

# **Susceptibilidad por Fenómeno de Remoción en Masas en la Cuenca de la Quebrada Isabel Pérez, Cali - Valle del Cauca**

**Jeffry Mauricio Bolaños Villota**

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de

Titulación del Programa Académico

Línea de Investigación

Desarrollo Territorial y Medio Ambiente

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2021

## Contenido

Resumen .....	6
Abstract.....	7
Introducción.....	8
1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación.....	10
1.1. Descripción del área problemática.....	10
1.2. Formulación del problema .....	12
1.3. Justificación .....	15
2. Objetivos.....	17
2.1. Objetivo General.....	17
2.2. Objetivos Específicos.....	17
3. Antecedentes.....	18
4. Referente Normativo y Legal .....	27
5. Referente Teórico .....	30
5.1. Remoción en masa .....	30
4. ....	31
5.1.1. Tipos de remoción en masa .....	31
5.5. ....	37
5.1.2. Causas desencadenantes de la remoción de masa .....	37
5.2. Susceptibilidad y Amenaza.....	38
5.2.1. Evaluación de la susceptibilidad.....	40
5.2.2. Los sistemas de información geográfica en estudios susceptibilidad a remoción en masa .....	42
6. Metodología.....	44
6.1. Enfoque Metodológico.....	44
6.2. Tipo de Estudio .....	45
6.3. Procedimiento .....	45
6.3.1. Descripción de los elementos pasivos (EP).....	49
6.3.2. Descripción de los factores de disparo (D).....	57
6.3.3. Procesamiento de la información .....	58
7. Resultados.....	62
5. ....	62
7.1. Elementos pasivos e intrínsecos de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa .....	62
7.1.1. Parámetro de la pendiente ( $S_p$ ).....	62
7.1.2. Influencia de la Litología ( $S_l$ ).....	64
7.1.3. Parámetro de Humedad del suelo ( $S_h$ ).....	72
7.2. Factores detonantes de la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa ..	77
7.2.1. Evaluación del factor de disparo por sismicidad ( $D_s$ ) .....	77
7.2.2. Evaluación del factor de disparo por lluvia $D_{ll}$ .....	78

7.3.	Niveles de susceptibilidad por remoción en masa en la cuenca quebrada Isabel Pérez en el municipio de Santiago de Cali (H).....	80
7.3.1.	Niveles de susceptibilidad por remoción en masa a partir del factor de sismo (HS) 83	
7.3.2.	Niveles de susceptibilidad por remoción en masa a partir del factor de precipitaciones .....	85
7.4.	Análisis de los elementos expuestos presentes en la zona susceptibles por fenómenos de remoción.....	87
8.	Conclusiones.....	90
9.	Recomendaciones .....	92
	Referencias .....	94
	Anexos .....	100

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Mapa de localización de la Cuenca quebrada Isabel Perez.....	11
<b>Figura 5.1.</b> Ejemplos de caídas, desprendimientos y desplomes de rocas o masas rocosas	32
<b>Figura 5.2.</b> Deslizamiento rotacional.....	33
<b>Figura 5.3.</b> Remoción en masa con propagación lateral por licuación.....	33
<b>Figura 5.4.</b> Ejemplos de flujos.....	34
<b>Figura 5.5.</b> Ejemplo de remoción en masa complejo .....	34
<b>Figura 5.6.</b> Remoción en masa por volcamiento .....	35
<b>Figura 5.7.</b> Hundimientos de terreno .....	36
<b>Figura 5.8.</b> Reptación de un terreno .....	36
<b>Figura 6.1.</b> Modelo de susceptibilidad - Model Builder.....	60
<b>Figura 7.1.</b> Mapa de clases de parámetro de la pendiente Sp.....	64
<b>Figura 7.2.</b> Mapa Geológico Regional .....	66
<b>Figura 7.3.</b> Unidades Superficiales y de Litología en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	67
<b>Figura 7.4.</b> Mapa de influencia de la Litología (Sl) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	72
<b>Figura 7.5.</b> Mapa de valores del parámetro de humedad del suelo Sh en la cuenca Qbd. Isabel Pérez.....	76
<b>Figura 7.6.</b> Mapa de valores del factor de disparo por lluvias (DII) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	79
<b>Figura 7.7.</b> Mapa de Niveles de susceptibilidad a remoción en masa en la cuenca Qbd. Isabel Pérez.....	81
<b>Figura 7.8.</b> Mapa de Niveles de susceptibilidad a remoción en masa por el factor de disparo de Sismos en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	84
<b>Figura 7.9.</b> Mapa de Niveles de susceptibilidad a remoción en masa por el factor de lluvias intensas (HII) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	86
<b>Figura 7.10.</b> Mapa de predios expuestos a remoción en masa en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	89

## Lista de Tablas

<b>Tabla 5.1.</b> Tipología de los remoción de masa .....	31
<b>Tabla 6.1.</b> Insumos empleados.....	48
<b>Tabla 6.2.</b> Clases de pendientes, valoración del parámetro $S_p$ .....	49
<b>Tabla 6.3.</b> Calificación del factor litológico $S_l$ .....	50
<b>Tabla 6.4.</b> Estaciones pluviométricas (PM) y pluviográficas (PG) .....	53
<b>Tabla 6.5.</b> Valores obtenidos para la definición de rangos de precipitación mensual.....	55
<b>Tabla 6.6.</b> Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia .....	55
<b>Tabla 6.7.</b> Valoración del parámetro humedad del suelo ( $S_h$ ) .....	56
<b>Tabla 6.8.</b> Valoración del factor de disparo por sismicidad $D_s$ .....	57
<b>Tabla 6.9.</b> Valoración del factor de disparo por precipitaciones $D_{II}$ .....	58
<b>Tabla 6.10.</b> Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento .....	59
<b>Tabla 7.1.</b> Clases de pendientes valor de parámetro $S_p$ .....	63
<b>Tabla 7.2.</b> Clasificación del factor litológico SI en la cuenca Qbd. Isabel Pérez.....	70
<b>Tabla 7.3.</b> Calculo ETP Estación Cañaveralejo – Edificio CVC aplicando método de Thornhwaite, 1948.....	73
<b>Tabla 7.4.</b> Calculo ETP Estación Planta Río Cali aplicando método de Thornhwaite, 1948 .....	74
<b>Tabla 7.5.</b> Valores obtenidos para la definición de rangos de precipitación mensual método Thornhwaite.....	75
<b>Tabla 7.6.</b> Categorización de la precipitación según clasificación de Mora y Vahrson, 1993 .....	75
<b>Tabla 7.7.</b> Clasificación parámetro de humedad del suelo $S_h$ en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	76
<b>Tabla 7.8.</b> Clasificación del factor de disparo por lluvias ( $D_{II}$ )en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	79
<b>Tabla 7.9.</b> Niveles de susceptibilidad a remoción en masa en la cuenca Qbd. Isabel Pérez.....	81
<b>Tabla 7.10.</b> Niveles de susceptibilidad a remoción en masa por el factor de disparo de Sismos (HS) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez.....	84
<b>Tabla 7.11.</b> Niveles de susceptibilidad a remoción en masa por el factor de lluvias intensas (HII) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez .....	86
<b>Tabla 7.12.</b> Número de predios por barrios expuestos a remoción en masa en la cuenca Qbd. Isabel Pérez.....	87

## Resumen

En este estudio se presenta una evaluación a la susceptibilidad por fenómeno de remoción en masa en la cuenca de la quebrada (qbd.) Isabel Pérez, localizada en la zona de ladera de la comuna 20 de Cali. La investigación se realizó a partir de la metodología propuesta por Mora y Vahrson (1993), modificada posteriormente por Mora (2004) a través del uso de un SIG, con lo cual se describieron las variables asociadas a los elementos pasivos (EP) intrínsecos, como la litología, humedad del suelo y pendiente, así como los factores de detonantes (D) como los son los sismos y la intensidad de lluvias. Como resultado, se determinaron los niveles de susceptibilidad a remoción en masa (en adelante MM) los que está expuesta la cuenca, y se concluye finalmente en qué medida los factores detonantes aportan a la estabilidad de las laderas de la cuenca qbd. Isabel Pérez. Finalmente se concluye sobre la importancia de los SIG en la automatización de metodologías para el análisis de amenazas, y su aporte al conocimiento de la distribución espacial de los parámetros que influyen en la ocurrencia de eventos de MM, conocimiento que podría aportar a la reciente implementación del conocimiento, manejo y gestión del riesgo en el ordenamiento territorial, así como en el diseño de herramientas para la prevención y mitigación.

Palabras clave: susceptibilidad, remoción en masa, amenazas, gestión del riesgo, cuencas hidrográficas

## **Abstract**

This study presents an evaluation of the susceptibility due to mass removal phenomenon in the Isabel Pérez river basin (qbd.), Located in the hillside area of the 20 district of Cali. The research was carried out based on the methodology proposed by Mora and Vahrson (1993), later modified by Mora (2004) through the use of a GIS, with which the variables associated with intrinsic passive elements (PE) were described, such as lithology, soil moisture and slope, as well as trigger factors (D) such as earthquakes and rainfall intensity. As a result, the levels of susceptibility to mass removal (hereinafter MM) to which the basin is exposed were determined, and it is finally concluded to what extent the triggering factors contribute to the stability of the slopes of the qbd basin. Isabel Pérez. Finally, it is concluded on the importance of GIS in the automation of methodologies for the analysis of threats, and its contribution to the knowledge of the spatial distribution of the parameters that influence the occurrence of MM events, knowledge that could contribute to the recent implementation knowledge, management and risk management in land use planning, as well as the design of tools for prevention and mitigation.

**Keywords:** susceptibility, mass removal, threats, risk management, watersheds

## **Introducción**

En este estudio se presenta el estado actual y los niveles de susceptibilidad a fenómenos por remoción en masa presentes en la cuenca quebrada Isabel Pérez en la ciudad de Santiago de Cali. Esto con el propósito de plasmar la necesidad fortalecer en los procesos de ordenamiento territorial municipal el componente de gestión del riesgo de desastres mediante la incorporación del conocimiento del riesgo, las amenazas y la vulnerabilidad del entorno. En la metodología empleada se dará conocer la importancia de la determinación de zonas de susceptibilidad como método previo a los estudios detallados de amenaza, dado a los factores condicionantes físicos propios de las laderas, a saber, la litología, la pendiente y la humedad del suelo, en relación con factores detonantes como la precipitación y la sismicidad que repercuten o influyen de acuerdo a la actividad humana.

Bajo la anterior perspectiva, la presente investigación se estructura en siete (7) capítulos.

En el primer y segundo capítulo se abordan los elementos preliminares que describen el problema de investigación propuesto. En el tercer (3) capítulo se presentan los antecedentes de estudios internacionales, nacionales y regionales que permiten delimitar los alcances de la presente investigación y los procedimientos y métodos más acordes para su desarrollo en un ambiente SIG. En el cuarto (4) capítulo se exponen los lineamientos normativos y legales que trazan la ruta a seguir para la evaluación de la susceptibilidad de fenómenos por remoción en masa. En el quinto (5) capítulo se exponen los referentes teóricos y conceptuales que enmarcan la investigación. En el sexto (6) capítulo se abordan los procedimientos metodológicos y su posterior abordaje en un SIG. Se describen las variables



empleadas, establecidas como factores condicionantes y detonantes. Por último, en los capítulos siete (7) y ocho (8) se presentan los resultados encontrados tras el despliegue de los métodos propuestos por SGC (2016) y la metodología modificada de Mora-Vahrson-Mora (2004).

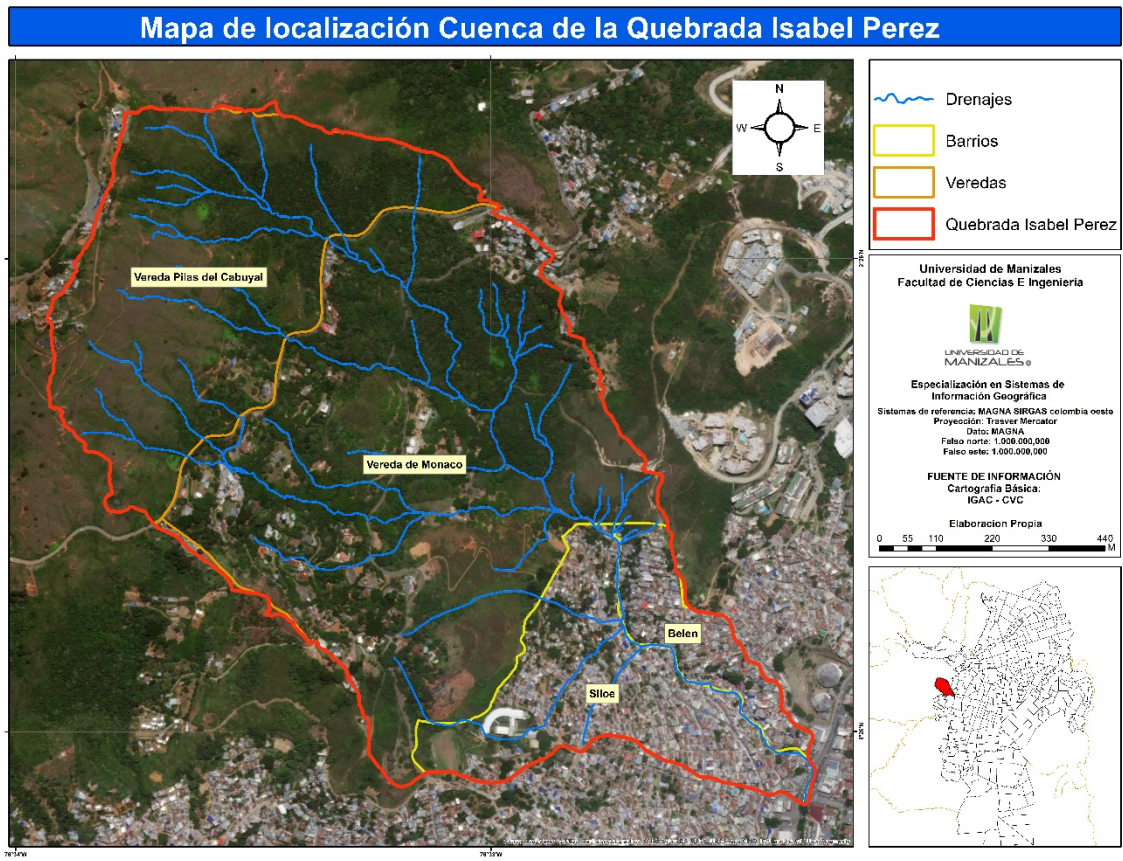
## **1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación**

A continuación, se presenta el planteamiento de la investigación a través de la descripción y formulación de la problemática del área de estudio, y los aspectos contextuales que lo justifican para su desarrollo en el presente estudio.

### **1.1. Descripción del área problemática**

El área de estudio corresponde a la cuenca de la quebrada Isabel Pérez localizada sobre el flanco Oriental de la cordillera Occidental en el municipio de Santiago de Cali, específicamente, lo que comprende las áreas de los sectores de cerro de Cristo Rey, Bajo Cristo Rey y Mónaco en el corregimiento de los Andes en la zona rural y de los barrios Belén y Siloé en la comuna 20, de la zona urbana del municipio de Cali. La cuenca de la quebrada Isabel Pérez presenta un área de 114 has y corresponde a una microcuenca del río Cañaveralejo (Figura 1.1).

**Figura 1.1.** Mapa de localización de la Cuenca quebrada Isabel Perez



**Fuente:** elaboración propia

La red fluvial de esta cuenca se desprende desde el cerro de Cristo Rey y desemboca sobre el canal de aguas lluvias localizado en la Av. de los Cerros con Cra. 42 en el sector conocido como La Nave. La mayoría de la red hídrica de esta cuenca se distribuye en el área rural y confluye en el área urbana, sobre la parte alta del barrio Siloé en el sector de San Francisco, en un solo afluente principal que descende por la ladera por medio de una obra de entombado, que hace que la quebrada no pueda ser vista en superficie.

Dentro de este contexto, la identificación de las estructuras geológicas y geomorfológicas de la zona de la cuenca de la Quebrada Isabel Pérez, permite construir una base de información importante para el entendimiento de las características de los materiales sólidos provenientes de las partes altas de la cuenca y que aportan a la peligrosidad de los flujos generados durante las avenidas torrenciales.

## **1.2. Formulación del problema**

Actualmente en los países latinoamericanos, a casi 20 años de la formulación de los primeros planes de ordenamiento territorial, cuentan con crecimiento poblacional desacelerado y desordenado en sus áreas urbanas, cuya expansión geográfica poblacional, de infraestructura, líneas vitales y de actividades productivas, presenta vacíos en la definición de planes para su intervención o tratamiento (Calderón y Frey, 2016).

Los fenómenos de remoción en masa son uno de los eventos geoambientales más comunes en el mundo, los cuales son responsable por la muerte de cientos de personas y miles de millones de dólares de pérdidas a la propiedad anualmente (Ozioko y Igwe, 2020). En el caso de la remoción en masa se ha observado una susceptibilidad elevada en los fenómenos a inestabilidad de las laderas, en donde las pérdidas socioeconómicas evaluadas aumentan debido al crecimiento de asentamientos informales sobre laderas inestables, resultando en una influencia sobre el bienestar socio-económico y el nivel y calidad de vida (Mora, 1993).

Sumado a esto, la interacción entre el crecimiento de las ciudades, la población y el territorio es un problema que no suele abordarse de manera sistemática, es decir, no se reconocen aún las relaciones entre diversas variables sociales y biofísicas dentro de múltiples escalas de tiempo y espacio; este es el caso colombiano, en donde existen limitaciones a financiación de la investigación, que ha ralentizado los estudios enfocados al conocimiento de los riesgos, principalmente de las medidas destinadas a reducir el riesgo. (Calderón y Frey, 2017) (Mora 1993).

Calderón y Frey (2017), mencionan que, a mediados del siglo XX en Colombia se inicia una transformación en su matriz productiva, que acelera inadecuadamente la configuración espacial de las ciudades. El crecimiento de la ciudad conllevó a nuevos usos de las tierras, expandiendo las periferias donde empezaron a originarse nuevos asentamientos humanos, localizados principalmente en los barrios periféricos o áreas degradadas, lo que contribuyó a la irregularidad en la tenencia, ilegalización, la precarización de la vivienda y la construcción irregular en zonas vulnerables (Calderón y Frey, 2017).

Esta situación se evidencia en la ciudad Cali, en donde la dinámica acelerada y descoordinada de crecimiento, generó un riesgo alto de desastres que, a lo largo del tiempo, se hizo evidente frente a los repetidos eventos que ha enfrentado barrios de la ladera. La comuna 20 cubre el 2% del área total del municipio de Santiago de Cali, con 243,9 ha; “al estar ubicada sobre la ladera occidental de Cali, presenta un relieve bastante inclinado lo que ha llevado a una adaptación de la trama urbana sobre las diferentes barreras fisiográficas” (Contreras, 2018, 111). Es así como, para la comuna 20 de Cali, a la que

pertenece el barrio Siloé y, por tanto, la Cuenca qbd. Isabel Pérez, los factores sociales, habitacionales, de movilidad y equipamientos que condicionan los niveles de vulnerabilidad, están estrechamente ligados con las condiciones de pobreza de la población, las cuales se pueden identificar con las necesidades básicas insatisfechas (NBI).

En suma, al momento de la ocurrencia de un remoción en masa, o una avenida torrencial en la zona de estudio, el grado de afectación tomaría trascendencia social ambiental, debido a que el taponamiento de sedimentos y bloques de roca que, por el arrastre de la corriente al momento de una creciente, generarían gran impacto sobre los elementos expuestos del sector, resultando en problemas de alcance social y ambiental. De este modo, la zona del barrio Siloé, se ha visto impactada fuertemente en dos ocasiones, debido a la ocurrencia de estas avenidas, generando pérdidas humanas y materiales en la comunidad.

Es por esto que se plantea en la presente investigación evaluar la susceptibilidad por fenómeno de remoción en masa en la cuenca qbd. Isabel Pérez en el municipio de Santiago de Cali, Valle del Cauca. Así, a través del modelamiento del grado de susceptibilidad través de un SIG, se analizaron tanto las variables pasivas asociadas a los factores de morfodinámicos que condicionan la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa, como los factores detonantes, para finalmente determinar los niveles de susceptibilidad por remoción en masa a partir de los factores detonantes de sismos y precipitación. Surge así una interrogante que se deriva de la problemática anunciada: ¿Cuál es el nivel de susceptibilidad por remoción en masa existente en la quebrada Isabel Pérez en el municipio de Santiago de Cali –Valle del Cauca?

### **1.3. Justificación**

La Gestión del riesgo, de acuerdo a la Ley 1523 de 2012, se concibe como un proceso social que enmarca el conocimiento del riesgo, la reducción y el manejo de desastres, con el fin de contribuir al bienestar social, la calidad de vida en miras del desarrollo integral sostenible (SGC, 2016). La metodología es reconocida a nivel internacional y muy utilizada en centro América como en algunos países del resto del mundo, es una metodología que no evalúa amenaza si no susceptibilidad, ya que la amenaza implica evaluar la probabilidad de ocurrencia del fenómenos, mientras la susceptibilidad avalúa la probabilidad de las zonas o de la compresión a la ocurrencia, la amenaza implica la evaluación de elementos mucho más complejos que implica trabajo de campo e información de primera mano, sobre deslizamientos y mas procesos. Esta metodología es heurística de tipo cartográfico en este sentido independientemente de las variables, se realizó un algebra de mapas y no una modelación en campo con información de primera mano.

Con base en lo anterior, se justifican los estudios de amenaza o de susceptibilidad, en términos temporales, espaciales y de afectación. Si bien, la obtención de mapas de amenaza demanda procedimientos profundos y técnicos en campo, la elaboración de mapas de susceptibilidad constituye una alternativa para el conocimiento preliminar de la ocurrencia de este tipo de fenómenos.

Para obtener conocimiento sobre las condiciones de riesgo, es necesario evaluar o estudiar factores como la amenaza o de manera inicial, el nivel de susceptibilidad ante la

eventualidad de un fenómeno, al centrarse en la susceptibilidad, un principal indicador de probabilidad espacial, los estudios de susceptibilidad pueden ser estudiados a partir de dos métodos, (1) aquellos fundamentados en leyes físicas y matemáticas y (2), los que tienen su base en técnicas estadísticas cuyo procesamiento requiere del manejo de sistemas de información geográfica SIG (Perálvarez, 2012). A este segundo grupo, corresponden los métodos estadísticos o probabilísticos, los determinísticos y los heurísticos o empíricos, estos últimos basados en la producción de cartografía e información espacial.

Dado el carácter geográfico de los SIG, la evaluación de variables geoambientales así como la automatización de métodos estadísticos desarrollados para la evaluación de la susceptibilidad a los MM. Permiten además el empleo de comparaciones de información histórica, la incorporación de parámetros morfométricos derivados de modelos digitales, fotogrametría terrestre y área y teledetección, que permiten identificar huellas o rastros de eventos anteriores.

.



## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Evaluar la susceptibilidad por fenómeno de remoción en masa en la cuenca Quebrada Isabel Pérez en el municipio de Santiago de Cali, Valle del Cauca.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Analizar las variables asociadas a los elementos pasivos por fenómenos de remoción en masa como en la quebrada Isabel Pérez en el municipio de Santiago de Cali, Valle del cauca.
- Analizar las variables asociadas a los factores detonantes de la susceptibilidad por fenómeno de remoción en masas en la quebrada Isabel Pérez en el municipio de Santiago de Cali, Valle del cauca.
- Determinar los niveles de susceptibilidad por remoción en masa a partir de los factores detonantes de sismos y precipitación en la quebrada Isabel Pérez en el municipio de Santiago de Cali, Valle del cauca.

### 3. Antecedentes

Jiménez (2012, 21) define la susceptibilidad como la tendencia de una zona a afectarse por la influencia de un proceso determinado, en este caso a remoción en masa, este último se entiende como el volumen de suelo roca o la mezcla de ambos, que se moviliza lenta o rápidamente debido a la acción de la gravedad, y se puede manifestar en deslizamientos, derrumbes, desprendimientos, caídas de roca, flujos, etc. Este tipo de fenómenos y los factores que los determinan, representan una fuente generadora de riesgo. A lo largo del tiempo, su análisis se ha desarrollado a través de diferentes metodologías de tipo empírico, estadístico cuantitativo y basado en parámetros físicos de distribución espacial y temporal (Jiménez, 2012). Por tanto, los sistemas de información geográfica representan un importante avance en el estudio de susceptibilidad a fenómenos por MM, como lo muestran diferentes autores.

Mora (2004), en su investigación *“Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica”* emplea una nueva metodología para el estudio de susceptibilidad al deslizamiento en sectores inestables propensos a presentar MM en caso de lluvias de intensas y sismos de magnitud importante. El método propuesto por Mora (2004), denominado Mora-Vahrson-Mora (MVM), se trata de una adaptación a lo desarrollado por Mora y Vahrson (1993) en *Determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos*. Así, en ambas investigaciones, se hace uso de indicadores morfodinámicos o factores de susceptibilidad como, el relieve relativo o la pendiente, las condiciones litológicas y la humedad del suelo,

a la vez que factores de disparo como las intensidades sísmicas y la intensidad de las precipitaciones.

Mora (2004) y Mora y Vahrson (1993), para efectos de estandarizar todas las variables en un sistema único de calificación, definen a cada factor o parámetro un peso específico ponderado, los cuales, al combinarse, resultan en un valor relativo de amenaza. La asignación de pesos y el tratamiento general de los datos, se lleva a cabo en un SIG, mediante la construcción de un modelo de flujos y procesos secuenciales. Ambas metodologías difieren y adoptan métodos adicionales, en la medida en que los parámetros intrínsecos como la pendiente y la humedad del suelo, requieren de tratamientos particulares dada las especificidades del área de estudio.

Los resultados obtenidos permitieron la identificación de áreas susceptibles a deslizamientos, jerarquizadas según la clasificación generada en cada investigación en, Muy Baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta. El mapa final de susceptibilidad es una muestra del rango de amenaza relativa al que está expuesta determinada zona, y no a la amenaza absoluta, es decir, a áreas con potencial a deslizamientos. Como recomendación, ambas investigaciones coinciden en recomendar que los métodos implementados no sustituyen las técnicas basadas en tomas directas en campo al análisis geotectónico.

Otros estudios, como el desarrollado por Jiménez (2012) denominado “*Remoción de ladera en la vertiente meridional de Sierra Nevada (Granada, España): identificación, análisis y cartografía de susceptibilidad y peligrosidad mediante SIG*”. Utilizan recursos estadísticos

probabilísticos para el procesamiento de información de inventarios históricos de remoción en masa, como apoyo a la información relacionada con los factores morfodinámicos generalmente estudiados, a saber, la litología y la pendiente. Esto, con el fin de reconocer las zonas inestables de ladera, a través de la creación de un mapa de peligrosidad a remoción en masa. Para alcanzar tal objetivo, el autor establece tres (3) objetivos específicos que aporta a la investigación elementos específicos de evaluación, esos son, (1) la determinación de la susceptibilidad a MM, (2) el análisis de taludes y, por último, (3) la determinación de los factores desencadenes y el mapa de peligrosidad a MM.

Los resultados de esta investigación permitieron, la calificación de la zona en diferentes grados de peligrosidad, incluyendo los grados de afectación a futuro, y la tipificación de la estabilidad de los taludes y condiciones de rotura. Finalmente, se estimó la frecuencia de los MM a partir de la frecuencia de lluvias que los desencadenan, lo que, en conjunto con los demás aspectos, permitió inferir que los tipos de MM que representan mayor peligrosidad son los deslizamientos y flujos. Entre lo discutido las conclusiones y recomendaciones finales hacen alusión a las herramientas empleadas, para este caso, se deduce que las herramientas estadísticas disponibles en los entornos SIG, facilitan la automatización de los métodos usuales en el análisis de amenazas.

Las metodologías propuestas para evaluar la susceptibilidad a remoción en masa, generalmente se fundamentan en el uso de un SIG dada las características espaciales y temporales de los factores que caracterizan dichos fenómenos. Sin embargo, existen otros estudios cuyos métodos, se basan en la explicación de procedimientos estadísticos que

combinan la información histórica de deslizamientos y los parámetros de fondo (Derivados de un MDT), para producir correlaciones espaciales.

Es el caso de Ferentinou y Chalkias (2011), en la investigación “*Mapping Mass Movement Susceptibility across Greece with GIS, ANN and Statistical Methods*”, en donde el eje transversal del estudio es la aplicación de métodos estadísticos regresión logística y un modelo de Redes neuronales artificiales (ANN) para la construcción de un índice de susceptibilidad (SI) y el cálculo de análisis de frecuencia (FR) de eventos por MM.

Los procesos se llevan a cabo a través del paquete estadístico SPSS y MATLAB, para ser procesados finalmente en un SIG a través de la función de *Superposición ponderada*. Con el empleo de un modelo de análisis multivariado se busca predecir la presencia o ausencia de MM basado en valores predictivos. Así, se evaluará la posible relación predictiva entre los deslizamientos de tierra y los factores que los influyen.

Para este estudio, los factores causales intrínsecos identificados fueron siete (7) y se clasificaron en cuatro tipos: geológicos (litología), geomorfología (pendiente, elevación, forma del terreno, proximidad a la red de drenaje, índice de humedad topográfica, ambiental (cobertura del suelo) y antropogénico (proximidad a la red vial, intensidad sísmica). Los factores desencadenantes fueron intensidad sísmica (aceleración del terreo) y precipitación media anual. Estos parámetros, se analizan integralmente a través del índice de susceptibilidad, con el fin de identificar áreas susceptibles a MM para derivar una relación predictiva en la ocurrencia de deslizamiento de tierra.

Como se vio, la evaluación estadística de la amenaza se ha convertido en un método aplicable utilizando a la vez Sistemas de Información Geográfica. Este tipo de análisis requieren de un inventario de deslizamientos, en combinación con los factores ambientales, que se asumen ocurran en las mismas condiciones en eventos pasados. Los modelos estadísticos más utilizados para el análisis de amenazas incluyen la regresión logística, los métodos multivariados como el ACP (Análisis de componentes principales), los procesos analíticos jerárquicos y la frecuencia de relaciones (FR).

En el contexto nacional, Correa e Higido (2017) en “*Determination of landslide susceptibility in linear infrastructure. Case: aqueduct network in Palacé, Popayan (Colombia)*”, con el objetivo de predecir la ocurrencia de remoción en masa en la red de acueducto Palacé, en el municipio de Popayán (Cauca), construyeron un modelo de predicción de susceptibilidad mediante regresión logística y la técnica no paramétrica ACP, utilizando variables dependientes (inventario de deslizamiento a partir del recorrido de campo) e independientes, correspondientes al terreno: la pendiente, el factor longitud de pendiente, el índice topográfico de humedad, la longitud de ruta de flujo, los suelos y el índice de convergencia.

Mediante la implementación del Arc-SDM (Modelador de datos espaciales para ArcView 3.2), obtuvieron un mapa de zonificación de susceptibilidad por deslizamientos de tierra, relacionado el inventario de MM con las variables numéricas mediante un DEM-SRTM, que permitió identificar las correlaciones y posibles factores predictores.

A la luz de la amplia disponibilidad de métodos para la evaluación de la susceptibilidad ante MM, autores como Díaz, Alzate y Ruiz (2004), presentan un estudio comparativo de cuatro metodologías de zonificación de amenaza por MM, aplicados al Sector Rural de Villavicencio, cuyo modelamiento se realiza a través de un SIG. Basados la zonificación obtenida por INGEOMINAS en el año 2003, esta investigación propone tres metodologías adicionales, las cuales analizan la influencia de las variables y parámetros geo ambientales, tanto intrínsecos como detonantes.

En suma, las metodologías expuestas son; (1) una microzonificación con base en Mora y Vahrson (1993), empleando indicadores morfodinámicos; (2) la metodología de valoración de ala amenaza con base en Keefer (1984) citado en Rodríguez (2001), que propone analizar las condiciones para tres mecanismos de falla y propagaciones laterales; (3) la metodología de predicción de la ocurrencia de fenómenos de inestabilidad de laderas, tomada de Van Western (1993), basado en un análisis multivariado aplicado a un inventario de MM, permitió predecir la ocurrencia de procesos morfodinámicos intrínsecos y detonantes.

Por último, (4) se expone la metodología denominada “sistema semicuantitativo de evaluación de estabilidad”, por la cual, con base a rangos de variabilidad de influencia establecidos por expertos, se estima la estabilidad de ocho parámetros intrínsecos y detonantes, a través de una suma ponderada entre archivos raster en un ambiente SIG.

Finalmente, la aplicación de las distintas metodologías ofrece un mapa preliminar de evaluación de la amenaza, condicionado al análisis de la ausencia o presencia de los procesos morfodinámicos intrínsecos de la zona. Las formas de evaluación de los niveles de amenaza fueron Media, Alta y Muy alta y se compara con el mapa de afectación por MM levantado en campo. Se concluye finalmente que las áreas con niveles de amenaza media a Muy Alta, coincide con las áreas con mayor probabilidad a ocurrencia de MM.

Con lo anterior, se conoce que existe una amplia bibliografía basada en los propuesto por Mora y Vahrson con modificaciones de acuerdo a las necesidades de cada estudio. Como estas se encuentran las investigaciones desarrolladas por López et. al. (2016) y Garcia y Rache (2018), *“Zonificación de susceptibilidad a remoción en masa en la microcuenca Tabacal, municipio de La Palma, departamento de Cundinamarca”*, y *“Aplicación del método Mora-Vahrson para evaluar la susceptibilidad a deslizamiento en el municipio de Manaure, Cesar, Colombia”*, respectivamente.

Igualmente, como se verá a continuación, cada zona de estudio se adapta o modifica sus metodologías, de acuerdo a los lineamientos nacionales o a las fuentes oficiales de información y referentes legales (Decretos y acuerdos para la aplicación de la Gestión del Riesgo), para el caso colombiano es frecuente la mención de la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por remoción en masa del SGC (2016).

Para ambas investigaciones, el punto de partida es la determinación o zonificación de áreas de amenaza, o que históricamente presentan una tendencia a MM, como se mencionó, la



aplicación Mora – Vahrson (1993) fue utilizada para caracterizar el grado de susceptibilidad de los parámetros y factores detonantes, adoptando modificaciones sugeridas por el SGC (2016). Mientras Garcia y Rache (2018) no emplean factores detonantes, los factores intrínsecos utilizados por ambos son la geología, geomorfología, cobertura y la pendiente.

A través del uso de la herramienta interscet de ArcGis, se calcularon las frecuencias de ocurrencia de los remoción en cada variable, para obtener el cálculo de susceptibilidad definen parámetros de clasificación, en donde Garcia y Rache (2018) proponen Baja Media, Alta y muy alta tomado de Mora-Vahrson (1993); y para López et. al. (2016) se toma clasificación propuesta por Mora (2004), Muy baja, Baja, Moderada y Alta.

En el contexto regional, Sandoval y Ruiz (2017), con el propósito de clasificar la amenaza por remoción en masa y de conocer el comportamiento espacial de los factores y parámetros que condicionan dicho fenómeno en el barrio El Mortiñal de Cali, hacen uso de la metodología Mora y Vahrson (1993), utilizando las variables de litología, pendiente y precipitación, así como el inventario de MM construido a partir de registros históricos disponibles en fuentes primarias; a excepción de la metodología original, los autores no utilizan la variable de humedad del suelo. La aplicación de esta metodología se hizo a través del software ArcGis 9.3.1, como herramienta base para realizar el álgebra de matrices y realizar todas las variables y factores de disparo.

Como elemento distintivo, una vez obtenido los análisis, se genera el mapa de amenaza por fenómenos de deslizamiento, para posteriormente, con apoyo del trabajo de campo, identificar las zonas con amenaza Baja, Media o Alta en contraste con los elementos expuestos y las zonas de afectación identificadas.

---

#### **4. Referente Normativo y Legal**

De acuerdo con la Ley 388 de 1997, la gestión del riesgo es un proceso social que enmarca el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres (SGC, 2016, 15). En ese sentido, la formulación y adopción de los planes de ordenamiento territorial en municipios y distritos requieren del diagnóstico del contexto de riesgos, siendo estos, una de las dimensiones determinantes para la definición de directrices y regulaciones sobre el uso del suelo, por tal razón, es importante su adopción, no solo a nivel de planificación, sino además para la creación de estudios para los fenómenos presentes en el territorio.

La gestión del riesgo de desastres en Colombia, de acuerdo con la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones, se define como el proceso de formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, directrices, instrumentos y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo. Así, se concibe como un paso fundamental para la sostenibilidad ambiental, y la mejora de la calidad de vida de comunidades en riesgo, lo que justifica su inclusión en la planificación del territorio en todos los niveles de gobierno.

Instrumentos legales como el Decreto 1807 de 2014, establece las condiciones y directrices necesarias para incorporar la gestión del riesgo en la evaluación de los contenidos de los planes de ordenamiento territorial, o en la actualización o expedición de un nuevo plan.

Entre los requisitos de procedimiento, se señala la necesidad de contar con estudios básicos

---

o específicos, y especifica los requerimientos técnicos y demás marcos legales a los cuales acogerse.

Bajo estas premisas el Acuerdo N° 0373 de 2014, “por medio del cual se adopta la revisión ordinaria de contenido de largo plazo del Plan de Ordenamiento territorial del Municipio de Santiago de Cali”, acoge la gestión del riesgo como una política orientada a actuar integralmente para prevenir y reducir los impactos sociales, económicos, ambientales y desarrollo colectivo que derivan de los fenómenos naturales o antrópicos de municipio. En el mismo, se propone trabajar sobre las revisiones técnicas pertinentes, la identificación y caracterización de las amenazas y vulnerabilidades determinantes para el municipio, articulando todos los actores involucrados en la gestión del riesgo de desastres.

“De esta manera, la gestión del riesgo de desastres está incluida dentro de tres componentes que estructura los planes de ordenamiento territorial. El componente general del POT establece los objetivos, estrategias y contenidos estructurales de largo plazo, donde se identifica y localiza las acciones y estrategias que se efectuaran sobre el territorio, así como las políticas de ocupación, aprovechamiento y manejo del suelo y de recursos naturales” (Calderón y Frey, 2017).

Desde las anteriores perspectivas, cualquier estudio enfocado a la gestión del riesgo, debe plantearse siguiendo determinados lineamientos metodológicos, en atención a esto, EL Servicio Geológico Colombiano (SGC) en convenio con la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), 020 de 2013, desarrolla e imparten la guía metodología para la

investigación y monitoreo de amenazas geológicas. “Esta guía describe los lineamientos metodológicos para realizar estudios de riesgo por remoción en masa a escala detallada o local, aplicable para divisiones territoriales dentro de las categorías 5 y 6.

Es así como, los estudios dispuestos para el análisis de amenaza, o la elaboración de mapas, zonificación o modelos de susceptibilidad, requieren de la caracterización de los factores y parámetros que condicionan la inestabilidad prevalente en el área de estudio, los cuales pueden ser inherentes o externos al entorno. Por un lado, los factores intrínsecos se relacionan con las características geológicas, geomorfológicas o geotectónicas de las laderas, que no varían en el espacio o tiempo, debido a su compleja evaluación, se analizan paralelamente, factores como la lluvia y los sismos, que a pesar de que su variación espacio temporal puede ser frecuente, se consideran detonantes que pueden modificar las condiciones de estabilidad del área en estudio (SGC, 2016).

Se propone así la definición de áreas de amenaza o susceptibilidad en términos de la ubicación, clasificación, material, frecuencia de ocurrencia, para obtener finalmente, un mapa de susceptibilidad o amenaza, que permitirá la toma integral de decisiones, y la consideración de etapas posteriores para la elaboración de estudios de riesgo (SGC, 2016).

## 5. Referente Teórico

A continuación, se presentan las definiciones reconocidas para los conceptos de remoción en masa, susceptibilidad, amenaza y el uso de herramientas SIG en el contexto de los riesgos naturales.

### 5.1. Remoción en masa

Un remoción en masa (MM) puede ser definido como cualquier desplazamiento o remoción externo de material litológico que tiende hacia abajo, que se dirige de manera vertical o en dirección de la pendiente de una ladera debido a la gravedad (Vargas, 2000, 39). “Los términos más utilizados para denominar globalmente los remoción en masa son: remoción en masa, remoción de terreno, deslizamientos de terreno, remoción de ladera, deslizamientos de vertiente” (Vargas, 2000, 40).

Cruden (1991), define el termino deslizamiento como el desplazamiento rápido o bajo influencia gravitacional, de una masa de roca, suelo residual o sedimentos adyacentes a una pendiente, en que el centro de gravedad de la masa en remoción avanza hacia abajo y hacia afuera. Por lo general, el material desplazado se mueve sobre una zona relativamente confinada o una superficie de cizallamiento. Remoción en masa es el termino latino más empleado, que concierne a todo aquel remoción de terreno en el cual ha ocurrido transporte de material, sin incluir procesos erosivos (Flageollet citado en Vargas, 2000).

La ocurrencia de un MM implica varios rasgos geomorfológicos y morfométricos característicos. Los primeros se asocian a la masa desplazada o a las características del terreno. Los MM pueden ser cuantificados por su magnitud en relación con el volumen, actividad y velocidad e intensidad en los daños que ocasiona.

### 5.1.1. Tipos de remoción en masa

Una remoción en masa puede clasificarse de acuerdo a las características geomorfológicas del terreno alrededor de la masa que se ha desplazado, el tipo de remoción y la naturaleza de los materiales inestables, es decir roca o suelo los tipos de mecanismos principales son las caídas, los derrumbes, los deslizamientos, separaciones laterales y flujos (Varner, 1978) (Tabla 5.1).

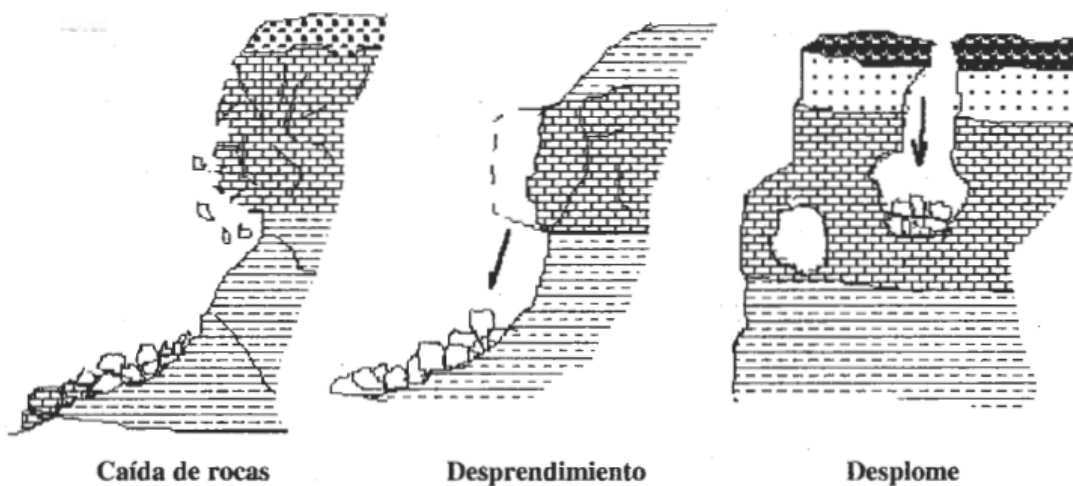
**Tabla 5.1.** *Tipología de la remoción de masa*

Tipo de remoción	Tipo de material		
	Base o roca	Suelos	
		De grano grueso	De grano fino
Caídas	Caídas de rocas	Caídas de detritos	Caídas de suelo
Derrumbes	Derrumbe de rocas	Derrumbe de escombros o detritos	Derrumbe de suelo
Deslizamientos	Rotacional Deslizamiento rotacional de rocas	Deslizamiento rotacional de detritos	Deslizamiento rotacional de suelos
	Traslacional Deslizamiento translacional de rocas	Deslizamiento translacional de detritos	Deslizamiento translacional de suelos
Separación lateral	Separación lateral en roca	Separación lateral en detritos	Separación lateral en suelos
Flujo	Flujo de rocas Arrastre profundo	Flujo de detritos Arrastre de suelo	Flujo de suelos
Complejo	Combinación de dos o más tipos principales de remoción		

**Fuente:** elaboración propia a partir de Varnes (1978) y Chaverri (2016)

*Caídas, desprendimientos o desplomes:* En las caídas de roca, una masa de cualquier tamaño se desprende de una pendiente pronunciada o acantilado, a lo largo de una superficie en la que poco o ningún desplazamiento de cizallamiento tiene lugar, y desciende principalmente a través del aire por libre caer, saltar, brincar o rodar (Figura 5.1) . La remoción son muy rápidos a extremadamente rápidos y representan la disgregación de rápida de un volumen de material litológicos (Varnes, 1978) (Vargas, 2000).

**Figura 5.1.** Ejemplos de caídas, desprendimientos y desplomes de rocas o masas rocosas



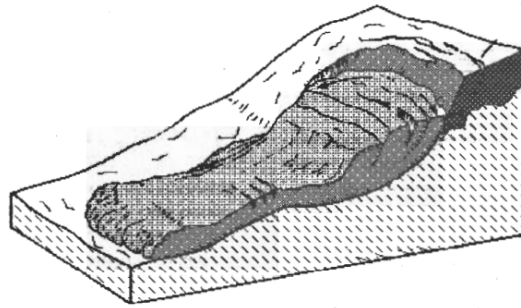
**Fuente:** elaboración propia a partir de Vargas (2000)

*Derrumbes:* Este tipo de remoción consiste en la rotación hacia adelante de una unidad o unidades de roca alrededor de algún punto, debajo o bajo en la unidad, bajo la acción de la gravedad y fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o por fluidos en grietas. Se inclina sin colapsar.



*Deslizamientos*: Son remoción caracterizados por desarrollar una o varias superficies de ruptura, una zona de desplazamiento y una zona de acumulación de material desplazado (Varnes, 1978).

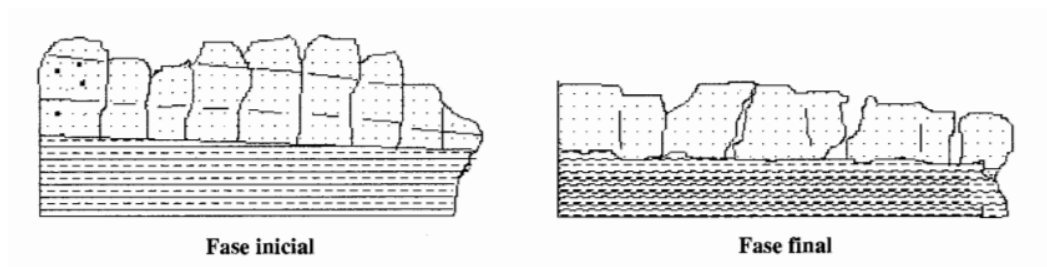
**Figura 5.2.** *Deslizamiento rotacional*



**Fuente:** elaboración propia a partir de Vargas (2000)

*Separación o propagación lateral*: son desplazamientos de rocas, suelos o detritos en sentido lateral o casi horizontal. Se relacionan con fenómenos de licuación o remoción plásticos de los materiales por actividad sísmica. Son de difícil apreciación en el terreno (Vargas, 2000).

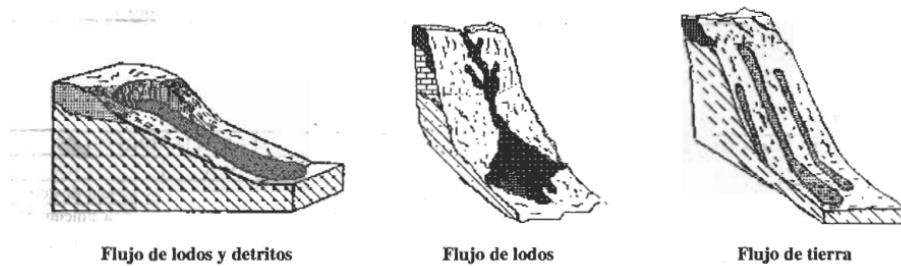
**Figura 5.3.** *Remoción en masa con propagación lateral por licuación*



**Fuente:** elaboración propia a partir de Vargas (2000)

*Flujos*: son remoción relativos de material litológico textura fina y gruesa, se desplazan a lo largo de una superficie de falla bien definida. Aunque se caracterizan por remoción rápidos y compuestos por lodo, también pueden ser lentos y compuestos por rocas y suelos no saturados. En estos, el principal agente es el agua que satura el material litológico y este comienza a fluir cuando supera el límite de plasticidad (Vargas, 2000).

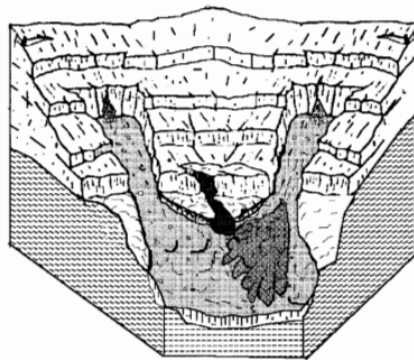
**Figura 5.4.** Ejemplos de flujos



**Fuente:** elaboración propia a partir de Vargas (2000)

*Remoción complejos*: se trata de la combinación de dos o más remoción en masa o de diferentes tipos de mecanismos de ruptura o falla (Vargas, 2000).

**Figura 5.5.** Ejemplo de remoción en masa complejo

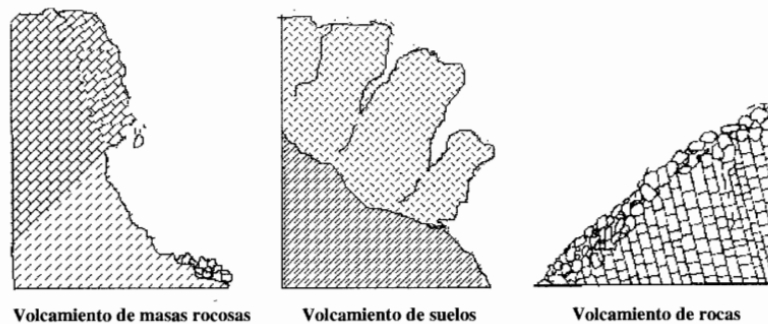


**Fuente:** elaboración propia a partir de Vargas (2000)

Los tipos de remoción anteriormente descritos, parten de sistemas de clasificación más comúnmente empleados, sin embargo, Vargas (2000), describe otros tipos de remoción según Coates (1977), entre estos volcamientos, hundimientos o subsidencia, reptación y avenidas torrenciales.

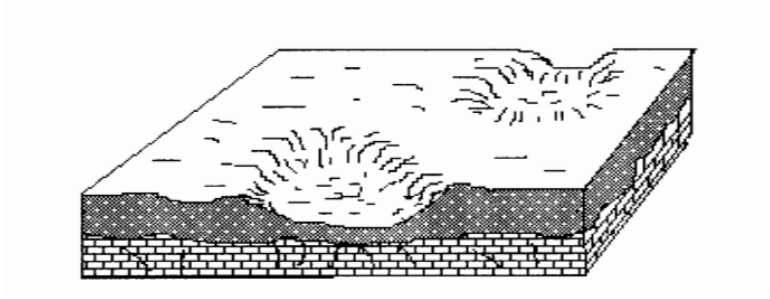
*Volcamientos:* son remoción producidos por la acción de la gravedad y la rotación, sobre una ladera o talud debido al colapso de material rocoso, se caracterizan por una heterogeneidad litológica o estructural.

**Figura 5.6.** Remoción en masa por volcamiento



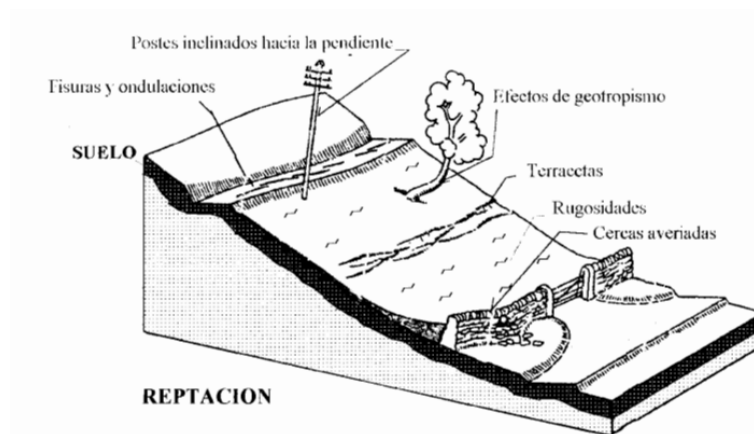
**Fuente:** elaboración propia a partir de Vargas (2000)

*Hundimientos o subsidencia:* son remoción de terrenos subverticales, lentos y progresivos, que se manifiestan como una depresión topográfica en la superficie, sin ruptura aparente. Comúnmente se dan bajo el efecto de fallamiento tectónico o de la extracción de recursos del subsuelo.

**Figura 5.7.** *Hundimientos de terreno*

**Fuente:** elaboración propia a partir de Vargas (2000)

*Reptación:* es un remoción de suelos, lento y continuo, con materiales de baja cohesión favorecidos por el agua. Por tanto, no presentan superficie de ruptura, se manifiesta en rugosidades del suelo, morfología ondulada o desplazamiento del suelo (Figura 5.8).

**Figura 5.8.** *Reptación de un terreno*

**Fuente:** elaboración propia a partir de Vargas (2000)

*Avenidas torrenciales:* es un tipo de remoción complejo que se forma por la ocurrencia súbita de uno o varios remoción en masa, vertiendo su material litológico sobre un cauce

normalmente estrecho y de régimen hidrológico importante. Forma una masa semilíquida de lodo, que se precipita pendiente abajo con gran velocidad y poder de arrastre (Figura 5.5).

Así como la remoción en masa se pueden clasificar de acuerdo al tipo de remoción y de material, existen otros procesos geomorfológicos y morfodinámicos que dan lugar a las clasificaciones de los materiales asociados o la disgregación natural de las laderas, particularmente, a las caídas, se destacan los términos de talud, derrubios y coluviones, Cuervo (2000, 54) los define así:

*Talud:* se trata de materiales gruesos, depositados en la base de un escarpe o ladera empinada.

*Derrubios:* se trata de materiales rocosos, de gran tamaño, depositados superficialmente en las laderas moderadas.

*Coluviones:* depósitos de rocas entremezcladas con suelos localizados sobre laderas moderadamente inclinadas.

### **5.1.2. Causas desencadenantes de la remoción de masa**

La remoción en masa se produce cuando existe un desequilibrio entre los componentes que tienen influencia sobre determinado terreno. Así, la estabilidad de las laderas está sujeta a la acción simultánea de distintos factores. Dichos factores se dividen en dos grandes grupos, factores internos y factores externos o detonantes (Suarez, 1998).

*Los factores internos*, se tratan generalmente de las características intrínsecas, relativas a las propiedades de los materiales y a su resistencia. Se relacionan con la morfología y las condiciones ambientales de la ladera, como lo son las características geológicas, de relieve, pendiente, la humedad del suelo, entre otros.

*Los factores externos o detonantes*, al influir sobre la estabilidad o equilibrio del terreno, dan lugar a modificaciones en las condiciones iniciales, desencadenando las roturas o caídas debido a las variaciones ejercidas, hasta finalmente detonar el remoción de la ladera. Existen diferentes detonantes, pero los más estudiados incluyen, las precipitaciones intensas, la intensidad sísmica o aceleración del suelo, las modificaciones antrópicas, los procesos erosivos, entre otros.

## **5.2. Susceptibilidad y Amenaza**

En el contexto de la gestión del riesgo, la susceptibilidad se refiere a la posibilidad de que un fenómeno ocurra sobre la base de las condiciones del contexto local Suarez (1998, 358). La susceptibilidad a remoción en masa o deslizamientos, se define por Vargas (2002), como la predisposición natural que tiene un área o entorno, para que se presenten fenómenos de remoción en masa, bajo la influencia de agentes inherentes al territorio como los morfodinámicos, o externo como las precipitaciones, y los sismos. El término de susceptibilidad se considera también como el grado de probabilidad o riesgo relativo de ocurrencia de un remoción en terreno, bajo la existencia de eventos de amenaza pasados (Cuervo, 1994).

De acuerdo con Suarez (1998), la susceptibilidad se puede evaluar de dos formas, por una parte, en primer lugar, de acuerdo al sistema de la experiencia, en donde la observación directa juega un papel importante para la identificación o el inventario de deslizamientos en el área estudiada, así se evalúa la ocurrencia a la vez que la geomorfología del sitio. En segundo lugar, se puede evaluar a partir del mapeo de los factores que se consideran puedan afectar la ocurrencia de deslizamientos, para posteriormente analizar la contribución y el comportamiento de cada uno de los factores o parámetros, esta forma de evaluación se denomina sistema teórico.

La amenaza, según Cardona (1993), se expresa como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno físico, natural, tecnológico o antrópico, que puede manifestarse con un nivel de severidad, en un sitio específico y un tiempo determinado. En ese sentido, el término susceptibilidad difiere del concepto de amenaza por cuanto esta última, implica determinar la probabilidad de ocurrencia en términos de tiempo, lugar y magnitud (Chaverri, 2016).

La amenaza en el contexto de los remoción en masa, se define como la probabilidad potencial de que, bajo ciertas condiciones como, volumen, área de los deslizamientos o velocidades, ocurra un deslizamiento particular en un determinado tiempo (Vargas, 2002).

Los términos de amenaza y susceptibilidad han sido utilizados erróneamente como sinónimos, por una parte, los mapas de susceptibilidad zonifican el terreno con el propósito de analizar los parámetros o factores detonantes. Mientras tanto, el término amenaza

expresa la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con potencial destructivo en áreas susceptibles, involucrando la frecuencia y magnitud (Aristizabal y Yokota, 2006).

### **5.2.1. Evaluación de la susceptibilidad**

La susceptibilidad es el primer acercamiento hacia la evaluación de la amenaza, debido a que “explica la distribución contemporánea de los deslizamientos de acuerdo con la evolución geomorfológica del terreno” (Griffiths et. al., citado en Aristizabal y Yokota, 2006, 10). Para el estudio del riesgo asociado a MM se suele utilizar el concepto de susceptibilidad, Para evaluar el grado de susceptibilidad existen diversas aproximaciones, la mayoría de ellas requieren o se basan en la caracterización de los factores internos o externos que concurren. Por lo general, estos factores se combinan para definir distintos grados de susceptibilidad, expresándose los resultados a través de cartografía mediante mapas de susceptibilidad. Una gran variedad de técnicas han sido desarrolladas para la evaluación la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos, sin embargo, Aristizabal y Yokota (2006) mencionan que estas pueden clasificarse en metodologías heurísticas, estadísticas y determinísticas.

*Metodologías heurísticas:* Llamadas también empíricas, se basan en conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área de estudio. Clereci et. al., (2002 citado en Aristizabal y Yokota, 2006) señala que se utilizan ampliamente para evaluar la susceptibilidad a partir de cuatro aspectos, (1) del mapeo de los deslizamientos; (2) del mapeo de los factores ambientales que influyen en la inestabilidad de las laderas y, (3) en la estimación de las relaciones de las relaciones entre los factores y las variables que afectan



la estabilidad y, (4) de la clasificación del terreno en grados o niveles de susceptibilidad de acuerdo a las estimaciones dadas anteriormente.

*Metodologías estadísticas:* Como su nombre lo indica, se basa en predicciones estadísticas derivadas de la combinación de variables que históricamente han sido generadoras de deslizamientos. Por tanto, estos métodos se basan en el empleo de inventarios de MM, y se pueden considerar como métodos empíricos garantizan menos subjetividad que los métodos heurísticos (Jiménez 2002). Las técnicas más utilizadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante. Los métodos estadísticos se dividen a su vez en bivariantes y multivariantes.

Carrara (1983) define el *análisis estadístico multivariante* como todas las técnicas de regresión Múltiple, análisis discriminantes que permitirían la correlación el análisis de la relación entre los parámetros de sitio y la distribución de remoción de ladera.

En el análisis *estadístico bivalente*, los factores determinantes son introducidos en un SIG y se correlacionan con el mapa de distribución de MM (Jiménez, 2002).

*Metodologías determinísticas o basadas en parámetros físicos:* Se basan en modelos de estabilidad y se utilizan ampliamente para la evaluación de la amenaza (Aristizabal y Yokota, 2006). De acuerdo con Van Westen (1993 citado en Medina, 2017), los métodos determinísticos se emplean en el estudio de estabilidad taludes, mostrando un alto grado de fiabilidad. Se fundamenta en modelos numéricos.

### **5.2.2. Los sistemas de información geográfica en estudios susceptibilidad a remoción en masa**

El uso de los SIG en la evaluación de la amenaza o la susceptibilidad deslizamientos data desde 1978, en adelante, se han reportado numerosas técnicas y métodos relacionadas con la zonificación cualitativa o cuantitativa de la amenaza (Suarez, 1988). La gran capacidad de procesamiento y automatización del SIG han posibilitado la aplicación de técnicas estadísticas espaciales, para explorar la interrelación entre los factores y su contribución a la rotura.

Un SIG permite la entrada y manejo ordenado y preciso de la información en cualquiera de sus formas (datos, mapas, et.), así como la salida eficiente de datos espaciales (mapas) y atributos (descriptivos) (Cuervo, 1994, 64). Estos métodos se han perfeccionado en la medida en que diversos autores elaboran dichos mapas a través de análisis estadísticos que operan a partir de técnicas de sensores remotos y SIG.

Entre los métodos disponibles en los SIG para la combinación de los diferentes factores implicados en el desarrollo de un deslizamiento se encuentra la superposición de mapas o datos que contienen las variables de interés. Entre las ventajas que ofrece están en análisis simultaneo de la información espacial y no espacial, la determinación rápida de la evolución de un fenómeno en el tiempo y espacio (Cuervo, 1994) (González et. al., 2000). El principio de análisis estadístico para la elaboración de este tipo de mapas de basa en la adición de capas o raster, determinando el valor de peso de cada unidad de terreno.

Igualmente, el método cartográfico de fundamenta en la recodificación de los valores iniciales de las capas digitales (Suarez, 1988). Como último paso para la obtención de mapas de susceptibilidad a MM es la definición de intervalos o grado, esto implica que la representación de la información es cualitativa, un ejemplo de ellos es la definición de intervalos en, muy baja, baja, media, alta y muy alta (Cuervo, 1994) (González et. al., 2000).

## 6. Metodología

En el presente capítulo, se presentarán los aspectos instrumentales y metódicos que estructuran la estrategia metodológica propuesta. Se presentan los procedimientos seguidos de la Guía para la evaluación de remoción en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016), y la combinación de métodos tomados de Mora-Vahrson-Mora (2004) (2012).

### 6.1. Enfoque Metodológico

Este estudio es una investigación realizada bajo un enfoque cuantitativo, se desarrolla a través de un conjunto de procesos secuenciales y probatorios, para efectos de medir y estimar magnitudes sobre un fenómeno concreto (Sampieri, et. al., 2004). Así, la metodología propuesta, se fundamenta en la medición de variables en determinado contexto, el análisis las mediciones obtenidas y la extracción conclusiones respecto de la pregunta o problema planteado.

Cada etapa realizada en el método desarrollado, se basa en un orden riguroso y estructurado, y busca conocer la realidad ambiental a través del análisis de las variables ambientales, parámetros y factores detonantes, que influyen en la susceptibilidad a remoción en masa. Como bien explica Sampieri (et. al., 2004), los estudios de tipo de cuantitativo, se apoyan en métodos para el procesamiento de datos no estandarizados, con recursos estadísticos a la luz de formula conclusiones que apunten a la delimitación de comportamientos tendenciales del fenómeno en estudio (Fernández, 2016).

## **6.2. Tipo de Estudio**

El presente estudio también se define por su carácter descriptivo, busca especificar o describir las propiedades de un fenómeno sometido a análisis, por lo que mide o evalúa diversas dimensiones o componentes del fenómeno a investigar.

Para la elaboración de este tipo de estudios se requiere de, identificar la muestra o población de estudio, determinar las variables o parámetros de estudio, así como las categorías y escalas de medida de dichas variables (Hoyos y Espinoza, 2013). Se utilizan para describir la frecuencia, distribución y características más importantes de un determinado problema o situación, permitiendo describir la relación o correlación entre dos o más variables sin establecer una relación causal entre ellas. Constituyen un punto de partida para generar hipótesis que deberán ser comprobadas mediante análisis incorporando la influencia de posibles factores externos asociados al problema estudiado (Seoane, et. al., 2007).

## **6.3. Procedimiento**

La estimación de la susceptibilidad se basa en la correlación de los factores determinantes que contribuyen a generación de remoción en masa, es por esto que, los mapas de susceptibilidad se realizan a partir de la identificación y análisis de datos cartográficos de tipo geomorfológico, litológico entre otros elementos físicos condicionantes. La presente investigación se fundamenta en el desarrollo de la metodología Mora-Vahrson y Mora (MVM) (Mora, R., 2004) tomando a la vez algunos de los procesos propuestos por Mora y

Vahrson (1993), los cuales se llevan a cabo, para su análisis espacial, mediante el SIG ArcGis 10.5.

La metodología abordada, de carácter heurístico, permite aproximarse al grado de susceptibilidad a MM, mediante la combinación a priori de cinco (5) factores y parámetros morfodinámicos y su distribución espaciotemporal que, según Mora-Vahrson (1993, 260), se diferencian en dos categorías principales.

*Elemento pasivos o Factores de susceptibilidad (EP):* En adelante EP, son aquellos que intrínsecamente forman parte del comportamiento del medio, es decir que constituyen los elementos pasivos del entorno. Este es el caso de la pendiente, su constitución litológica y las condiciones de humedad del suelo.

*Factores de Disparo (D):* se trata de los factores que extrínsecamente, inducen un comportamiento dinámico y activo que a partir de determinadas condiciones generarán fenómenos decisivos de movilización. Se trata de la intensidad de los sismos y de las lluvias intensas para un periodo de retorno de 100 años.

La combinación de los factores y parámetros mencionados, se realiza considerando que los MM ocurren en un contexto litológico determinado, con un grado de humedad y una pendiente que condicionan un cierto grado de susceptibilidad (elementos pasivos) (Mora, 2004). Bajo estas condiciones los factores externos y activos, como la sismicidad y las lluvias intensas, actúan como factores de disparo que alteran el equilibrio que se mantiene en determinado entorno (Mora, 2004).

Así, Mora (2004) sugiere que el grado de susceptibilidad a MM es el resultado de la interacción entre los elementos pasivos intrínsecos y la acción externa de los factores de disparo activos. Esta combinación se realizó tras la aplicación de la siguiente ecuación empírica:

$$(1) H = EP * D$$

Donde:

H: grado de susceptibilidad al deslizamiento

EP: valor producto de la combinación de los elementos pasivos

D: valor del factor de disparo

A su vez, según lo propuesto por Mora y Vahrson (1992), el valor de los elementos pasivos se obtiene por la combinación de los parámetros litológicos, la pendiente y la humedad del suelo:

$$(2) EP = S_l * S_h * S_p$$

Donde:

S<sub>l</sub>: valor del parámetro de susceptibilidad litológica

S<sub>h</sub>: valor del parámetro de humedad del suelo

S<sub>p</sub>: valor del parámetro de la pendiente

Por su parte, el valor del factor de disparo (D), es la combinación de la intensidad de las lluvias y la intensidad sísmica (Mora y Vahrson, 1992):

$$(3) D = D_s + D_{ll}$$

Donde:

$D_s$ : valor del parámetro de disparo por sismicidad

$D_{II}$ : valor del parámetro de disparo por lluvia

Así, la ecuación original se puede expresar como:

$$(4) H = (S_l * S_h * S_p) * (D_s + D_{II})$$

Dadas las particularidades tectónicas y climáticas regionales, se consideró derivar la ecuación de la siguiente manera:

$$(5) H_s = (S_l * S_h * S_p) * (D_s)$$

$$(6) H_l = (S_l * S_h * S_p) * (D_{II})$$

Donde:

$H_s$ : susceptibilidad al deslizamiento por sismicidad

$H_l$ : susceptibilidad al deslizamiento por lluvias

Para los parámetros y factores de análisis no se puede establecer una escala de calificación única, pues los mismos están sujetos a variaciones por las condiciones del área estudiada, por tal motivo las valoraciones a cada una de las variables, así como a la combinación de todos los factores, se modifica de acuerdo al método que mejor se adapte al entorno.

La información espacial que se empleó se encuentra en formato vectorial, shapefile, y se convirtió a raster con el mismo tamaño de pixel del modelo de elevación digital (DEM, 1m), los insumos empleados se presentan en la **Tabla 6.1**.

**Tabla 6.1.** *Insumos empleados*

Insumos	MMV	Fuente
DTM	Tamaño de pixel 1x1 m,	Propia georreferenciada



Curvas de nivel	validada DEM Resolución 1m	Elaboración propia
Precipitación	Precipitación total mensual (1978 – 2018)	Portal Hidroclimatológico CVC – IDEAM. CVC – UNIVALLE, 2019
Mapa de geología local	Unidades litológicas	CVC – UNIVALLE 2019

**Fuente:** elaboración propia

### 6.3.1. Descripción de los elementos pasivos (EP)

A continuación, se describe el procedimiento aplicado a los parámetros involucrados en el análisis y determinación del grado de susceptibilidad de los EP, según las condiciones locales.

#### Parámetro de la pendiente ( $S_p$ )

El índice relativo de relieve responde a las condiciones de rugosidad natural del terreno, sin embargo, la calificación propuesta por Mora (2004) sugiere utilizar el parámetro de pendiente dadas las condiciones específicas locales. Por lo tanto, para el presente estudio, este parámetro se determina a partir de las clases de pendiente del terreno, obtenidas de las curvas de nivel (CVC – UNIVALLE, 2019). Para su calificación se asignan valores de ponderación de acuerdo a las clases de pendiente de Van Zuidam (1986 citado en Mora, 2004).

**Tabla 6.2.** *Clases de pendientes, valoración del parámetro  $S_p$*

Clases de pendiente		Condiciones del terreno	Valor del parámetro
Grados	Porcentaje		
0 - 2	0 - 2	Planicie, sin denudación apreciable	0
2 - 4	2 - 7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1
4 - 8	7 - 15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2
8 - 16	15 - 30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales,	3

Clases de pendiente		Condiciones del terreno	Valor del parámetro
16 - 35	30 - 70	peligro severo de erosión Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	4
35 - 55	70 - 140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5
>55	>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	6

**Fuente:** elaboración propia a partir de Van Zuidam, 1986 citado en Mora, 2004

### Parámetro de Influencia de la litología ( $S_l$ )

La influencia de la litología permite un acercamiento al comportamiento dinámico de las laderas; si bien no se cuenta con datos geotécnicos cuantitativos, el Mapa de Geología Local elaborado para la Quebrada Isabel Pérez (CVC y UNIVALLE, 2019) permitió el análisis de los tipos de rocas y material que configuran e influyen en la estabilidad o inestabilidad de la zona. La evaluación de este parámetro se realizó según la clasificación propuesta por Mora y Vahrson (1993, 266), que valora la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas, con apoyo adicional de expertos.

**Tabla 6.3.** *Calificación del factor litológico  $S_l$*

Valor $S_l$	Litología	Características físico mecánicas	Calificativo
1	Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo. Calizas duras, permeables. Rocas intrusivas poco fisuradas, bajo nivel freático. Basaltos, andesitas, ignimbritas y otras rocas efusivas, sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas, sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.	Materiales sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas, sin relleno.	Baja

Valor $S_i$	Litología	Características físico mecánicas	Calificativo
2	Rocas sedimentarias no o muy poco alteradas, estratificación maciza (decimétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lavas, ignimbritas, rocas metamórficas medianamente alteradas y fisuradas. Aluviones con compactaciones leves, con proporciones considerables de finos, drenaje moderado, nivel freático a profundidades intermedias.	Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables	Moderada
3	Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas, coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.	Resistencia al corte moderada a media, fracturación importante	Mediana
4	Aluviones fluvio lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente y con rellenos arcillosos. niveles freáticos someros.	Resistencia al corte moderada a baja, con la presencia frecuente de arcillas	Alta
5	Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos elevados.	Resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos	Muy alta

**Fuente:** elaboración propia a partir de Mora y Vahrson, 1993

### Humedad del suelo ( $S_h$ )

Para establecer la humedad del suelo sin mediciones directas en campo, se realizó el cálculo de balance hídricos estimativos, en donde se asume una evapotranspiración potencial (EPT). El resultado permitirá una aproximación al comportamiento de la saturación y la distribución temporal de la humedad en el suelo (Mora y Vahrson, 1993). Para el desarrollo de la metodología propuesta por Mora (2004) y Mora y Vahrson (1993) se empleó información de precipitación y temperatura promedio mensual. La categorización de la precipitación mensual no se puede llevar a cabo con la información suministrada en Mora (2004), por tanto, se definen rangos coherentes con las condiciones pluviométricas del contexto local. El cálculo de este parámetro consta de dos grandes momentos, (1) de la categorización de la precipitación mensual y (2) de la definición del parámetro de humedad del suelo ( $S_h$ ), a continuación, se presenta cada uno.

#### *Categorización de la precipitación mensual*

Para este ajuste, el valor del límite inferior de los rangos se definió con base en el promedio anual de Evapotranspiración (ETP) en cm y mm, mientras que el valor del límite superior se definió con base en el valor de precipitación máximo mensual, para esto se siguió la metodología propuesta por Thornhwaite (1948).

Para el cálculo de los promedios de precipitación mensual se construyó una base de datos con la información del periodo 1975 – 2018 de cinco (5) estaciones pluviográficas operadas por la CVC e IDEAM (Cañaveralejo, Cañaveralejo – Edificio CVC, Los Cristales y Planta Rio Cali), localizadas en la zona de influencia del área de estudio. La metodología de los

polígonos de Thiessen es empleada, en este caso, para conocer el área de influencia que tiene cada una de las estaciones identificadas sobre la zona de estudio.

- Determinación del potencial de ETP a partir de Thornhwaite (1948)

Para el cálculo de ETP se emplearon los valores de temperatura media mensual, la relación entre la temperatura y la ETP se expresa en la siguiente ecuación y se calcula a partir de los pasos 1 a 4:

$$(7) e = ct^a$$

Donde:

*e*: valor de la evapotranspiración mensual en cm

*t*: valor de la temperatura promedio mensual

*c*: coeficiente

*a*: coeficiente

Para el cálculo de los promedios de temperatura mensual se utilizó la información de dos (2) estaciones de las cuatro estaciones trabajadas anteriormente (Cañaveralejo – Edificio CVC y Planta Río Cali), para el periodo 1975 – 2018 operadas por la CVC e IDEAM.

**Tabla 6.4.** Estaciones pluviométricas (PM) y pluviográficas (PG)

Nombre	Municipio	Categoría	Entidad	Coordenadas		Altura (msnm)
				X	Y	
Cañaveralejo	Cali	PG	CVC	1055421,41	868987,297	1056
Cañaveralejo Edificio CVC	Cali	PG	CVC	1059854,91	868389,069	985
Los Cristales	Cali	PM	CVC	1056527,90	870803,337	1312
Planta Río Cali	Cali	PG	CVC	1059076,72	872749,661	1070

*PM (Pluviométrica), PG (Pluviográfica)*

**Fuente:** elaboración propia

- 1) El coeficiente  $c$  varía inversamente con el valor del índice de calor mensual, de acuerdo al contexto climático local, el índice de calor mensual se calcula así:

$$(8) i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

Donde:

$i$ : índice de calor mensual

$t$ : valor de la temperatura promedio mensual

- 2) Para el cálculo del ETP se generó el índice de valor anual, para lo cual se realiza la siguiente ecuación:

$$(9) I = \sum i$$

- 3) Posteriormente, se calcula el ETP mensual sin corregir mediante la fórmula:

$$(10) ETP_{\text{sin corregir}} = 1.6 \left(\frac{10t}{I}\right)^a$$

Dónde:

$t$ : valor de la temperatura promedio mensual

$I$ : índice de calor mensual calculado en la ecuación (9).

$a$ : se obtiene de la siguiente expresión:

$$(11) a = 0.0000006751^3 - 0.00007711^2 + 0.017921 + 0.49239$$

- 4) Para encontrar la ETP corregida, se consideran el número de días en el mes y el número de horas de sol:

$$(12) ETP = ETP_{\text{sin corregir}} \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{d}{30}\right)$$

Dónde:

*ETP*: evapotranspiración potencial sin corregir

*N*: número de horas máximas de sol para este estudio se asigna 12 para todos los meses

*d*: número de días correspondiente a cada mes

Para lo cual se necesita encontrar *N* y *d*

Sabiendo que

$$(13) f = \frac{N}{12}$$

Finalmente, para obtener el valor ETP anual/mm, se promediaron los valores de ETP para las dos estaciones (Cañaveralejo – Edificio CVC y Planta Rio Cali).

**Tabla 6.5.** Valores obtenidos para la definición de rangos de precipitación mensual

Estaciones	Promedio Mensual ETP	
	CM	MM
Planta Rio Cali	7,42	74,2
Cañaveralejo - Edificio CVC	11,49	114,9
<b>Promedio Estaciones</b>	9,455	<b>94,55*</b>

Valor máximo de precipitación Mensual  
mm

232,00\*\*

**Fuente:** elaboración propia

\*Rango mínimo

\*\*Rango máximo

Una vez identificados los valores de rango mínimo y máximo, se categorizan obteniendo la siguiente clasificación:

**Tabla 6.6.** Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia

Promedio de precipitación mensual (mm)	Valor asignado
--	----------------

Promedio de precipitación mensual (mm)	Valor asignado
<94	0
95 – 200	1
>200	2

**Fuente:** elaboración propia a partir de Mora y Vahrson, 1993

#### *Definición del parámetro de humedad del suelo ( $S_h$ )*

A partir de los valores obtenidos para los promedios mensuales de lluvia, con base en la, se les asignan los valores de la Tabla 6.6 y se efectúa una suma de estos valores para los doce meses del año, con lo que se obtiene un valor que oscila entre 0 y 24. Finalmente, cada uno de los valores sumados, con base en Mora y Vahrson (1993), se clasifican de acuerdo la Tabla 6.7, obteniendo así el valor de parámetro de humedad del suelo para las estaciones en estudio.

**Tabla 6.7.** Valoración del parámetro humedad del suelo ( $S_h$ )

Suma de valores asignados a cada mes	Descripción	Valoración del parámetro $S_h$
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

**Fuente:** elaboración propia a partir de Mora y Vahrson, 1993

Con todos los parámetros generados, pendiente, litología y humedad del suelo, se sustituyen en la ecuación (2):

$$EP = S_l * S_h * S_p$$



### 6.3.2. Descripción de los factores de disparo (D)

A continuación, se describe el procedimiento realizado para la determinación de los valores del factor de intensidad sísmica máxima y el factor de intensidad de lluvias.

El tratamiento de los parámetros involucrados en el análisis y determinación del grado de susceptibilidad de los EP, según las condiciones locales.

#### Factor de disparo por sismicidad ( $D_s$ )

Según Mora y Vahrson (1993), el factor de sismicidad es considerado como un factor con gran influencia sobre los fenómenos de MM. Para determinar la clase de influencia de la sismicidad sobre los deslizamientos Mora-Vahrson-Mora determinar una correlación entre la intensidad de Mercalli-Modificada y la actividad sísmica. El valor de intensidad de Mercalli-Modificada correspondiente a la zona de estudio se define a partir del mapa de intensidad histórica de Salcedo y , y se califica con base en la **Tabla 6.8** de Mora (2004).

**Tabla 6.8.** Valoración del factor de disparo por sismicidad  $D_s$

Intensidad Mercalli-Modificada	Valoración del factor $D_s$	Intensidad Mercalli-Modificada	Valoración del factor $D_s$
I	1	VII	7
II	2	VIII	8
III	3	IX	9
IV	4	X	10
V	5	XI	11
VI	6	XII	12

Fuente: elaboración propia a partir de Mora, 2004 y Mora y Vahrson, 1993

#### Factor de disparo por lluvia $D_{II}$

Mora y Vahrson (1993, 268), menciona que las lluvias de alta intensidad se asocian a deslizamientos profundos de tipo translacional, por tanto, se consideran como la segunda causa en importancia para el disparo de MM. Para su cálculo utilizan los valores de precipitación máxima en 24 horas con un periodo de retorno de 100 años.

La estimación de precipitaciones máximas para el periodo de retorno de 100 años se adopta de CVC y UNIVALLE (2019). Su cálculo consistió en la aplicación de un análisis de frecuencia, empleando como factor las distribuciones de Normal, Log Normal, Pearson III, Log Pearson III y Gumbel para cada una de las estaciones de estudio (Tabla 6.4). Para la calificación de la influencia de las precipitaciones se toman los valores (Tabla 6.9) propuestos por Mora (2004) y Mora y Vahrson (1993).

**Tabla 6.9.** Valoración del factor de disparo por precipitaciones  $D_{II}$

Lluvia máxima en 24 horas, período de retorno 100 años (mm)	Descripción	Valor del factor $D_{II}$
<100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Medio	3
300-400	Alto	4
>400	Muy alto	5

Fuente: elaboración propia a partir de Mora, 2004 y Mora y Vahrson, 1993

### 6.3.3. Procesamiento de la información

Para obtener el mapa de susceptibilidad a remoción en masa (MM) en la cuenca de la Quebrada Isabel Pérez, una vez efectuada las calificaciones a cada parámetro y factor de disparo presentados en los apartados anteriores, se procedió a procesar las capas digitales o

archivos shapefile, correspondientes a pendiente, litología, humedad del suelo, intensidad sísmica e intensidad de precipitaciones.

Para este proceso se creó un modelo de geoprocésamiento con la herramienta Model Builder del software de escritorio ArcGis 10.5 (Figura 6.1), mediante el cual se automatiza la metodología propuesta por Mora (2004) y Mora y Vahrson (1993), a través de flujos y secuencias de procesos de análisis espacial, para generar finalmente el modelo de susceptibilidad a MM.

De modo que, para procesar en el SIG el cálculo de los elementos pasivos (EP) y los Factores detonantes (D) y el nivel de susceptibilidad final (H), se emplea la herramienta *Intersect*, para posteriormente mediante la herramienta *Field calculator* se calculan las expresiones  $EP = S_1 * S_h * S_p$   $D = D_s + D_{II}$   $H = (S_1 * S_h * S_p) * (D_s + D_{II})$ . Es de mencionar que, los valores finales de H, se normalizan en una escala de 0 a 1 con la herramienta *Field calculator*, para finalmente clasificar de acuerdo a la Tabla 6.10.

**Tabla 6.10.** Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento

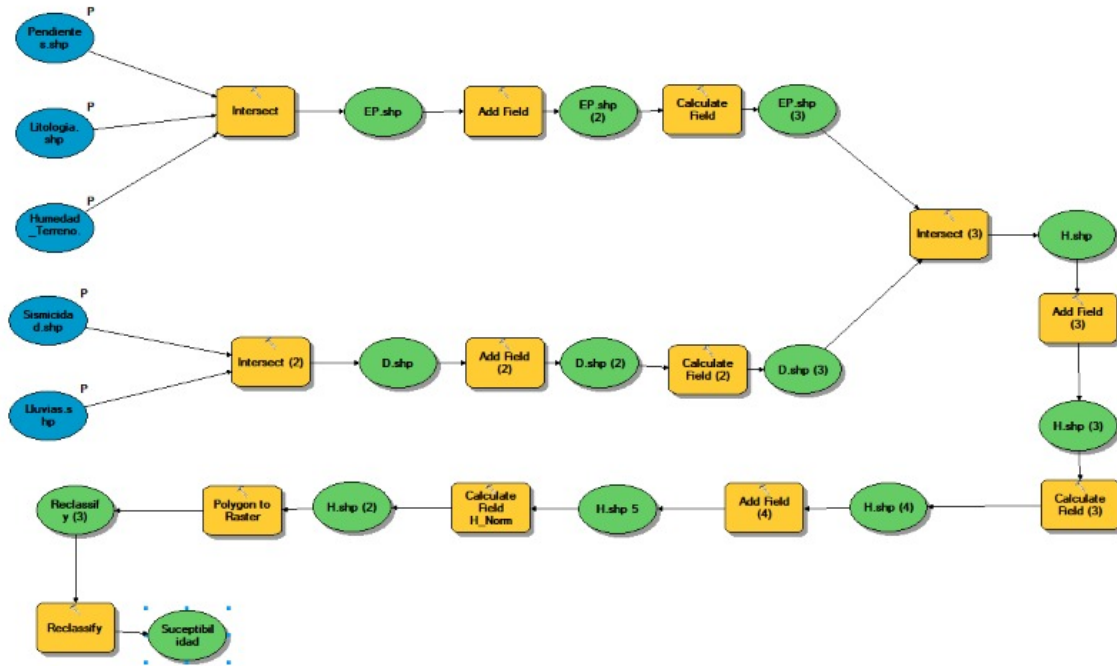
Clase	Calificativo de susceptibilidad al deslizamiento	Característica
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios

Clase	Calificativo de susceptibilidad al deslizamiento	Característica
		indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: remoción de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección
V	Muy alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

**Fuente:** elaboración propia a partir de Mora, 2004

Una vez normalizados los valores de H, es decir los niveles de susceptibilidad a MM, el archivo obtenido en shapefile se convierte a Raster a través de la herramienta *Raster to Polygon*, empleando el campo normalizado de valores de H, y en el tamaño de celda de 1 mt.

**Figura 6.1.** Modelo de susceptibilidad - Model Builder



Fuente: elaboración propia

## 7. Resultados

De acuerdo con lo presentado a lo largo de esta investigación, los eventos de remoción en masa (MM) son sujetos a diferentes factores, por tal razón, para efectos de evaluar la susceptibilidad a este tipo de fenómenos, autores como Mora (2004) y Mora y Vahrson (1993) proponen clasificar dichos factores en elementos pasivos o intrínsecos y factores detonantes. A continuación, se presentarán los niveles de susceptibilidad obtenidos para los distintos parámetros y factores detonantes evaluados, así como el modelo final de susceptibilidad a MM que permite conocer las variables de mayor influencia sobre la estabilidad de las laderas en la cuenca de la Qbd. Isabel Pérez, en el contexto local de la comuna 20 de Cali.

### 7.1. Elementos pasivos e intrínsecos de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa

El desarrollo de la metodología Mora-Vahrson-Mora, implicó la descripción de una serie de factores o elementos pasivos, para luego proceder a sumarlos y así obtener el mapa final de susceptibilidad por MM, estos son, la litología, la pendiente y la humedad del suelo.

#### 7.1.1. Parámetro de la pendiente ( $S_p$ )

La importancia de este parámetro ante la ocurrencia de remoción en masa radica en su relación directa con las tensiones tangenciales y normales en los materiales superficiales influyendo a la vez en la distribución del agua de la ladera, supeditando la estabilidad de una ladera (Suarez, 1998).

En la Figura 7.1 se presenta la clasificación de pendientes, generada a partir de las curvas de nivel a 2 mt de la cuenca qbd. Isabel Pérez. De acuerdo con la clasificación propuesta por Mora (2004), en la zona de estudio se encuentran seis clases de pendientes correspondientes a laderas que oscilan desde 0% hasta valores superiores a 140% (Tabla 7.1). La primera clase 0 se encuentran pendientes entre 0 a 2%, con 29392,14 m<sup>2</sup> (2,58%), corresponden a planicies sin denudación apreciable; a la clase 2 pertenecen 15928,84 m<sup>2</sup> de área de planicie sin denudación apreciable (1,40%); la clase 3 son pendientes moderadas que van desde 15 a 30%, con 225500,29 m<sup>2</sup>, abarcando el 19,76% de la superficie; dentro de la clase 4 se encuentran pendientes que oscilan entre 30 a 70%, y se distribuyen en el 58,66% de la cuenca, se tratan de pendientes fuertes con procesos denudacionales intensos; a la clase 5 corresponden pendientes muy fuertes de 70 a 140%, que abarcan 141230,41 m<sup>2</sup> de superficie (12,37%); por ultimo a la clase 6 corresponden pendientes extremadamente fuertes mayores a 140%, comprendiendo 2902 m<sup>2</sup>, 0,25% del área total dela cuenca.

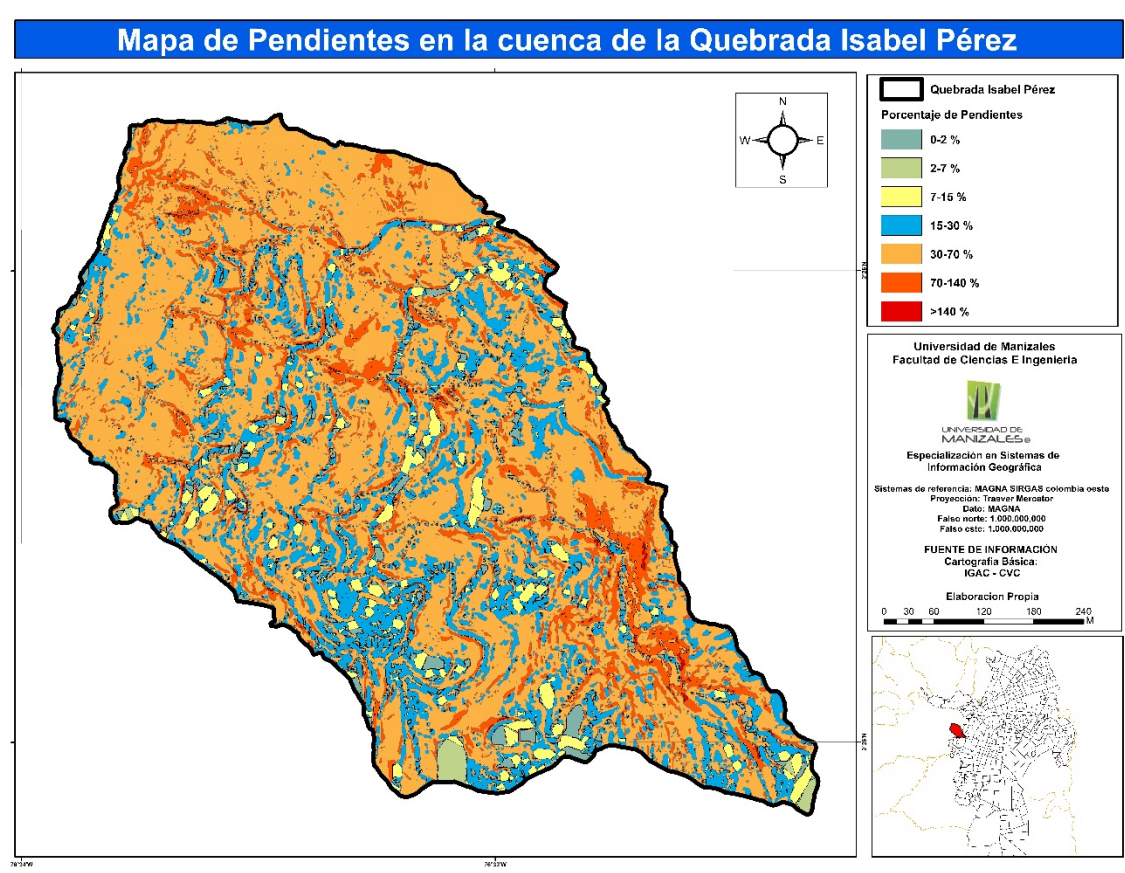
**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 7.1.** Clases de pendientes valor de parámetro  $S_p$

Porcentaje de pendiente	Clasificación	Valor del factor $S_p$	Área (m <sup>2</sup> )
0 - 2	Planicie, sin denudación apreciable	0	29392,14
2 - 7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1	15928,84
7 - 15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2	56832,44
15 - 30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión	3	225500,29
30 - 70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	4	669572,85
70 - 140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5	141230,41
>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	6	2902,21

Fuente: elaboración propia

Figura 7.1. Mapa de clases de parámetro de la pendiente  $S_p$



### 7.1.2. Influencia de la Litología ( $S_l$ )

En términos regionales, el departamento del Valle del Cauca se localiza al noroccidente de Suramérica, en el sitio de interacción de las placas tectónicas, suramericana, Nazca y Caribe. De ahí, el Valle del Cauca se caracteriza por situarse en un complejo de fallas regionales, como lo son el sistema de fallas Cauca Almaguer en la cordillera central, Cali-Patía y Dagua-Calima en la cordillera occidental (MZSC, 2005). Esto como parte del



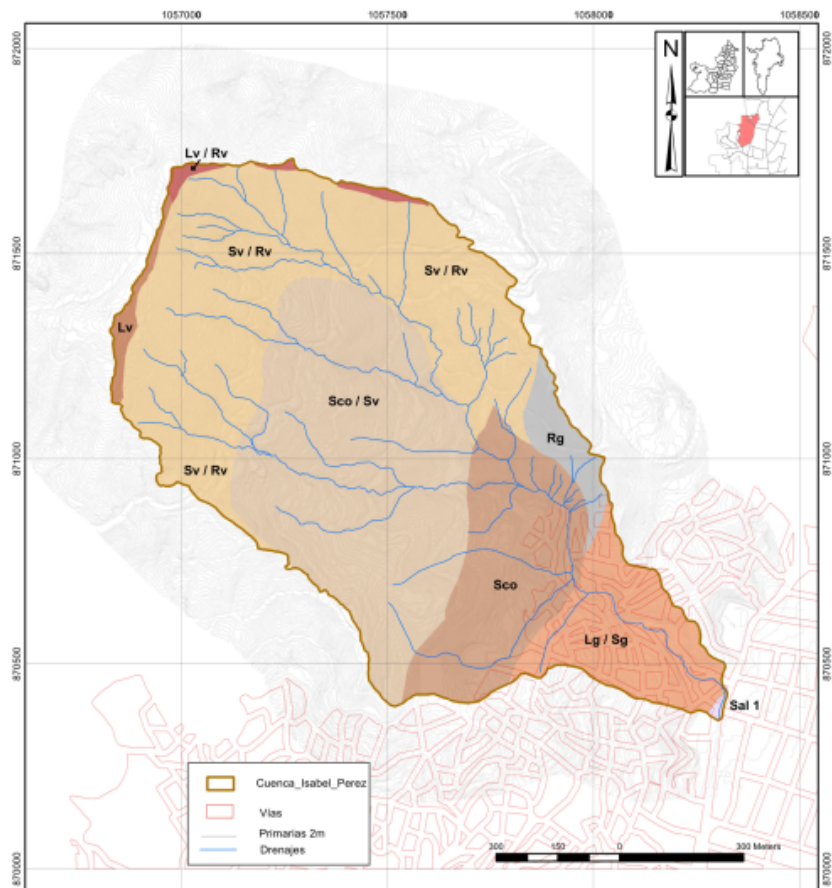
levantamiento tectónico de las cordilleras, durante el Terciario, y como reacción a los esfuerzos compresivos. Al tiempo, depósitos de abanicos aluviales, conos aluviales y sedimentos del río Cauca predominan en la depresión inter-cordillerana del Valle del río Cauca (CVC y UNIVALLE, 2019).

En este contexto, el modelo tectónico regional que tiene influencia en el municipio de Santiago de Cali se caracteriza por el desarrollo de extensas fallas profundas, inversas, normales y direccionales, paralelas a la cordillera occidental (**Error! Reference source not found.**), de reconocida actividad sísmica y responsables de terremotos como el ocurrido en Buga en 1766, Popayán 1983 y Armenia en 1999 (CVC y UNIVALLE, 2019). Entre estas el sistema de Cali-Patía, que bordea la cordillera occidental, y el sistema de fallas de Romeral, que bordea el frene occidental de la cordillera central.



La cuenca de la Quebrada Isabel Pérez se comprende de suelos residuales transportados, dos formaciones geológicas, la Formación Guachinte (rocas sedimentarias del Terciario) (TOg) y rocas Volcánicas oceánicas del Cretáceo (Kv). En menor proporción se identifican depósitos aluviales (no cartografiables) a lo largo de las quebradas principales y sus afluentes, estas son, la Qb. Isabel Pérez y la Qb. Mónaco. La geología estructura está dominada por el sistema de falla de Cali-Patía y por fallas con dirección predominante W-E.

**Figura 7.3.** Unidades Superficiales y de Litología en la cuenca Qbd. Isabel Pérez



**Fuente:** CVC – UNIVALLE (2019)

*Rocas sedimentarias del Terciario (TOg)*

Las rocas sedimentarias de la Formación Guachinte del terciario, ocupan el extremo oriental de la cuenca de Norte a Sur hacia la base de la Cordillera Occidental. Se componen por areniscas que varían de tamaño de grano, de fino a muy gruesos (CVC –UNIVALLE, 2019).

*Rocas Volcánicas del Cretáceo (Kv)*

Las rocas de la Formación Volcánica consisten en lavas basálticas compuestas piroxeno y plagioclasa cálcica. Según las observaciones de campo realizadas por CVC – UNIVALLE (2019), es común ver, entre la divisoria de aguas de la cuenca, al noroccidente del sector de Siloé, que el basalto presenta suelos residuales, sobrepuestos por suelos transportados, con fragmentos angulosos, aplanados y subredondeados.

Se observa también que el fracturamiento tectónico en el basalto ha dado lugar a cuatro familias de fracturas, conformadas por bloques que han sido arrastrados hacia las quebradas, en su parte alta y media. El efecto de desprendimiento de bloques de basalto, se debe, entre otras causas a la acción erosiva, de las quebradas mayores y sus afluentes, hacia la parte alta de la cuenca de la Qbd. Isabel Pérez. Este factor influye en cierta medida, a la susceptibilidad de estos bloques, que, al ser arrastrados e involucrados con flujos torrenciales, amenazan el sector del embotellamiento y la parte urbana del barrio Siloé de Cali.

### *Depósitos aluviales y fluviales Cuaternarios (Qca)*

Estos depósitos cuaternarios consisten en gravas, arenas, limos y arcillas espesas que conforman conos y abanicos aluviales, que se sobreponen con zonas urbanas y densamente habitadas en la ciudad de Cali. Si bien se tratan de unidades no cartografiadas, se deduce que se extienden desde el borde la cordillera Occidental hacia el oriente, sobre los cauces de la red fluvial, abundan bloques, gravas, limos y arcillas de origen basáltico, así como fragmentos de rocas provenientes de las cabeceras de la red fluvial.

### **Contexto geológico estructural local**

Como se mencionó, la cuenca está dominada por el sistema de falla de Cali-Patía, del que no se conoce con certeza su actividad, de tipo trascurrente, pasa por el frente montañoso oriental desde el Departamento de Nariño. En el barrio Siloé transcurren dos fallas principales de dirección N-S a NNE, como se puede observar en el mapa geológico local (figura). El fracturamiento de dirección SEE, de carácter distensivo, se cree que tectónicamente responsable del desarrollo de fallas transversales como las que configuran las quebradas Isabel Pérez y Mónaco, entre otras.

### **Unidades geológicas superficiales – Litología**

Las unidades superficiales, en la cuenca de la Quebrada Isabel Pérez, se tratan de formaciones generalmente rocosas con diferentes grados de meteorización, suelos y depósitos no consolidados y transportados. Estas unidades son el resultado de los procesos de meteorización y demás procesos que se generan sobre ese material parental, y se

correlacionan con procesos morfodinámicos generados por fenómenos exógenos que modelan la superficie terrestre.

De acuerdo con CVC-UNIVALLE (2019), el mapa (Figura 7.3) de Unidades Superficiales o de Litología de la cuenca presenta la clasificación de los materiales geológicos, como Roca (R), Material Intermedio (I), Suelo Residual y Transportado (S). Las unidades cartografiadas se asocian a las rocas de la formación volcánica del cretáceo, basalto y diabasa, así como con las rocas sedimentarias de la formación Esmita del Terciario; arenisca, arcillolita, limolita y conglomerado. Otras nomenclaturas como Sv/Rv, expresan el tipo de suelo Sv, que cubren parcialmente la roca volcánica Rv.

Una vez identificada la litología de la zona de la cuenca qbd. Isabel Pérez, tomado de la información proveída por CVC y UNIVALLE (2019), se clasificaron según el parámetro de influencia litológica establecido por Mora y Vahrson (1993) (citar tabla de litología de metodología), con el objetivo de determinar un rango de susceptibilidad entre 1 a 5 como se muestra en la Tabla 7.2.

**Tabla 7.2.** Clasificación del factor litológico SI en la cuenca Qbd. Isabel Pérez

Unidad	Factor S <sub>i</sub>	Calificación	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (mts)
Iv	2	Moderado	12733,94	1155,31
Iv / Rv	3	Medio	7255,26	1200,68
Lg / Sg	5	Muy Alto	115782,14	1749,17
Rg	2	Moderado	33034,19	1199,23
Sal 1	5	Muy Alto	1592,80	183,72
Sco	5	Muy Alto	168897,99	1915,52
Sco / Sv	3	Medio	381513,72	2634,40
Sv / Rv	3	Medio	39987,13	1400,01

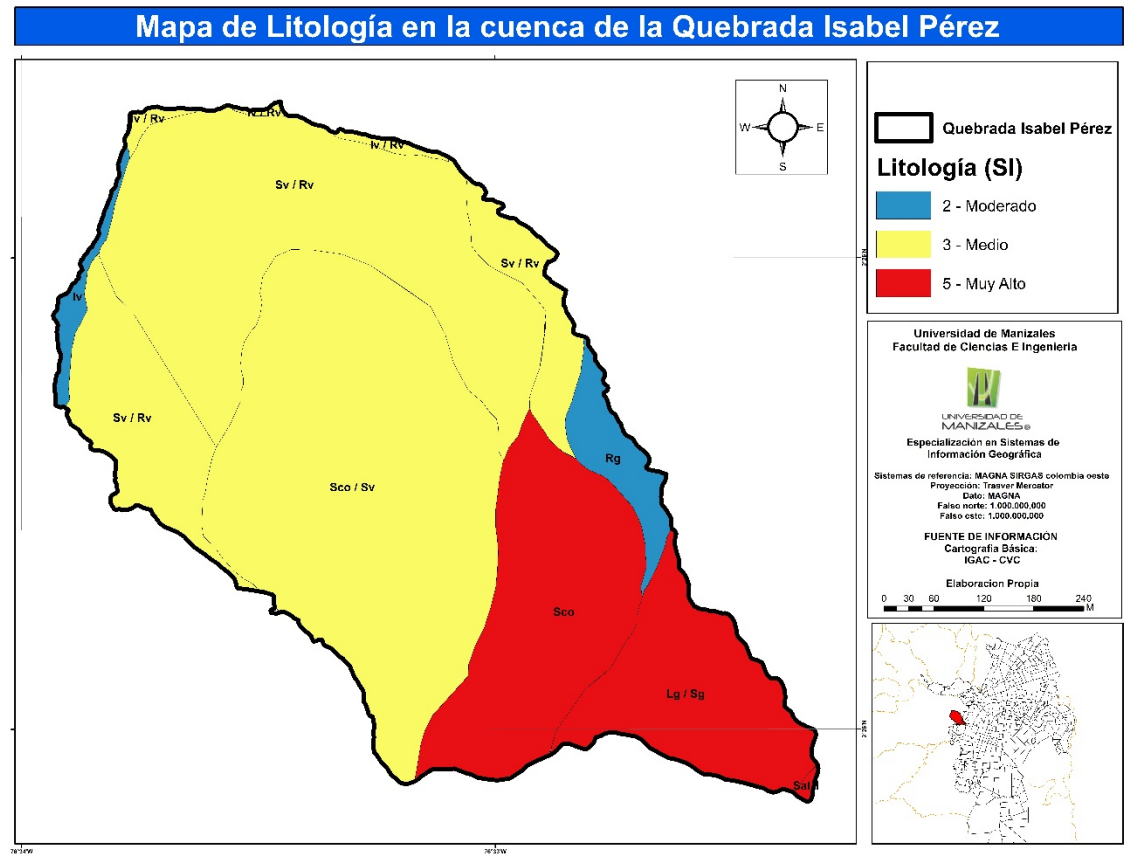
---

Unidad	Factor S <sub>i</sub>	Calificación	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (mts)
Sv / Rv	3	Medio	289162,90	3120,21
Sv / Rv	3	Medio	86653,06	1718,41

**Fuente:** elaboración propia a partir de CVC-UNIVALLE, 2019

En síntesis, de acuerdo con la Tabla 7.2, de unidades litológicas, y la clasificación propuesta por Mora y Vahrson, 4,027% (45768,13 m<sup>2</sup>) del área total de la cuenca corresponden a un nivel de susceptibilidad Moderada, comprendido por las unidades de material intermedio volcánico (Iv) y Unidades de roca sedimentaria (Rg); 70,78% (804572,08) m<sup>2</sup> presenta un nivel Medio lo que incluye las unidades material intermedio volcánico sobrepuesto en unidades de roca volcánica (Iv/Rv), suelos coluviales sobrepuestos en suelos residuales de la Formación Volcánica (Sco/Sv) y suelos de la Formación Volcánica sobrepuestos en unidades de roca volcánica (Sv/Rv); por ultimo, 25,18% (286272,93 m<sup>2</sup>) conciernen a un nivel Muy Alto, abarcando las unidades de material intermedio sedimentario sobre suelos residual de la Formación Guachinte (Lg/Sg), la Llanura Aluvial río Cauca (Sal 1) y suelos coluviales (Sco).

**Figura 7.4.** Mapa de influencia de la Litología (SI) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez



Fuente: elaboración propia

### 7.1.3. Parámetro de Humedad del suelo ( $S_h$ )

Para establecer la humedad del suelo se realizó el cálculo de balance hídrico estimativo, para lo cual se procesó la evapotranspiración potencial (EPT), tomando como base lo propuesto por Mora y Vahrson (1993) y Mora (2004). Para el desarrollo de esta se empleó información de precipitación y de la temperatura promedio mensual (Anexo 1 y Anexo 3). Con esto, el cálculo de este parámetro constó de dos grandes momentos, en primer lugar, se



categorizó la precipitación mensual para así definir como último momento las clases de susceptibilidad relacionadas al parámetro de humedad del suelo.

### Precipitación promedio mensual en un periodo de retorno de 100 años

Cómo se mencionó anteriormente, para la generación de los rangos precipitación, ajustados al comportamiento del promedio mensual de precipitaciones para la cuenca qbd. Isabel Pérez, se calculó el promedio anual de ETP, cuyo valor se tomó como el límite inferior del rango de precipitaciones. El rango superior se definió con base en el valor de precipitación máximo mensual siguiendo lo propuesto por Thornhwaite (1948).

Los índices calculados para la obtención de la ETP mensual se aprecian en la Tabla 7.3 y Tabla 7.4, con base en los datos temperatura para las estaciones Cañaveralejo Edificio-CVC y Planta Rio Cali (**Anexo 3**).

**Tabla 7.3.** *Calculo ETP Estación Cañaveralejo – Edificio CVC aplicando método de Thornhwaite, 1948*

Mes	Temp. media mensual	Índice de calor mensua II	10/t	ETP sin corregir	N	$f=n/12$	d	n días/mes (d/30)	ETP/ (cm/mes)
Enero	25,24	11,60	1,83	11,54	12	1	31	1,03	11,93
Febrero	25,26	11,61	1,83	11,56	12	1	28	0,93	10,79
Marzo	25,03	11,46	1,82	11,23	12	1	31	1,03	11,60
Abril	24,94	11,39	1,81	11,10	12	1	30	1,00	11,10
Mayo	24,65	11,19	1,79	10,67	12	1	31	1,03	11,03
Junio	25,35	11,68	1,84	11,70	12	1	30	1,00	11,70
Julio	25,69	11,92	1,86	12,22	12	1	31	1,03	12,63
Agosto	25,63	11,88	1,86	12,13	12	1	31	1,03	12,54
Septiembre	25,67	11,90	1,86	12,19	12	1	30	1,00	12,19
Octubre	24,73	11,25	1,79	10,80	12	1	31	1,03	11,16

Mes	Temp. media mensual	Índice de calor mensual I	10/t	ETP sin corregir	N	$f=n/2$	d	n días/mes (d/30)	ETP/ (cm/mes)
Noviembre	24,44	11,05	1,77	10,39	12	1	31	1,03	10,74
Diciembre	24,30	10,952	1,76	10,19	12	1	31	1,03	10,53
<b>Índice calor anual</b>		137,88	<b><math>\alpha= 3,27</math></b>					<b>ETP anual</b>	137,93
								<b>Promedio mensual ETP Est. Cañaveralejo – Edificio CVC</b>	11,49

Fuente: elaboración propia

**Tabla 7.4.** *Calculo ETP Estación Planta Río Cali aplicando método de Thornhwaite, 1948*

Mes	Temp. media mensual	Índice de calor mensual I	10/t	ETP sin corregir	N	$f=n/12$	d	n días/mes (d/30)	ETP/ (cm/mes)
Enero	20,75	8,62	2,15	8,05	12	1	31	1,03	8,32
Febrero	20,75	8,62	2,15	8,05	12	1	28	0,93	7,52
Marzo	20,30	8,34	2,10	7,69	12	1	31	1,03	7,95
Abril	19,80	8,03	2,05	7,29	12	1	30	1,00	7,29
Mayo	19,60	7,91	2,03	7,14	12	1	31	1,03	7,38
Junio	19,65	7,94	2,04	7,18	12	1	30	1,00	7,18
Julio	20,10	8,22	2,08	7,53	12	1	31	1,03	7,78
Agosto	19,70	7,97	2,04	7,22	12	1	31	1,03	7,46
Septiembre	18,80	7,43	1,95	6,54	12	1	30	1,00	6,54
Octubre	19,30	7,73	2,00	6,91	12	1	31	1,03	7,14
Noviembre	19,27	7,71	2,00	6,89	12	1	31	1,03	7,12
Diciembre	19,67	7,95	2,04	7,19	12	1	31	1,03	7,43
<b>Índice calor anual</b>		96,48	<b><math>\alpha= 2,11</math></b>					<b>ETP anual</b>	89,10
								<b>Promedio mensual ETP Est. Planta Río Cali</b>	7,43

Fuente: elaboración propia

Tras la aplicación de los procedimientos sugeridos por Thornhwaite (1948), se obtiene el promedio mensual de ETP anual en mm para ambas estaciones, 95,55 mm, valor que corresponde al límite inferior del rango de precipitación.

**Tabla 7.5.** Valores obtenidos para la definición de rangos de precipitación mensual método Thornhwaite

Estaciones	Promedio Mensual ETP cm	Promedio Mensual ETP mm
PLANTA RIO CALI	7,42	74,2
CAÑAVERALEJO-EDIFICIO CVC	11,49	114,9
Promedio Estaciones cm	9,455	
<b>Promedio Estaciones mm</b>	94,55 Rango mínimo	
<b>Valor máximo precipitación mensual mm</b>	232,00 Rango máximo	

**Fuente:** elaboración propia

Una vez identificados los valores de rango mínimo y máximo de precipitación, se categorizan obteniendo los valores de clases de precipitación de acuerdo, con esto se re clasifican los valores de promedio mensual de cada estación (Anexo 1).

**Tabla 7.6.** Categorización de la precipitación según clasificación de Mora y Vahrson, 1993

Promedio de precipitación mensual (mm)	Clases precipitación
<94	0
95 – 200	1
>200	2

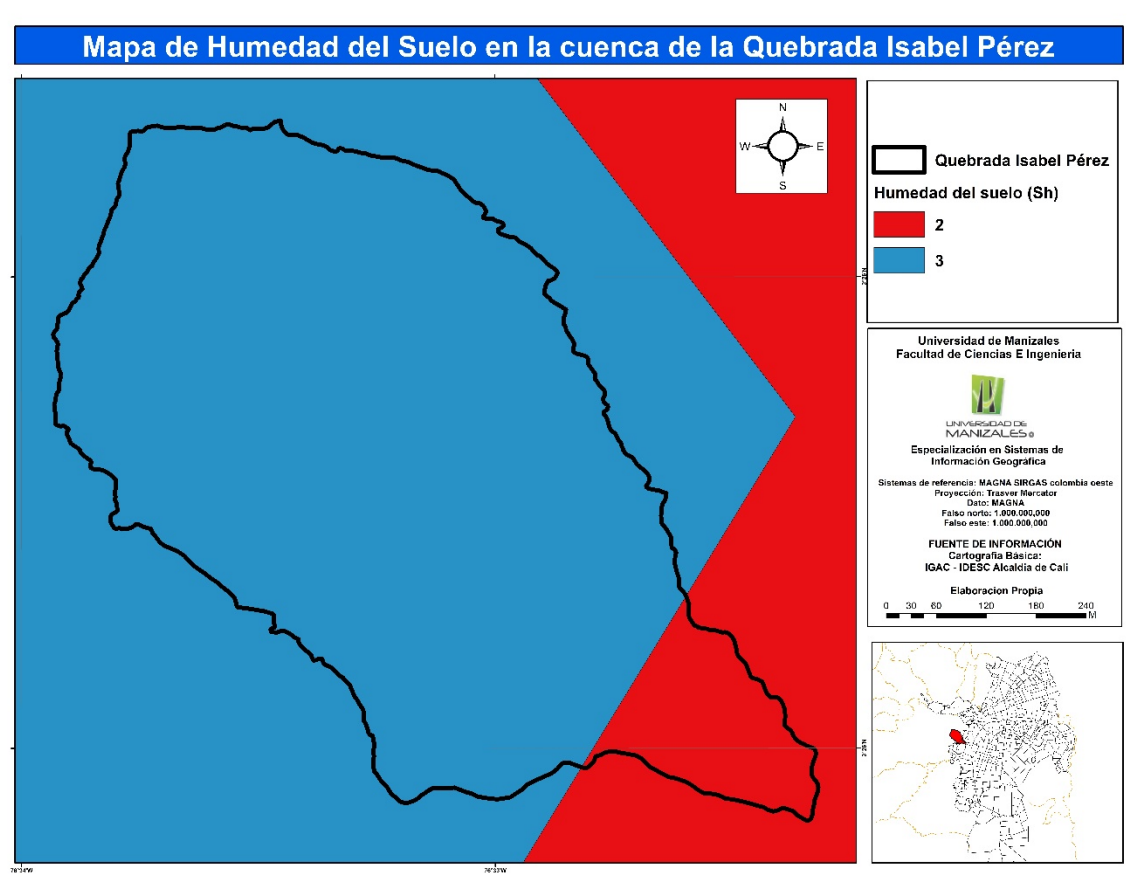
**Fuente:** elaboración propia

### Definición del parámetro de humedad del suelo ( $S_h$ )

Luego de re clasificar los promedios mensuales de precipitación para cada estación con base en las clases de la Tabla 7.6, se realizó una suma de dichas clases, obteniendo valores que oscilaron entre

8 a 13 (Anexo 4), con esto se asignaron las clases de parámetro de humedad del suelo presentadas por Mora y Vahrson (1993) en la (Tabla 6.7). La Tabla 7.7 resume la distribución espacial de la clasificación final, la cual indica calores de humedad de 2 a 3, esto indica una influencia baja a media del mismo en lo que respecta a la susceptibilidad al deslizamiento (Figura 7.5).

**Figura 7.5.** Mapa de valores del parámetro de humedad del suelo  $S_h$  en la cuenca Qbd. Isabel Pérez



Fuente: elaboración propia

**Tabla 7.7.** Clasificación parámetro de humedad del suelo  $S_h$  en la cuenca Qbd. Isabel Pérez

Estación	Suma de valores asignada a cada mes	Valoración parámetro $S_h$
Cañaveralejo PG	8	2

Estación	Suma de valores asignada a cada mes	Valoración parámetro $S_h$
Cañaveralejo-Edificio CVC	8	2
Los Cristales	13	3
Planta Rio Cali	5	2

Fuente: elaboración propia

## 7.2. Factores detonantes de la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa

### 7.2.1. Evaluación del factor de disparo por sismicidad ( $D_s$ )

Según Mora y Vahrson (1993) el factor de sismicidad, considerado como un factor de gran influencia sobre los MM, se evaluó tomando como valor de referencia la intensidad Mercalli modificada para la zona de estudio. El valor de intensidad de Mercalli modificada para el barrio Siloé corresponde a V, por estar en la zona 12 de la ciudad de Cali. La determinación de este valor se tomó con base en Salcedo y Alvarado (2007), en el cual se evalúa las intensidades macrosísmicas en la ciudad de Cali, tomando como referente los efectos reportados u observados en el terremoto del 15 de noviembre de 2004 con epicentro en Pizarro (Chocó).

Con esto, se establece, a partir de Mora, (2004) y Mora y Vahrson (1993), que el valor del factor de disparo por sismicidad es 5 (referencia tabla 6.8).

El valor de intensidad se constituye de factores cualitativos como físicos. Desde el punto de vista físico, el grado de intensidad comprende elementos como la amplitud del desplazamiento de las partículas del suelo, la velocidad de desplazamiento, aceleración, dirección, periodo y duración del proceso. Dentro de los aspectos sociales, se incluyen

factores alusivos a los efectos y daños producidos, tanto para las personas, como los objetos, edificios y el paisaje.

### **7.2.2. Evaluación del factor de disparo por lluvia $D_{II}$**

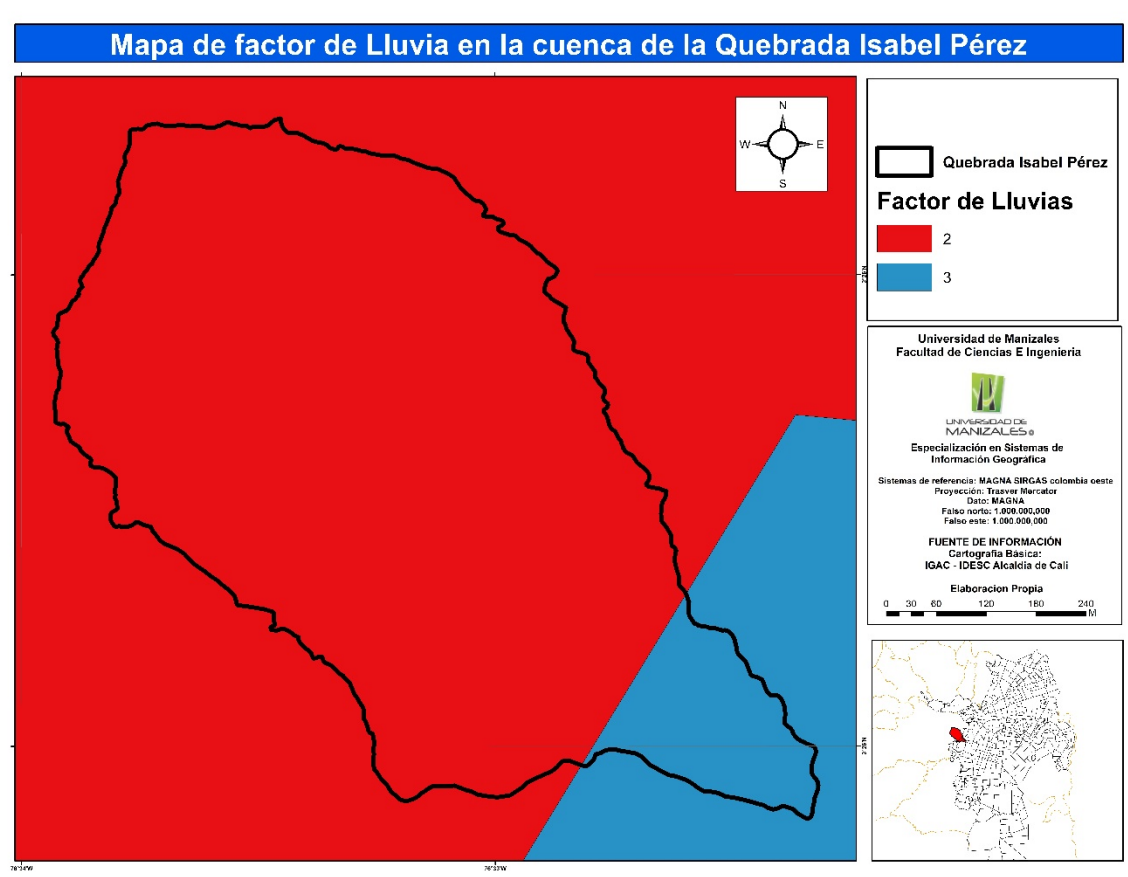
Las precipitaciones de alta intensidad se consideran como el segundo factor de disparo en los procesos de MM, por cuanto se asocian a deslizamientos profundos. Con base en los datos de precipitación mensual (Anexo 1) de las cuatro estaciones con influencia en la cuenca, con esto se observa que la distribución temporal de la lluvia de la cuenca presenta un régimen bimodal, que obedece a dos periodos de alta pluviosidad y dos periodos de baja pluviosidad. Las mayores lluvias se encuentran en los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre, mientras que los periodos menos pluviosos están entre los meses de enero a febrero y de junio a septiembre.

Como se mencionó, la estimación de precipitaciones máximas relaciona la magnitud de las precipitaciones máximas con la frecuencia de ocurrencia, mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Para la presente investigación se toma las estimaciones de CVC y UNIVALLE (2019), las cuáles se establecieron con base en las series de precipitaciones máximas para periodo de retorno de 100 años (**Anexo 2**).

De acuerdo a lo anterior, con base en Mora (2004) y Mora y Vahrson (1993), se determinó que, para la cuenca Qbd. Isabel Pérez, los valores del factor de lluvias oscilan entre 2 y 3 (Figura 7.6), es decir que 90, 59% (1045413,69 m<sup>2</sup>) se encuentra en un nivel bajo de

susceptibilidad por lluvias, mientras que un 8,41% (95945,48 m<sup>2</sup>) está sobre un nivel medio (Tabla 7.8.)

**Figura 7.6.** Mapa de valores del factor de disparo por lluvias ( $D_{II}$ ) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez



**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 7.8.** Clasificación del factor de disparo por lluvias ( $D_{II}$ ) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez

Valor del factor $D_{II}$	Área m <sup>2</sup>	Porcentaje
2	1045413,69	91,59
3	95945,48	8,40

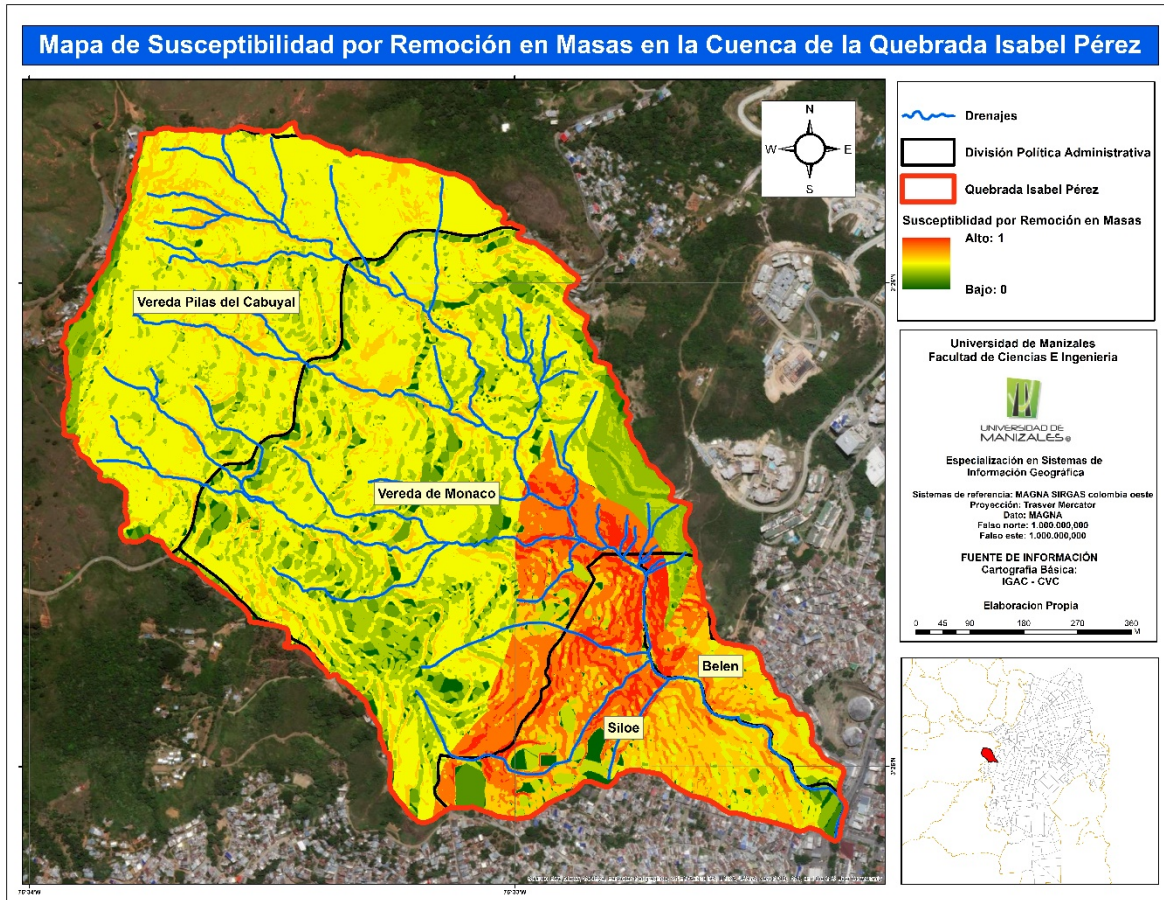
**Fuente:** elaboración propia

### **7.3. Niveles de susceptibilidad por remoción en masa en la cuenca quebrada Isabel Pérez en el municipio de Santiago de Cali (H)**

Tras aplicar la ecuación propuesta por Mora y Vahrson (1993), se generó el mapa de susceptibilidad por MM en la cuenca de la Qbd. Isabel Pérez (Figura 7.7), este incluye los elementos pasivos intrínsecos, pendiente, litología y humedad del suelo, al tiempo que los factores detonantes o de disparo, sismicidad e intensidad de lluvias (citar ecuación final susceptibilidad). En términos generales, se encontró que el 63,93% de la cuenca se encuentra bajo un nivel de susceptibilidad a remoción en masa Moderado; el 16,53% presenta un nivel Alto; 11,15% un nivel Muy alto y, el 4,77% y 3,62% presentan un nivel Bajo y Muy bajo respectivamente (Tabla 7.8).



**Figura 7.7.** Mapa de Niveles de susceptibilidad a remoción en masa en la cuenca Qbd. Isabel Pérez



Fuente: elaboración propia

**Tabla 7.9.** Niveles de susceptibilidad a remoción en masa en la cuenca Qbd. Isabel Pérez

Clase propuesta por Mora (2004)	Rango	Calificativo	Área m <sup>2</sup>
I	0 - 0,13	Muy baja	41277,58
II	0,13 - 0,26	Baja	54363,22
III	0,26 - 0,40	Moderada	729067,86
IV	0,40 - 0,66	Alta	188510,55
V	0,66 - 1	Muy alta	127119,37

Fuente: elaboración propia

De manera más específica, en la zona más habitada de la cuenca, se aprecian niveles Altos y Muy altos de susceptibilidad a remoción en masa, en la zona de confluencia de la red hídrica, sobre la parte alta del barrio Siloé, que corresponde a la zona de entamborado. En contraste con la información del sistema de fallamiento, se observa que las zonas con niveles más altos coinciden con el plano de la falla Inversa Aproximada. De acuerdo con CVC y UNIVALLE (2019), sobre la zona urbana de la cuenca se aprecian zonas críticas con erosión, deslizamientos y bloques de roca sueltos, las zonas más críticas se encuentran en la ladera norte, en la parte media de la cuenca de la Qbd, en zonas con pendiente entre 50-70% de inclinación.

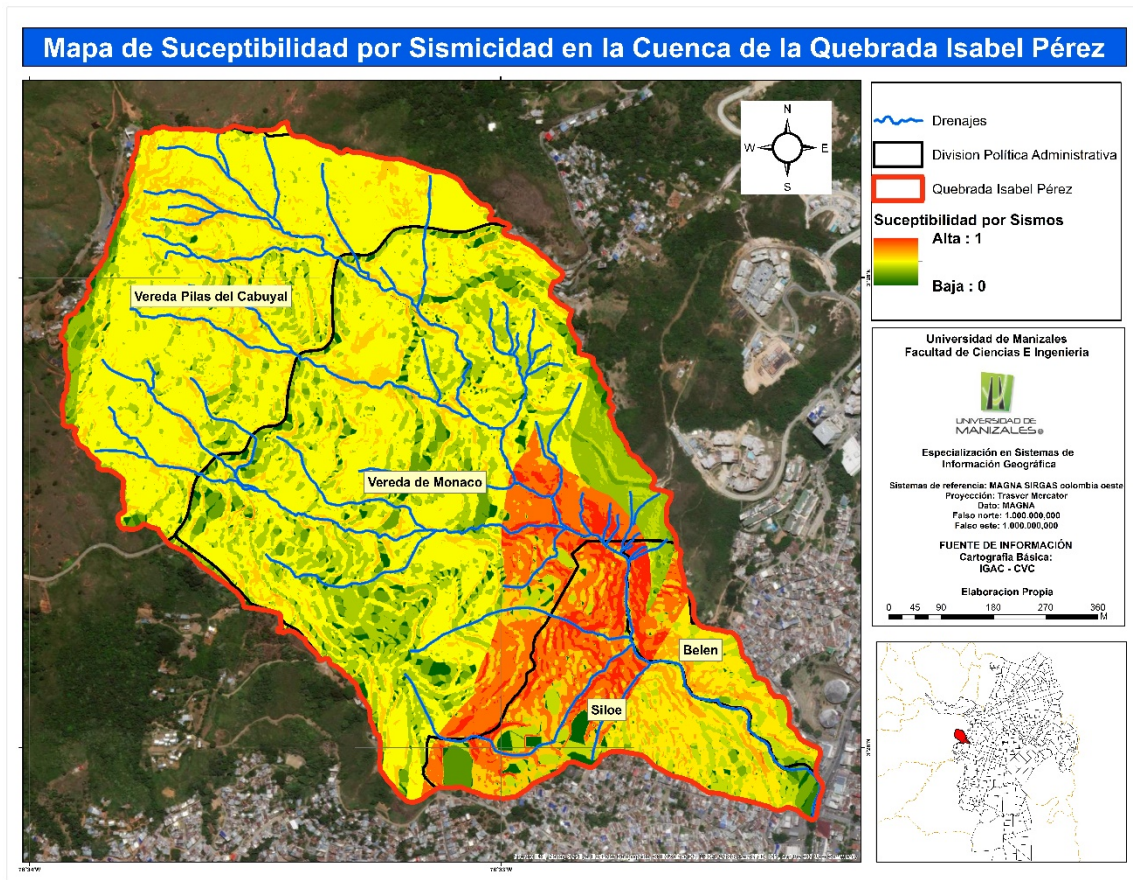
Los reportes por MM en la cuenca Qbd. sugieren que no son comunes procesos de remoción en masa de gran magnitud, por lo cual no se aprecia una afectación severa por parte de estos fenómenos. Las zonas de la cuenca con presencia de MM se distribuyen de manera puntual, en zonas viales. Estos fenómenos van acompañados de reptación terreno, se identifican además cicatrices de deslizamientos cubiertos por vegetación arbórea. Los sitios con reportes de eventos de MM, se caracterizan por presentar unidades geológicas de Formación Volcánica Kv, y Guachinte TOg, en el margen izquierdo de la quebrada. Niveles de susceptibilidad por remoción en masa a partir del factor de sismicidad

### **7.3.1. Niveles de susceptibilidad por remoción en masa a partir del factor de sismo (HS)**

El mapa (Figura 7.8) de susceptibilidad a partir de los factores de disparo permite una zonificación más centralizada que integra el aspecto de intensidad sísmica, por tanto, permite inferir con base a la información macrosísmicas local al tiempo que los factores intrínsecos como la litología, la pendiente y la humedad del suelo. Como muestra de ello, en contraste con el modelo completo (H) (Figura 7.7), se observan mayores zonas con nivel Alto de susceptibilidad, es decir 60,60% del total del área (690139,68 m<sup>2</sup>), distribuyéndose mayormente en la zona rural. El modelo completo de susceptibilidad (H) presenta un nivel Muy alto 16,53% del total de la cuenca, y se concentra en la zona urbana. Por otra parte, el 3,40% (38762,73 m<sup>2</sup>) corresponde a zonas con Muy bajo nivel de susceptibilidad; 4,91% (55872,42 m<sup>2</sup>) con Bajo nivel; 19,91% Moderado (226786,99 m<sup>2</sup>) y 11,18% presenta un nivel Muy alto (127332,54 m<sup>2</sup>) (Fuente: elaboración propia

**Tabla 7.10).**

**Figura 7.8.** Mapa de Niveles de susceptibilidad a remoción en masa por el factor de disparo de Sismos en la cuenca Qbd. Isabel Pérez



Fuente: elaboración propia

**Tabla 7.10.** Niveles de susceptibilidad a remoción en masa por el factor de disparo de Sismos (HS) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez

Clase	Rango	Calificativo	Área m <sup>2</sup>
I	0 - 0,13	Muy baja	38762,73
II	0,13 - 0,26	Baja	55872,42
III	0,26 - 0,40	Moderada	226787,00
IV	0,40 - 0,66	Alta	690139,68
V	0,66 - 1	Muy alta	127332,55

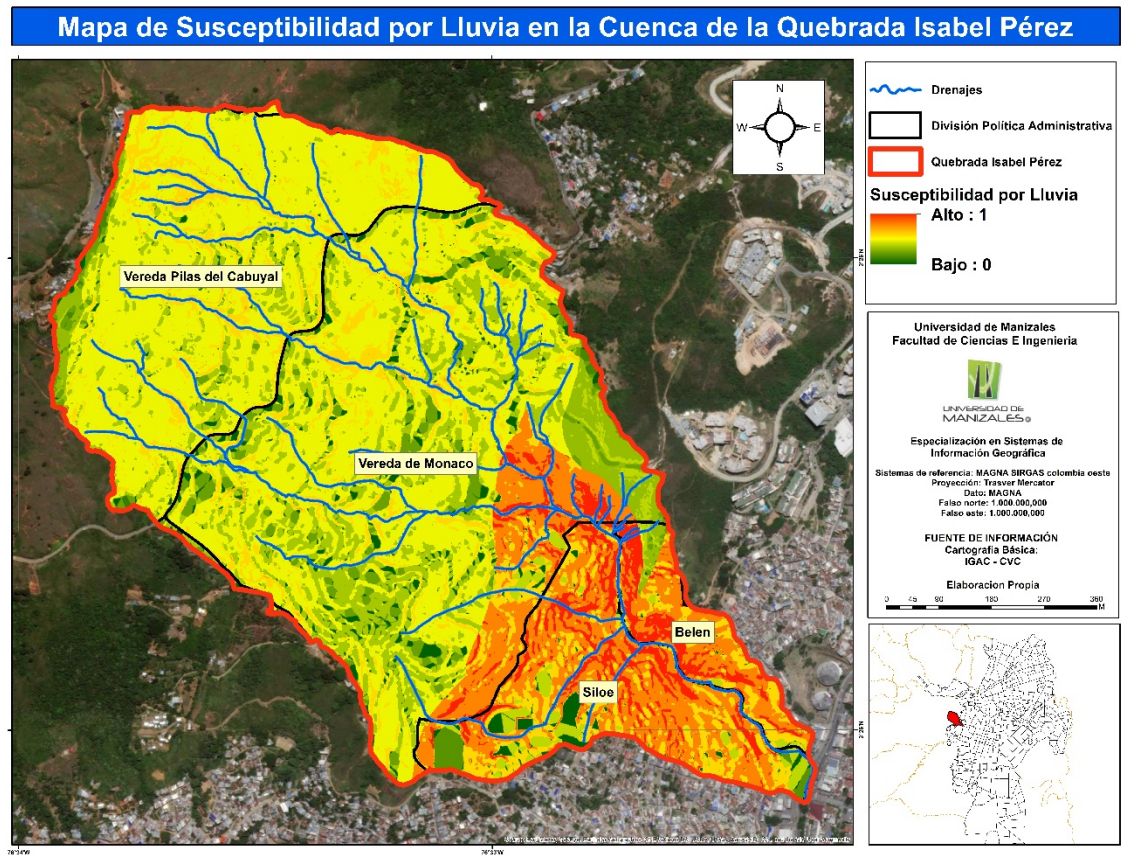
Fuente: elaboración propia

### **7.3.2. Niveles de susceptibilidad por remoción en masa a partir del factor de precipitaciones**

De acuerdo al mapa obtenido para el factor de precipitaciones o lluvias intensas (Figura 7.9), el nivel de susceptibilidad que predomina en la cuenca es Alto, abarcando el 57,39% del total del área de la cuenca (653667,52 m<sup>2</sup>), y se distribuye principalmente en la zona rural de la cuenca, en la zona de mayor densidad hídrica. El 16,53% (188265,81 m<sup>2</sup>) del área de la cuenca presenta un nivel Muy alto de susceptibilidad, abarcando mayormente la zona urbana cercana a la parte norte del barrio Siloé, zona en la que también incide el plano de la falla Inversa Aproximada. Por otra parte, al 18,21% (207358,67 m<sup>2</sup>) del área total posee nivel Moderado; mientras que el 4,71% presenta un nivel Bajo y al 3,16% (35988,08) del total de la cuenca lo corresponde un nivel Muy bajo de susceptibilidad (Tabla 7.11).



**Figura 7.9.** Mapa de Niveles de susceptibilidad a remoción en masa por el factor de lluvias intensas (HII) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez



**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 7.11.** Niveles de susceptibilidad a remoción en masa por el factor de lluvias intensas (HII) en la cuenca Qbd. Isabel Pérez

Clase	Rango	Calificativo	Área m <sup>2</sup>
I	0 - 0,13	Muy baja	35988,08
II	0,13 - 0,26	Baja	53613,39
III	0,26 - 0,40	Moderada	207358,67
IV	0,40 - 0,66	Alta	653667,52
V	0,66 - 1	Muy alta	188265,82

**Fuente:** elaboración propia

De acuerdo con el modelo de susceptibilidad por el factor de precipitación (HII), la lluvia es uno de los principales factores que afectaría altamente la estabilidad de laderas en la cuenca de la Qbd. Isabel, de acuerdo a Cuanalo et. al., las áreas donde se registra mayor precipitación anual presentan mayores problemas de estabilidad debido a la existencia de caudales de flujo subterráneo y materiales meteorizados que inciden en el terreno, en relación con esto, las zonas con niveles altos y moderados de susceptibilidad presentan promedios de precipitación anual (mm) que oscilan entre 1610 mm a 1560 mm.

#### **7.4. Análisis de los elementos expuestos presentes en la zona susceptibles por fenómenos de remoción**

El análisis de elementos expuestos presentes en la zona, se realiza principalmente a las edificaciones y predios expuestos en la cuenca de la quebrada Isabel Pérez. De acuerdo con la distribución espacial predial de la cuenca (Tabla 7.12), hay un total de 2 barrios expuestos ante un evento por remoción en masa, con 721 predios en exposición Alta, de las cuales la mayoría pertenecen al barrio Siloé (470 predios), 250 en Belén y 1 predio en zona rural. En el nivel Medio, se encuentran expuestos 369 predios, 198 en Siloé, 169 en Belén y 2 en zona rural.

**Tabla 7.12.** *Número de predios por barrios expuestos a remoción en masa en la cuenca Qbd. Isabel Pérez*

Barrio	Número de predios		
	Exposición Alta	Exposición Media	Total
Siloé	470	198	668
Belén	250	169	419
Zona rural	1	2	3

---

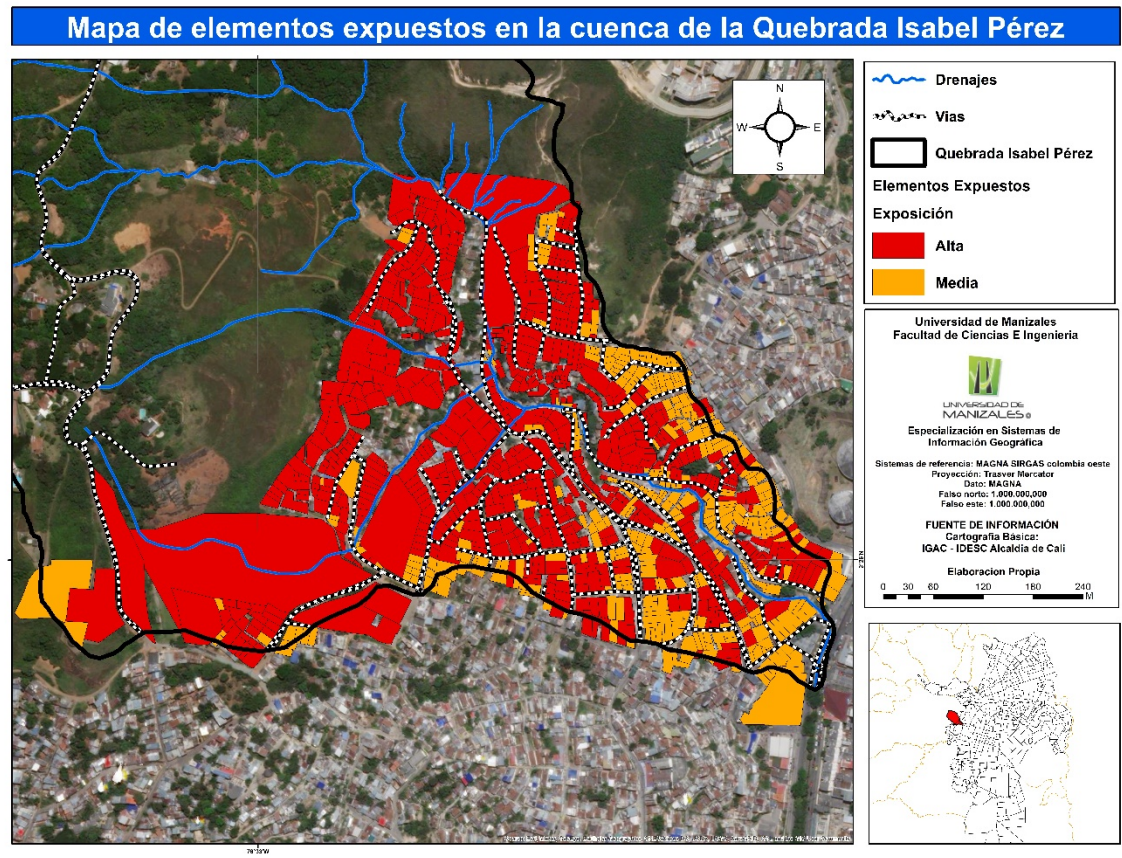
Barrio	Número de predios		
	Exposición Alta	Exposición Media	Total
Total	721	369	1090

**Fuente:** elaboración propia

De acuerdo con CVC y UNIVALLE (2019), la zona de influencia de la cuenca de la Qbd. Isabel Pérez, comprende un total de 5 barrios expuestos ante una eventualidad inundación, fenómeno que por las características pluviométricas y de susceptibilidad por lluvias intensas, podría repercutir eventualmente en procesos derivados como Avenidas torrenciales, deslizamientos y MM. Los barrios expuestos son Siloé, Belén, La Nave, Unidad Residencial Nueva Granada y Lido con 101 edificaciones en exposición alta, (55 en Belén y 43 en Siloé, y 2 edificaciones en susceptibilidad media (una en Siloé y otra en Nueva Granada) (Figura 7.10).



**Figura 7.10.** Mapa de predios expuestos a remoción en masa en la cuenca Qbd. Isabel Pérez



**Fuente:** elaboración propia

El área construida expuesta a MM es de 39930 m<sup>2</sup>, es decir el 3,50% de la cuenca, en donde 20973 m<sup>2</sup> corresponden a un nivel Alto y 18957 m<sup>2</sup> a un nivel Medio. A nivel vial, en el área de la cuenca se encuentran expuestas 11,60 km de red vial rural, entre las que se destacan la Vía Cristo Rey, y 3 km de vías urbanas expuestas a un nivel Alto, entre las que se encuentran vías arteriales secundarias, vías colectoras y vías colectoras rurales como la Avenida de los Cerros, y la Calle 5.

## 8. Conclusiones

La susceptibilidad de la zona urbana de la Cuenca aumenta en los sectores con mayores registros de precipitación o con mayor intensidad de lluvias, o susceptibles a inundaciones en un periodo de retorno de 100 años. De acuerdo con los mapas de susceptibilidad elaborados, las construcciones y viviendas al margen de las quebradas principales Santa Isabel y Mónaco se encuentran en zonas de alta susceptibilidad a MM.

Los niveles altos de susceptibilidad se evidencian también en la zona de “entamboramiento” de la cuenca, en donde se encuentran también zonas con pendientes con un grado de inclinación entre 30 a 70% y 70 a 140%. La susceptibilidad de la cuenca, esta previamente definida por los efectos de las fallas geológicas existentes a lo largo de las quebradas principales, principalmente del sistema de fallas de Cali-Patía. Es decir que, se presentan los niveles tienden a aumentar en zonas con fracturas de origen tensional que determinan los cauces de las Qbd. Isabel Pérez y Mónaco, así como algunos tributarios, así mismo las zonas que corresponden a la Formación Guachinte, en el barrio Siloé, condicionen la salida da drenaje y desembocadura de la cuenca.

El uso de los sistemas de información geográfica (SIG), son herramientas que favorecen a la automatización de metodologías como la sugerida por Mora (2004) y Mora y Vahrson (1993), para la definición de la susceptibilidad por fenómenos de MM, ya que agilizan procesamiento de datos espaciales empleados en los diferentes índices propuestos, y agiliza la manipulación y el modelamiento espacial entre las capas de información geo ambiental.

Todas las expresiones matemáticas e índices indicados en las metodologías se procesaron de manera esquemática en Model Builder.

En lo que respecta al análisis de elementos expuestos, de los 1090 predios situados en el área de la cuenca expuestos a niveles de susceptibilidad alto y medio, correspondientes a los barrios Siloé y Belén, se puede inferir que por su ocupación incontrolada y localización en la zona de “entamboramiento”, tendrían mayores afectaciones a nivel estructural y por tanto de la población que reside en ellas.

Se concluye finalmente que, aunque existen regionalmente pocos estudios sobre amenaza por MM, es posible que, a través de estudios de los mapas y la cartografía de susceptibilidad, incorporar en los planes de ordenamiento la producción del conocimiento de amenazas para la gestión, creación de planes y programas de prevención y mitigación en las áreas de ladera. Es necesario vincular este tipo mapas con la toma de decisiones frente a la gestión del riesgo en la ciudad de Cali.

## 9. Recomendaciones

En términos generales, se puede deducir que la Cuenca de la qbd. Isabel Pérez es una zona de atención inmediata, especialmente en las zonas con niveles de susceptibilidad Alta, a razón de que la influencia de los demás factores como el régimen de precipitaciones, las unidades geológicas superficiales, la geología estructural y el contexto macrosísmico local, podría desencadenar un evento de envergadura social y ambiental; esto, relacionado con los problemas de habitabilidad del sector, la alta informalidad en la tenencia de vivienda y las condiciones de fragilidad de las viviendas..

Si bien la metodología Mora y Vahrson (1993) y Mora-Vahrson-Mora (2004), son las más adecuadas y de las que mejor se adaptan para estudios de susceptibilidad y riesgo por remoción en masa, se modificaron y ajustaron algunos procedimientos, que se adecuaron a las variables geo ambientales estudiadas en el contexto de la cuenta Isabel Pérez. De acuerdo con lo anterior, el modelamiento de los niveles de susceptibilidad a remoción de masas presentado en este estudio, se basó en la caracterización de variables ambientales de acuerdo a su comportamiento y distribución espacial y temporal en el área de la cuenca, de modo que las áreas de susceptibilidad establecidas, son válidas únicamente para el contexto local de la comuna 20 de Cali.

Para efectos del uso de un SIG, se recomienda emplear información con un nivel de detalle, georreferenciado y confiable, así como insumos digitales recientes de fuentes oficiales, que prevean mayor información y generación de nuevas variables.

Los mapas de susceptibilidad deben proporcionar además información sobre probabilidad de ocurrencia de los remoción. La información histórica aporta al componente de probabilidad los aspectos temporales y de ocurrencia. el establecimiento de la probabilidad de ocurrencia de los remoción durante un período establecido, por lo general, se obtiene de los catálogos de los eventos de remoción históricos. Esto con el fin de construir o identificar a nivel espacial y temporal el tipo de eventos que han ocurrido, sirviendo de apoyo para el análisis de las áreas con mayor susceptibilidad, o para la incorporación de métodos estadísticos probabilísticos, como los mencionados en la revisión de literatura.

---

## Referencias

- Calderón Ramírez, D., y Frey, K. (2017). El ordenamiento territorial para la gestión del riesgo de desastres en Colombia. *territorios*, (36), 239-264.
- Cardona, O. D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. En *Los desastres no son naturales*, p 51-74.
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3), 403-426.
- Chaverri-Molina, I. F. (2016). Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y Universidad del Valle. (2019). Zonificación detallada de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo (V-R) por avenida torrencial e inundación fluvial y pluvial en la quebrada Isabel Pérez del municipio Santiago de Cali. Autores.
- Correa-Muñoz, N. A., e Higidio-Castro, J. F. (2017). Determination of landslide susceptibility in linear infrastructure. Case: aqueduct network in Palacé, Popayan (Colombia). *Ingeniería e Investigación*, 37(2), 17-24.

- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 27-29.
- Cuanalo, O. A., Quezada, P., Aguilar, A., Oliván, A. M., y Barona, E. (2006). Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México. *e-Gnosis*, (4), 0.
- Cuervo, G. V. (1994). Metodología para la cartografía de zonas de susceptibilidad a los deslizamientos a partir de sensores remotos y SIG. En *Boletín Geológico*, 34(1), 59-116.
- Díaz, F. A., Álzate, B., González, A., y Ruiz, G. (2004). Estudio Comparativo de Metodologías de Zonificación de Amenaza por Remoción en masa aplicado al sector rural de Villavicencio [Doctoral dissertation], Tesis de Pregrado en Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Ferentinou, M., y Chalkias, C. (2013). Mapping mass movement susceptibility across Greece with GIS, ANN and statistical methods. En *Landslide Science and Practice*, pp. 321-327).
- Fernández, P. T. (2016). Acerca de los enfoques cuantitativo y cualitativo en la investigación educativa cubana actual. *Atenas*, 2(34), 1-15.

- García Álvarez, G. A., y Rache Rodríguez, J. A. (2018). Zonificación de susceptibilidad a remoción en masa en la microcuenca Tabacal-municipio de la Palma, departamento de Cundinamarca. [Tesis de especialización].
- Hoyos Serrano, M., & Espinoza Mendoza, E. (2013). Estudios descriptivos. *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 33, 1670.
- Irigaray, C., y Chacón, J. (2002). Métodos de análisis de la susceptibilidad a los remoción de ladera mediante SIG. Mapas de susceptibilidad a los remoción de ladera con la técnica SIG. Fundamentos y aplicaciones en España, 21-36.
- Jiménez, J. D. (2012). Remoción de ladera en la vertiente meridional de Sierra Nevada (Granada, España): identificación, análisis y cartografía de susceptibilidad y peligrosidad mediante SIG. [Tesis de maestría], Universidad de Granada]. *Dialnet*.
- López Botero, E. M. (2018). Generación de información primaria para la zonificación de amenazas por remoción en masa e inundaciones en un contexto urbano. [Tesis de pregrado]. Universidad del Valle.
- López, R. E., Zuluaga, A. D., Gómez, F., y Tapia, L. (2020). Aplicación del Método Mora-Vahrson para Evaluar la Susceptibilidad a Deslizamiento en el Municipio de Manaure, Cesar, Colombia. *REDER*, 4(2), p 57-70.



- 
- Mapa Geológico de Colombia 2015. Gómez, J., Montes, N.E., Nivia, Á. & Diederix, H., compiladores. 2015. Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:100 000. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá
- Mora, R. (2004). Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de san José, provincia de san José, costa rica. [Tesis de maestría], Universidad de Costa Rica.
- Moradas, M. R. G., Nicieza, C. G., y de Montes, Y. L. (2000). Obtención del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos con técnicas SIG. En Revista Digital del Cedex, (119), 13-13.
- MZSC, Microzonificación Sísmica de Cali (2005) Mapa unidades geológicas de Cali. MZSC– G1, ESC: 1:20.000, 2005. Disponible en línea en: <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/CALI/MZSC-G1-Geologia.pdf>
- Ozioko, O. H., & Igwe, O. (2020). GIS-based landslide susceptibility mapping using heuristic and bivariate statistical methods for Iva Valley and environs Southeast Nigeria. *Environmental monitoring and assessment*, 192(2), 1-19.
- Paredes, P. C. (2018). La reproducción de la informalidad en el contexto urbano: el caso de la comuna 20 en Cali, Colombia. *Territorios en formación*, (13), 99-113.
- Salcedo Hurtado, Elkin de Jesús and Alvarado Flórez, Carlos Enrique (2007) "Intensidades del sismo de Pizarro - Chocó del 15 de noviembre de 2004 en Cali - Colombia," *Épsilon: Iss. 9* , Article 6.

- 
- Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, L. (2014). Definiciones de los enfoques cuantitativo y cualitativo, sus similitudes y diferencias. En Torres, *Definiciones de los enfoques cuantitativo y cualitativo, sus similitudes y diferencias* en Metodología de la investigación, p. 2-21.
- Sandoval Sierra, E. M., y Ruiz Figueroa, D. (2018). Zonificación de amenazas por deslizamientos a partir del modelo de Mora y Vahrson. *Entorno geográfico*, N° 13, p 114-141.
- Seoane, T., Martín Sánchez, E., Martín, J. L., Lurueña-Segovia, S., y Moreno, F. A. (2007). En Capítulo 3: La investigación a partir de la observación. Estudios descriptivos. Estudios analíticos. *SEMERGEN-Medicina de Familia*, 33(5), 250-256.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), S. G. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por remoción en masa. En *Servicio Geológico Colombiano-SGC*.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en Zonas Tropicales, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. doi:10.2307/210739
- Van Zuidam, R. A. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. *Smits Publishers*, The Hague. 442 p.p.

Vargas Cuervo, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de remoción en masa. Boletín de geología, 22(37).

Vargas, R. (2002). Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos Municipio de La Celia, Departamento de Risaralda. (Informe final). Pereira, Colombia. (En línea) consultado el 16 de octubre de 2016.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.

## Anexos

### Anexo 1. Registro de precipitación media mensual 1968 - 2018

Estación	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Valor Anual	Año de registro	
														Inicial	Final
Cañaveralejo Pg	106,02	101,18	145,71	188,28	176,78	94,98	56,44	58,51	97,88	155,82	160,11	131,87	1473,58	1968	2017
Cañaveralejo-Edificio Cvc	104,58	119,22	140,31	179,30	160,73	97,48	52,22	40,33	92,92	153,18	165,85	126,31	1432,43	1983	2018
Los Cristales	114,20	126,78	175,55	232,09	208,26	117,27	71,46	74,79	119,94	203,08	190,58	146,39	1780,39	1969	2018
Planta Río Cali	80,57	76,36	109,50	152,66	140,67	85,69	49,00	48,73	77,95	134,30	131,18	98,06	1184,66	1929	2018

### Anexo 2. Registro de precipitación máxima 24 horas para un periodo de retorno de 100 años

Estación	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Valor Anual	Año de registro	
														Inicial	Final
Cañaveralejo Pg	38,93	37,82	45,68	47,08	51,54	32,35	25,72	22,26	33,42	41,42	48,80	42,81	38,99	1968	2017
Cañaveralejo-Edificio Cvc	33,37	34,95	37,59	44,39	46,34	34,59	22,22	18,23	29,55	38,78	48,16	39,28	35,62	1983	2018
Los Cristales	38,22	38,52	49,73	54,28	47,98	36,24	26,92	28,21	37,06	48,02	49,35	44,94	41,62	1969	2018
Planta Río Cali	29,00	26,62	32,28	40,47	38,80	31,59	20,02	20,32	27,21	36,50	39,62	35,10	31,46	1952	2018

### Anexo 3. Registro de temperatura

## Quebrada Isabel Pérez, Cali - Valle del Cauca

Estación	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Valor Anual	Año de registro	
														Inicial	Final
Cañaveralejo-Edificio Cvc	25,24	25,26	25,03	24,94	24,65	25,35	25,69	25,63	25,67	24,73	24,44	24,30	25,08	2013	2018
Planta Río Cali	20,75	20,75	20,30	19,80	19,60	19,65	20,10	19,70	18,80	19,30	19,27	19,67	19,81	1972	1974

**Anexo 4.** *parámetro de humedad del suelo  $S_h$  en la cuenca Qbd. Isabel Pérez*

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Suma de valores asignada a cada mes	SH	DH	Max 24 Tr 100
Cañaveralejo Pg	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	8	2	3	202,4
Cañaveralejo-Edificio Cvc	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	8	2	2	182,9
Los Cristales	1	1	1	2	2	1	0	0	1	2	1	1	13	3	2	162,76
Planta Río Cali	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	5	2	2	157,77