

**Formulación de alternativas de mitigación para los fenómenos de remoción en masa
que afectan el área urbana del municipio de Campoalegre, Huila.**

Juan David Rojas Rodríguez

Víctor Manuel Torres Marín

Trabajo de grado

para optar por el título de Ingeniero Civil

Dirigido por:

Livaniel Viveros Rosero

Master en geotecnia

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Programa de Ingeniería Civil

Bogotá D.C.

2020

Resumen

El presente trabajo de grado tiene como fin establecer alternativas de mitigación para fenómenos de remoción en masa que puedan ocurrir en inmediaciones del municipio de Campoalegre, Huila, donde se cuenta con antecedentes de dichos fenómenos, los cuales afectaron a la población e infraestructura. A partir de esto se generó un estudio que parte de la recopilación de información secundaria de fuentes oficiales, para establecer las zonas de susceptibilidad con la aplicación del método de análisis multicriterio y posteriormente hallar la amenaza relativa por precipitación, todo esto desarrollado con los sistemas de información geográfica, para obtener un mapa con las zonas más propensas a presentar deslizamientos por causas de la precipitación, de tal manera se determinan cuatro zonas en donde se ven afectadas comunidades o bienes del municipio y se considera pertinente el implementar acciones encaminadas a minimizar las posibles afectaciones, mediante la elección de soluciones ingenieriles acordes a las características propias de la zona.

Palabras clave: análisis multicriterio, SIG, deslizamientos, alternativas.

Abstract

The purpose of this degree work is to establish mitigation alternatives for mass removal phenomena that occur in the vicinity of the municipality of Campoalegre, Huila, where there is a history of such phenomena, which affected the population and infrastructure. This generated a study that starts from the collection of secondary information from official sources, to establish the susceptibility zones with the application of the multi-criteria analysis method and later find the relative threat due to precipitation, all this developed with geographic information systems. To obtain a map with the area's most prone to landslides due to precipitation, in such a way, four areas where communities or property of the municipality are affected are determined and it is considered pertinent to implement actions aimed at minimizing possible impacts, through the choice of engineering solutions and according to the characteristics of the area.

Keywords: multi-criteria analysis, GIS, landslides, alternatives.

Tabla de contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Lista de tablas.....	6
Lista de figuras.....	8
Glosario.....	9
Introducción	11
Formulación del problema	13
Objetivos	15
General	15
Específicos	15
Justificación.....	16
Estado del arte.....	17
Metodología	23
Obtención de la información secundaria.....	23
Modelamiento de factores condicionantes.....	24
Características morfométricas de la subcuenca.	25
Geología.....	27
Geomorfología	28
Cobertura Vegetal	29

Intensidad sísmica esperada.....	31
Determinación de la susceptibilidad.....	32
Generación del mapa de susceptibilidad.....	35
Validación del mapa de susceptibilidad.....	37
Modelamiento del factor detonante	37
Amenaza relativa por lluvia.....	40
Alternativas de mitigación	41
Resultados.....	43
Análisis de resultados	66
Alternativas de mitigación	68
Conclusiones	80
Referencias	83

Lista de tablas

Tabla 1	<i>Parámetros para clasificar la distancia a fuentes hídricas.</i>	27
Tabla 2	<i>Parámetros para clasificación de características geológicas.</i>	28
Tabla 3	<i>Parámetros para clasificación de pendiente.</i>	29
Tabla 4	<i>Parámetros para clasificación de cobertura vegetal según el NDVI.</i>	30
Tabla 5	<i>Parámetros para clasificación de intensidad sísmica esperada.</i>	31
Tabla 6	<i>Clasificación de prioridades para el método AHP.</i>	33
Tabla 7	<i>Índice de consistencia aleatorio.</i>	35
Tabla 8	<i>Clasificación de prioridades para el método AHP.</i>	36
Tabla 9	<i>Zonificación climática.</i>	38
Tabla 10	<i>Coeficientes de infiltración según cobertura vegetal y pendiente (>50%).</i>	39
Tabla 11	<i>Clasificación de lluvia máxima diaria infiltrada como factor detonante.</i>	39
Tabla 12	<i>Parámetros para clasificación de factor detonante (lluvia).</i>	40
Tabla 13	<i>Objetivos de las alternativas de mitigación.</i>	42
Tabla 14	<i>Resultados de los parámetros morfométricos de la subcuenca.</i>	44
Tabla 15	<i>Proximidad de los materiales a drenajes de la subcuenca.</i>	46
Tabla 16	<i>Geología de la subcuenca.</i>	47
Tabla 17	<i>Tipología de los materiales de la subcuenca.</i>	49
Tabla 18	<i>Litología de la subcuenca.</i>	52
Tabla 19	<i>Pendiente de la subcuenca.</i>	53
Tabla 20	<i>Cobertura vegetal de la subcuenca.</i>	54
Tabla 21	<i>Intensidad sísmica esperada de la subcuenca.</i>	56
Tabla 22	<i>Matriz de comparación de pares, análisis multicriterio.</i>	59

Tabla 23 <i>Matriz normalizada, análisis multicriterio.</i>	60
Tabla 24 <i>Pesos de cada factor condicionante y niveles de consistencia.</i>	61
Tabla 25 <i>Estaciones climáticas y pluviométricas.</i>	62
Tabla 26 <i>Precipitación media y temperatura media.</i>	62
Tabla 27 <i>Precipitación máxima en 24 h para un periodo de retorno de 20 años.</i>	63
Tabla 28 <i>Clasificación de la zona.</i>	64
Tabla 29 <i>Resumen y alternativa de mitigación zona 1.</i>	72
Tabla 30 <i>Resumen y alternativa de mitigación zona 2.</i>	74
Tabla 31 <i>Resumen y alternativa de mitigación zona 3.</i>	76
Tabla 32 <i>Resumen y alternativa de mitigación zona 4.</i>	78

Lista de figuras

Figura 1 <i>Nivel de amenaza relativa por lluvia.</i>	41
Figura 2 <i>Pasos para el modelado de la subcuenca.</i>	43
Figura 3 <i>Mapa elevación y red de drenaje de la subcuenca.</i>	43
Figura 4 <i>Mapa de proximidad de los materiales a drenajes de la subcuenca.</i>	46
Figura 5 <i>Mapa geológico de la subcuenca.</i>	48
Figura 6 <i>Mapa de tipología de los materiales de la subcuenca.</i>	50
Figura 7 <i>Mapa de susceptibilidad litológica de la subcuenca.</i>	52
Figura 8 <i>Mapa de pendiente de la subcuenca.</i>	54
Figura 9 <i>Mapa de cobertura vegetal.</i>	55
Figura 10 <i>Mapa de intensidad sísmica esperada.</i>	56
Figura 11 <i>Mapa de susceptibilidad.</i>	61
Figura 12 <i>Mapa de precipitación infiltrada.</i>	63
Figura 13 <i>Mapa de amenaza relativa por fenómenos de remoción en masa.</i>	65
Figura 14 <i>Mapa de amenaza con las zonas a intervenir.</i>	69
Figura 15 <i>Fotografías de Google Earth® de zonas a intervenir.</i>	70
Figura 16 <i>Perfiles de las zonas a intervenir.</i>	71
Figura 17 <i>Ilustración alternativa de mitigación zona 1</i>	73
Figura 18 <i>Ilustración alternativa de mitigación zona 2.</i>	75
Figura 19 <i>Ilustración alternativa de mitigación zona 3.</i>	77
Figura 20 <i>Ilustración alternativa de mitigación zona 4.</i>	79

Glosario

Susceptibilidad: Se emplea para indicar el nivel de predisposición del terreno a la consecución o no de un fenómeno, que está condicionado por las características intrínsecas del mismo (Lario et al., 2016).

Amenaza: Probabilidad de ocurrencia de un suceso o fenómeno durante un periodo de tiempo en un sitio determinado (Lario et al., 2016).

Detonante: Son los factores que controlan o provocan el cambio en el estado de una ladera, que se analiza desde las características iniciales modificando su estado de esfuerzos (Navarro, 2012).

Precipitación: es la caída de partículas de agua líquida o sólida que se originan en una nube incluyendo lluvia, nieve, granizo, también rocío y escarcha (Sánchez, F. J., 2016).

Cuenca: Unidad fisiográfica superficial, cuyo límite es la frontera o divisoria de aguas de aguas, la red de drenaje transporta aguas, sedimentos y materiales sueltos a un punto específico que posteriormente será conducido a un afluente mayor o al mar (Cervantes, 2008).

Condicionantes: Estado original del talud, que determina la susceptibilidad al deterioro y es inherente a la topografía, geología y características de los materiales y perfiles, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal (Suarez, 1998).

Topografía: Refleja las características morfológicas de la superficie terrestre incluyendo parámetros como la pendiente, altura, amplitud de ladera, entre otros (Mora *et al.*, 1994).

Geología: Es la ciencia que estudia el tipo de material que se encuentra en la ladera, sus propiedades físicas y químicas, resistencia al esfuerzo (Mora *et al.*, 1994).

Meteorización: Permite definir el grado de afectación que tiene el material cuando sufre cambios tanto físicos como químicos de disgregación (Tumbaco Yalamá Eduardo Colón, 2017).

Ángulo de fricción: Es la representación matemática del coeficiente de rozamiento siendo la tangente del ángulo de fricción (Suárez, 2010).

Cohesión: Es el parámetro que mide la cementación o la adherencia que tienen las partículas entre sí por estar en contacto o muy próximas (Suárez, 2010).

Presión de poros: es la presión que ejerce el agua en el espacio dejado por las partículas de suelo (Suárez, 2010).

Esfuerzo efectivo: Es la capacidad de soporte que es asumida por el esqueleto del suelo, este esfuerzo es el que controla el comportamiento al cortante (Suárez, 1998).

Esfuerzo total: Es la sumatoria de todas las fuerzas que se encuentran en el suelo, como la del agua y el esqueleto (Braja Das, 2015).

Geomorfología: Disciplina que estudia los fenómenos que han configurado la superficie terrestre debido a la variación en el balance dinámico, los procesos son constructivos y destructivos (Alcaldía Municipal Campoalegre, 2017)

Erosión: Es el proceso por el cual el suelo se desprende, arrastra y deposita por la intervención del agua y el viento (Suárez, 1998).

Sismo: Definido como un evento que se presenta por los movimientos friccionantes de las placas tectónicas de la tierra donde se libera energía (Suárez, 2010).

Deslizamiento: Es un desplazamiento de una masa de roca, suelo residual o sedimentos de una ladera (Suárez, 2010).

Introducción

Los fenómenos de remoción en masa en Colombia suelen presentarse en mayor medida en zonas de relieve montañoso, al adicionar las características litológicas, como rocas incompetentes, bajos niveles en la compactación del suelo superficial, rocas meteorizadas o fracturadas y las bajas densidades de cobertura vegetal, se induce a la propagación de estos fenómenos.

Para la generación de estos fenómenos, es necesario una combinación entre factores condicionantes y detonantes. Los primeros son características intrínsecas del talud o la ladera, mientras que los detonantes hacen referencia a un evento externo que desencadena el deslizamiento, siendo la precipitación el principal factor detonante. (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

De acuerdo al Sistema de información de movimientos en masa (SIMMA, 2020), el departamento del huila cuenta con 531 registros de movimientos en masa de los cuales 14 registros se presentaron en el municipio de Campoalegre, 13 de ellos en los últimos 10 años. Entre los años 2017 y 2018 existieron deslizamientos de tipo flujo generados por la inestabilidad de las laderas aledañas al casco urbano y a dos cauces que atraviesan al centro poblado. Esto permitió la deposición del material en los afluentes convirtiendo el deslizamiento en un flujo de detritos que sería transportado al municipio causando pérdidas en bienes materiales evaluados en más de dos mil millones de pesos (Diario del Huila, 2017).

Teniendo en cuenta que los deslizamientos una vez materializados pueden continuar en un estado activo, esta vez con resistencias residuales y no picos, conllevan a la reincidencia de un nuevo deslizamiento que ponga en riesgo vidas humanas y bienes materiales. Debido a lo anterior se hace necesario conocer los factores condicionantes y detonantes de la zona ¿cuáles

son las alternativas de mitigación preventivas o correctivas más adecuadas para los fenómenos de remoción en masa detectados en los mapas de susceptibilidad y amenaza a realizar en el respectivo informe?

Para la generación de los mapas de susceptibilidad se hará uso de los SIG y de metodologías como la evaluación multicriterio, ya que esta resulta útil a la hora de evaluar los distintos grados de incidencia de los factores de la zona. Otro de los productos del presente trabajo será el mapa de amenaza relativa con base a la precipitación, que será generado a partir de los resultados del análisis hidroclimático en el software ArcMap.

El proyecto se desarrolló con el fin de implementar metodologías de diferentes autores que en conjunto permitan la identificación de zonas vulnerables frente a fenómenos de remoción en masa para el área de estudio, permita realizar una actualización de los mapas del PBOT del municipio y proponga soluciones ingenieriles para los casos seleccionados.

Las alternativas de mitigación se plantearán para las zonas de mayor amenaza que pongan en riesgo ya sea bienes materiales o vidas humanas identificadas con imágenes satelitales. El impacto que genera el desarrollo de este trabajo no solo está dirigido para el municipio, también lo está para promover el uso de SIG y herramientas de teledetección en el área de la geotecnia, explicadas en la metodología del respectivo informe. El municipio se beneficiará, ya que será posible identificar zonas susceptibles a desarrollar deslizamientos, así como establecer las alternativas para mitigar el fenómeno.

Formulación del problema

El problema en el municipio de Campoalegre-Huila radica en que los fenómenos de remoción en masa comprometen el bienestar de la población y están generando pérdidas de bienes materiales. Se requiere el estudio de los fenómenos de remoción en masa teniendo en cuenta los factores geológicos e ingenieriles que los están causando. En consecuencia, se hace necesario identificar en la zona de estudio las áreas más susceptibles frente a fenómenos de remoción en masa, para proponer alternativas de mitigación adecuadas para los casos más críticos.

En un país como Colombia que presenta relieves de pendientes pronunciadas, diversidad de biomas, altas precipitaciones, variedad de fallas geológicas, materiales térreos propensos a ser vulnerables frente a fenómenos de remoción en masa, frecuencia de sismos entre otros; hace que los deslizamientos se generen diariamente en el territorio nacional, afectando a un número significativo de población. Según el Sistema de información de movimientos en masa (SIMMA, 2020) el departamento del Huila presenta alrededor de 531 registros de movimientos en masa, siendo uno de los departamentos más propensos a presentar dichos fenómenos debido a su relieve, ubicación y clima; albergando todos los pisos térmicos y una gran variedad en los niveles de precipitación. En consecuencia, se genera un mayor grado de exposición de la zona frente al fenómeno mencionado anteriormente.

De la anterior fuente, se identifica que el municipio de Campoalegre-Huila, presentó 14 registros históricos de movimientos en masa, de los cuales 13 sucedieron en los últimos 10 años. Además, el municipio se encuentra ubicado en una zona de amenaza alta frente a fenómenos de remoción en masa de acuerdo al “Mapa Nacional de amenaza por movimientos en masa” del

Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2020). Lo anterior es evidencia de que la zona es propensa a que continúen surgiendo fenómenos de este tipo.

En la consulta bibliográfica, se registra que entre los años 2017 y 2018, el municipio de Campoalegre experimentó distintos eventos de remoción en masa clasificados como flujos, que se generaron debido a la inestabilidad de las laderas más cercanas al municipio y a dos cauces que atraviesan completamente la zona de extremo a extremo (sur oriental- noroccidental). Esto permitió que el material desplazado proveniente de las laderas cayera en los afluentes y lo movilizaran al casco urbano causando daños a viviendas, locales comerciales, infraestructura del municipio y demás, dichos daños fueron evaluados en más de dos mil millones de pesos. Además, fue necesario realizar la evacuación de aproximadamente 2.000 personas para garantizar y mantener su seguridad. Las medidas adoptadas por las autoridades competentes salvaguardaron las vidas humanas (Diario del Huila, 2017). Los antecedentes demuestran que en Campoalegre se evidencia la necesidad de prevención de riesgos, evidenciada en una demanda colectiva contra las autoridades locales, regionales y nacionales, por no realizar acciones pertinentes para prevenir las afectaciones (Areiza, 2018).

Objetivos

General

Formular alternativas de mitigación para las zonas más susceptibles frente a fenómenos de remoción en masa del municipio de Campoalegre Huila.

Específicos

1. Evaluar los factores ingenieriles presentes en la zona de estudio, que intervienen y condicionan el comportamiento de los fenómenos de remoción en masa a través de información secundaria.

2. Generar un mapa de susceptibilidad frente a fenómenos de remoción en masa, bajo la metodología multicriterio “proceso de análisis jerárquico (AHP)” para establecer zonas susceptibles a movimiento de material.

3. Comparar los resultados obtenidos con información suministrada por trabajos e informes que hayan solucionado fenómenos de remoción en masa con características similares al de la zona de estudio para identificar posibles alternativas de mitigación.

Justificación

Debido a la alta amenaza por fenómenos de remoción en masa que presenta la zona de estudio y a la concentración de personas, se hace necesario la intervención ingenieril ya sea mediante planeación, prevención u obras civiles, con el fin de evitar pérdidas humanas, bienes materiales y culturales.

Según el DANE (2019), 26.417 habitantes se encuentran asentados en casco urbano del municipio, a esto se le adicionan una población turística significativa, debido a que el municipio cuenta con festividades de alta tasa de aglomeración. De este número de habitantes se estima que alrededor de 3.000 se encuentran en zona de riesgo por un posible flujo de escombros producidos por un fenómeno de remoción en masa, en proximidades a los afluentes (Areiza, 2018). Los beneficios que presenta el desarrollo de este proyecto no son solo para los habitantes que residen en estas zonas, sino también contribuye a mejorar la planeación del municipio.

Con la generación del mapa de susceptibilidad frente a fenómenos de remoción en masa mediante el uso de sistemas de información geográfica (GIS), el municipio podrá disponer de esta cartografía ya sea para uso del PBOT, estudios específicos o hasta toma de decisiones en primera instancia.

La implementación de este trabajo permite el desarrollo e innovación de futuros estudios, ya que predice las posibles causas y motivos del comportamiento del fenómeno, evidenciados en la interrelación de los factores ingenieriles condicionantes y detonantes realizada mediante el modelo (GIS).

Durante la ejecución del proyecto se tendrá la oportunidad de acercarse a un problema de ingeniería real cuyas alternativas de solución impactan a la comunidad y al medio ambiente.

Estado del arte

En 1964 en la revista *Géotechnique* se presenta la estabilidad a largo plazo de las pendientes de arcillas según Skempton (1964), hace referencia a que cuando se hace un corte, la presión de poros en cualquier punto depende de la posición del nivel del agua subterránea y en mayor medida de la respuesta de la arcilla a los cambios de tensión que se han producido durante la excavación. Con el transcurso del tiempo, las presiones de poros en la arcilla se ajustan gradualmente hasta que finalmente están todas las partes en equilibrio hidrostático con el agua subterránea. Esta es la etapa conocida como la condición de "largo plazo", todas las pendientes naturales se encuentran en esta condición, mientras que en los cortes esta etapa no se alcanza hasta varios meses o años después de la excavación; el tiempo requerido depende principalmente de la permeabilidad de la arcilla. Allí se concluye que la resistencia máxima de la arcilla está definida por el nivel de fisuración y compactación en el que esta se encuentre, además que su resistencia máxima disminuye a una resistencia residual en el momento en que se produzca el deslizamiento.

Prior y Graham (1974) estudian descensos rotacionales y toboganes de escombros poco profundos en la parte sur de Irlanda, donde identificaron laderas conformadas por rocas de la edad carbonífera "lutitas" que se desgastan para producir un suelo rico en arcilla, mediante la realización de pruebas de corte directo hallaron los valores de resistencia para este suelo, donde resaltan la importancia del parámetro de cohesión residual para los cálculos de estabilidad sobre los deslizamientos de tierra según la pendiente, posterior a esto, se realiza el análisis a partir de las pruebas mineralógicas, químicas y geotécnicas en lutitas, con lo cual se concluyó que las fallas en pendientes se asocian con el afloramiento de las lutitas ya que absorben una cantidad significativa de agua causando que la cohesión residual medible disminuya facilitando los

deslizamientos, y según Skempton (1985), cuando se produce una caída en la resistencia al corte de una arcilla se considera que tiene lugar en dos etapas principalmente. Primero, en desplazamientos relativamente pequeños, la resistencia disminuye al valor de "estado crítico", debido a un aumento en el contenido de agua (dilatación

Hutchinson (1983) expresa la importancia de identificar y localizar las superficies de deslizamiento en una masa de suelo. Para esto se proponen 2 grupos a analizar, primero los deslizamientos de tierra en movimiento y segundo los fenómenos estacionarios. Para los deslizamientos en movimiento el análisis comprende de observaciones de la superficie, mediciones directas de desplazamientos bajo la superficie y detección geoacústica principalmente, en los fenómenos estacionarios los métodos incluyen observaciones in situ desde agujeros de acceso, observaciones sobre muestras recuperadas y técnicas geofísicas de superficie y subsuperficial. Este estudio concluyó que es aconsejable emplear una variedad de métodos, sugiriendo la búsqueda de información secundaria accesible y, por lo tanto, más barata. También debe tenerse en cuenta que a menudo existen múltiples superficies de deslizamiento y que es importante asegurar que se encuentre la más baja.

En 1989 se plantea un documento en el cual se describe la aplicación de un sistema de información, categorización y planificación para la detección de deslizamientos de tierra en el sur de Gales. El sistema modela una evaluación geotécnica que describe brevemente el proceso de obtención de conocimiento mediante la utilización de información secundaria obtenida de tres bases de conocimiento, como lo son sitios alejados de deslizamientos de tierra documentados, sitios cercanos a deslizamientos de tierra documentados y sitios en deslizamientos de tierra documentados, además se han formulado opciones de respuesta de planificación para cada

escenario que pueden incorporarse directamente en el marco de procedimiento operado por las Autoridades de Planificación Local (Wislocki et al., 1989).

En el capítulo 8 del libro “Slope instability recognition, analysis, and zonation” se propone una metodología para el análisis, reconocimiento, zonificación de amenaza y vulnerabilidad de laderas. En resumen, brinda la capacidad de clasificar el proyecto a trabajar en escalas seleccionadas, que dependen del alcance, las imágenes satelitales que se tengan y de la extensión geográfica delimitada. Finalmente establece los posibles tipos de análisis con sus respectivas técnicas y características, especificando el tipo de información de entrada necesaria. (Soeters et al., 1996).

Las decisiones en la ingeniería son de vital importancia, por ende, es necesario estudiar metodologías para la implementación de esta, según (Saaty, 2008) el método de la jerarquía analítica (AHP), es una teoría de medición a través de comparaciones por pares de atributos que se basan en los juicios del experto o el desarrollador del estudio, con el fin generar las escalas de prioridad que a su vez miden las distintas variables en términos relativos. Dichas comparaciones se realizan utilizando una escala de juicios absolutos, lo cual representa la relación de un elemento con un determinado atributo. Los juicios pueden ser inconsistentes, por tal motivo esta metodología estipula valores máximos de aceptación a inconsistencias.

Para el mismo año, la doctora María José García en su tesis doctoral “Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos” expone diferentes metodologías para la evaluación de la peligrosidad de un fenómeno de remoción en masa, clasificadas como metodologías geomorfológicas, determinísticas, semicuantitativas, estadísticas y alternativas. Entre las cuales se encuentra la evaluación multicriterio por el método de análisis jerárquico (AHP), establecido entre las metodologías semicuantitativas. El objetivo principal de

esta tesis consiste en investigar y desarrollar la modelización matemática del peligro de los deslizamientos de laderas a escala regional. Abordando el fenómeno tanto con modelos conceptuales como con implementación computacional.

En el trabajo “Geographic Information Systems and geomorphological mapping applied to landslide inventory and susceptibility mapping in El Estado River, Pico de Orizaba, México” se genera una metodología que contempla e integra la información secundaria como cartografía geomorfológica a gran escala con la generación de mapas de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa empleando sistemas de información geográfica (SIG) y el método estadístico de regresión logística múltiple (RLM) (con más de dos posibles resultados). En este artículo se evidencia el análisis que se debe realizar para generar de manera adecuada un inventario de deslizamientos, ya que se contempla la escala multitemporal que combinada con la cartografía morfométrica de la cuenca del río El Estado que produce un resultado con un nivel de confiabilidad válido. La cuenca del río El Estado se ubica al costado suroeste del volcán Citlaltépetl. Debido a su proximidad a esta formación, se aprecia que los factores geológicos, geomorfológicos y litológicos presentan una alta variabilidad estacional en los niveles de precipitación, a tal grado de ser considerada como suelo desnudo o descubierto siendo de esta manera más propenso y que en combinación con las altas pendientes (escarpadas) facilitan los deslizamientos, para determinar el nivel de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en la zona de estudio se generó un mapa donde el inventario de deslizamientos con aerofotografías y la cartografía geomorfométrica fueron los insumos para el modelo SIG y se obtuvo el mapa de susceptibilidad a deslizamientos (Aceves et al., 2016).

El Servicio Geológico Colombiano decide publicar una guía metodológica en la cual se busca evaluar las amenazas por movimientos en masa mediante la realización de estudios de

zonificación a escala nacional, regional y local, para de esta forma generar fuentes de información con las que se pueden tomar decisiones frente a dichas amenazas tanto a nivel urbano como rural. El SGC tiene claro el nivel de complejidad en el entendimiento y representación de las condiciones geoambientales y socioculturales que determinan la estabilidad del terreno, mediante la elaboración de esta guía metodológica busca generar estudios de calidad, garantizando la viabilidad técnica y la replicabilidad de la metodología, la cual se basa principalmente en métodos en donde se emplean Sistemas de Información Geográfica (SIG), que consta de la selección adecuada de la escala de trabajo, los inventarios de procesos morfodinámicos, la información geológica, geomorfológica, de cobertura de la tierra y uso del suelo, como también de los factores hidrológicos y sísmicos de la zona (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Para el año 2017 se desarrolló la tesis “Estudio de susceptibilidad por movimientos en masa en la subcuenca del arroyo Quijorna mediante evaluación multicriterio” (Español Angela, 2017) en donde se hace uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la evaluación, estudio, monitoreo y modelación de los factores condicionantes de un fenómeno de remoción en masa en la subcuenca del arroyo Quiorna-España. La tesis muestra los pasos a seguir para desarrollar y generar un mapa de susceptibilidad de la zona a través del análisis multicriterio y el método de las jerarquías (AHP). Para finalizar, se realizó un análisis enfocado en las precipitaciones máximas de la zona de estudio lo cual queda como insumo para el desarrollo de investigaciones en estudios de peligrosidad.

En el presente año (2020) se publicó el estudio “A GIS-physically-based emergency methodology for predicting rainfall-induced shallow landslide zonation” que propone un enfoque original para predecir los riesgos de deslizamiento traslacional superficial, que se desencadenan

por eventos de lluvia irregulares, a través del método de zonificación a escala regional en situaciones de emergencia. El modelo propuesto incorpora el método de pendiente infinita en un SIG que es capaz de evaluar peligros y riesgos asociados con la inestabilidad de taludes, La finalidad del trabajo consiste en proporcionar una herramienta rápida para gestionar emergencias y predecir deslizamientos poco profundos inducidos por lluvias. Este método proporciona mapas de riesgos, incluida la zonificación basada en un factor de seguridad hacia deslizamientos de tierra poco profundos, donde las condiciones estables e inestables (dependiendo de la precipitación) están determinadas para el manejo de emergencias (Gutiérrez et al., 2020).

Para el IDEAM (2020) los procesos del ciclo hidrológico y su balance conforman el modelo básico para una correcta comprensión del sistema hídrico, así como también las diferentes relaciones existentes entre los componentes de la biosfera (océano y continente); lo cual representa una interacción entre los estados del agua y las condiciones propias del terreno superficial, destacando la importancia de estudiar las condiciones que lo modifican (radiación solar, efectos antrópicos como la contaminación o degradación del ambiente), según Campos (1984) el estudio de la hidrología superficial sirve como base para el diseño de proyectos enfocados en el control y aprovechamiento de los recursos hídricos, teniendo en cuenta las distintas variables que afectan su consumo como el incremento de la población y del mejoramiento de las condiciones de vida de estas. Además de realizar la evaluación de acuerdo a datos de diferentes estaciones con el fin de estimar precipitaciones futuras en lo que se conoce cómo curvas de intensidad duración frecuencia como también los análisis de evapotranspiración de las distintas cuencas, además se recopilan los distintos métodos matemáticos que se emplean para el cálculo de todas las variables que están implicadas en este.

Metodología

Para determinar y evaluar los posibles factores ingenieriles que desencadenan el fenómeno de remoción en masa del área de estudio seleccionada, es necesario definir propiedades y características de la zona como: pendientes, tipo de suelo, geología, hidrogeología, entre otros, para posteriormente predecir el comportamiento del deslizamiento se da inicio con:

Obtención de la información secundaria

La información secundaria son todos los recursos que contienen datos sintetizados y organizados provenientes de información primaria, se debe hacer uso de esta cuando no se dispone de suficientes recursos y la fuente es confiable. La información necesaria para este proyecto se muestra a continuación y se obtendrá a partir del sitio web correspondiente:

- Mapas geológicos y geotécnicos en formato PDF del Plan básico de ordenamiento territorial del municipio (Municipio Campoalegre, 2017).
- Datos meteorológicos en formato ".txt" del Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM, 2020).
- Inventario y registros de fenómenos de remoción en masa en formato "shape" del servicio geológico colombiano (SIMMA, 2020).
- Imágenes satelitales del satélite Landsat 8 en formato ".TIFF" del servicio geológico de estados unidos (USGS, 2020).
- Tectónica del sitio en formato "shape" del servicio geológico colombiano (Servicio Geológico colombiano, 2017).

- Modelo digital de elevación (MDE) del satélite ALOS PALSAR 7 © JAXA / METI 2020.
- División política del municipio, capacidad y uso del suelo formato “shape” del Instituto Agustín Codazzi (IGAC, 2020).
- Parámetros de respuesta sísmica de la norma sismo resistente NSR-10 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Una vez recolectada la información, se realizarán los respectivos procesos y modelaciones para evaluar los factores ingenieriles participantes del fenómeno de remoción en masa.

Modelamiento de factores condicionantes

Los factores que al relacionarse entre sí pueden producir un fenómeno de remoción en masa se conocen como condicionantes y detonantes.

Los condicionantes “son las características intrínsecas del terreno, las cuales influyen en la distribución de esfuerzos, resistencia de los materiales y en la estabilidad del terreno” (Ramírez et al., 2019). Los factores condicionantes a evaluar en este análisis son la geología y tipo de material, cobertura vegetal, drenajes, estructuras lineales, y la geomorfología. Para comenzar, se debe cargar el modelo digital de elevación (MDE) para determinar el área de estudio (subcuenca) con sus respectivos drenajes. posteriormente se evaluará cada uno de los factores mencionados anteriormente, para luego reclasificar sus respectivas capas de 1 a 5 de acuerdo a la susceptibilidad frente al fenómeno de remoción en masa (siendo 1 el más bajo y 5 el más alto) (Saaty, 2008).

Características morfométricas de la subcuenca.

Una vez generada la subcuenca, se procede a calcular las características morfométricas (cota máx., cota min, área, perímetro, tiempo de concentración, pendiente media, índice de compacidad, etc.) seguido a esto, se generan los drenajes con las herramientas de “Hydrology” del software. Se realizará un ordenamiento de los drenajes con el método de Strahler el cual asigna el valor de n a las cabeceras de los ríos, esto se refiere, a los tramos que no se bifurcan aguas arriba. Pero al avanzar aguas abajo, cuando dos tramos de igual orden se unen, forman un tramo de orden $n + 1$ (Mesa, 2018). Esto se emplea para conocer la relación de bifurcación (R_b) que se asocia a cuencas con buen drenaje cuando los valores de R_b son bajos y se calcula con la ecuación 1, para posteriormente evaluar la densidad de drenaje el cual es uno de los parámetros reveladores del régimen y la morfología de la cuenca según Campos (1998), ya que relaciona la longitud de los cuerpos de agua con el área total, dictaminando así, que para valores altos de densidad de drenaje es una cuenca con un alto (buen) nivel de drenaje, y se calcula mediante la ecuación 2.

$$R_b = \frac{n}{n + 1} \quad (1)$$

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} \quad (2)$$

Las características como la densidad de la red de drenaje, la variación en el nivel freático y los aumentos de caudales, son factores condicionantes para la generación de fenómenos de remoción en masa, debido a que propician la erosión y posteriormente el transporte de sedimentos, ya que al aumentar y disminuir el nivel del agua altera las condiciones (presión de poros) de estabilidad de los suelos circundantes (Lara et al., 2008).

Se procede a comparar la forma de la cuenca con la de una circunferencia mediante el índice de compacidad (K_c), cuando el valor tiende a 1 la forma de la cuenca es similar a una circunferencia, estos valores nunca serán inferiores a 1 (Mesa, 2018), la forma de calcular el K_c es mediante la ecuación 3 donde relaciona el perímetro y el área de la cuenca.

$$K_c = \frac{0,28 * P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

Se continua con la determinación del tiempo de concentración el cual hace referencia al tiempo de viaje de una gota de agua que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de cierre de la misma (Consortio POMCA Quindío, 2017). Para la determinación del tiempo de concentración se pueden emplear distintas ecuaciones empíricas disponibles en la literatura, en este caso se usará la fórmula de Témez (1978) la cual emplea la longitud (L_c) y la pendiente media del cauce principal (S_o), como se evidencia en la ecuación 4.

$$T_c = 0,3 * \left(\frac{L_c}{S_o^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (4)$$

Teniendo modelada la red de drenajes en el software, se procede a evaluar la influencia de estos dentro del fenómeno de remoción en masa, para la aplicación en este proyecto se tiene en cuenta la ronda hídrica estipulada por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM, 2016) y el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio de Campoalegre (2017). La ronda hídrica según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2011) es un área de especial importancia ecológica, estas rondas de los ríos, quebradas, lagos entre otras tienen una amplitud de 30 metros Municipio Campoalegre (2017), y en este proyecto se empleará para evaluar la influencia del cuerpo hídrico en los fenómenos de remoción en masa, de

esta manera se procede a realizar el mapa de distancia a cuerpos hídricos con la herramienta “Distance”. Por último, se reclasifica de 1 a 5, de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1

Parámetros para clasificar la distancia a fuentes hídricas.

Clase	Importancia	Característica
1	Muy baja	> 120 m
2	Baja	90 - 120 m
3	Moderada	60 - 90 m
4	Alta	30 - 60 m
5	Muy alta	< 30 m

Nota. Adaptado del PBOT Municipio Campoalegre (2017).

Geología

La geología según Ramírez et al. (2019) se refiere a las características de los materiales del subsuelo tales como; composición, fábrica (esqueleto, cemento y porosidad), y grado de meteorización; las cuales controlan propiedades físicas y mecánicas como la densidad, cohesión, conductividad hidráulica o ángulo de fricción. Para evaluar este factor, es necesario cargar el mapa de geología y tipología de los materiales proporcionados por el PBOT del municipio, seguido de esto se georreferencia en coordenadas adecuadas como MAGNA-SIRGAS. Una vez georreferenciados los mapas, se procede a digitalizar las unidades geológicas y los materiales presentes en el área de estudio.

Digitalizadas las capas, se procede a realizar la reclasificación de 1 a 5 bajo el siguiente criterio técnico propuesto por Mora et al. (1992) donde los depósitos aluviales jóvenes y los materiales arenosos representan el nivel de susceptibilidad más alto, esto se evidencia en la tabla 2 con la clasificación propuesta.

Tabla 2*Parámetros para clasificación de características geológicas.*

Clase	Importancia	Característica
1	Muy baja	Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo, calizas duras permeables, rocas intrusivas, poco fisuradas, bajo nivel freático basaltos, andesitas, ignimbritas. Características físicas mecánicas: materiales sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevado, fisuras sanas, sin relleno.
2	Baja	Rocas sedimentarias no o muy poco alteradas, poco fisuradas, rocas intrusivas, calizas duras. Características físico mecánicas: resistencia a la corte media a elevada.
3	Media	Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas, niveles freáticos relativamente altos.
4	Alta	Aluviones fluvio lacustres, Suelos piroclásticos poco compactados, rocas fuertemente alteradas.
5	Muy alta	Materiales aluviales, coluviales 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.

Nota. Mora et al. (1992).

Geomorfología

La geomorfología tiene en cuenta los materiales, el relieve, la geometría y demás; ésta influye en el fenómeno de remoción en masa ya que es un conjunto de características particulares de la zona, atribuibles como procesos de formación, alteración, pendientes, planos de discontinuidades etc. Conocer la geomorfología es importante porque permite conocer las condiciones y circunstancias por las que el terreno ha sido afectado y modificado a lo largo del

tiempo, así como sus zonas de debilidad. Para el caso de este trabajo, se evaluará el factor geomorfología mediante la generación del mapa de pendientes del terreno para la subcuenca, de acuerdo al modelo digital del terreno con la ayuda de la herramienta “TIN” del software, seguido a esto se realiza el mapa de pendientes para culminar con la reclasificación de la susceptibilidad de acuerdo al criterio técnico propuesto por Elmes (2006) en la tabla 3.

Tabla 3
Parámetros para clasificación de pendiente.

Clase	Importancia	Característica	Definición
1	Muy baja	< 10°	Ligeramente planas a inclinadas
2	Baja	10° - 20°	Fuertemente inclinadas
3	Media	20° - 30°	Onduladas
4	Alta	30° - 45°	Escarpada
5	Muy alta	> 45°	Fuertemente escarpada

Nota. Elmes (2006).

Cobertura Vegetal

Según Muñoz (2013) la cobertura vegetal es uno de los factores en los cuales se centra la investigación, análisis y control de los recursos naturales, todo esto gracias a las imágenes satelitales que pueden ser recuperadas de las misiones LANDSAT, NOAA, SPOT y CEOS entre otras, las cuales son empleadas para determinar y supervisar el estado de la cobertura vegetal (vegetación), a diferentes escalas ya sea global, regional y local.

La información recopilada de los satelitales es de imágenes multibanda, la cual debe ser tratada, categorizada y agrupada, todo esto para identificar características de un área, mediante la

utilización de índices. Para el análisis de cobertura vegetal se utiliza uno de los índices de vegetación disponible, como es el índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) ya que es el más empleado para las distintas aplicaciones en la ingeniería y la teledetección, esto debido a su facilidad para ser calculado, además de que se dispone de un rango de fijo de variación (entre -1 y $+1$) y se calcula con la ecuación 5 (Muñoz, 2013).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (5)$$

Con el resultado obtenido del NDVI los valores muy bajos inferiores a 0.1, corresponden a áreas urbanas, suelo desnudo o sin vegetación, para valores en un rango entre 0.2 a 0.3 pueden corresponder a áreas de poca vegetación o de cobertura vegetal baja y desde estos valores se obtienen niveles relacionados a pastizales, coberturas forestales y para clasificarlos se utiliza la tabla 4.

Tabla 4

Parámetros para clasificación de cobertura vegetal según el NDVI.

Clase	Importancia	Característica	Definición
1	Muy baja	> 0.5	Bosque denso
2	Baja	0.3 - 0.5	Bosque abierto
3	Media	0.2 - 0.3	Arbustal denso
4	Alta	0.1 - 0.2	Arbustal abierto
5	Muy alta	< 0.1	Tierras desnudas, degradadas.

Nota. Adaptada de Muñoz (2013).

Intensidad sísmica esperada

Un sismo es una vibración en la superficie terrestre, causada por la liberación súbita de energía acumulada en zonas de contacto entre placas tectónicas o en fallas geológicas (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2016). Los sismos pueden ser perceptibles o imperceptibles de acuerdo a su magnitud o intensidad que a su vez dependen de los efectos locales del sitio. Estos efectos definen la respuesta sísmica del suelo en superficie (primeros 30 m), producto de la propagación de las ondas sísmicas a través de los materiales de los cuales está constituido (velocidad de onda), dependen del tipo de suelo y la topografía del terreno (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2016). Por ende, la variación de la intensidad sísmica está en función a la litología.

Para evaluar este factor, se usa el Shape “Intensidad sísmica esperada”, proporcionado por el servicio geológico colombiano (SGC) donde se establecen a nivel nacional aceleraciones PGA y valores de percepción cualitativa de la intensidad esperada. Se extrae la información del shape que le corresponde a la cuenca para finalizar con la reclasificación de acuerdo a la tabla 5 fundamentada en la percepción de la intensidad del movimiento sísmico esperado.

Tabla 5
Parámetros para clasificación de intensidad sísmica esperada.

Clase	Importancia	Característica
1	Muy baja	débil- ligero
2	Baja	moderado
3	Moderada	fuerte
4	Alta	muy fuerte
5	Muy alta	severo-violento

Nota. Servicio Geológico Colombiano (2020).

Determinación de la susceptibilidad

La susceptibilidad es definida según Campos (2014) como la posibilidad de que una zona se vea afectada por un determinado proceso, expresada en grados cualitativos y relativos.

Depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos geológicos, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos. De acuerdo a la revisión de información, la metodología para la evaluación de la susceptibilidad a usar es el análisis multicriterio (García, 2008), debido a que este es de tipo semicuantitativo y heurístico.

La evaluación multicriterio es un conjunto de operaciones matemáticas que se emplean para la consecución de los objetivos propuestos, que en este caso en particular es determinar la susceptibilidad de la zona de estudio, teniendo en cuenta todas las variables que intervienen (Barredo-Cano, 1996). Este método es considerado especialmente útil para la evaluación de la susceptibilidad distintas escalas (1:10.000, 1:25.000 y 1:50.000), en zonas donde no se dispone de datos geotécnicos o hidrogeológicos para la aplicación de métodos determinísticos (Hervás et al., 2002). Se aplicará este método ya que permite la interrelación y jerarquización entre factores condicionantes, con el fin de obtener el aporte de cada uno de ellos en la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.

Para hacer uso de la evaluación multicriterio se requiere emplear el Método AHP (Analytic Hierarchy Process), el cual consiste en la jerarquización de los criterios a evaluar, determinando las variables de mayor incidencia, donde los principios que se emplearan para desarrollar dicha evaluación jerárquica de acuerdo a Saaty (1987) son:

Construcción de las jerarquías: donde el problema es analizado desde los elementos que lo componen. Se procede a establecer las prioridades: se debe asignar la importancia ya sea relativa o absoluta a cada uno de los elementos de la matriz de comparación de pares,

para asignar dicho valor de importancia se emplea la escala de Saaty representada en la tabla 6.

Tabla 6
Clasificación de prioridades para el método AHP.

Clase	Importancia	Característica
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente, (probada en práctica).
9	Importancia extrema de un elemento frente a otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.

Nota. Saaty (1994).

Para efectos de este trabajo, la escala de pesos de importancia relativos se utilizará de 1 a 5 ya que el juicio para establecer las jerarquías entre las variables estará basado en la experiencia recopilada de distintos documentos, el criterio ingenieril y no en pruebas de campo, para valores intermedios de la escala numérica (2,4,6,8), sugiere Moreno (2006) utilizarse en situaciones medias, y las cifras decimales en estudios de gran precisión.

Para generar la matriz A, es necesario realizar las comparaciones entre las variables definidas, siendo W_i el valor dado al elemento (i). Para el elemento W_{ij} , si $i=j$ el valor deberá ser

igual a la unidad (1), ya que se está comparando el factor consigo mismo. Además, se garantiza que $W_{ij} * W_{ji} = 1$. Por tanto, $W_{ij} = (1/W_{ji})$. A continuación, se presenta en la ecuación 6 donde se evidencia la estructura de la matriz de comparaciones pareadas.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & w1/w2 & \dots & w1/wn \\ w2/w1 & 1 & \dots & w2/wn \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ wn/w1 & wn/w2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Seguido a esto, se procede a la normalización de la matriz anteriormente desarrollada, para llevar todos los valores a un rango con el cual sea posible trabajar de manera adecuada. Para llevar a cabo esta normalización se divide elemento a elemento de la matriz entre la adición de todos los valores de la columna j de dicha matriz, el método AHP permite calcular una razón de consistencia para establecer si los resultados del método son consistentes, para ello esta razón, por ningún motivo debe superar el 10%.

Para garantizar que el análisis se a realizado de manera adecuada se emplea la consistencia lógica que consistente en $AW = nW$. Donde W es el vector columna de valores relativos asignados a los elementos, que se obtiene del promedio de todos los elementos de la fila en la matriz normalizada que se presenta en la ecuación 7.

$$\begin{bmatrix} 1 & w1/w2 & \dots & w1/wn \\ w2/w1 & 1 & \dots & w2/wn \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ wn/w1 & wn/w2 & \dots & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w1 \\ w2 \\ \vdots \\ wn \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nw1 \\ nw2 \\ \vdots \\ nwn \end{bmatrix} = n * \begin{bmatrix} w1 \\ w2 \\ \vdots \\ wn \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para medir la razón de consistencia, se utiliza la ecuación 8, donde RC= razón de consistencia, I.C. = índice de consistencia y I.A. = índice aleatorio.

$$R.C. = \frac{I.C.}{I.A.} \quad (8)$$

Para calcular el índice de consistencia se utiliza la ecuación 9, donde n máximo es el máximo valor de la matriz de comparaciones y se calcula con la ecuación 10.

$$I.C. = \frac{n_{max} - 1}{n - 1} \quad (9)$$

$$n_{max} = A\bar{W}^T \quad (10)$$

El índice de consistencia aleatoria se obtiene de la tabla 7, de acuerdo al número de elementos a comparar y es propuesta por García (2012).

Tabla 7
Índice de consistencia aleatorio.

Tamaño de la matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Nota. García (2012).

Una vez calculados los pesos relativos W y comprobado la razón de consistencia del método, se procede a introducir los pesos relativos al software destinados a la generación del mapa de susceptibilidad.

Generación del mapa de susceptibilidad

Una vez obtenidos los coeficientes de importancia de las variables, se hará uso de la herramienta “álgebra de mapas” del software ArcMap, multiplicando las capas reclasificadas de los factores condicionantes, con sus coeficientes de importancia. Este mapa permite la interrelación de dichos factores identificando las zonas más susceptibles, arrojando valores de susceptibilidad que varían de 1 a 5, los niveles de susceptibilidad se representan en la tabla 8.

Tabla 8
Clasificación de prioridades para el método AHP.

Clase	Importancia	Características
1	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 edificaciones
2	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 alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad.
3	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: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, entre otros. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
4	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 de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
5	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.

Nota. Mora et al. (1992).

Validación del mapa de susceptibilidad

Una vez generado el mapa es necesario validarlo mediante un análisis con imágenes Landsat, donde se evaluará las zonas con niveles altos de susceptibilidad contra los registros del SIMMA, comparando si las zonas identificadas como susceptibles en el mapa generado por los autores concuerda con la ubicación de los registros, para de esta manera garantizar que la información que este suministra sea acorde con la realidad.

Modelamiento del factor detonante

Según Guzetti et al. (1999) es necesario evaluar las distribuciones espaciales de lluvia las cuales detonan los movimientos en masa, esto mediante una revisión de las distribuciones de lluvia, donde recopiló los parámetros a tener en cuenta para el cálculo de los umbrales por los cuales se detonan los fenómenos.

Para el desarrollo del factor detonante lluvia se recolecta y analiza la información de estaciones pluviométricas y pluviográficas (IDEAM, 2020) cercanas el área de estudio, con una referencia temporal de 29 años, posterior a esto se efectúa el completado de datos mediante las técnicas estadísticas aplicadas a datos hidrológicos y meteorológicos (HIMAT, 1990), en específico la razón de valores normales.

Una vez obtenidos los valores máximos completos de intensidades anuales para cada una de las estaciones seleccionadas se procede con análisis de frecuencia de la lluvia, considerando para ello una función de distribución de probabilidad de valor extremo como la función Gumbel, para el cálculo de esta distribución se emplean la ecuación 11, donde α y u son factores de forma.

$$F(x) = e^{\left[-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}\right]} \quad (11)$$

Una vez obtenidos los valores de precipitación media anual y temperatura media anual, se continua con el análisis, donde se toman estos valores para clasificarlos según INGEOMINAS (2010) mediante la zonificación climática de acuerdo a la tabla 9.

Tabla 9

Zonificación climática.

		Frio extremo	Muy frio	Frio	Templado	Cálido	
Precipitación (mm)	7000				4	3	Pluvial
	3000	5	5	5	4	2	Muy Húmedo
	2000	5	5	5	3	2	Húmedo
	1000	4	3	3	2	2	Seco
	0	2	2	2	1	1	Muy seco
							1
		6	12	18	24	30	
		Temperatura (°C)					

Nota. Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010).

Una vez calificada la zona mediante la tabla 9, se procede a evaluar el efecto de la lluvia diaria, teniendo en cuenta que según Aleotti (2004) a mayor cantidad de lluvia diaria habrá mayor saturación del suelo, lo que con lleva a una mayor probabilidad de que se generen movimientos en masa, considerando que la precipitación aporta como escorrentía la cual fluye de acuerdo a la pendiente y como infiltración que se analiza mediante la cobertura vegetal presente en la zona de estudio, la pendiente media de la cuenca y el tipo de suelo (semipermeable) como se aprecia en la tabla 10 la cual fue adaptada de (de Azagra Paredes, A. M., 2007) donde se obtuvieron coeficientes de infiltración para la zona de estudio los cuales serán empleados junto a los análisis de los registros de lluvias para un período de retorno de 20 años, para definir los

rangos de importancia de la lluvia máxima diaria infiltrada según su contribución a movimientos en masa, como se representa en la tabla 11 proporcionada por INGEOMINAS (2010).

Tabla 10

Coefficientes de infiltración según cobertura vegetal y pendiente (>50%).

Cobertura del suelo	Tipo de suelo	Coefficiente de escorrentía	Coefficiente de infiltración
Tierras desnudas o degradadas		0.70	0.30
Arbustal abierto	Semipermeable	0.60	0.40
Arbustal denso		0.55	0.45
Bosque abierto		0.50	0.50
Bosque denso		0.45	0.55

Nota. Adaptada de Azagra Paredes, A. M. (2007)

Tabla 11

Clasificación de lluvia máxima diaria infiltrada como factor detonante.

Valores de lluvia Máxima diaria (mm)		Clasificación detonante factores climáticos				
> 220		3	4	4	5	5
150	220	3	3	3	5	5
100	150	2	3	2	4	5
50	100	1	2	1	4	4
0	50	1	2	1	5	5
		1	2	3	4	5
Zonificación climática						

Nota. Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010).

Con el valor de la clasificación de lluvia como factor detonante se procede a reclasificar el mapa mediante la tabla 11.

Tabla 12

Parámetros para clasificación de factor detonante (lluvia).

Clase	Importancia	Característica
1	Muy baja	1
2	Baja	2
3	Media	3
4	Alta	4
5	Muy alta	5

Nota. Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010).

Amenaza relativa por lluvia

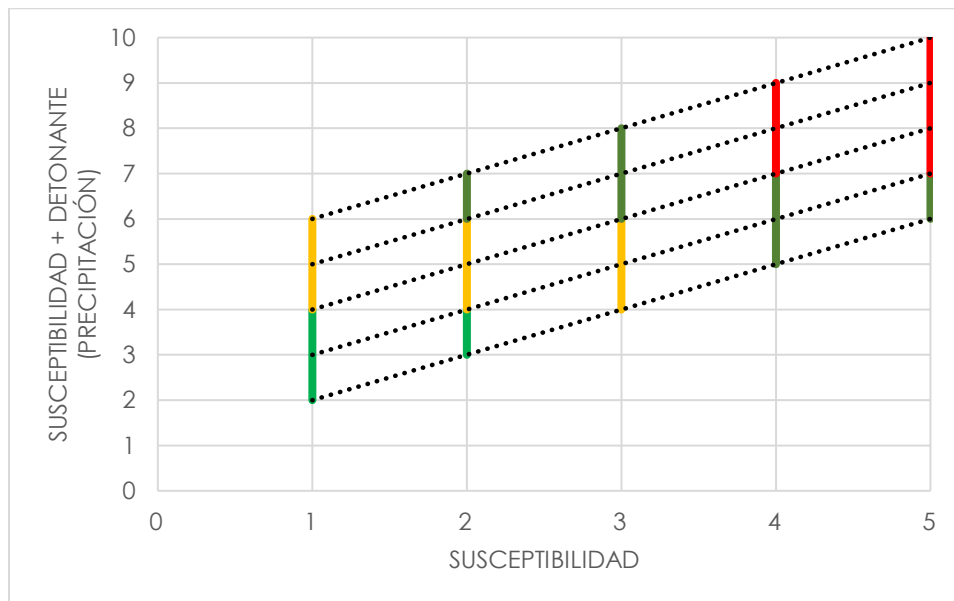
Una vez generado el mapa de susceptibilidad y el análisis del factor detonante lluvia a partir de la zonificación climática y el nivel de precipitación máximo para 24 horas, se aplica una metodología heurística propuesta por el INGEOMINAS (2010), con la cual se busca obtener la zonificación de amenaza relativa por precipitación a fenómenos de remoción en masa, mediante la ecuación 12, donde se obtiene la amenaza mediante la suma de los mapas de susceptibilidad y precipitación.

$$\text{Amenaza relativa} = \text{Susceptibilidad} + \text{Peso del factor precipitación infiltrada} \quad (12)$$

El producto obtenido a partir de la ecuación 12 se clasifica según la figura 1, donde la zona verde representa amenaza baja, la amarilla amenaza media, la naranja amenaza alta y por último la zona roja amenaza muy alta.

Figura 1

Nivel de amenaza relativa por lluvia.



Nota. Adaptado de “documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:500.000” del Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010).

Alternativas de mitigación

Estas acciones buscan reducir la vulnerabilidad física a fenómenos de remoción en masa, para esto se emplean procesos de estabilización que buscan evitar el movimiento potencial de las laderas inestables, si las condiciones de velocidad, volumen y demás lo permiten (Atencia, 2013).

Según Cuanalo (2016) la selección del método constructivo a proponer está condicionado a las características específicas del terreno y del movimiento que en este se pueda presentar, incluyendo volumen a desplazarse, como también la velocidad, la profundidad de la superficie de falla y la geometría de la ladera, además de algunos elementos a considerar como la maquinaria, equipo y materiales en la zona a estabilizar.

De acuerdo a la tabla 12 es posible proponer alternativas según el caso específico estudiado, por lo cual se analiza la zona y se generan alternativas acordes a las necesidades.

Tabla 13

Objetivos de las alternativas de mitigación.

Proceso constructivo	Tipo	Objetivos
Rectificación geométrica	Abatimiento del talud	Disminuir las fuerzas actuantes sobre la ladera y/o aumentar las fuerzas resistentes que se oponen al deslizamiento
	Remoción de cresta	
	Conformación de terrazas	
Elementos de drenaje	Contrapeso	Captar, conducir y eliminar el agua de escurrimiento superficial y/o disminuir la presión neutral o agua intersticial de los poros que afecta la resistencia de los materiales de la ladera
	Zanjas de drenaje	
	Drenes horizontales	
	Pozos de alivio	
	Pantallas drenantes	
Elementos estructurales refuerzo	Galerías filtrantes	Incrementar la resistencia cortante del terreno
	Barrera de pilotes	
	Anclas	
	Gravedad	
Muros de contención	Cantiléver	Soportar la presión que ejercen las masas de tierra o roca inestables
	Contrafuertes o estribos	
	Tierra armada	
Protección superficial	Gaviones	Evitar el caído de los materiales superficiales, reducir la erosión y meteorización, y minimizar la infiltración de agua de escurrimiento
	Mallas metálicas	
	Concreto lanzado	
	Geosintéticos	
	Vegetación	

Nota. Cuanalo (2016).

Resultados

Para la realización de la delimitación de la subcuenca se emplean las herramientas del software ArcMap. En la figura 2 se representan las etapas y en la figura 3 el resultado de esta modelación.

Figura 2

Pasos para el modelado de la subcuenca.

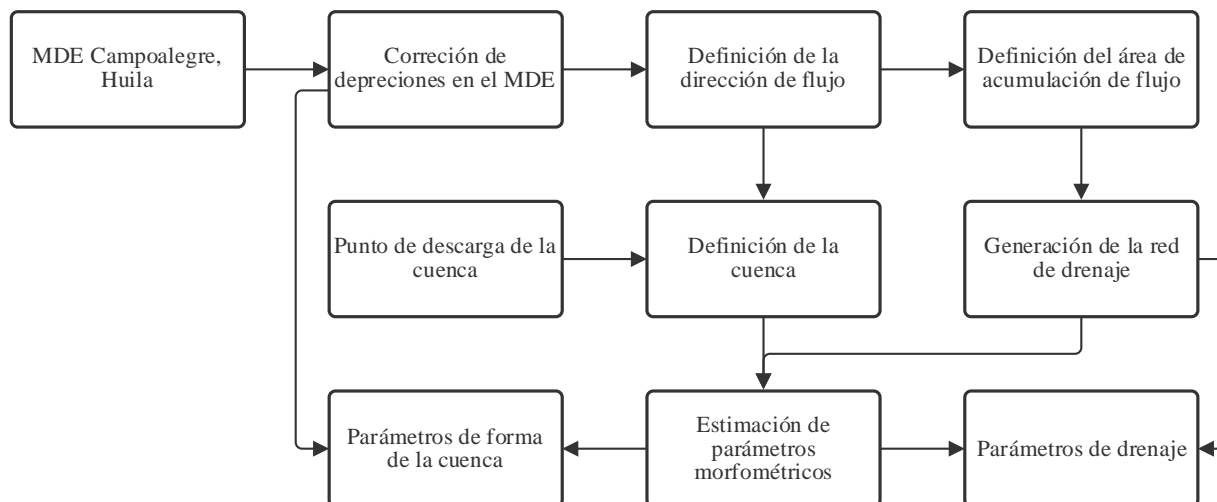
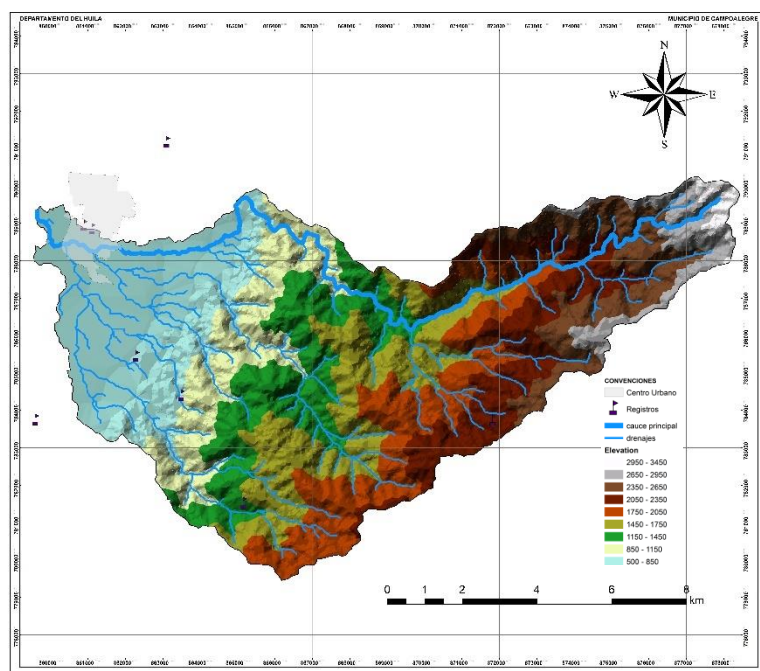


Figura 3

Mapa elevación y red de drenaje de la subcuenca.



Se calculan de los parámetros morfométricos de la subcuenca para obtener información detallada acerca del funcionamiento hidrológico de esta. En la tabla 14 se presenta un resumen de los cálculos obtenidos.

Tabla 14

Resultados de los parámetros morfométricos de la subcuenca.

Parámetro	Valor	Unidades
Área	106.32	km ²
Perímetro	59.08	km
Cota mínima	550	msnm
Cota máxima	3250	msnm
Longitud del cauce principal	28.045	km
Longitud total de drenaje	168.049	km
Pendiente media de la cuenca	62.58	%
Pendiente media del cauce principal	3.51	%
Densidad de drenaje	1.58	km/km ²
Razón de bifurcación	4.06	
Índice de compacidad	1.6	
Tiempo de concentración	2.98	horas

El cálculo de los parámetros como el área y el perímetro, son importantes ya que son los insumos para posteriormente estimar otras variables morfométricas, el área se vincula con la cantidad de precipitación que puede recoger la cuenca, en este caso arrojo un resultado de 106.32 km², además el área en conexión con el perímetro que es de 59.08 km revela la forma de la cuenca.

El orden de la red de drenaje refleja el grado de bifurcación al interior de la cuenca, en este estudio se presentan drenajes hasta orden 5, el cálculo de la razón de bifurcación arrojo un

resultado de 4.06 que considerando las investigaciones desarrolladas por Campos (1998), donde los valores superiores a 4.0 indican un nivel moderadamente alto en la torrencialidad de la cuenca.

La densidad de drenaje de la cuenca es de 1.58 km/km², que según Delgadillo et al. (2008) hace referencia a cuencas con un drenaje moderado, las cuencas que presentan valores elevados en la densidad de drenaje tienen una respuesta más rápida al momento de evacuar altos niveles de precipitación (Campos, 1998).

La longitud del cauce principal es 28.045 km, con una pendiente media de 3.51% clasificándolo como un afluente con pendiente suave según Campos (1998), lo cual está relacionado a la velocidad de flujo de la cuenca y su capacidad para transportar sedimentos.

El índice de compacidad es 1.60 lo que evidencia que la cuenca presenta forma oval oblonga a rectangular según la FAO (1985) que consiste en una menor capacidad de concentrar agua en la parte baja de la cuenca.

El tiempo de concentración de la subcuenca es de 3 horas lo que representa el tiempo necesario para alcanzar el caudal máximo, además se define como el tiempo de viaje de una gota de lluvia que escurre desde el punto más alejado de la cuenca al punto de cierre de la misma (Campos, 1998).

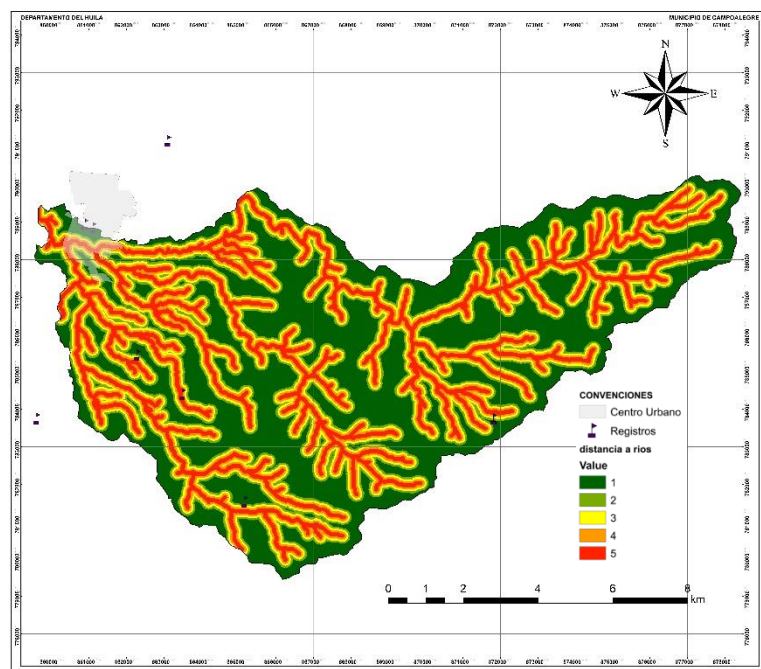
Para evaluar la proximidad de los materiales a los drenajes se entiende como la cercanía en distancia (buffer) de estos a la red de drenaje, la cual se refiere a las posibles líneas de transporte de agua debido a la fuerza gravitacional de la tierra, lo cual condiciona la generación de fenómenos de remoción en masa, debido a que la circulación del agua favorece al transporte del material más cercano a los afluentes (García, 2005). Aproximadamente un 18% del área

superficial de los materiales de la subcuenca se encuentra en zona de alta susceptibilidad por cercanía a drenajes (< 60 m), en la tabla 15 se evidencia el porcentaje y el nivel de susceptibilidad respecto a la cercanía de los materiales a los drenajes que conforman la subcuenca, en la figura 4 se representa de manera gráfica los resultados.

Tabla 15
Proximidad de los materiales a drenajes de la subcuenca.

Valor	Área (km ²)	%	Importancia
1	68,40	64.34	Muy baja
2	8,43	7.93	Baja
3	10,16	9.56	Moderada
4	8,30	7.80	Alta
5	11,03	10.37	Muy alta
Total	106,32	100.00	

Figura 4
Mapa de proximidad de los materiales a drenajes de la subcuenca.



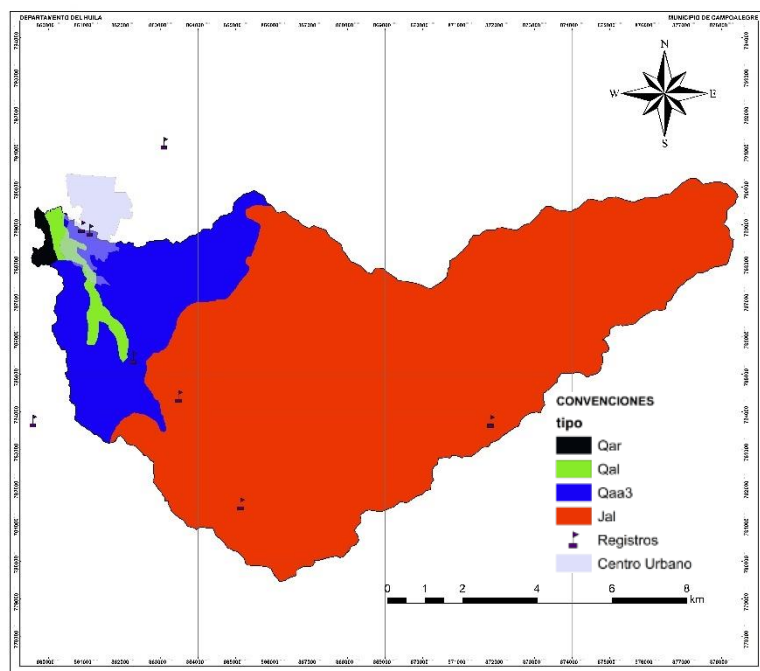
La geología presente en la zona de estudio se puede apreciarse en la figura 5. De acuerdo a lo descrito en la tabla 16, el 81,9% del área de la subcuenca corresponde a un depósito de monzogranito de Algeciras compuesto por material ígneo en su mayoría. El 18,1% restante se compone de abanicos y depósitos aluviales formados a partir del transporte y acumulación de sedimentos provenientes del monzogranito.

Tabla 16
Geología de la subcuenca.

Tipo	Depósito	Característica	Área (km²)	%
Qar	Abanico reciente	Escasa disección, textura homogénea y conservación del ápice. Comprenden los sedimentos transportados como material de arrastre y las terrazas más bajas asociadas a las	0.54	0.51
Qal	Depósito aluvial	corrientes principales, estos depósitos y materiales fluviales varían en granulometría y composición, de acuerdo con la dinámica de la corriente. Conformados por depósitos caóticos de origen fluvio torrencial, que constan de	1.85	1.74
Qaa3	Abanico antiguo poco disectado	fragmentos y bloques sub-redondeados a subangulares clastos soportados y matriz de rocas metamórficas.	16.79	15.79
Jal	Monzogranito de algeciras	Predominan los monzogranito y en menor proporción granodioritas, granitos y dioritas.	87.15	81.97
Total			106.32	100

Nota. Tomado de “Plan Básico de Ordenamiento Territorial” de la Alcaldía Municipal de Campoalegre (2017).

Figura 5
Mapa geológico de la subcuenca.



Nota. Adaptado de “Plan Básico de Ordenamiento Territorial” de la Alcaldía Municipal de Campoalegre (2017).

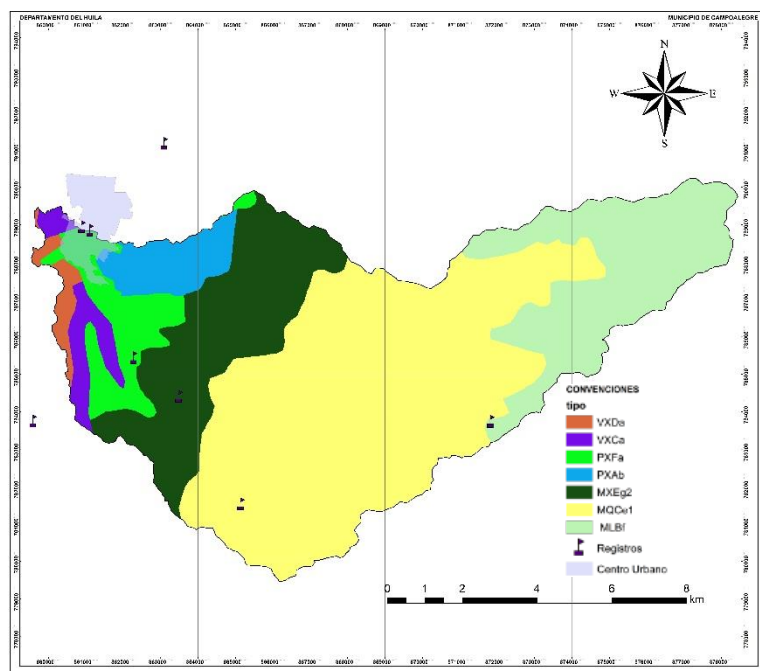
Los tipos de materiales presentes en la subcuenca pueden apreciarse en la figura 6. La tabla 17 representa el porcentaje del área de la subcuenca que ocupan dichos materiales, la subcuenca se compone en su mayoría por rocas ígneas y sedimentarias a partir de las cuales se derivan suelos residuales moderadamente profundos y superficiales (84%). En el restante del área de la subcuenca se asientan materiales aluviales y coluviales que se diferencian entre sí por el tipo de detrito que drena el correspondiente afluente y por el tipo de relieve como se ha formado.

Tabla 17
Tipología de los materiales de la subcuenca.

Tipo	Contenido	Característica del suelo	Área (km²)	%
VXD _a	Depósito aluvial heterogéneo	Superficial y moderadamente profundo, textura fina, acidez neutra, drenaje bueno, fertilidad alta y media.	1.53	1.44
VXC _a	Depósito aluvial grueso	Superficial, textura media, acidez alcalina, drenaje pobre, fertilidad baja	3.01	2.83
PXF _a	Detritos de rocas volcánicas con matriz arcillosa	Superficial, textura fina, ácido, drenaje excesivo, fertilidad media	7.02	6.6
PXA _b	deposito coluvio aluvial heterogéneo	Moderadamente profundo, textura media y fina, ácido, drenaje bueno y fértil	4.78	4.5
MXE g ₂	rocas sedimentarias areniscas tobáceas y arcillolita	Superficial, textura gruesa, fuertemente ácido, drenaje excesivo	18.43	17.34
MQC e ₁	rocas ígneas granodioritas, dioritas, andesitas y ceniza volcánica	Moderado, textura media y fina, ácido, buen drenaje, fertilidad baja	52.34	49.23
MLB _f	rocas ígneas y cenizas volcánicas	Moderadamente profundo y superficial, textura gruesa y media, fuertemente ácido, buen drenaje, fertilidad baja	19.21	18.07
		Total	106.32	100

Nota. Tomado de “Plan Básico de Ordenamiento Territorial” de la Alcaldía Municipal de Campoalegre (2017).

Figura 6
 Mapa de tipología de los materiales de la subcuenca.



Nota. Adaptado de “Plan Básico de Ordenamiento Territorial” de la Alcaldía Municipal de Campoalegre (2017).

De acuerdo a los tipos de materiales y a la geología presente en la zona de estudio, se generó un mapa que se evidencia en la figura 7 que clasifica la susceptibilidad de la litología frente a fenómenos de remoción en masa a partir de la tabla 2 de Mora et al. (1992).

La litología de la subcuenca evidenciada en la figura 7, se compone en mayor magnitud (65%) de roca ígnea granodiorita, andesita y ceniza volcánica, Rocas sedimentarias areniscas tobáceas y arcillolitas. Las rocas ígneas pueden considerarse conjuntos impermeables, pero debido a la meteorización existen diaclasas que contribuyen a la infiltración de agua degradando en mayor medida a la roca, causando erosión y contribuyendo a la susceptibilidad de dicho material.

Las rocas granodioríticas y andesíticas son las que presentan la mayor tendencia a no activar en largos periodos de tiempo las remociones en masa que presentan esta susceptibilidad, por exponer un grado de meteorización y fractura de roca baja, alta cohesión y baja permeabilidad, por lo tanto, el estado litológico es estable (Becerra, 2018).

Las rocas sedimentarias como las areniscas y arcillolitas tienden a producir sedimentos poco consolidados, con baja cementación y erosionables frente a fenómenos atmosféricos (Díaz, 2005). Las cenizas volcánicas son producto de erupciones volcánicas seguidas de una deposición, por ende, su grado de consolidación tiende a ser nulo siendo un material susceptible a remoción en masa frente a factores detonantes como la precipitación.

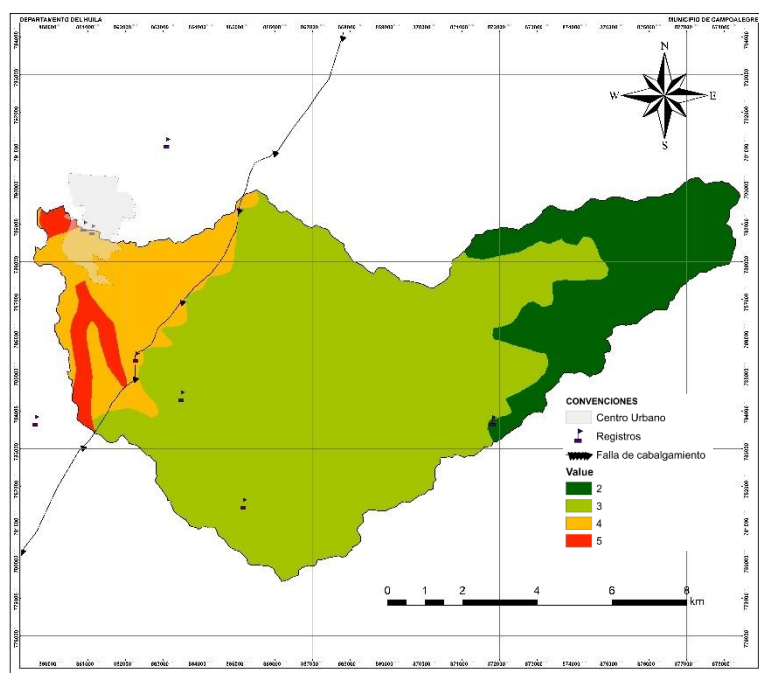
Las arcillolitas son las lutitas con alto contenido de arcilla, lo cual las hace muy físciles y susceptibles a deslizamiento (Suarez, 1998); la subcuenca también está compuesta en una importante medida (12%) por material aluvial proveniente de la zona oeste depositado en forma de abanico. Este depósito está conformado por detritos, rocas volcánicas en matriz arcillosa, aluviones gruesos y sedimentos provenientes de la meteorización y erosión de las rocas más altas.

En menor medida se encuentran los materiales más susceptibles representando un área del 3% aproximadamente. Estos materiales se depositan en forma de terrazas y están compuestos por material aluvial heterogéneo con características similares al de los depósitos en abanico diferenciándose de aquellos, ya que experimentan un drenaje excesivamente pobre posibilitando inestabilidad por incremento de presión de poros en épocas de lluvia, en la tabla 18 se representan las consideraciones finales de la litología de la zona al contemplar la geología y los suelos representados en las figuras 5 y 6 respectivamente.

Tabla 18
Litología de la subcuenca.

Zona	Litología	Área (km ²)	%
2	Rocas ígneas y cenizas volcánicas, suelos areno arcilloso profundos y superficiales, acidez fuerte.	19.21	18.07
3	Roca ígnea grano diorita, andesita y ceniza volcánica. Rocas sedimentarias arenisca tobácea y arcillolita	70.77	66.57
4	Abanicos y terrazas aluviales poco disectados con contenido detrítico, roca volcánica en matriz de arcilla (clasto soportado). Presenta drenajes excesivos	13.33	12.54
5	Depósitos sedimentarios aluviales de carácter actual. El suelo es superficial de textura media, PH básico y drenaje pobre.	3.01	2.83
Total		106.32	100.00

Figura 7
Mapa de susceptibilidad litológica de la subcuenca

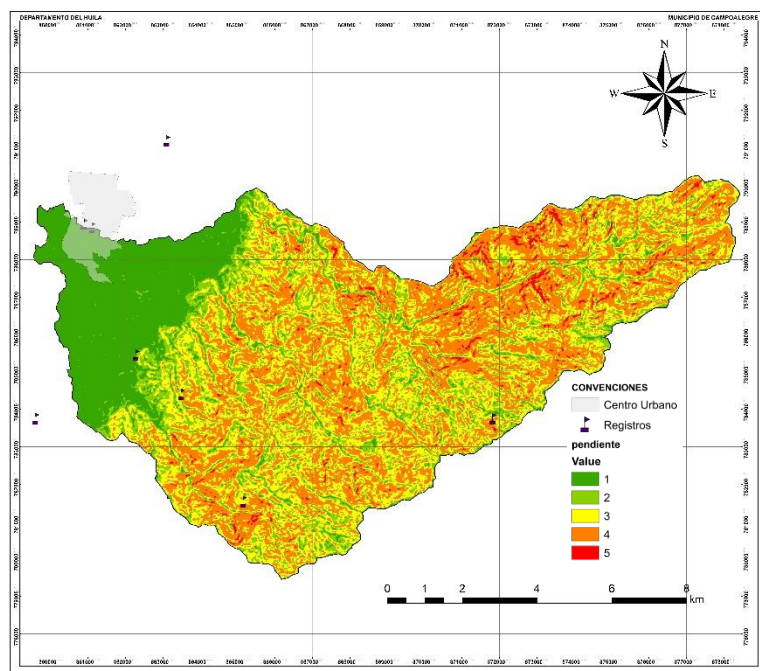


Una vez calculada la pendiente en grados de la subcuenca, se aprecia que las pendientes van desde 0° en el oeste, hasta 75° en el este, plasmado en la figura 8. Seguido a esto se reclasifica de acuerdo a la tabla 3 y el valor porcentaje del área se evidencia en la tabla 19, las pendientes predominantes son las moderadas y fuertes con un 64% del área aproximadamente clasificadas con valores de 3 y 4. Dichas pendientes presentan un mayor nivel de susceptibilidad debido a la posibilidad de presentarse erosiones intensivas, inestabilidad, pérdida de la cobertura vegetal y movimientos en masa.

Tabla 19
Pendiente de la subcuenca.

Valor	Área (km ²)	Área (%)	Pendiente (°)
1	19.66	18.49	< 10
2	15.69	14.76	10-20
3	32.03	30.13	20-30
4	36.97	34.77	30-45
5	1.96	1.85	> 45
Total	106.31	100.00	

Figura 8
Mapa de pendiente de la subcuenca.



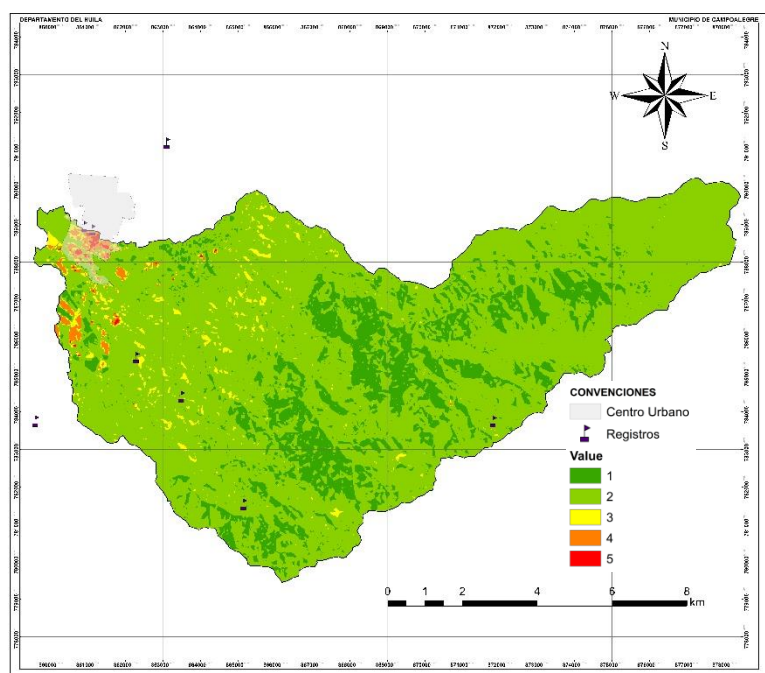
El análisis de la cobertura vegetal mediante la utilización del NDVI arrojó un 98.9% de coberturas en buen estado que fueron reclasificadas como se evidencia en la tabla 20, dejando solo un 1.1% de zonas con susceptibilidad alta a fenómenos de remoción en masa por degradación o pérdida de la capa vegetal del terreno.

Tabla 20
Cobertura vegetal de la subcuenca.

Valor	Área (km ²)	%	Característica
1	18.26	17.20	Bosque denso
2	84.63	79.60	Bosque abierto
3	2.19	2.10	Arbustal denso
4	1.05	1.00	Arbustal abierto
5	0.18	0.10	Tierras desnudas o degradadas
Total	106.30	100.00	

La cobertura es un factor condicionante del ciclo hidrológico, debido a que se ve directamente relacionado a los niveles de infiltración y escorrentía superficial, esto sucede por al aumento de la intensidad y duración de la precipitación, en la figura 9 se representa la importancia de la cobertura vegetal reclasificada de acuerdo a la tabla 4.

Figura 9
Mapa de cobertura vegetal.



De acuerdo al mapa de “intensidad sísmica esperada” del servicio geológico colombiano, el cual fue desarrollado mediante la información de los acelerógrafos ubicados en distintas zonas del país se asume para la subcuenca una aceleración PGA de 0.25 ya la totalidad de la zona se encuentra categorizada bajo una percepción “muy fuerte” y debido a que no se encuentran acelerógrafos en cercanías de la zona de estudio para realizar un análisis más detallado se elige este valor que se representa en la tabla 21.

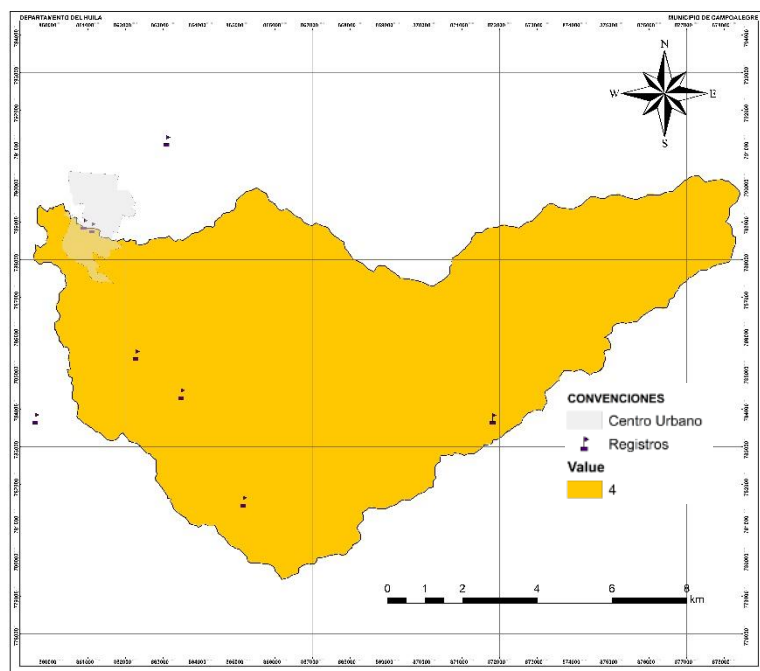
La intensidad sísmica esperada con la que puede llegar el evento sísmico depende en su mayoría de los efectos del sitio. Estos efectos definen la respuesta sísmica del suelo en superficie

(primeros 30 m), producto de la propagación de las ondas sísmicas a través de los materiales de los cuales está constituido (velocidad de onda), (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2016). En la figura 10 se muestra la clasificación de intensidad sísmica esperada en la subcuenca, recopilada del Servicio Geológico Colombiano en el mapa de intensidad sísmica esperada disponible en el Geoportal del SGC (2020).

Tabla 21
Intensidad sísmica esperada de la subcuenca.

Valor	Área (km ²)	PGA	%	Característica
4	106,30	0.25	100	Muy fuerte

Figura 10
Mapa de intensidad sísmica esperada.



Al finalizar tanto el tratamiento como la clasificación de cada uno de los factores condicionantes, se procede con el análisis multicriterio para relacionar y establecer la influencia de cada uno de ellos sobre el fenómeno de remoción en masa, mediante la utilización de la

matriz de comparación de pares representada en la tabla 22, donde se evaluó la proximidad de los materiales a drenajes, litología, pendiente, cobertura vegetal e intensidad sísmica esperada.

Para asignar cada uno de los valores de preferencia de un factor condicionante sobre otro se realizó un análisis entre cada uno de los pares presentado a continuación.

Pendiente-litología: la pendiente tiene mayor importancia a la litología debido a que tenemos un 65% del área de la cuenca con pendientes mayores a 20° y menores a 45° y la litología de los materiales más susceptibles se encuentra alrededor del 15%, además la ubicación de los materiales con litología más susceptible se encuentra sobre las pendientes más bajas (menor 10°), debido a esto se le asigna una ligera preferencia (Valor de 2.0) a la pendiente.

Pendiente-cobertura vegetal: la cobertura vegetal dependiendo de su naturaleza es capaz de mejorar la resistencia al corte de manera adecuada hasta 26°, a partir de este valor, la estabilidad de la cobertura se condiciona a las características propias de la misma (tamaño, profundidad y resistencia al arrancamiento de las raíces). Debido a que se tiene un 65% del área de la cuenca con pendientes entre 20° y 45° se le asigna una ligera preferencia (Valor de 2.0) a la pendiente.

Pendiente-distancia a cuerpos hídricos: En las zonas de mayor pendiente, se le da preferencia a esta ya que aumenta la velocidad de flujo de los afluentes que a su vez genera una mayor erosión debido a la variación del nivel del agua (régimen turbulento). Teniendo en cuenta que el 65 % del área de la cuenca tiene pendientes entre 20° y 45° se le asigna una preferencia moderada (Valor de 3.0) a la pendiente sobre la distancia a cuerpos hídricos.

Pendiente-intensidad sísmica esperada: la pendiente tiene una moderada preferencia (Valor de 3.0) sobre la intensidad sísmica esperada, ya que, con un mismo valor de intensidad

sísmica esperada, los materiales que se encuentran en altas pendientes son más susceptibles a presentar el fenómeno de remoción en masa que los que se encuentran en pendientes bajas. Una razón más es que cuando hay un cambio brusco en la topografía del terreno, los efectos de sitio tienden a aumentar la aceleración del sismo; la falla de cabalgamiento que atraviesa la subcuenca (Potrerillos) genera cambios en la morfología del terreno y en los materiales, incrementando la susceptibilidad de los materiales.

Litología-intensidad sísmica esperada: debido a la erosión presente en la zona, se generan depósitos de materiales poco consolidados sin cementar en la parte media y baja de la cuenca, además, debido al transporte, sus granos son redondeados y subangulares aumentando los vacíos entre las partículas lo que ocasiona que disminuya la fricción entre estas. Adicionalmente se tienen altas aceleraciones PGA que están condicionadas a la geología del material, por ende, se le asigna una ligera preferencia (Valor de 3.0) a la litología frente a la intensidad sísmica.

Litología-distancia a cuerpos hídricos: se asigna una ligera preferencia (Valor de 2.0) a la litología frente a la distancia a cuerpos hídricos, debido a la capacidad de los materiales de soportar la erosión, que está en función a la resistencia mecánica del material, al grado de consolidación y al grado de meteorización en el que el material se encuentre.

Litología-cobertura vegetal: se le asigna una ligera preferencia (Valor de 2.0) a la litología frente a la cobertura vegetal, ya que se evidencia un 97% de la zona con coberturas entre bosque denso y bosque abierto que benefician la estabilidad del material.

Cobertura vegetal- distancia a cuerpos hídricos: se le asigna una ligera preferencia (Valor de 2.0) a la cobertura vegetal frente a la distancia a cuerpos hídricos, de acuerdo a que la vegetación requiere de ciertos recursos (agua y energía solar) para su crecimiento y en las

cercanías a las fuentes hídricas se encuentran las condiciones adecuadas para un desarrollo óptimo. Adicionalmente la cobertura vegetal protege al suelo de ser erosionado, por ende, entre más cerca se esté al cuerpo hídrico mayor densidad de cobertura vegetal.

Cobertura vegetal- intensidad sísmica esperada: se le asigna una ligera preferencia (Valor de 2.0) a la intensidad sísmica esperada frente a la cobertura vegetal, ya que las raíces y la densidad vegetal protegen, confinan y consolidan el material propenso a desarrollar remoción en masa.

Distancia a cuerpos hídricos-intensidad sísmica esperada: se le asigna una ligera preferencia (Valor de 2.0) a la distancia a cuerpos hídricos frente a la intensidad sísmica esperada, ya que las presiones de poros tienden a aumentar en función a la aceleración de respuesta esperada, disminuyendo la resistencia al corte del material que se encuentra cercano al afluente ya que reduce los esfuerzos efectivos posibilitando un flujo de detritos o de lodos.

Tabla 22
Matriz de comparación de pares, análisis multicriterio.

	Pendiente	Litología	Cobertura vegetal	Distancia a cuerpos hídricos	Intensidad sísmica esperada
Pendiente	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00
Litología	0,50	1,00	2,00	2,00	2,00
Cobertura vegetal	0,50	0,50	1,00	2,00	0,50
Distancia a cuerpos hídricos	0,33	0,50	0,50	1,00	2,00
Intensidad sísmica esperada	0,33	0,50	2,00	0,50	1,00

Una vez completada la matriz de pares se procede a normalizarla en un rango entre 0 y 1 mediante la división de elemento a elemento de la matriz de pares entre la suma estos, por ejemplo, el valor de 0.38 de la fila y columna pendiente se obtiene mediante la división de 1.00 entre la sumatoria de la columna pendiente, como se evidencia en la ecuación 7 y los resultados de esto se aprecian en la tabla 23.

Tabla 23

Matriz normalizada, análisis multicriterio.

	Pendiente	Litología	Cobertura vegetal	Distancia a cuerpos hídricos	Intensidad sísmica esperada
Pendiente	0,38	0,44	0,27	0,35	0,35
Litología	0,19	0,22	0,27	0,24	0,24
Cobertura vegetal	0,19	0,11	0,13	0,24	0,06
Distancia a cuerpos hídricos	0,13	0,11	0,07	0,12	0,24
Intensidad sísmica esperada	0,13	0,11	0,27	0,06	0,12

Para finalizar se calculan los valores correspondientes a los pesos de cada uno de los factores sobre el fenómeno de remoción en masa según las ecuaciones 7, 8 y 9 se verifica el nivel de consistencia el cual se obtiene de la tabla 7, como se evidencia en la tabla 24.

Tabla 24

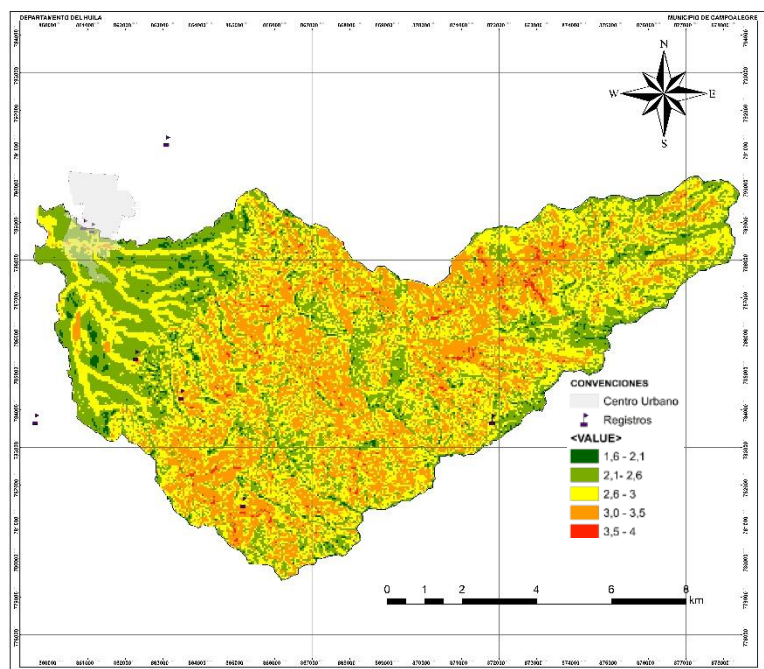
Pesos de cada factor condicionante y niveles de consistencia.

Factor	Peso	Parámetros	
Pendiente	35,8%	n _{max}	5,35
Litología	22,9%	n	5,00
Cobertura vegetal	14,5%	CI	0,09
Distancia a cuerpos hídricos	13,1%	IA	1,12
Intensidad sísmica esperada	13,6%	Rc	0,08

Con la estimación de los pesos de cada uno de los factores condicionantes se elabora el mapa de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, que se aprecia en la figura 11, aquí se aplica un rango en donde evidencian pequeñas alteraciones debido al peso de factores.

Figura 11

Mapa de susceptibilidad.



Realizado el análisis de los factores condicionantes y la elaboración del mapa de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, se continua con la evaluación de los factores

detonantes, en este caso la precipitación que se infiltra, ya que puede reactivar o desencadenar movimientos, dependiendo de la intensidad, el volumen y la duración del evento.

Es debido a lo anterior que se incluye el análisis climático, mediante el tratamiento de los datos de las estaciones de la tabla 25 desde el año 1991 a 2019, recuperados del IDEAM (2020), donde se contempla la precipitación media presentada en la tabla 26, la temperatura media en la tabla 26 y la precipitación máxima esperada para un periodo de retorno de 20 años de cada una de las estaciones en la tabla 27, la cual será multiplicada por el coeficiente de infiltración de la respectiva cobertura vegetal presente en la subcuenca en la tabla 10, para de esta manera obtener los valores de precipitación que se infiltra.

Tabla 25

Estaciones climáticas y pluviométricas.

Nombre estación	Código	Latitud	Longitud	Altitud
El guadual	21110440	2.7957	-75.2393	735
Los rosales	21105050	2.6031	-75.4183	553
Potosí hacienda	21105040	2.6968	-75.2989	680
Nuevo paraíso	21100080	2.6153	-75.2067	1525

Tabla 26

Precipitación media y temperatura media.

Nombre estación	Precipitación media (mm)	Temperatura media (°C)
El guadual	1769.4	24.7
Los rosales	1291.3	25.6
Potosí hacienda	1172.6	25.4
Nuevo paraíso	1250.1	25.1
Promedio	1370.9	25.2

Tabla 27

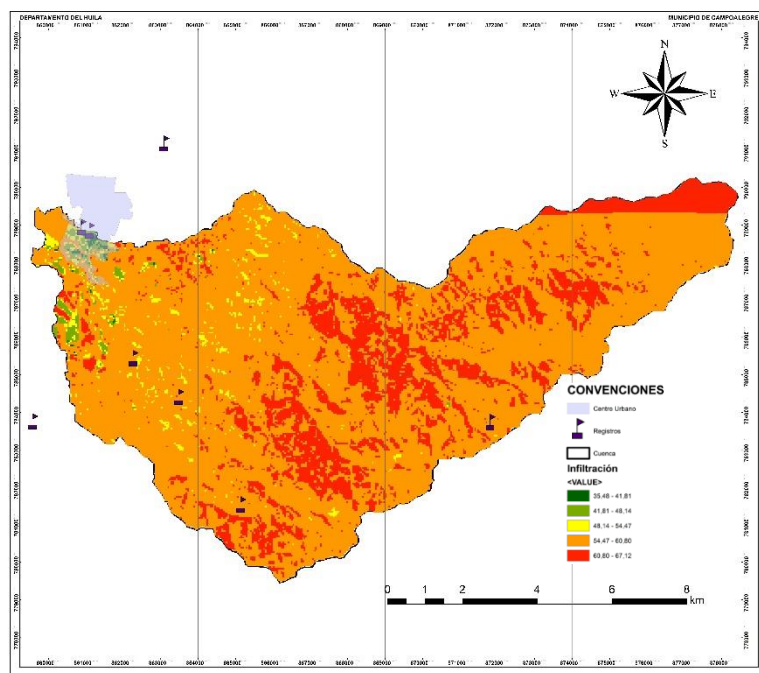
Precipitación máxima en 24 h para un periodo de retorno de 20 años.

Nombre estación	Precipitación máxima (mm)
El guadual	153.6
Los rosales	113.8
Potosí hacienda	118
Nuevo paraíso	110.1
Media	123.9

Se continua con la zonificación climática según la INGEOMINAS (2010) en la tabla 9 y se presenta el resultado en la tabla 28, con la clasificación según la zona climática y la precipitación máxima que se infiltra de la tabla 27 multiplicado por los coeficientes de infiltración de la tabla 10, arrojando como resultado el mapa de la figura 12.

Figura 12

Mapa de precipitación infiltrada.



Se procede a clasificar según la tabla 11, arrojando como resultado una zona con amenaza moderada (2) debido a que todos los valores de precipitación máxima infiltrada de la subcuenca se encuentran en el rango correspondiente a este nivel de amenaza, en la tabla 28 se presenta el resultado de esta clasificación.

Tabla 28

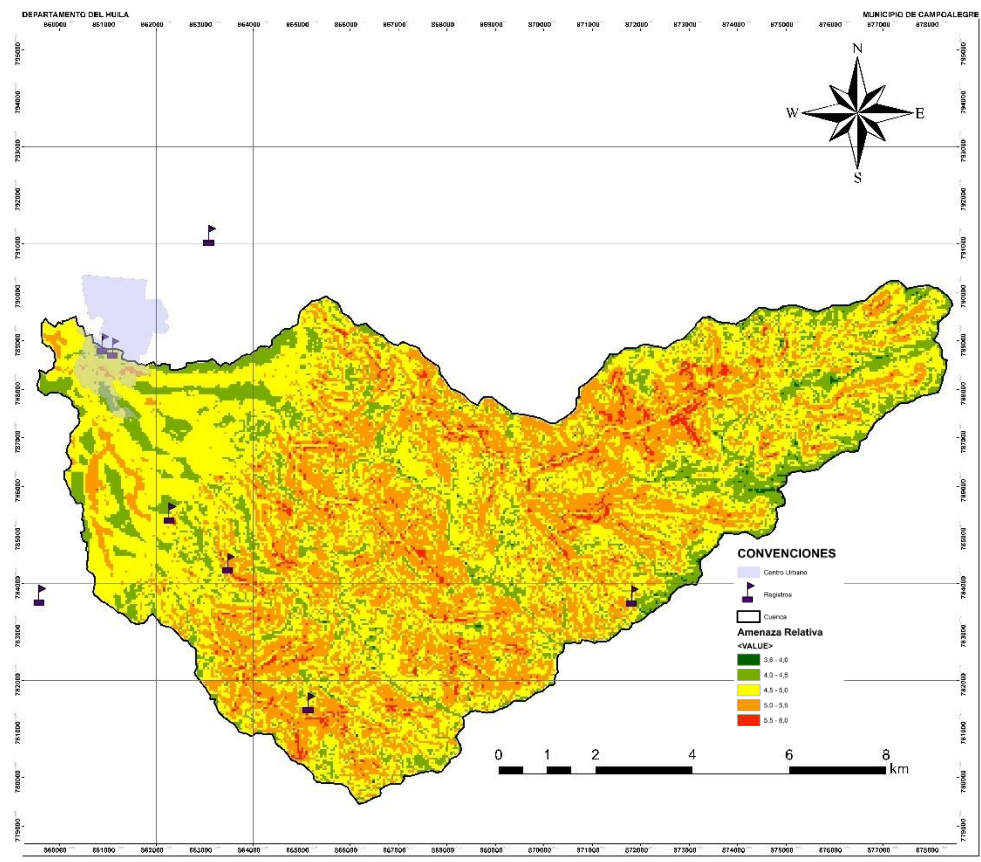
Clasificación de la zona.

	Zonificación climática	Precipitación máxima infiltrada (mm)	Susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa
Subcuenca	2	68.145	2

Para elaborar el mapa de amenaza relativa por lluvias se emplea la ecuación 12, donde se suma el mapa de susceptibilidad a remoción en masa más el mapa de precipitación infiltrada, esto se representa en la figura 13.

Figura 13

Mapa de amenaza relativa por fenómenos de remoción en masa.



Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos, que se encuentran evidenciados en la tabla 16, 17 y en las figuras 5, 6, respectivamente. Se determina que la litología de la zona 2 en la figura 7 proviene de un macizo ígneo andesítico y granodiorítico con acidez fuerte y meteorización moderada de tipo física y química, que produce sedimentos debido a factores meteorológicos y a la acidez del material. Estos sedimentos forman suelos residuales identificados como suelos areno-arcillosos como se aprecia en la figura 6, mientras que los transportados se encuentran en zonas más bajas y son de tipo aluvial y coluvial. Se infiere que las partes bajas son más susceptibles a fenómenos de remoción en masa cuando se analiza únicamente su composición y origen, a su vez las partes altas en combinación con los demás factores condicionantes y detonantes resultan ser más susceptibles a dichos fenómenos (figura 13).

De acuerdo a las características morfométricas obtenidas de la subcuenca (tabla 14), se determina que esta posee un nivel de drenaje fluvio torrencial moderado, capaz de movilizar los sedimentos aguas abajo, formando depósitos aluviales en forma de abanicos y terrazas como se aprecia en la figura 6. El transporte de los sedimentos está en función de la densidad de drenaje de los cauces y de las fuertes pendientes de la zona, lo cual generalmente produce redondez en las partículas, disminuyendo la fricción entre estas, aumentando la porosidad, que dificulta el grado de compactación, por consiguiente, teóricamente el material depositado en cercanías a los afluentes es más propenso a desplazarse, ya que ante un aumento en el nivel del cauce sería fácilmente transportado aguas abajo, llegando incluso a inmediaciones del casco urbano del municipio de Campoalegre.

En las zonas más bajas existen dos tipos de depósitos que se diferencian entre sí por su edad geológica, el primero (zona 4) está compuesto por abanicos y terrazas poco disectadas del

neógeno y el segundo (zona 5) son depósitos sedimentarios actuales del cuaternario. En ese orden de ideas al encontrarse en pendientes similares, el primer depósito (zona 4) tiene un mayor grado de consolidación y cementación que el segundo (zona 5) debido a su edad geológica, haciendo que el depósito sedimentario aluvial más joven sea el más susceptible a fenómenos de remoción en masa.

En las zonas donde la cobertura vegetal de la subcuenca es más densa existe mayor contribución a la estabilidad del material ya que las raíces de las plantas dan soporte y confinamiento, además de protección, porque sirven como barrera entre el suelo y los efectos climáticos como la precipitación, la radiación solar y el viento, minimizando la erosión y el grado de saturación del suelo. De acuerdo a la tabla 24 donde se representan los pesos de los factores que condicionan la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, la pendiente es más de dos veces el aporte de la cobertura vegetal. Es debido a lo anterior que en la figura 13 aunque en la zona presente una densidad de cobertura vegetal adecuada mantiene un nivel de amenaza alto gracias al aporte de la pendiente. En la figura 9 las zonas 3, 4 y 5 presentan deforestación y degradación de la cobertura vegetal haciéndolas más susceptibles a presentar fenómenos de remoción cuando no se analizan en conjunto con los demás factores que condicionan los fenómenos.

Debido a que la percepción sísmica esperada es de magnitud muy fuerte para la subcuenca según el SGC, las zonas con mayor susceptibilidad a remoción frente a este factor son las zonas 4 y 5 de la figura 7 que hacen referencia a depósitos aluviales sedimentarios jóvenes, abanicos y terrazas.

La subcuenca presenta precipitaciones medias multianuales superiores a 1000 milímetros por año en toda la zona. De acuerdo a las curvas IDF, para un periodo de retorno de 20 años la

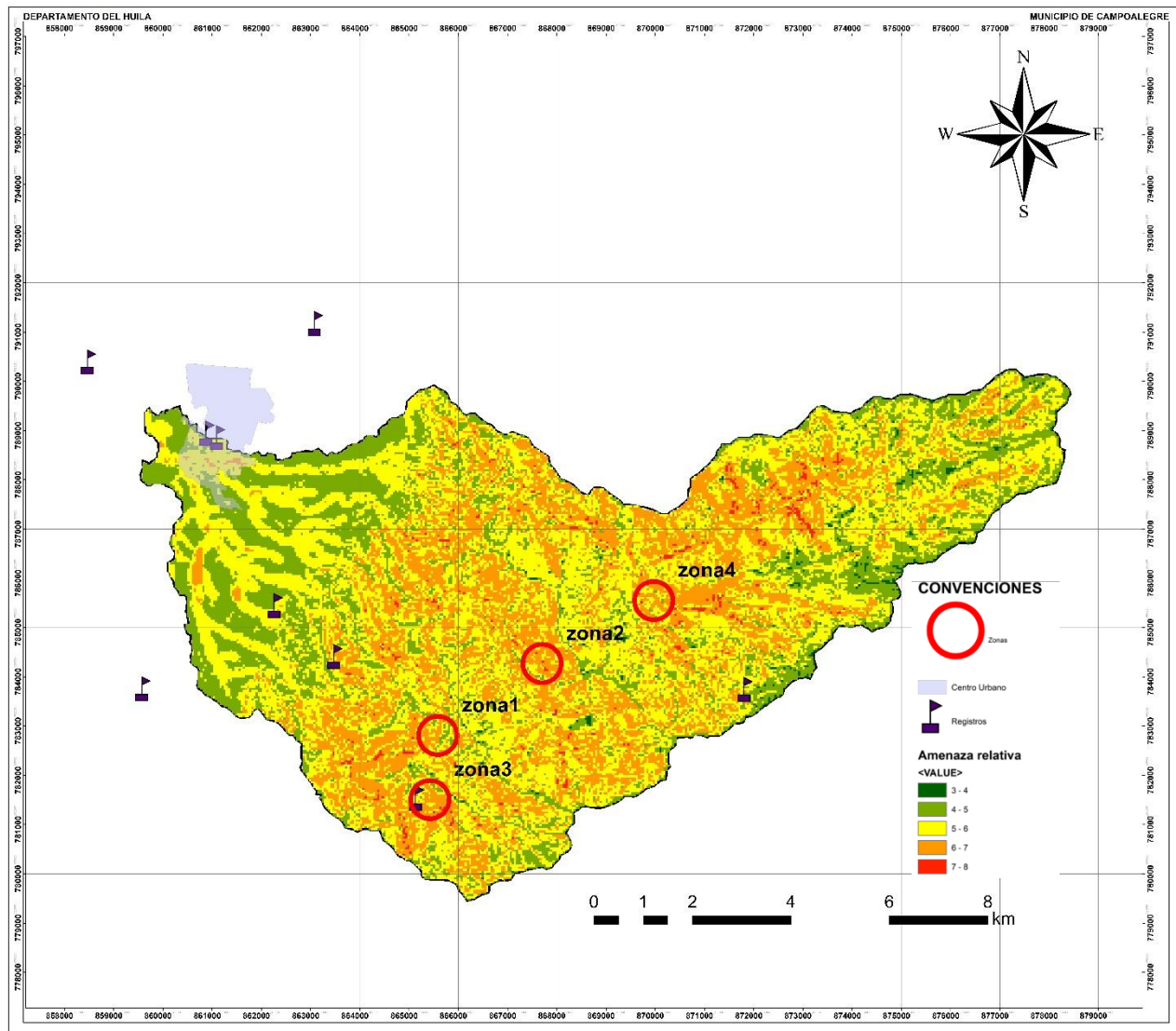
precipitación máxima en 24 horas llega a ser hasta de 155 mm, la totalidad de esta precipitación no ingresa directamente al suelo ya que aproximadamente el 56% se convierte en escorrentía (tabla 10) lo que implica que solo el 44% se infiltra, representando alrededor de 68.4 mm en un evento máximo que en equivalencia con la precipitación media multianual representa un 7% de esta. De presentarse dicho evento en temporada de lluvia, ocasionaría saturación y un aumento significativo en la presión de poros de los materiales (en mayor medida a los que tienen coberturas pobres) permitiendo alcanzar un estado de falla por corte.

Alternativas de mitigación

Teniendo en cuenta que la principal forma de reducir el riesgo es intervenir los factores condicionantes, debido a esto se promueven las siguientes alternativas.

De acuerdo al mapa de amenaza figura 13, existen diversas zonas con amenaza muy alta, lo anterior no significa que sea necesario intervenir la totalidad de dichas áreas, debido a esto, se proponen alternativas de mitigación para las áreas susceptibles que pongan en riesgo vidas humanas, instalaciones de terceros y bienes e infraestructura los cuales se representan en el mapa de la figura 14 y la figura 15.

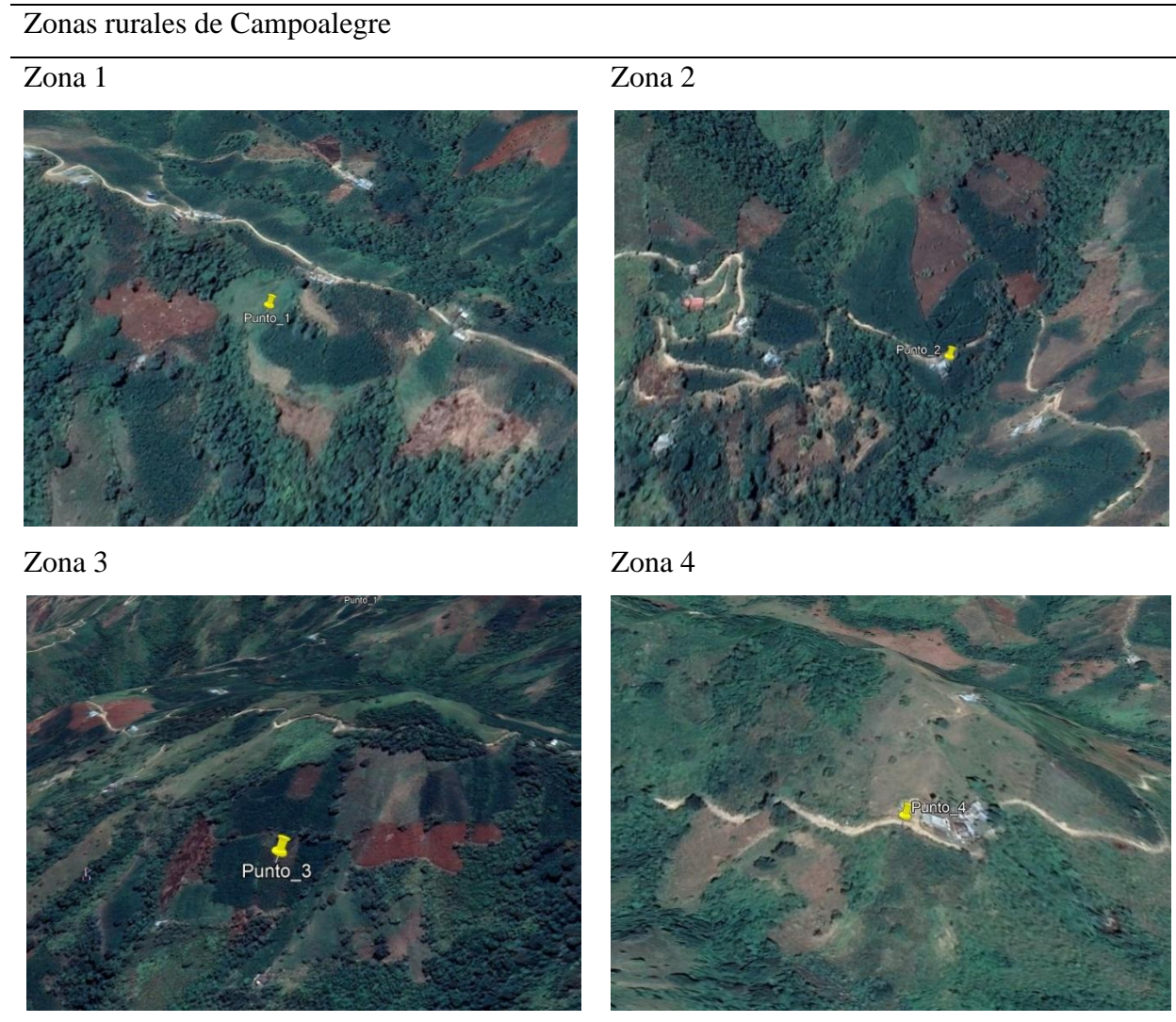
En la figura 13 se puede observar la cantidad de áreas que se encuentran en zonas de amenaza relativa alta y muy alta, por ende, las alternativas de mitigación propuestas estarán en función de la problemática que tenga cada zona respectivamente, en la figura 14 identifican las zonas a intervenir.

Figura 14*Mapa de amenaza con las zonas a intervenir.*

Para cada una de las zonas se identifican diferentes factores que condicionan el fenómeno de remoción en masa, además se propone una alternativa conceptual de mitigación para el posible deslizamiento, en las tablas 29, 30, 31 y 32 respectivamente.

Figura 15

Fotografías de Google Earth® de zonas a intervenir.

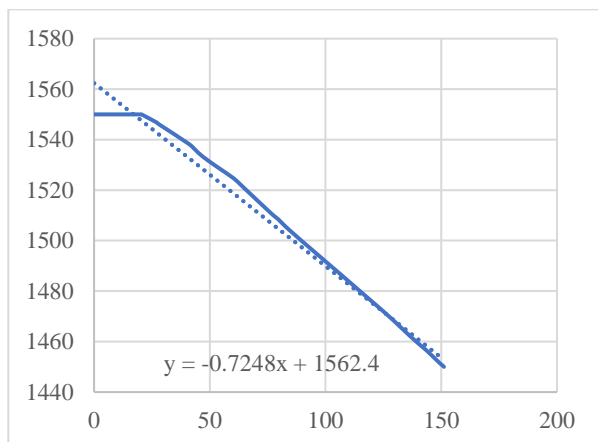


En la figura 16 se aprecia las pendientes de cada una de las zonas a intervenir, con esta información se complementa los datos requeridos para proponer alternativas adecuadas a cada una de estas zonas, de presentarse un fenómeno de remoción en masa en las zonas anteriormente mencionadas podrían transportar los materiales hacia los afluentes y estos a su vez a la zona urbana del municipio, causando afectaciones a la comunidad.

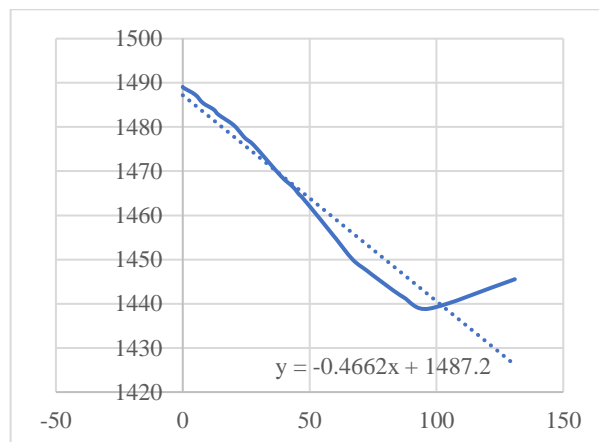
Figura 16
Perfiles de las zonas a intervenir.

Zonas rurales y urbana de Campoalegre

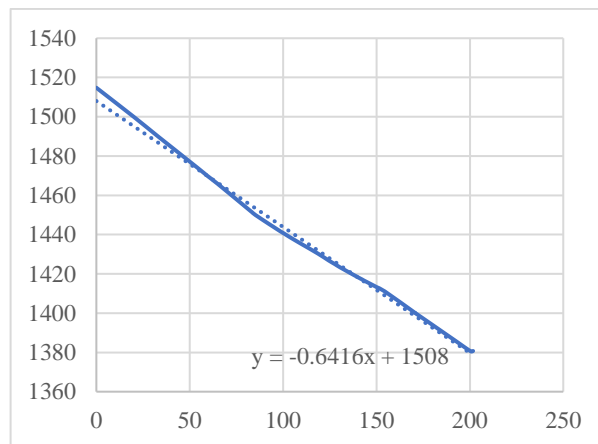
Zona 1



Zona 2



Zona 3



Zona 4

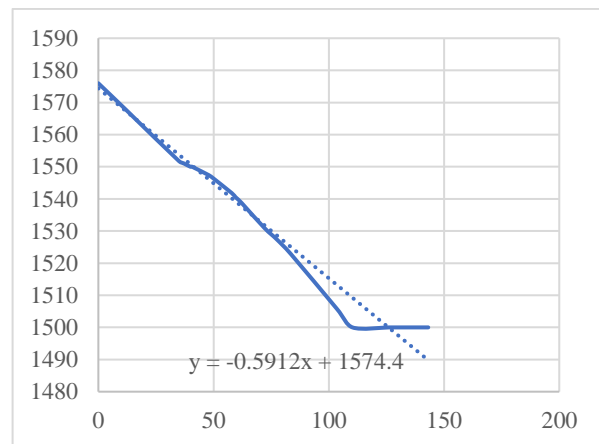


Tabla 29*Resumen y alternativa de mitigación zona 1.*

Litología	Roca sedimentaria (arenisca tobácea, arcillolita) con presencia de roca ígnea (diorita, andesita), suelo areno arcilloso y ceniza volcánica.
Pendiente	35° o 72.4%
Cobertura vegetal	Arbustal abierto
Cercanías a drenajes	> 120 m
Afectaciones	Vía secundaria, viviendas, fuente hídrica.
Infiltración	56.9 mm en 24 horas

Análisis

En la zona se presenta una vía secundaria la cual cuenta con una pendiente media de 14% encargada de comunicar al área urbana del municipio con las zonas rurales y algunas viviendas aledañas a esta. Se evidencia que debido a un posible aprovechamiento del suelo (forestal) por parte de los pobladores que en conjunto con la erosión física producida por el drenaje natural del agua generan degradación de la cobertura vegetal que se puede corroborar en la zona 1 de la figura 15 que se extiende por al menos 1 hectárea. El relieve de la zona (condición escarpada), y la tipología de los suelos superficiales (areno-arcillosos) es propensa a desplazarse debido a su origen aluvial y la pérdida de la cobertura vegetal en el área condicionan la zona a presentar fenómenos de remoción en masa del tipo flujos. En caso de presentarse un evento de precipitación máxima (>100 mm día), la infiltración esperada en el terreno sería de aproximadamente 56.9 mm aumentando la presión de poros en el suelo que, en conjunto con la erosión en la capa superficial desnuda producida por la escorrentía de 44 mm proveniente de las áreas aferentes y las condiciones presentes en el suelo, podrían desencadenar flujos hacia el costado occidental afectando a las viviendas como a la estructura vial.

Alternativa

Debido a las características de la zona y al continuo deterioro de la cobertura vegetal por erosión, se sugiere la implementación de una contra cuneta en concreto impermeabilizado al costado inferior de la vía y un drenaje longitudinal de zanja ubicado debajo de esta. La cuneta debe ser diseñada hidráulicamente para evacuar aguas de escorrentía de las áreas aferentes superiores de la ladera con una longitud de al menos 294 de acuerdo a la ilustración presentada a continuación. El drenaje longitudinal debe tener de 1 a 1,5 metros de profundidad, el tubo debe ser perforado y su

diámetro debe suplir la demanda de agua de infiltración del evento máximo calculado producto de las áreas aferentes superiores, adicionalmente, debe estar relleno con un material filtrante debidamente compactado como se muestra en la figura 17. Para las áreas con degradación de cobertura vegetal se propone sembrar especies aptas para las condiciones de la zona y biomantas de fibra de coco sujeta por una red hexagonal de doble torsión debido a las altas pendientes de dicho lugar. Lo anterior para evitar la erosión que producen las aguas lluvias.

Figura 17
Ilustración alternativa de mitigación zona 1



Tabla 30*Resumen y alternativa de mitigación zona 2.*

Litología	Roca sedimentaria (arenisca tobácea, arcillolita) con presencia de roca ígnea (diorita, andesita), suelo areno arcilloso y ceniza volcánica.
Pendiente	25° o 46%
Cobertura vegetal	Arbustal denso a arbustal abierto
Cercanías a drenajes	< 60 m
Afectaciones	Población, viviendas, banca de vía.
Infiltración	64.9 mm en 24 horas

Análisis

En la zona se encuentran ubicadas algunas viviendas y en cercanías se encuentra una vía terciaria de acceso, se evidencia deterioro en la cobertura vegetal y lo que pueden ser posibles deslizamientos traslacionales hacia la parte occidental (figura 15, zona 2) justo debajo de la vía, esto debido al cambio en la cobertura vegetal del suelo que puede estar influenciado por el aprovechamiento del mismo para beneficios del ser humano o por los deslizamientos antes mencionados, la zona se encuentra en proximidades a redes de drenaje natural ocasionando erosión en los materiales más cercanos o donde se presente ausencia de la cobertura vegetal. El material que se encuentra en la parte superior de la vía (oriental) carece de áreas con cobertura vegetal óptima, que, en conjunto con la pendiente ondulada, el tipo de material presente y la dinámica de la escorrentía permite que mucha más cantidad de agua llegue a la parte baja además se infiere que la vía que pasa por la zona funciona como canal de transporte de agua, ya que se encuentra paralela a las curvas de nivel transportando la escorrentía por el trazado de la vía hacia un mismo punto de acumulación, localizado aguas abajo de la misma saturando y erosionando dicha zona, ocasionando el incremento en la presión de poros, que a su vez podría ocasionar un deslizamientos de los materiales superficiales.

Alternativa

De acuerdo a la similitud entre el trazado de la vía existente y las curvas de nivel, es posible establecer una zona de acumulación y drenaje de agua como se muestra en la figura 18 erosionando la cobertura vegetal y el material superficial tanto en la parte superior de la vía como en la inferior. Se propone el uso de barreras vivas en la parte superior de la vía distanciadas cada metro y ubicadas paralelamente al trazado, de esta manera se espera disminuir el agua de

escorrentía que llega al punto de acumulación localizado, además de proporcionar soporte y confinamiento al material superficial. En la zona de acumulación, se propone la implementación de un dren transversal en forma de espina de pez como se muestra en la figura 18, con el fin de conducir el flujo de aguas de infiltración al afluente más cercano, minimizando la saturación del material y el exceso de presión de poros, adicionalmente se recomienda utilizar barreas vivas ubicadas de manera trasversal al trazado de la vía con separación de 1 metro como se indica en la figura 18.

Figura 18

Ilustración alternativa de mitigación zona 2

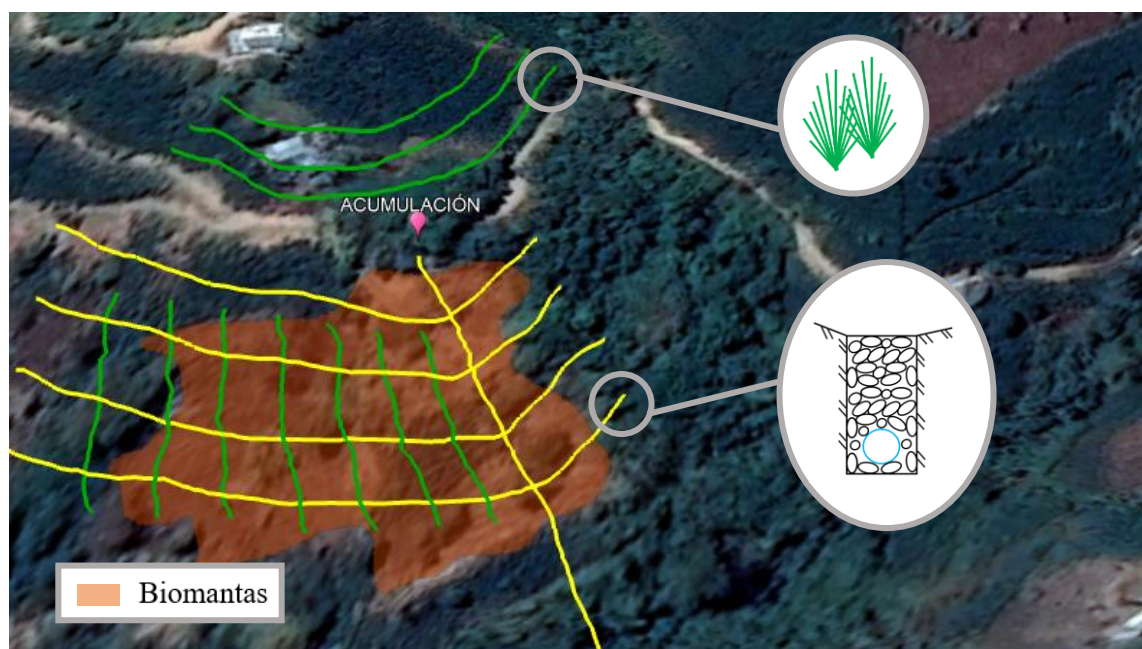


Tabla 31*Resumen y alternativa de mitigación zona 3.*

Litología	Roca sedimentaria (arenisca tobácea, arcillolita) con presencia de roca ígnea (diorita, andesita), suelo areno arcilloso y ceniza volcánica.
Pendiente	33° o 64%
Cobertura vegetal	Arbustal abierto
Cercanías a drenajes	< 60 m
Afectaciones	Instalaciones de terceros, fuentes hídricas
Infiltración	59.2 mm por 24 horas

Análisis

Entre 2017 y 2018 se presentaron 5 fenómenos de remoción en masa de tipo flujo los cuales fueron registrados por el Servicio Geológico Colombiano en el Sistema de Información de Movimientos en Masa, además de lo anterior en el mapa de amenaza relativa por lluvia desarrollado en el presente trabajo la zona está en amenaza alta con bastantes probabilidades de desplazarse al momento de ocurrir un periodo de lluvias con registros máximos donde se incrementa la saturación al interior del talud, lo cual ocasionaría que la superficie expuesta por la degradación de la cobertura vegetal y los deslizamientos presentados con anterioridad, fueran transportados hacia la fuente hídrica que está en inmediaciones de las laderas, a todo esto se debe añadir las altas pendientes las condiciones de inestabilidad relacionadas a la tipología de los materiales que facilitan el desplazamiento de la capa superficial, causando un posible flujo de material hacia al casco urbano del municipio, como ocurrió con 2019 donde se afectaron bienes materiales por alrededor de 2.424 millones de pesos (SGC, 2020).

Alternativa

De acuerdo a la incidencia de los fenómenos de remoción en masa presentados en esta zona identificados como flujos de tierra. Se propone para la zona norte, la implementación de barreras vivas separadas 1 metro y ubicadas paralelas al trazado de la vía junto con biomantas de fibra de coco, sujetas por una red hexagonal de doble torsión debido a las altas pendientes de dicha zona. Como puede observarse en la figura 16 zona 3, el costado sur también presenta áreas susceptibles a deslizarse, pero debido a la falta de rutas de ingreso, al paso del afluente y a las altas pendientes, dicha zona se considera de difícil acceso y de alto riesgo. De acuerdo a lo anterior se recomienda implementar un sistema de alertas tempranas mediante la instalación de un limnómetro digital ya

que no es posible intervenir dicha zona, con el fin de monitorear la dinámica del afluente y emitir alertas al municipio ya sea por riesgo de inundación o transporte de material proveniente del costado sur.

Figura 19
Ilustración alternativa de mitigación zona 3

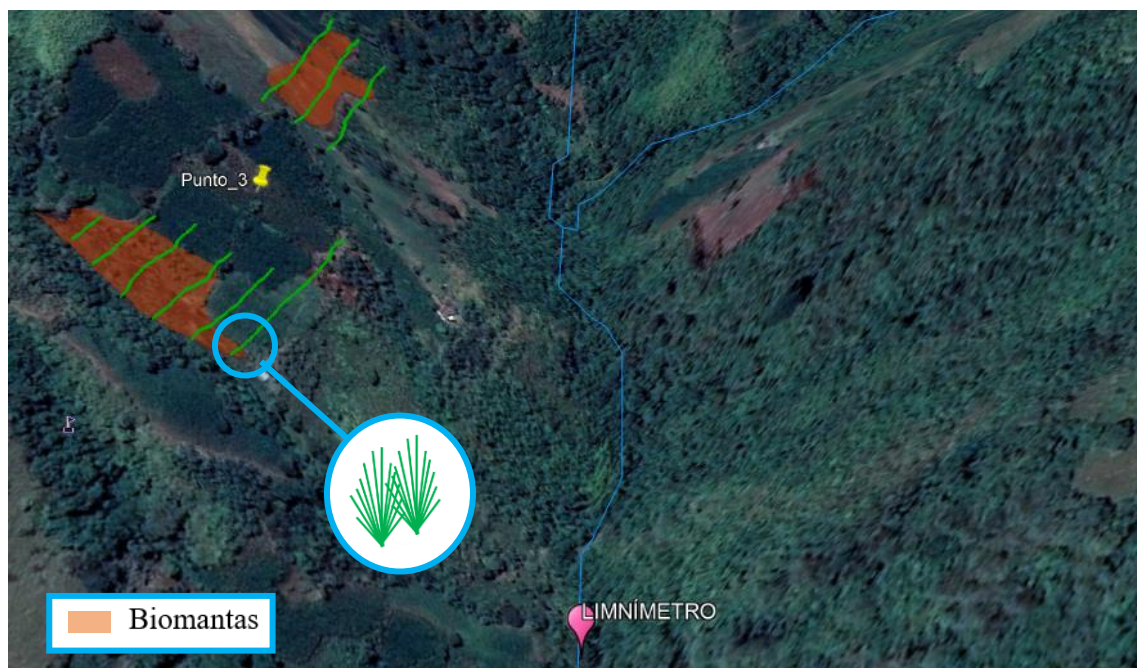


Tabla 32*Resumen y alternativa de mitigación zona 4.*

Litología	Roca sedimentaria (arenisca tobácea, arcillolita) con presencia de roca ígnea (diorita, andesita), suelo areno arcilloso y ceniza volcánica.
Pendiente	30° o 59%
Cobertura vegetal	Arbustal abierto
Cercanías a drenajes	> 120 m
Afectaciones	Población, viviendas
Infiltración	68.2 mm en 24 horas

Análisis

En la zona 4 según la figura 15 se aprecian algunas viviendas en proximidades a la vía secundaria, la cual es utilizada como enlace entre la parte urbana del municipio con la zona rural, que además se emplea para el transporte de víveres entre otros, cabe resaltar que también se observa una fuerte degradación en la cobertura vegetal de la zona, que puede atribuirse al aprovechamiento del suelo por parte de la comunidad y a los factores atmosféricos (lluvia, viento). La zona cuenta con relieve ondulado, suelos superficiales (areno-arcillosos) propensos a desplazarse debido a la tipología de los materiales, ya que se considera que esta capa de suelo superficial de 0.60 a 1.0 m (Rivera, 2021) sería el factor que condiciona la zona a fenómenos de remoción en masa, todo esto se infiere de los distintos registros del SIMMA del área de estudio, en los cuales se evidencio que en su gran mayoría, la saturación del suelo y las altas pendientes afectan la estabilidad superficial y que en caso de materializarse un evento de precipitación máxima combinado con un suelo saturado, podría desencadenar deslizamientos superficiales o flujos de materiales que lleguen a la fuente hídrica (rio frio) que fue la encargada de transportar junto con las quebradas Caraguaja y San Isidro un flujo que hizo evacuar más de 2000 personas del casco urbano de Campoalegre en el año 2017 (SGC, 2020).

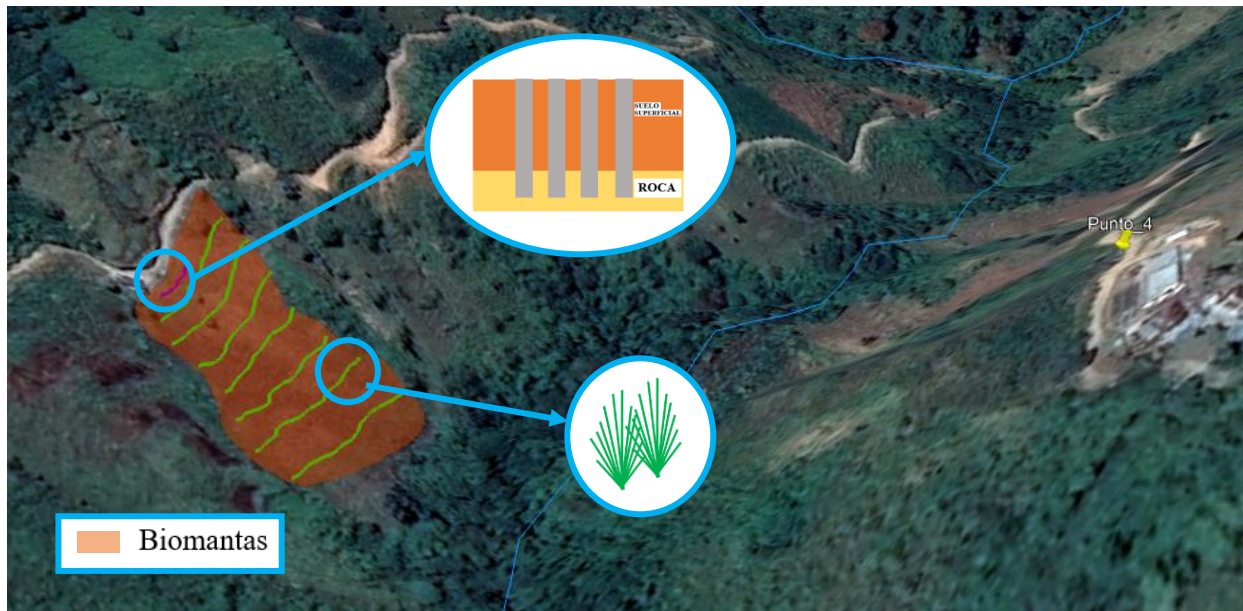
Alternativa

Para evitar que la estructura vial se vea comprometida en el momento de presentarse un fenómeno de remoción en masa a causa del evento de precipitación esperado, se propone la implementación de una pantalla de micropilotes fundidos in situ con una profundidad tal que asegure el empotramiento de la super estructura dentro de la roca. La pantalla de pilotes tendrá una longitud aproximadamente de 20 metros y estará ubicado de acuerdo al ilustrado en la figura 20.

Para controlar la erosión del agua en las zonas inferiores con cobertura vegetal escasa, se propone el uso de barreras vivas orientadas paralelamente al trazado de la vía y con 1 metro de separación entre estas. Adicionalmente, reforzar con una biomanta de fibra de coco con el fin de permitir el desarrollo de las barreras vivas y de la cobertura vegetal.

Figura 20

Ilustración alternativa de mitigación zona 4



Conclusiones

De acuerdo a la información secundaria disponible de manera abierta y gratuita para todos desde las fuentes oficiales tanto nacionales como internacionales, fue posible determinar los factores ingenieriles específicos que condicionan el comportamiento de los fenómenos de remoción en masa para la zona, cómo son; la litología, la proximidad a drenajes, el estado de la cobertura vegetal, la pendiente y la intensidad sísmica esperada, contemplando la posibilidad de incluir muchos más dependiendo propiamente de la zona en específico que se analice y el nivel de detalle que está requiera. La incidencia en el fenómeno de remoción en masa evaluada de manera independiente para cada factor, generó unos mapas con base a los criterios de algunos autores mostrados en la metodología, capaces de ilustrar la influencia del respectivo factor de manera autónoma en el comportamiento del fenómeno de remoción en masa.

Para la generación del mapa de susceptibilidad de la zona de estudio, fue necesaria la interrelación de los factores ingenieriles a partir de las comparaciones jerárquicas realizadas a pares (factor a factor) obtenidas mediante la metodología AHP que determinaron los pesos de los coeficientes de importancia (tabla 24) que condicionan de manera conjunta la susceptibilidad y el comportamiento frente a fenómenos de remoción en masa.

Para usar la metodología heurística del proceso analítico jerárquico (AHP) y la evaluación multicriterio, no es requisito utilizar los mismos factores condicionantes usados en el presente informe, ya que el ingeniero tiene la potestad de escoger la cantidad y el tipo de criterios que predominen en su respectiva zona de estudio, siempre y cuando las comparaciones a pares estén amparadas por su juicio, experiencia y/o autores que analizaran estos factores. Adicionalmente garantizar que el índice de consistencia sea menor a 0.1, brindando un nivel de confiabilidad aceptable.

Del problema práctico abordado, el mapa de susceptibilidad (figura 11) generado por los autores expone en mayor medida valores de susceptibilidad entre 2.6 y 4 (moderado y alta). Los valores de 3.5 o superiores coinciden con la ubicación de los registros de fenómenos de remoción en masa del SIMMA de los últimos 10 años presentes en todos los mapas de este proyecto, dándole confiabilidad a los resultados generados por el modelo.

Para generar el mapa de amenaza relativa por lluvia se estimaron los niveles de precipitación media multianual de la zona, así como, la precipitación para el periodo retorno de 20 años. Adicionalmente se empleó la metodología de la evaluación de amenaza relativa propuesta por el INGEOMINAS (2010), a la cual se le realizó una modificación con el fin de contemplar la precipitación que se infiltra en la zona de acuerdo a la cobertura vegetal y a la pendiente media de la subcuenca (tabla 10), ya que esa metodología contempla la precipitación en su totalidad, este análisis arrojó como resultado el mapa de amenaza relativa por lluvia (figura 13) el cual evidencia zonas en considerable peligro latente de que el deslizamiento se presente afectando bienes materiales u ocasionando otros impactos a infraestructura y población.

Es posible inferir que los valores de amenaza alta por fenómenos de remoción en masa son producto de las litologías con valor 3 de la figura 7 que presentan considerables niveles de meteorización física y química, que en combinación con las altas pendientes y precipitaciones, son propensas a desarrollar en la mayoría de los casos deslizamientos superficiales, alcanzando los cuerpos hídricos e incitando a la generación de un flujo de lodos o de detritos que de acuerdo a la forma y torrencialidad de drenaje de la cuenca transportaría el material hacia las inmediaciones del casco urbano del municipio.

De acuerdo a la validación de los resultados obtenidos, se puede concluir que este tipo de análisis tanto de susceptibilidad, como de amenaza son útiles y funcionales para la toma de

decisiones a escala (1:25000). Para proponer las alternativas de mitigación conceptuales fue necesario la identificación de las zonas más susceptibles a presentar fenómenos de remoción en masa producto del análisis realizado en el presente trabajo y a la evaluación de los factores ingenieriles propuestos, para detallar en el análisis se podrían desarrollar ensayos, visitas campo una microzonificación geotécnica lo cual proporciona mayor conocimiento de la zona, y que en combinación con los mapas de amenaza y susceptibilidad permiten profundizar en la información acerca de la estabilidad de taludes y laderas, resultando de gran utilidad para la planificación y ejecución de obras públicas, así como para la prevención y corrección de estas.

Las alternativas de mitigación conceptuales propuestas en cada una de las 4 zonas identificadas en la figura 14, fueron desarrolladas a partir de la información resultante del análisis de los factores condicionantes del terreno, la infiltración y escorrentía ocasionada por la precipitación e información del Plan Básico de Ordenamiento Territorial. Arrojando como resultado una serie de alternativas para cada una de las zonas, las cuales dependen de las características propias de la orografía, además se infiere que los fenómenos de remoción en masa de ocurrir, será en la capa superficial del suelo la cual posee un espesor de entre 0.6 y 1 metro, de acuerdo a esto fueron seleccionadas las alternativas que en su mayoría están encaminadas a la protección del suelo frente a los factores atmosféricos, como también minimizar el flujo de la escorrentía en las laderas.

Referencias

Aceves Quesada, J. F., Legorreta Paulín, G., Lugo Hubp, J., Umaña Romero, J., & Legorreta Cuevas, H. A. (2016). Geographic information systems and geomorphological mapping applied to landslide inventory and susceptibility mapping in el Estado River, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 2016(91), 43-55. doi:10.14350/rig.46503

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2016). Instituto distrital de gestión del riesgo y cambio climático. Obtenido de: <https://www.idiger.gov.co/rsismico>

Alcaldía Municipal Campoalegre. (2017). Plan básico de ordenamiento territorial. (No. 1). Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de: <https://doaj.org/article/29ace880e2b94e91a3738e5d93ce6644>

Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73, 247-265. doi:10.1016/j.enggeo.2004.01.007

Areiza, R. (2018). Millonaria demanda por los daños de la avalancha en campoalegre Obtenido de: <https://www.lanacion.com.co/millonaria-demanda-por-los-danos-de-la-avalancha-en-campoalegre>

Atencia, Y., & Arcila, H. (2016). Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca cay, Ibagué, Tolima, Colombia. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 26, 111-128. doi:10.18359/rcin.1800

Barredo-Cano, J. (1996, *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio, en la ordenación del territorio.*, 250.

CAM. (2016). Resolución 2972 de 2016.

Campos, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico (1er ed.). México, San Luis Potosí: Universitaria Potosina.

Campos, F. (2014). Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la quebrada de los chanchos, región metropolitana, Chile (Dissertation/Thesis). Obtenido de: <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/130232>

Cervantes Zavala, R. (2008). Propuesta de herramientas para el desarrollo de procesos de cogestión de cuencas hidrográficas en América Central CATIE, Turrialba (Costa Rica). Obtenido de: https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____3056::732130bfc2231b207603d3194f56b8dd

Consorcio POMCA Quindío. (2017). Morfometría. Caracterización de la cuenca del río la Vieja (pp. 9-34) Obtenido de: <https://doaj.org/article/29ace880e2b94e91a3738e5d93ce6644>

Cuanalo Campos, O. A., & Gallardo Amaya, R. J. (2016). Fenómenos de remoción en masa. acciones para reducir la vulnerabilidad y el riesgo. Vector, (11)

Das, B. M., & Cervantes González, S. R. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica (4a. ed.). México, D.F: CENGAGE Learning. Obtenido de: [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=3430138](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=3430138)

de Azagra Paredes, A. M. (2007). Método de los coeficientes de escorrentía: MAUCO generalizado. Revista Virtual Pro, junio 2007, Medio Ambiente. Recursos Hídricos, 13-23. Obtenido de <http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/metodo-de-los-coeficientes-de-escorrentia-mauco-generalizado>

Departamento Nacional de Estadística. (2019a). Resultados censo nacional de población y vivienda 2018. (). Obtenido de: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/191003-CNPV-presentacion-Huila.pdf>

Elmes, M. (2006). Análisis y evaluación de riesgos por movimientos en masa inundación y sismicidad en el piedemonte de la comuna de puente alto.

Español, A. (2017). Estudio de susceptibilidad por movimientos en masa en la subcuenca del arroyo Quijorna mediante evaluación multicriterio Obtenido de: https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____1472::b5f236def52b92ddb14f805ce48a716a

García, J. A. (2012). Metodología para la selección de la mejor desagregación de series de tiempo para pronóstico. (). Bogotá D.C.: Obtenido de: https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____3056::2cd7e5a9d4dedbe54b7221bb49517499

García, M. J. (2008). Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos (Dissertation/Thesis).

Gutiérrez-Martín, A. (2020). A GIS-physically-based emergency methodology for predicting rainfall-induced shallow landslide zonation. *Geomorphology*, 359 doi:10.1016/j.geomorph.2020.107121

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy. *Geomorphology*, 31(1), 181-216. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)

Hervás, J., Barredo, J., & Lomoschitz, A. (2002). Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. aplicación a la depresión de Tirajana (gran canaria) (Dissertation/Thesis).

HIMAT. (1990). Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos.

Hutchinson, J. N. (1983). Methods of locating slip surfaces in landslides. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 20(3), 235-252. Obtenido de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0020802753&partnerID=40&md5=89a6c5537f5bf3852501f7420dc24147>

IDEAM. (2020). Ciclos hidrológicos. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua>

IGAC. (2020). Geoportal - agrícola consulta Obtenido de: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/agrologia-consulta>

INGEOMINAS. (2010). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:500000

Jaime, S. (2010, Comportamiento sísmico de los taludes., 5-11.

Lara, M., & Sepúlveda, S. (2008). Remociones en masa: Apuntes del curso. (No. 45). Santiago:

Lario, J., & Bardaji, T. (2016). Introducción a los riesgos geológicos.

Mesa, O. J. (2018). Cuatro modelos de redes de drenaje. *Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 379-391. Obtenido de:

https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____618::2337cea694701d432e9a7e331d6efb5c

Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. Bogotá D.C.:

Mora, R., Mora, S., & Vahrson, W. (1992). Mapa de amenaza de deslizamientos, valle central, costa rica, centro de coordinación para la prevención de desastres naturales en américa central (CEPREDENAC). (). San José, Costa Rica: CEPREDENAC.

Mora, S., & Vahrson, W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination.

Moreno-Jiménez, J. M. (2006). El proceso analítico jerárquico (AHP). fundamentos, metodología y aplicaciones.

Muñoz, P. (2013). Índices de vegetación.

Navarro Vidal, J. (2012). Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante S.I.G. en el municipio de berlín, el salvador Obtenido de:

https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____126::ca3f0a74059783b49948ce8a137818f9

Prior, D. B., & Graham, J. (1974). Landslides in the magho district of fermanagh, northern ireland. *Engineering Geology*, 8(4), 341-359. doi:10.1016/0013-7952(74)90027-1

Ramírez, L. F., Piamonte, A. C., & Viveros, L. (2019). Review sensors systems for the monitoring of landslides KIT Scientific Publishing. Obtenido de:

<http://books.openedition.org/ksp/4462>

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176. doi:[https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. ()

Sánchez Román, F. J. (2016). Hidrología superficial (III), relación precipitación - escorrentía Universidad de Salamanca (España). Open Course Ware. Obtenido de: https://explore.openaire.eu/search/other?orpId=od_____1472::db2802a5e32df964b4211a470ec392cb

Servicio Geológico Colombiano. (2017). Las amenazas por movimientos en masa de Colombia (Primera edición ed.). Bogotá D.C.: SGC.

Servicio Geológico colombiano. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. (). Obtenido de: [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)

SIMMA. (2020). Sistema de información de movimientos en masa. Obtenido de: <http://simma.sgc.gov.co/>

Skempton, A. W. (1964). Fourth rankine lecture long-term stability of clay slopes. *Geotechnique*, 14(2), 77-102. doi:10.1680/geot.1964.14.2.77

Skempton, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique*, 35(1), 3-18. doi:10.1680/geot.1985.35.1.3

Soeters, R., van Westen, C. J., Turner, A. K., & Schuster, R. L. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. Landslides, investigation and mitigation (transportation research board, national research council, special report ; 247) (pp. 129-177) National Academy Press. Obtenido de:

<https://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:ris.utwente.nl:publications%2F501bff9d-f715-4c45-899b-209e06dccdd9>

Suarez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales

Tumbaco Yalamá Eduardo Colón. (2017). Caracterización de taludes en la Av. Simón Bolívar. Obtenido de: <https://search.proquest.com/docview/429762850>

USGS. (2020). Earth explorer. Obtenido de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Wislocki, A. P., & Bentley, S. P. (1989). Expert system for landslide hazard and risk assessment. Paper presented at the 249-252. Obtenido de:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0024935446&partnerID=40&md5=00bce51edb5779a26abee4b5b00775af>