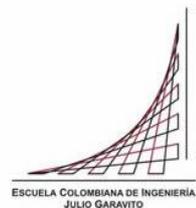


Maestría en Ingeniería Civil

**Metodología para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos
en masa tipo flujo aplicada en la cuenca quebrada La Negra**

Yesica Hasbleidy Serrano Neira

Bogotá, D.C 04 de marzo de 2021

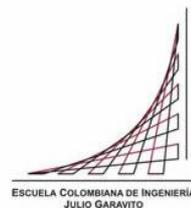


**Metodología para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos
en masa tipo flujo aplicada en la cuenca quebrada La Negra**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en
Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

Dr. Germán Ricardo Santos Granado
Director

Bogotá, D.C 04 de marzo de 2021



La tesis de maestría titulada “Metodología para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo aplicada en la cuenca quebrada La Negra”, presentada por Yesica Hasbleidy Serrano Neira, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Ing. Germán Ricardo Santos Granado

Jurado

Ing. Allen Bateman Pinzón

Jurado

Ing. Vicente Medina Iglesias

Bogotá, D.C., 04 marzo de 2021

Agradecimientos

Gracias a Dios y a la Virgen por permitirme alcanzar un logro más en mi vida.

A los ingenieros Allen Bateman, Vicente Medina y Germán Santos por su asesoría y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

Y a aquellas personas que están a mi lado que hicieron posible realizar este trabajo.

Resumen

El análisis de susceptibilidad busca identificar cuales factores influyentes que tiene un talud son favorables o no para que en ella se presenten procesos de inestabilidad, ocasionando un proceso de movimiento en masa. De esta manera el objetivo de este análisis, es con base en la identificación de las variables del área de estudio determinar las zonas que presentan mayor probabilidad a sufrir procesos de inestabilidad y clasificarlas en categorías de susceptibilidad alta, media y baja.

Existen diferentes formas de aproximación para realizar un análisis de susceptibilidad, se conocen métodos heurísticos, métodos estadísticos, métodos probabilísticos, en Colombia, las propuestas metodológicas para la evaluación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa tipo flujo son frecuentemente geomorfológicas y de criterio experto. En la siguiente metodología propuesta, se realizó un análisis de susceptibilidad con un método tipo determinístico mediante el modelo de talud infinito, donde se identifica y analiza las zonas susceptibles a ruptura con la ocurrencia de este tipo de eventos de acuerdo con algunos parámetros geomecánicos del suelo junto con la intensidad de lluvia asociada para los diferentes periodos de retorno propuestos, y la utilización de herramientas computacionales cuantitativas y cualitativas que permitieron modelar el comportamiento del flujo de acuerdo con los escenarios planteados en una cuenca de estudio.

El desarrollo de esta metodología sirve como una herramienta para proponer medidas y estrategias en la reducción de riesgos por movimientos en masa tipo flujo y aporta a los entes territoriales, autoridades ambientales y demás entidades interesadas una alternativa en el primer paso de la toma de decisiones de la planificación ambiental del territorio para la reducción del riesgo desde el componente del conocimiento.

Palabra clave:

Flujo, planificación territorial, riesgo, susceptibilidad.

ABSTRACT

The susceptibility analysis is looking to identify whether or not the factors present on the slope are favorable or not, in the process of stability and if this could create a landslide. This analysis is based on the identification of the variables within the studied area, and will determine what zones are at probable risk of having landslides. The probabilities will be classifying as high, median and low.

There are different approximation approaches to create a susceptibility analysis such as: Heuristic Method, Statistic Method and Probability Method. In Colombia the proposed approach to create a susceptibility evaluation and landslide hazard assessment are geomorphological and expert criteria. In the following proposed methodology, I created a susceptibility analysis with a deterministic method, while using the infinite slope model. In which I identify and analyzed the susceptibility zones of rupture, and the occurrence of this type of event. All of this was based on geomechanics parameters of the soils and the rain intensity associated to the different proposed return time frames. The use of qualitative and quantitative computational tools allowed me to model the landslide flow behavior based on the specific slope scenario.

The development of this methodology could be used as a tool to propose strategies and action plans to minimize the risk of flow landslide. Which will support government departments, environmental authorities, and other entities looking for an alternative in the decision making of zone planning and reduction of risk based on knowledge.

Key Words

Flow, Zone planning, Risk, Susceptibility.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1 OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.1.1 Objetivos específicos	18
2 MARCO REFERENCIAL	19
2.1 MARCO CONCEPTUAL	19
2.1.1 Amenaza	19
2.1.2 Análisis y evaluación del riesgo	19
2.1.3 Conocimiento del riesgo	19
2.1.4 Exposición	19
2.1.5 Gestión del riesgo	19
2.1.6 Mitigación del riesgo	19
2.1.7 Movimiento en Masa	19
2.1.8 Susceptibilidad	20
2.2 MARCO TEORICO	20
2.2.1 Flujo	20
2.2.2 Mecanismos de formación de flujos	20
2.2.2.1 Lluvias	20
2.2.2.2 Cauces de agua	20
2.2.2.3 Eventos sísmicos	20
2.2.2.4 Flujos piroclásticos	21
2.2.2.5 Deslizamientos pequeños de alta velocidad	21
2.2.2.6 Deshielo de nevados	21
2.2.3 Etapas del flujo	21
2.2.3.1 Etapa de formación	21
2.2.3.2 Etapa de Movilidad	21
2.2.3.3 Etapa de Transporte	21
2.2.3.4 Etapa de Depositación	22
2.2.4 Perfil del flujo	22
2.2.5 Tipos de flujo	23
2.2.6 Descripción de los modelos físicos	29
2.2.6.1 Programa infiniteslope	29
2.2.6.2 Programa debrisdice	32
2.2.7 Metodología existente	34

3	ÁREA DE ESTUDIO	37
3.1	ANTECEDENTES	38
3.2	PRECIPITACIÓN	39
3.2.1	Distribución Temporal	41
3.2.2	Distribución Espacial	43
3.3	GEOLOGÍA	44
3.3.1	Grupo Guaguaquí (kgg)	45
3.3.2	Grupo olini (kso)	46
3.3.2.1	Formación lidita inferior (ksli)	46
3.3.2.2	Formación nivel de lutitas (ksl)	46
3.3.3	Grupo villeta	46
3.3.3.1	Formación trincheras (kitr)	46
3.3.3.2	Formación Socotá (Kis)	47
3.3.3.3	Formación Capotes (Kic)	47
3.3.3.4	Formación Hiló (Kih)	47
3.3.4	Formación útica (kiut)	48
3.4	GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA	48
3.4.1	Unidades de roca	49
3.4.1.1	Macizos rocosos de resistencia intermedia	50
3.4.1.2	Macizos rocosos de resistencia baja -rocas blandas	52
3.4.2	Unidades de suelo	53
3.4.2.1	Suelos residuales (Srs)	53
3.4.3	Suelos transportados	55
3.4.3.1	Suelos coluviales (Sco)	55
3.4.3.2	Depósitos fluviotorrenciales	57
3.5	GEOMORFOLOGÍA	58
3.5.1	Características geomorfológicas regionales	59
3.5.2	Subunidades y elementos geomorfológicos de la cuenca	59
3.5.2.1	Subunidades y elementos de origen estructural, laderas estructurales denudacionales	60
3.5.2.2	Subunidades y elementos de origen denudacional laderas activas – estables	62
3.5.2.3	Subunidades y elementos de origen fluvial	67
3.6	PENDIENTE	69

4 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUCIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO	72
4.1 INFORMACIÓN BASE	72
4.1.1 Modelo de elevación digital	73
4.1.2 Cohesión	75
4.1.3 Ángulo de fricción interna	77
4.1.4 Espesor del suelo	79
4.1.5 Conductividad hidráulica	81
4.1.6 Intensidad de lluvia	83
4.2 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD	87
4.2.1 Determinación de zonas susceptibles	89
4.2.2 Propagación del viaje del movimiento	95
5 CONCLUSIONES	102
6 RECOMENDACIONES	103

Índice de fotografías

Fotografía 1 Cono de detritos, Quebrada Quiscas, Lima, Perú. _____	24
Fotografía 2 Flujos de detritos Armero, Colombia, noviembre 13 de 1985. _____	24
Fotografía 3 Crecida de detritos en el valle el río Aconcagua, Chile, 1980. _____	25
Fotografía 4 Flujos de lodo Norte de Santander, Colombia. _____	26
Fotografía 5 Flujo de tierra junio 6 de 1994, Páez, Huila. Colombia. _____	26
Fotografía 6 Deslizamiento por flujo, West Vancouver, Canadá, 2005. _____	27
Fotografía 7 Avalanchas de detritos Estado Vargas, Venezuela, 1999. _____	27
Fotografía 8 Depósito de avalancha de Tigre Dormido, Mendoza, Argentina. _____	28
Fotografía 9 Material transportado y depositado por la quebrada La Negra al río Negro. ____	38
Fotografía 10 Cementerio Útica después de avalancha noviembre 1988. _____	39
Fotografía 11 Puente Ferrocarril municipio de Útica después de avalancha noviembre 1988. _	39
Fotografía 12 Rocas intermedias clase 1. _____	50
Fotografía 13 Roca Intermedia clase 2. _____	51
Fotografía 14 Roca intermedia clase 3. _____	51
Fotografía 15 Roca intermedia clase 4. _____	52
Fotografía 16 Roca blanda clase 1. _____	53
Fotografía 17 Roca blanda clase 2. _____	53
Fotografía 18 Suelo residual clase 1. _____	54
Fotografía 19 Suelo residual clase 2. _____	54
Fotografía 20 Suelo residual clase 3. _____	55
Fotografía 21 Depósitos coluviales clase 1. _____	56
Fotografía 22 Depósito coluvial clase 3. _____	56
Fotografía 23 Depósito fluvio-torrencial del cauce actual. _____	57
Fotografía 24 Niveles de terraza antiguos. _____	57
Fotografía 25 Abanico aluvial. _____	58
Fotografía 26 Escarpe de falla. _____	61
Fotografía 27 Laderas de contrapendiente. _____	62
Fotografía 28 Laderas estructurales. _____	62
Fotografía 29 Lomos Anchos. _____	63
Fotografía 30 Lomos angostos y redondeados. _____	63
Fotografía 31 Escarpes denudacionales. _____	64
Fotografía 32 Laderas moderadas. _____	64
Fotografía 33 Depósitos coluviales. _____	65
Fotografía 34 Depresión denudacional. _____	65

Fotografía 35 Hondonada denudacional. _____	66
Fotografía 36 Escarpe de corona principal. _____	66
Fotografía 37 Cauce actual. _____	67
Fotografía 38 Planicies o llanuras de inundación. _____	67
Fotografía 39 Niveles de terraza antiguos. _____	68
Fotografía 40 Abanico aluvial. _____	68
Fotografía 41 Cono de deyección. _____	69
Fotografía 42 Depósito de flujo torrencial. _____	69

Índice de gráficas

Gráfica 1 Precipitación histórica mensual estaciones cuenca quebrada La Negra.....	41
Gráfica 2 Promedio histórico precipitación, estación Tuscolo.....	42
Gráfica 3 Promedio histórico precipitación, estación Agua Fría.	42
Gráfica 4 Promedio histórico precipitación, estación Útica.....	43
Gráfica 5 Ajuste de las distribuciones de probabilidad.....	85

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Origen de los sólidos.....	22
Ilustración 2 Perfil de un flujo.....	22
Ilustración 3 Partes básicas de un flujo.....	23
Ilustración 4 Parámetro cohesión-ángulo de fricción.....	75

Índice de mapas

Mapa 1 Área de estudio.....	37
Mapa 2 Estaciones meteorológicas, cuenca quebrada La Negra.....	40
Mapa 3 Precipitación media anual, cuenca quebrada La Negra.....	44
Mapa 4 Geología generalizada, cuenca quebrada La Negra.	45
Mapa 5 Unidades geológicas superficiales, cuenca quebrada La Negra.....	49
Mapa 6 Geomorfología cuenca de la quebrada La Negra.....	60
Mapa 7 Pendiente cuenca quebrada La Negra.	71
Mapa 8 Cuenca de estudio..	73
Mapa 9 Modelo Digital de Elevación, cuenca quebrada La Negra.....	74
Mapa 10 Parámetro cohesión, cuenca quebrada La Negra.....	77
Mapa 11 Ángulo de fricción, cuenca quebrada La Negra.	79
Mapa 12 Espesor de suelo, cuenca quebrada La Negra.	81
Mapa 13 Conductividad hidráulica, cuenca quebrada La Negra.....	83
Mapa 14 Polígonos de Thiessen, cuenca quebrada La Negra.	84
Mapa 15 Curva número, cuenca quebrada La Negra.	87
Mapa 16 Topografía, cuenca quebrada La Negra.	88
Mapa 17 Factor de seguridad asociado a un TR de 10 años.	90
Mapa 18 Factor de seguridad asociado a un TR de 50 años.	91
Mapa 19 Factor de seguridad asociado a un TR de 100 años.	92
Mapa 20 Susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo, cuenca quebrada La Negra.....	93
Mapa 21 Probabilidad de ruptura vs eventos.	94
Mapa 22 Ángulo de reposo asociado a un TR de 10 años.	96
Mapa 23 Ángulo de reposo asociado a un TR de 50 años.	97
Mapa 24 Ángulo de reposo asociado a un TR de 100 años.....	98
Mapa 25 Velocidad asociada a un TR de 10 años.....	99
Mapa 26 Velocidad asociada a un TR de 50 años.....	100
Mapa 27 Velocidad asociada a un TR de 100 años.....	101

Índice de tablas

Tabla 1 Movimientos en masa tipo flujo.....	24
Tabla 2 Definición de susceptibilidad simplificada, para el Programa InfiniteSlope	32
Tabla 3 Unidades/subunidades indicativas de procesos tipo flujo/avenida torrencial	35
Tabla 4 Categorías de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo	35
Tabla 5 Calificación de pendientes con base en la susceptibilidad a los movimientos en masa.	70
Tabla 6 Valores de referencia parámetro de cohesión	75
Tabla 7 Valores de referencia parámetro de ángulo de fricción.....	78
Tabla 8 Valores de referencia parámetro de ángulo de fricción.....	80
Tabla 9 Valores de conductividad hidráulica para diferentes rocas	82
Tabla 10 Precipitaciones máximas en 24 horas obtenidas en función del TR	85
Tabla 11 Clasificación hidrológica de los suelos	86

INTRODUCCIÓN

Los flujos son un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhiben un comportamiento semejante al de un fluido; pueden ser rápidos o lentos, saturados o secos (Varnes, 1978). Estos constituyen unos de los desastres naturales que más vidas han cobrado en el mundo. Entre los países más afectados por catástrofes debidas a flujos se encuentran las áreas andinas de Perú, Colombia, Ecuador y Venezuela (Suárez, 1999).

Algunos ejemplos de este fenómeno en el ámbito internacional han sido: los flujos de detritos de Vargas (Venezuela), ocurridos en 1999, con alrededor de 15.000 víctimas (GEMMA, 2007), el volcán Cotopaxi (Ecuador) (Mothes et al., 1998), la avalancha de roca y hielo/flujo de detritos de 1970 en el Nevado Huascarán (Perú), que ocasionó la pérdida de 18.000 vidas (GEMMA, 2007), el lahar en el volcán Casita (Nicaragua) (Scott et al., 2005).

En Colombia, han ocurrido casos relevantes que pueden indicar el comportamiento de estos fenómenos, como el flujo masivo provocado por una erupción volcánica en Armero, ocurrido en 1985, cuando se produjeron enormes flujos de lodo por diversos cauces de las faldas del Nevado del Ruiz y varios flujos detríticos (lahares) que sorprendieron a las poblaciones el día de la erupción (Bateman et al., 2007). Posteriormente, en 1994, ocurrió la avalancha del río Páez, donde un sismo sacudió vertientes ya saturadas de humedad en un cañón que condujo todo el material desprendido (Mantilla, 2001). Y más recientemente, el flujo de detritos ocurrido en el municipio de Mocoa la noche del 31 de marzo de 2017, aportado por las quebradas Taruca y Taruquita y los ríos Sangoyaco y Mulato; siendo el factor detonante una precipitación intensa el día del evento, conjugada con las lluvias antecedente, que afectó casi un 30% de área urbana poblada en su momento (Servicio Geológico Colombiano, 2017a).

Las consecuencias de la ocurrencia de estos fenómenos y la ocupación de zonas aluviales, han llevado analizar el riesgo asociado a este tipo de eventos, con el propósito de determinar e implementar medidas de mitigación que permitan disminuir las consecuencias de estos fenómenos, resaltando que la importancia de que dichas medidas deben ser articuladas con las demás estrategias e instrumentos de planificación territorial existentes orientadas a la gestión integral del riesgo.

Por esta razón, durante las últimas tres décadas, a raíz de la ocurrencia de desastres de origen socio-natural, se han expedido en Colombia reglamentaciones relacionadas con la administración y desarrollo físico del territorio, la utilización del suelo y la gestión del riesgo de desastres, cuya adopción ha requerido de la elaboración de estudios técnicos que permitan tomar decisiones efectivas de planificación y al mismo tiempo incorporar la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial de los municipios. Normas de ordenamiento territorial tales como la Ley 388 de 1997 y los decretos 879 de 1998, 3600 de 2007, 1807 de 2014, 1077 de 2015, o de gestión del riesgo de desastres como la Ley 1523 de 2012, entre otras, han sido iniciativas lideradas desde el Gobierno nacional, en cuya reglamentación se ha dado relevancia al conocimiento del territorio como una premisa para contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible (Servicio Geológico Colombiano, 2017b).

El propósito de este trabajo de investigación es proponer una metodología para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo, basado en el acceso de la información disponible para el análisis de variables relevantes en la ocurrencia de este tipo de fenómenos, como lo son: la geología, la geomorfología, el clima, apoyándose con modelos físicos que permiten evaluar la susceptibilidad con diferentes escenarios de intensidad de lluvia propuestos.

Lo anterior es aplicado en una cuenca, en la cual se han presentado desastres ocasionados por este tipo de fenómenos, los resultados servirán como una herramienta para proponer medidas y estrategias para la reducción de riesgos y de los efectos de un posible desastre en el territorio por este tipo de movimientos, sin embargo, se debe mencionar que las autoridades pertinentes deben elaborar estudios de acuerdo con el tipo de fenómenos que se presenten en la cuenca y de mayor escala para la toma de decisiones.

Con el desarrollo de este trabajo de investigación se pretende aportar a los entes territoriales, autoridades ambientales y demás entidades interesadas una metodología alternativa para el primer paso de la planificación ambiental del territorio en la reducción del riesgo desde el componente del conocimiento, ya que como lo menciona la Ley 1523 de 2012, la gestión del riesgo es un proceso social que enmarca tres componentes principales: el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres, cuyo fin es contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Plantear una metodología que permita evaluar la susceptibilidad de un movimiento en masa tipo flujo, utilizando herramientas computacionales cuantitativas y cualitativas, aplicado en un caso de estudio.

Objetivos específicos

- Identificar las posibles áreas susceptibles a este tipo de movimiento en diferentes periodos de retorno, por medio de un modelo cuantitativo de iniciación de flujo.
- Analizar las características del flujo eventual con los resultados de la velocidad e intensidad a través de un modelo cualitativo de propagación de flujo para cada periodo de retorno.
- Generar los mapas de susceptibilidad de acuerdo con los diferentes escenarios asociados a cada periodo de retorno.

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO CONCEPTUAL

Amenaza

De acuerdo a la Ley 1523 de 2012 amenaza se refiere al peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Análisis y evaluación del riesgo

Implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. Se estima el valor de los daños y las pérdidas potenciales, y se compara con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo y preparación para la respuesta y recuperación. (Ley 1523 de 2012 artículo 4, numeral 4).

Conocimiento del riesgo

El concepto de conocimiento del riesgo se define en la Ley 1523 de 2012 como el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la identificación de escenarios de riesgo, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes y la comunicación para promover una mayor conciencia del mismo que alimenta los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastre.

Exposición

Como lo define la Ley 1523 de 2012 en su artículo 4, numeral 10 la exposición se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza.

Gestión del riesgo

La Ley 1523 de 2012 define gestión del riesgo como el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, (rehabilitación y reconstrucción). Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.

Mitigación del riesgo

Son las medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente. (Ley 1523 de 2012 artículo 4, numeral 16).

Movimiento en Masa

Para este documento se acoge la definición que se describe en la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (SGC, 2016), dicha terminología y clasificación de movimientos es conforme a la guía para la evaluación de amenazas por movimientos en masa propuesta por el Proyecto Multinacional Andino (PMA), donde se define que movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad y equivale a definiciones como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas.

Susceptibilidad

La susceptibilidad en los estudios de análisis y evaluación de amenazas, constituye la base inicial, el primer paso para el análisis y zonificación de amenazas se entiende como la predisposición de un territorio a presentar determinados fenómenos amenazantes. De acuerdo con la naturaleza de los eventos amenazantes, cada uno de ellos tiene una fuente y una forma como se materializa en un espacio geográfico. Por lo tanto, se plantea que no se puede configurar un evento de origen natural si no existen determinadas condiciones ya sean geológicas, geográficas, meteorológicas, atmosféricas, ambientales y sociales para que se puedan materializar. Los mapas de susceptibilidad para cada evento deben delimitar áreas de acuerdo con unas características específicas que dan lugar a uno de los tipos de eventos determinados (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014).

2.2 MARCO TEORICO

Flujo

De acuerdo con Varnes (1978), un flujo es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhiben un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída.

Mecanismos de formación de flujos

Los flujos son generalmente generados por diversos tipos de fenómenos que provocan inestabilidades en la masa de terreno. La ocurrencia del flujo depende de que ocurran los deslizamientos, haya disponibilidad de agua suficiente para fluir y exista una cuenca capaz de concentrar el flujo con alta pendiente para producir grandes velocidades (Kanji y otros, 2001). Dentro de los mecanismos que se le atribuyen a la formación de estos fenómenos se encuentran principalmente los siguientes:

2.2.1.1 Lluvias

De acuerdo con (Suárez, 1999), una gran cantidad de autores relacionan la activación de los flujos con un determinado valor de intensidad de lluvia durante un tiempo determinado, la intensidad de la lluvia determina, hasta cierto grado, el requisito de que la infiltración sea mayor que la exfiltración y al mismo tiempo, proporciona el caudal de agua requerido para que la mezcla de agua-suelo se comporte como un flujo. Así mismo el volumen de lluvia ocurrida en los días precedentes a la lluvia activadora de los flujos, es un factor determinante. Un ejemplo de este mecanismo de formación de flujo fue el evento ocurrido en el estado de Vargas, en Venezuela, en el año 1999, donde una precipitación excepcional en una zona climática semiárida, ocasionó este evento de gran magnitud.

2.2.1.2 Cauces de agua

Cuando un deslizamiento de tierra de gran magnitud alcanza un cauce de agua o un canal de agua lluvias de alta pendiente, los materiales aportados por el deslizamiento pueden fluir por el cauce alcanzando velocidades significativas y avanzando distancias considerables. Algunos cauces de agua son muy susceptibles a formar flujos por erosión lateral y se suman varios deslizamientos a lo largo de la cuenca, ejemplo de este tipo de formación de flujo es el caso en las cuencas tributarias del río Colorado (Suárez, 1999).

2.2.1.3 Eventos sísmicos

Otro mecanismo de formación de flujos que se menciona en el estudio de (Suárez, 1999), es la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud y poca profundidad de foco, debido a que genera una gran cantidad de deslizamientos cosísmicos, la formación del flujo por eventos sísmicos depende de las características del sismo, de la susceptibilidad de las laderas a los deslizamientos de tierra y de la coincidencia o no con períodos de lluvias. Como ejemplo de este tipo de mecanismos se puede mencionar el sismo del río Páez, en 1994, de magnitud 6.4 que

ocasionó un deslizamiento en un área de 250 km², en suelos residuales con rocas, predominantemente de cuarcitas y esquistos.

2.2.1.4 Flujos piroclásticos

Las erupciones explosivas magmáticas o freáticas de los volcanes son otro mecanismo de formación de flujos, a veces acompañados de flujos piroclásticos o explosiones laterales dirigidas. Las intrusiones magmáticas pueden deformar y fracturar las rocas que conforman el cono volcánico al empujar hacia arriba y hacia fuera, induciendo aumento de fuerzas cortantes y la disminución de la resistencia al corte de la masa (García, 1986). Un ejemplo de esta formación de flujo, fue lo ocurrido en el volcán Merapi en Indonesia donde un flujo piroclástico sobre una pendiente de 35° aproximadamente, destruyó un área de 839 hectáreas y días después de la ocurrencia del flujo, las lluvias intensas generaron flujos de lodos y de residuos de gran magnitud (Suárez, 1999).

2.2.1.5 Deslizamientos pequeños de alta velocidad

Así mismo (Suárez, 1999), señala que los deslizamientos pequeños en las zonas de alta pendiente, también pueden producir flujos rápidos, siendo este otro mecanismo de formación de flujos. La capacidad de destrucción depende del tamaño del flujo, la tipología y la movilidad. Los flujos pequeños pueden tener gran movilidad y generar grandes riesgos a pesar de su tamaño. Un ejemplo de esta causa fue el deslizamiento de las colinas ocurrido en Santa Tecla, El Salvador, durante un sismo fuerte donde un flujo rápido afectó a la población.

2.2.1.6 Deshielo de nevados

(Suárez, 1999), refiere que el deshielo de nevados por acción de erupciones volcánicas o lluvias torrenciales puede generar flujos de gran magnitud, como por ejemplo la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985 que produjo una explosión, en la cual se dispersaron residuos piroclásticos en un radio de 50 Km.

Etapas del flujo

Según los criterios para el análisis de los flujos que se menciona en el documento de (Suárez, 1999), se podría describir las siguientes etapas de un flujo:

2.2.1.7 Etapa de formación

Como resultado de lluvias extraordinarias, sismos fuertes o deshielos rápidos u otro evento anómalo mencionados anteriormente, se pueden generar procesos de deslizamiento o erosión, los cuales producen una concentración de sedimentos o partículas sobre las laderas o cauces. Las masas que se desprenden pueden estar saturadas o puede haber aporte adicional de agua de acuerdo con las características del proceso que las inició, esta concentración de sedimentos sueltos sobre una pendiente fuerte, favorece su movimiento.

2.2.1.8 Etapa de Movilidad

De acuerdo con el tipo de material y la concentración de sedimentos en el agua se desarrolla esta etapa en los flujos. Dentro de los factores que afectan la movilidad de los flujos se encuentra el tamaño de los deslizamientos, ya que los deslizamientos de mayor magnitud generan flujos de mayor movilidad, siendo proporcional al caudal del flujo, sin embargo, para esta etapa el contenido del agua del flujo es el factor más importante.

2.2.1.9 Etapa de Transporte

En la etapa de transporte, la velocidad y el caudal aumentan bruscamente como en una especie de onda, lo que puede ocasionar una posible incorporación de sedimentos nuevos al flujo ya sea por arrastre, aportes de deslizamientos, corrientes de agua, entre otros. Durante esta etapa de acuerdo con la composición, concentración y velocidad, el flujo puede comportarse en un tipo de flujo (lodos, hiperconcentrado o de residuos).

2.2.1.10 Etapa de Depositación

Por último, el flujo presenta una disminución de la velocidad o frenado al disminuir la pendiente o aumentar el ancho del canal, es decir, la energía cinética disminuye produciendo la sedimentación de las partículas, de esta manera el ancho y la pendiente de la zona de depositación determinan el espesor del depósito y la forma como se producen los procesos de frenado y sedimentación. La depositación de los flujos generalmente se da en pulsos (Williams, 2006), lo cual demuestra que el flujo no es permanente sino que tiene ondas y cada onda puede transportar materiales de diferente granulometría desde materiales muy gruesos hasta materiales muy finos o mezclas de varios materiales.

Perfil del flujo

Como se presenta en la Ilustración 1, en los flujos se presenta un perfil, el cual se encuentra compuesto de un origen de los sólidos, una distancia de recorrido y una zona de depositación (Iverson, 1997).

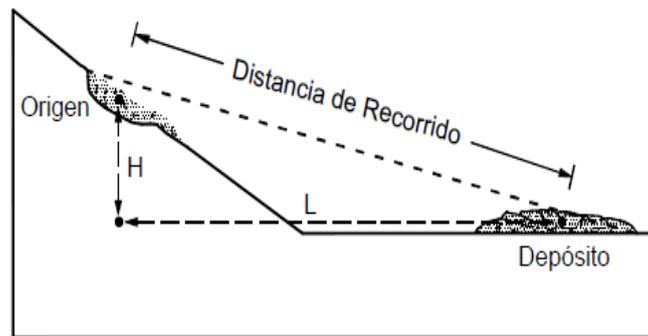


Ilustración 1 Origen de los sólidos (Iverson, 1997). Tomado de (Suárez, 1999).

La morfometría de un flujo en movimiento se podría describir en tres partes como se observa en la Ilustración 2, el **frente** que es la parte donde se concentran los materiales más gruesos, en la cual predominan las fuerzas de los sólidos y así mismo la que presenta la mayor altura del flujo, el **cuerpo** cuya parte es donde se desarrolla el flujo, transportando partículas gruesas incluso en suspensión y donde predominan las fuerzas del fluido y por último la parte de la **cola** donde se acumula parte del agua libre de sedimentos finos.

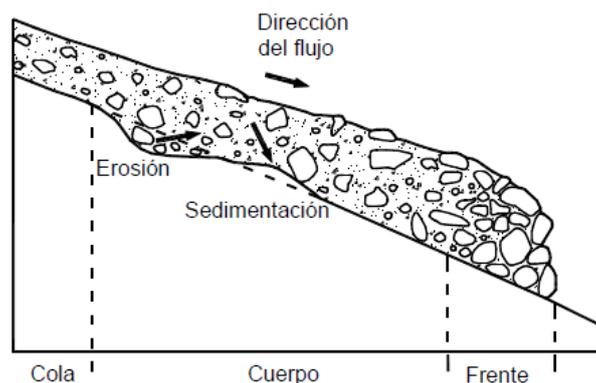


Ilustración 2 Perfil de un flujo. Fuente. Tomado de (Suárez, 1999).

Una vez en planta el perfil del flujo, se puede analizar en tres partes como se presenta en la Ilustración 3, la primera una zona de iniciación que como se puede observar forma un embudo, una segunda zona de transición o zona de tránsito de flujo y por último una zona de depositación en abanico.

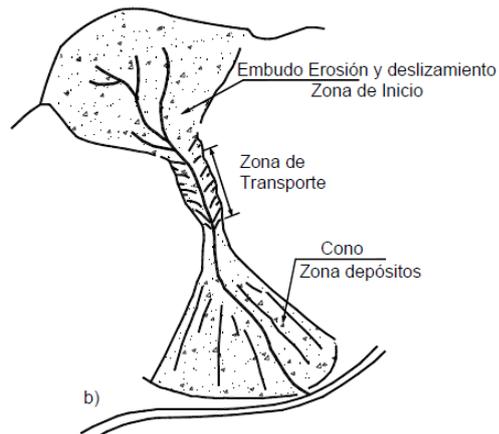


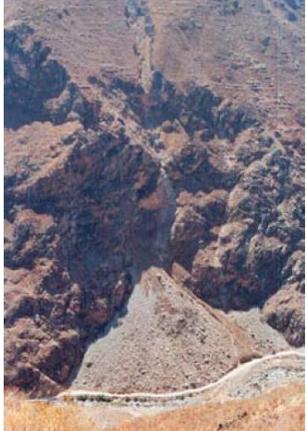
Ilustración 3 Partes básicas de un flujo (Bateman y otros, 2006). Tomado de (Suárez, 1999).

Tipos de flujo

Las particularidades de la mezcla sumado con las condiciones morfométricas (pendiente y forma del canal), generan un fluido con diferentes características, en las que se pueden diferenciar varios tipos de flujo.

A continuación se presenta la clasificación propuesta por Hungr et al. (2001), en la cual describen los flujos de acuerdo con el tipo y propiedades del material involucrado, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y otras características que los hacen distinguibles.

Tabla 1 Movimientos en masa tipo flujo descritos por Varnes (1978), Hungr et al. (2001), Hungr (2005).

Tipo de flujo	Descripción	Caso
<p>Flujo secos</p>	<p>Es un movimiento tipo flujo de material granular, con estructura ordenada o desordenada, suelto, seco o húmedo, durante el cual no hay un exceso de presión de poros significativa.</p> <p>De acuerdo con el tipo de material puede denominarse como flujo de arena seco (proceso fundamental en la migración de dunas de arena), flujo de limo seco (a veces son desencadenados por el fallamiento de escarpes empinados o barrancos de material limoso), flujo de grava seco o flujo de detritos seco. (Hungr et al., 2001).</p>	 <p>Fotografía 1 Cono de detritos, Quebrada Quiscas, Lima, Perú.</p>
<p>Flujo de detritos (Debris flows)</p>	<p>Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido (5 m/s) de detritos saturados, no plásticos, que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce empinado y por naturaleza son capaces de producir la muerte de personas (Hungr, 2005).</p> <p>Este tipo de evento se distingue también porque el agua del cauce se incorpora al cuerpo del flujo de detritos, incrementando su contenido de agua. Además, el confinamiento lateral ayuda a mantener la profundidad del flujo, facilitando un cierto tipo de ordenamiento de las partículas sólidas y el desarrollo de oleaje.</p> <p>Otra característica de este tipo de flujos es la forma de la depositación del material sólido, cuando el flujo de detritos alcanza el ápice del abanico de depositación, el canal se amplía y los clastos más gruesos</p>	 <p>Fotografía 2 Flujos de detritos Armero, Colombia, noviembre 13 de 1985.</p>

Tipo de flujo	Descripción	Caso
	<p>son expulsados hacia los lados para formar una especie de jarillones o albardones y el frente es sobrepasado por el material fino que viajaba tras ellos hasta detenerse tomando una forma lobulada gruesa.</p>	
<p>Crecida de detritos-(Debris floods)</p>	<p>Es un flujo muy rápido de una crecida de agua que transporta una gran carga de detritos a lo largo de un canal empinado, usualmente también llamados flujos hiperconcentrados.</p> <p>Las crecidas de detritos se caracterizan por caudales pico 2 o 3 veces mayores que el de una crecida de agua o inundación. Las crecidas no forman diques a lo largo de las márgenes del canal ni frentes gruesos como ocurre con los flujos de detritos, la capacidad destructiva de las crecidas es similar a la de una inundación de agua y por ello los objetos impactados quedan enterrados o son rodeados por los detritos pero frecuentemente sin sufrir daño. (Hungre et al., 2001).</p>	 <p>Fotografía 3 Crecida de detritos en el valle el río Aconcagua, Puntilla del Viento, Chile, 1980.</p>

Tipo de flujo	Descripción	Caso
Flujo de lodo (Mud flow)	<p>De acuerdo con Hungr et al., (2001) es un flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad > 5%). El carácter de este tipo de movimiento es similar al de flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material.</p> <p>También se distingue de los deslizamientos por flujo de arcilla, en que el flujo de lodo incorpora agua superficial durante el movimiento, mientras que en los primeros hay licuación in situ sin un incremento significativo del contenido de agua.</p>	 <p>Fotografía 4 Flujos de lodo Norte de Santander, Colombia.</p>
Flujo de tierra (Earth flow)	<p>Es un movimiento intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso plástico. Las velocidades medidas en flujos de tierra generalmente están en el intervalo de 10^{-5} a 10^{-8} mm/s, y por tanto son generalmente lentos o extremadamente lentos.</p> <p>Otra característica es que, a pesar de su morfología tipo flujo, el mecanismo dominante del flujo de tierra es el deslizamiento en condiciones de resistencia residual a lo largo de las paredes laterales y fondo del canal o cauce por el que transcurre. (Hungr et al., 2001).</p>	 <p>Fotografía 5 Flujo de tierra junio 6 de 1994, Páez, Huila. Colombia.</p>

Tipo de flujo	Descripción	Caso
<p>Deslizamiento por flujo (deslizamiento por licuación) (Flow slide)</p>	<p>Es un flujo muy rápido o extremadamente rápido de una masa de suelo con estructura granular ordenada o desordenada. Ocurre en taludes de pendiente moderada e involucra un exceso de presión de poros o licuación del material en la zona donde se origina el movimiento en masa. De acuerdo con el tipo de material, puede denominarse más específicamente como: deslizamiento por flujo de arena, deslizamiento por flujo de limo, deslizamiento por flujo de detritos o deslizamiento por flujo de roca débil.</p>	 <p>Fotografía 6 Deslizamiento por flujo, West Vancouver, Canadá, 2005.</p>
<p>Avalancha de detritos (debris avalanches)</p>	<p>Es un flujo no canalizado de detritos saturados o parcialmente saturados, poco profundo, muy rápido a extremadamente rápido. Estos movimientos comienzan como un deslizamiento superficial de una masa de detritos que al desplazarse sufre una considerable distorsión interna y toma el carácter de tipo flujo. Relacionado con la ausencia de canalización de estos movimientos, está el hecho de que estos movimientos presentan un menor grado de saturación que los flujos de detritos y que no tienen un ordenamiento de la granulometría del material en sentido longitudinal, ni tampoco un frente de material grueso.</p> <p>Las avalanchas, a diferencia de los deslizamientos, presentan un desarrollo más rápido de la rotura. Según el contenido de agua o por efecto de la pendiente, la totalidad de la masa puede licuarse, al menos en parte, fluir y depositarse mucho más allá del pie de la ladera (Varnes, 1978).</p>	 <p>Fotografía 7 Avalanchas de detritos Estado Vargas, Venezuela, 1999.</p>

Tipo de flujo	Descripción	Caso
<p>Avalancha de rocas (rock avalanches)</p>	<p>Es un movimiento tipo flujo, extremadamente rápido y masivo de roca fragmentada proveniente de un gran deslizamiento de roca, o de una caída de roca. Pueden ser extremadamente móviles y su movilidad parece que crece con el volumen.</p> <p>Sus depósitos están usualmente cubiertos por bloques grandes, aun cuando se puede encontrar bajo la superficie del depósito material fino derivado parcialmente de roca fragmentada e incorporada en la trayectoria. (Hungar et al., 2001).</p>	 <p>Fotografía 8 Depósito de avalancha de Tigre Dormido, Mendoza, Argentina.</p>

Fuente. Adaptado de (GEMMA, 2007).

Descripción de los modelos físicos

Los primeros modelos matemáticos para la caracterización de los flujos partieron de la base de la resistencia de los materiales, de acuerdo con la ecuación de Coulomb (Johnson y Rodine, 1984). Posteriormente, se involucraron modelos hidráulicos como los de Bingham, Manning y Bagnold, los cuales fueron adaptados al comportamiento de fluidos producto de la mezcla de suelo y agua (Suárez, 1999).

El uso de programas que permitan la modelación de los flujos se ha convertido en el método de análisis más recurrente para este tipo de fenómenos. Los modelos se basan en la mecánica del medio continuo y generalmente se encuentran asociados a un determinado modelo reológico de acuerdo con las características de los materiales y el comportamiento esperado del flujo.

Con respecto a los programas que se utilizan en este trabajo de investigación para la modelación de fenómenos de movimientos en masa tipo flujo, estos son: el modelo cuantitativo infiniteslopeprograma y el modelo cualitativo DebrisDice.

2.2.1.11 Programa infiniteslope

Este método es válido para material de suelo granular y para condiciones iniciales de suelo seco. Acopla un mecanismo de falla de Mohr-Coulomb con un flujo lateral en estado estable (infiltración horizontal), teniendo en cuenta el área acumulada y la pendiente local (como TOPMODEL, Beaven y Kirkby 1979).

Un enfoque tradicional de la estabilidad de la pendiente estima la presión de los poros del agua, de manera simplificada, suponiendo que se alcanzan condiciones de estado estable después de una lluvia que tiene una intensidad constante y una duración indefinida. Para un área de drenaje elemental de área a y ancho b , la conservación de la masa y la Ley de Darcy en estado estacionario se plantean respectivamente en las ecuaciones 1 y 2:

$$a(p - PE) - q = 0, \text{ for } h \leq z \quad (1)$$

$$q = bhK \sin \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

Donde:

p es la tasa de lluvia

PE es la evapotranspiración potencial

q es el flujo de agua subterránea

h es la profundidad del nivel freático

K es la conductividad hidráulica del suelo

α es la pendiente

La relación entre la profundidad de la capa freática h y el espesor de la capa de suelo z , se puede derivar, combinando las ecuaciones (1) y (2), mediante la siguiente ecuación (Montgomery y Dietrich 1994):

$$\frac{h}{z} = \frac{I a}{Kz b \sin \alpha \cos \alpha} + 1 \quad (3)$$

Donde:

$I = (p-PE)$ es la tasa neta de lluvia.

Utilizando el enfoque clásico de Skempton y DeLory (1957) para la estabilidad de una capa de suelo poco profunda completamente saturada, el factor de seguridad FS se puede calcular de la siguiente manera:

$$FS = \frac{c' + z\gamma_w \cos^2 \alpha \tan \varphi}{z\gamma_s \sin \alpha \cos \alpha} - \frac{\gamma_w \tan \varphi}{\gamma_s \tan \alpha} \left(\frac{h}{z} \right) \quad (4)$$

Donde:

γ_s es el peso específico del suelo saturado

γ_w es el peso específico del agua

c' es la cohesión del suelo

φ es el ángulo de fricción interna del suelo.

En condiciones de equilibrio límite (FS = 1), la profundidad crítica de la capa freática h_c se puede evaluar como:

$$h_c = \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi} \frac{c'}{\gamma_w \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} z \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi} \right) \quad (5)$$

Si $h \geq h_c$ la pendiente se reconoce como inestable, mientras que para $h < h_c$ la pendiente se reconoce como estable.

La ecuación (4) muestra dos casos límite, el primero es el caso incondicionalmente inestable (en sus siglas en inglés UUC-*unconditionally unstable case*), que corresponde a una pendiente inestable incluso en condiciones secas, que está dada por $h = 0$ y $FS \leq 1$, dando como resultado la relación (6) en la pendiente.

$$\tan \alpha \geq \frac{\tan \varphi}{1 - \frac{c'}{z\gamma_s \sin \alpha \cos \alpha}} \quad (6)$$

El caso incondicionalmente inestable está relacionado con las pendientes empinadas que son, en la práctica, acantilados rocosos.

Para el segundo caso límite son los casos incondicionalmente estables (en sus siglas en inglés USC-*unconditionally stable cases*), que corresponden a una pendiente estable incluso en condiciones completamente saturadas, que está dada por $h = z$ y $FS > 1$, dando lugar a la relación (7) en la pendiente.

$$\tan \alpha < \frac{\tan \varphi (1 - \gamma_w / \gamma_s)}{1 - \frac{c'}{z\gamma_s \sin \alpha \cos \alpha}} \quad (7)$$

En esta ocasión los casos incondicionalmente estables están relacionadas con aquellas zonas planas que siempre son estables.

Una pendiente que cumple la relación (6) u (7) se desprecia del cálculo. En general, las pendientes superiores a 45° son eliminadas del cálculo, pero ese valor debe tratarse con cuidado dependiendo de la geomorfología del área.

Al ajustar las ecuaciones (3) y (5) en condiciones críticas para $h = hc$, la tasa de lluvia crítica I_c , para un período de retorno seleccionado, se puede evaluar de la siguiente manera:

$$I_c = \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \varphi} \frac{c'}{\gamma_w \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} z \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi} \right) \right) K \frac{b}{a} \sin \alpha \cos \alpha \quad (8)$$

La ecuación (8) es válida en la hipótesis de intensidad constante y duración indefinida de la lluvia. En consecuencia, el período de retorno correspondiente no está definido debido a la duración indeterminada. Para superar esta dificultad, la duración del evento de lluvia se fija igual al tiempo necesario para que el suelo alcance su estado estable. Una relación simple para evaluar dicho intervalo de tiempo, como un valor medio en una determinada porción de la cuenca formada por celdas M, es propuesta en la siguiente ecuación (Papa et al., 2010):

$$\tau_s = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{a_i}{b_i} \frac{\theta_{s_i}}{K_i \cos \alpha_i \sin \alpha_i} \quad (9)$$

Donde:

τ_s es el tiempo de saturación

θ_s es el contenido de agua en la saturación expresado como la relación de volumen de agua sobre el volumen total de suelo que se considera conveniente por igual a la porosidad.

El uso de θ_s se justifica bajo la hipótesis simplificada de suelo saturado, incluso por encima de la capa freática, debido a la infiltración de la lluvia. En la ecuación (9) se puede observar que el tiempo de saturación solo depende de los parámetros morfológicos y físicos y no de la lluvia, siendo la formulación del estado estacionario del flujo de agua subterránea.

Una vez que se evalúa el tiempo de duración de la lluvia (τ_s), como una especie de tiempo característico, la intensidad de la lluvia para los diferentes períodos de retorno se deriva de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

Este modelo cuantitativo se utiliza para identificar las zonas susceptibles, es decir, la construcción del mapa de iniciación del flujo, el modelo cuantitativo "infinteseleoprograma" implementa el algoritmo de pendiente infinita; el cual se ejecuta con el DEM y la construcción de las cinco capas de la información de los parámetros geomecánicos del suelo, cuyos datos de entrada se encuentran en formato ráster (ráster ASCII) y un archivo de texto con los parámetros de configuración.

Para lo cual es necesario construir las siguientes capas con información de los parámetros geomecánicos del suelo:

- Cohesión (Pa).
- Ángulo de fricción interna (radianes).
- Espesor del suelo (profundidad) (m).
- Conductividad hidráulica (mm/día).
- Intensidad de lluvia de acuerdo con los periodos de retorno (mm/día).
- Densidad saturada (kg / m³).

Al ejecutar el modelo se obtendrán los siguientes resultados:

- DEM con depresiones llenas: "fillsinks.asc", raster ESRI ASCII (m)
- Pendiente en radianes: "Slope.asc", ráster ESRI ASCII
- Cuadrícula de acumulación a / b: "acc.asc", ráster ESRI ASCII (m)
- Grado de saturación h / z: "h_z.asc", raster ESRI ASCII
- Factor de seguridad: "FS.asc". raster ASRII ESRI, si $FS \leq 1$ la célula es inestable; si $FS > 1$ la celda es estable.

Con el resultado del factor de seguridad se clasificará de acuerdo con las categorías que se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2 Definición de susceptibilidad simplificada, para el Programa InfiniteSlope

Susceptibilidad	Tr (años)	Factor de Seguridad
ALTO	10	≤ 1
MEDIO	100	≤ 1
BAJO	500	≤ 1

Fuente. (GITS-UPC, n.d.)

2.2.1.12 Programa debrisdice

Es un modelo estocástico de propagación del flujo, desarrollado por el Grupo de Investigación de Transporte de Sedimentos GITS de la Universidad Politécnica de Cataluña, el modelo estocástico consiste en un algoritmo de enrutamiento de flujo incorporado en una serie aleatoria para generar trayectorias de flujo. Gamma (1999) y Hürlimann et al. (2008), combinaron un algoritmo de enrutamiento de flujo D8 (O'Callaghan y Mark, 1984) con Montecarlo y la teoría aleatoria.

A partir de los puntos de inicio evaluados con modelos de iniciación de flujo (para esta investigación infiniteslope) o datos de campo, ese procedimiento permite obtener una trayectoria de flujo de propagación para cada punto y, posteriormente, se calculan las trayectorias de flujo n_{iter} . Finalmente, la probabilidad de invadir una celda P_{xy} , se calcula para cada celda del DEM utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{xy} = \frac{n_{afect}}{n_{iter}} \quad (10)$$

Donde:

n_{afect} es el número de trayectorias de flujo que invadieron una celda.

El resultado de este método es un mapa que contiene información sobre la probabilidad de que cada celda del DEM se vea afectada por un futuro flujo. El resultado depende en gran medida de la resolución de DEM y del número de iteraciones.

El primer mecanismo de detención del enrutamiento se evalúa mediante la siguiente ecuación la cual presenta una relación entre el ángulo de alcance y el volumen total de flujo (Corominas, 1996):

$$\tan \beta = H/L_{\max} = 0.97V^{-0.105} \quad (11)$$

Donde:

β es el ángulo de alcance.

H es el gradiente entre el centro de la masa del deslizamiento y el abanico.

L_{\max} es la distancia de viaje.

V es el volumen en m^3 de la cantidad total de sedimento movilizado, este volumen puede estimarse a través del modelo de iniciación.

El cálculo de la velocidad de flujo se logra aplicando la reología de flujo de fluidos Voellmy para flujo de desechos granulares (1955):

$$\frac{1}{2} \frac{dv^2}{ds} = g(\sin \alpha - \mu_m \cos \alpha) - \frac{v^2}{k} \quad (12)$$

Donde:

v es la velocidad de la mezcla.

s es la línea de la trayectoria del flujo.

μ_m es el coeficiente de fricción de deslizamiento.

k es el "coeficiente de turbulencia, también llamado "relación masa a arrastre".

μ_m y k deben definirse mediante un análisis posterior, pero los valores típicos pueden establecerse.

Cuando la velocidad es cero, el flujo se detiene (segundo método de parada).

A continuación, se describen los datos de entrada para ejecutar el modelo:

MONTECARLO (en el modo de datos de cuadrícula de iniciación) necesita un archivo maestro llamado "input.dat", un archivo ascii-raster y archivos * dll-ARCGIS:

input.dat: archivo maestro con la siguiente estructura:

A B

Nitro

EN

Alfa Beta

Mu, k

Dónde:

$A = 1$ iteraciones comienzan desde una sola celda, entonces IN debería definir las coordenadas x y y de esta celda.

$A = 2$ iteraciones comienzan desde muchas celdas dadas por un ascii-raster, (definido en la cuadrícula por valor = 1; otras celdas tienen valor = 0), luego IN debe ser el nombre del archivo ascii (por ejemplo, ini.dat).

$B = 1$ se calculará la trayectoria de flujo "más empinada", 0 la ruta de flujo "más empinada" no se calculará.

N_{iter} : número de iteraciones.

$Alpha$: ángulo de alcance.

$Beta$: ángulo de pendiente crítico entre dos celdas que provoca la detención del flujo. Por lo tanto, el flujo puede ser detenido por alfa o beta.

Mu : Factor de fricción de Coulomb (factor de fricción dinámico).

K : Relación masa a arrastre (resistencia al flujo en condiciones turbulentas)

topo.dat: archivo ráster ASCII de DEM

avbase.dll, avfeat.dll, avgridio.dll

Al ejecutar el modelo se obtendrán los siguientes resultados:

- "Topo" de la topografía.
- "Maxpend" "la ruta de flujo más empinada" (si $B = 1$)
Se indican las depresiones de "control" en la topografía y también las "celdas de parada" teóricas para el valor beta seleccionado.
- "Result_angle": valor de cuadrícula = número normalizado de veces que la celda es invadida por el flujo. Este resultado se obtiene utilizando los criterios de ángulo de alcance.
- "Result_vel": valor de cuadrícula = número normalizado de veces que la celda es invadida por el flujo. Este resultado se obtiene utilizando los criterios de parada de velocidad no negativa.
- "Velocidad": es el cálculo de la velocidad del flujo en m/s, para cada celda invadida incluida en "result_vel". La velocidad se calcula mediante la ecuación de conservación de energía.

Metodología existente

El objetivo del análisis de susceptibilidad es identificar cuáles son las variables que un área de estudio presenta mayor incidencia en la estabilidad de los taludes, de acuerdo con los la información histórica y los registros cartográficos de los deslizamientos identificados y a partir de estos datos, determinar las zonas que presentan mayor probabilidad a sufrir procesos de inestabilidad y clasificarlas en categorías de susceptibilidad alta, media y baja.

Un ejemplo de esto es el desarrollo de la "Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa. Escala 1: 25.000" elaborada en el año 2017 por el Servicio Geológico Colombiano SGC, entre cuyos objetivos misionales se encuentran la investigación, el seguimiento y el monitoreo de las amenazas geológicas para la gestión integral del riesgo, ordenamiento territorial y la planificación del territorio. En esta guía, se propone una metodología en la cual el primer paso es la identificación y preparación de los factores condicionantes (unidades geológicas superficiales, las subunidades geomorfológicas, las unidades de cobertura de la tierra y uso del suelo y el inventario de procesos morfodinámicos), una vez se cuente con las características morfométricas indicativas de ocurrencia de flujos en la cuenca, se propone para el análisis de susceptibilidad la identificación de zonas susceptibles a ser afectadas mediante el mapeo directo de subunidades geomorfológicas cuyo origen este relacionado principalmente con corrientes torrenciales que desembocan en zonas planas (denudacionales y fluviales). Dentro de las subunidades indicativas de procesos tipo flujo se mencionan la Tabla 3:

Tabla 3 Unidades/subunidades indicativas de procesos tipo flujo/avenida torrencial

GEOFORMAS INDICATIVAS DE PROCESOS TIPO FLUJO/AVENIDAS TORRENCIALES		
AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	UNIDAD/SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ACRÓNIMO
DENUDACIONAL	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado	Dft
	Lóbulo y cono de avalancha de detritos	Dlcad
	Lóbulo y cono de avalancha de rocas	Dlcar
FLUVIAL	Abanico aluvial	Faa
	Abanico aluvial antiguo	Faaa
	Abanico aluvial subreciente	Faas
	Abanico aluvial actual	Faaac
	Abanico aluvial incisado	Faai
	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados (bajadas)	Fac
	Cono de deyección	Fcdy

Fuente. (Servicio Geológico Colombiano, 2017b).

Obtenida la susceptibilidad del mapa de geomorfología se categoriza la susceptibilidad con base en las características que se presenta en la Tabla 4, también cabe resaltar que existen geofomas que pueden constituir posibles zonas de aporte de material durante el tránsito del flujo, las cuales a criterio del experto pueden ser mapeadas como zonas de susceptibilidad.

Tabla 4 Categorías de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo

CLASE O CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	UNIDAD / SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA
ALTA	Dlcad, Dlcar, Faaac, Fcdy
MEDIA	Faas
BAJA	Faaa, Faai

Fuente. (Servicio Geológico Colombiano, 2017b)

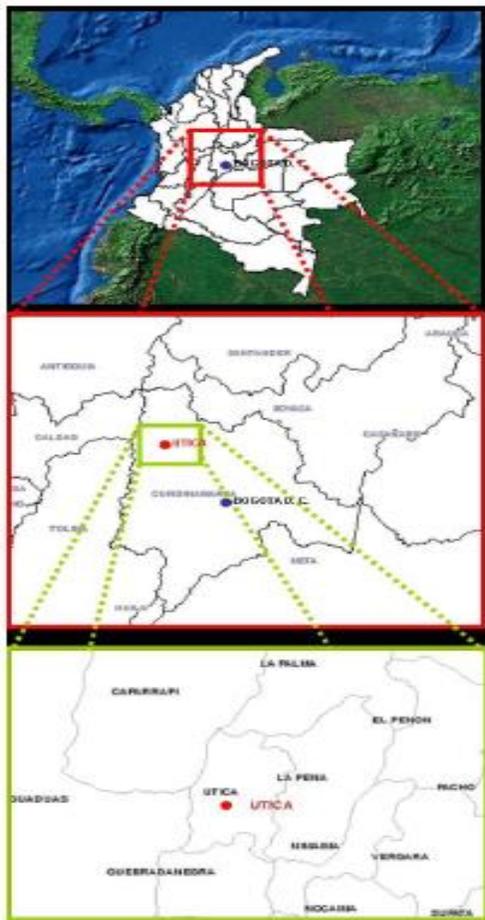
Finalmente, estos criterios deben ser validados con los datos obtenidos del inventario de procesos morfodinámicos, así como con cartografía social que permita definir áreas de inundación, alturas de flujo, recurrencia de los eventos.

3 ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de la quebrada La Negra presenta un área de 70.15 km², cuenta con un ancho máximo de 6.84 km, con un ensanchamiento medio de 4.53 km, los municipios de Útica y Quebradanegra hacen parte de la cuenca, y se encuentra entre los 497 y 2065 msnm, la corriente corre en sentido sur-norte y por la margen izquierda de esta llegan las aguas de las quebradas Verbena, La Chorrera, La Platanera, Agua Clara, La Papaya, La Jabonera, La Amargosa, El Descanso, La Rivera y La Seca, mientras que por la margen derecha llegan aguas de las quebradas Lázaro, Seca y La María. (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019).

De acuerdo con lo mencionado en el Plan de Ordenación y Manejo cuenca hidrográfica del río Negro POMCA (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2009), la cuenca de la quebrada La Negra se localiza en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, conformando la cuenca hidrográfica del río Negro en su parte media; en su nacimiento a los 1900 msnm toma el nombre de la quebrada La Esmeralda, cortando un valle en v de altas pendientes hasta los 1500 msnm en donde cambia de nombre al de la quebrada La Chorrera disminuyendo levemente la pendiente, drenando siempre con dirección oeste – este hasta la cota 950.

En la parte media la quebrada La Negra cambia de rumbo drenando con sentido sur - norte desde los 950 hasta los 488 msnm, en la confluencia con el río Negro, en jurisdicción del municipio de Útica, en una zona de medias a bajas pendientes, recibiendo en este tramo los aportes de drenajes de corta longitud entre las que se destacan las quebradas Platanera, Agua Clara y La Papaya siempre por la vertiente occidental.



Mapa 1 Área de estudio. Tomado (SGC, 2009).

La quebrada La Negra y sus afluentes se caracterizan por el alto potencial para arrastrar de manera continua rocas y materiales depositados en sus lechos, así como aquellos materiales producto de los movimientos en masa que en ocasiones obstruyen sus cauces. Así mismo, debido a la existencia de pendientes altas a lo largo del recorrido de la cuenca, existe la probabilidad del desarrollo de crecientes fuertes en corto tiempo, que originan un régimen torrencial, con la constante presencia de deslizamientos y avalanchas, asociadas al transporte de materiales de diferentes espesores, agravado por el hecho de la existencia de centros poblados (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2009).



Fotografía 9 Material transportado y depositado por la quebrada La Negra en su confluencia al río Negro. Fuente. (SGC, 2009).

Actualmente, la cuenca está intervenida principalmente con cultivos de caña de azúcar, los cuales contribuyen continuamente a la degradación de la roca parental y al movimiento de los suelos en la superficie, pues geológicamente estos suelos son susceptibles al movimiento, dado su elevado fracturamiento y disposición. Adicionalmente la acción del agua por escurrimiento e infiltración produce el arrastre de materiales en la corriente principal y genera movimientos en masa simples o complejos. Muchos de estos movimientos son consecuencia de la acción erosiva del agua en la base de las laderas, así como su propagación retrogresiva en la ladera en búsqueda de la condición de equilibrio. Los eventos de creciente hidrológica en la cuenca en combinación con eventuales represamientos de los cauces, generan constantemente flujos que degradan la cuenca y modifican las condiciones del abanico aluvial donde se encuentra el municipio de Útica (SGC, 2009).

3.1 ANTECEDENTES

Dadas las características particulares de la cuenca de la quebrada La Negra, históricamente ha presentado problemas de inundaciones y movimientos en masa, asociados a la socavación, lluvias intensas y rocas con intensos grados de fracturamiento, y teniendo en cuenta la clasificación propuesta por Hungr et al. (2001), mencionada anteriormente, esta cuenca es altamente susceptible a la formación de flujos con altas concentraciones de material sólido (flujos de lodos y/o flujos hiperconcentrados), los cuales, frecuentemente son depositados en el abanico aluvial de la quebrada en su parte baja.

De acuerdo con el Plan Municipal de Gestión del Riesgo del Municipio de Útica (CMGRD Útica, 2012), la noche del 17 de noviembre de 1988 el municipio se vio afectado por las corrientes que lo circundan, presentando una situación especialmente crítica; la quebrada La Negra produjo un movimiento en masa tipo flujo y la quebrada La Papaya se represó, ocasionando afectaciones a la población y cuantiosos daños materiales. Este evento fluctuó entre uno y dos metros y dejó un espeso depósito de lodo, como lo evidencian la Fotografía 10 y la Fotografía 11.



Fotografía 10 Cementerio Útica después de avalancha noviembre 1988. Tomado (Pedraza, 2016).



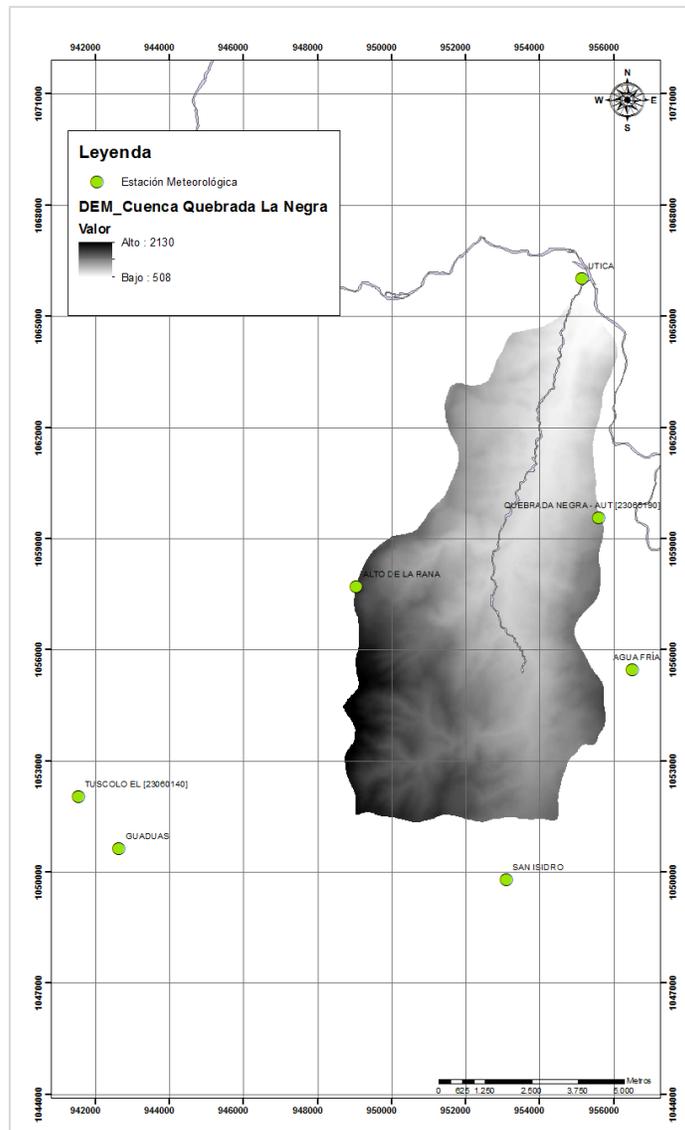
Fotografía 11 Puente Ferrocarril municipio de Útica después de avalancha noviembre 1988. Tomado (Pedraza, 2016).

Así mismo, la noche del primero de mayo de 1990 se presentó una nueva creciente en la quebrada La Negra, calificada por los habitantes como superior a la ocurrida en 1988, tres víctimas mortales, 171 familias damnificadas, cerca de 80 viviendas destruidas total y parcialmente y cultivos arrasados, dejó el flujo de lodo espeso y crecientes de grandes proporciones en la quebrada Negra.

Otro antecedente que se puede mencionar, fue durante la ola invernal 2010 – 2011 “Fenómeno de La Niña”, el día 18 de abril de 2011 el municipio se vio afectado por un movimiento en masa tipo flujo de la quebrada La Negra, donde la población en general presentó los siguientes resultados de afectación: en la zona urbana se registraron 55 viviendas destruidas, 329 viviendas averiadas y en la zona rural se registraron 12 viviendas destruidas, 72 viviendas averiadas y dos personas que perdieron la vida.

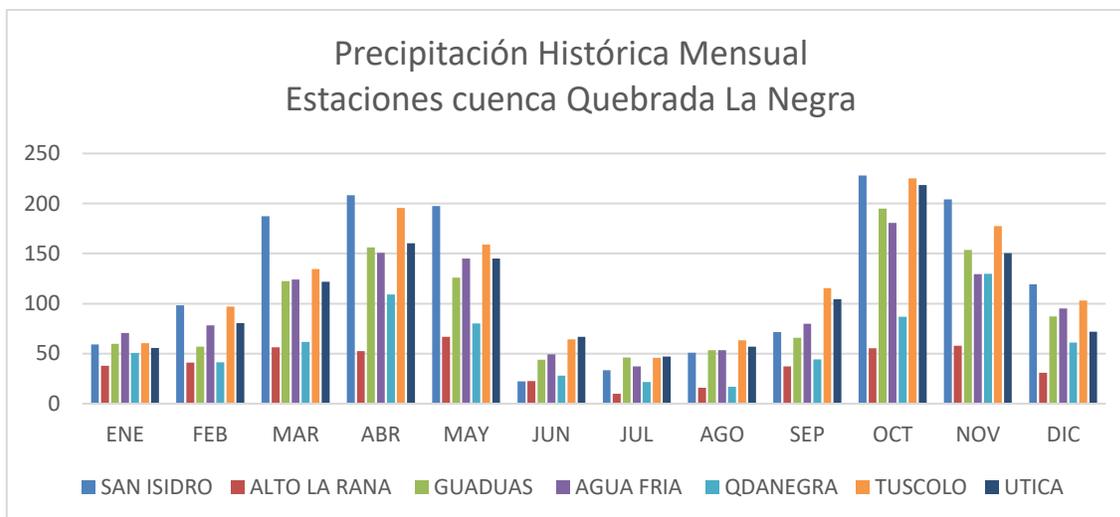
3.2 PRECIPITACIÓN

El análisis de los valores de precipitación en su distribución temporal y espacial en la cuenca de la quebrada La Negra, se realizó a partir de los valores medios mensuales de las estaciones meteorológicas localizadas dentro del área de estudio, posterior a un análisis de consistencia de la información. Las estaciones meteorológicas utilizadas para este análisis se presentan en el Mapa 2.



Mapa 2 Estaciones meteorológicas, cuenca quebrada La Negra.

Debido a la localización geográfica de la zona de estudio, ubicada en una zona de bajas latitudes, entre los 5° 14' y 5° 45' al norte del Ecuador, sobre la vertiente occidental de la cordillera oriental en la zona andina colombiana, el clima de la región es de carácter tropical, determinado principalmente por las variaciones altimétricas, la topografía del relieve y la influencia que ejerce el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ITC), la cual genera a su paso dos períodos húmedos y dos secos que se presentan intercalados a lo largo del año, como se observa en la Gráfica 1.

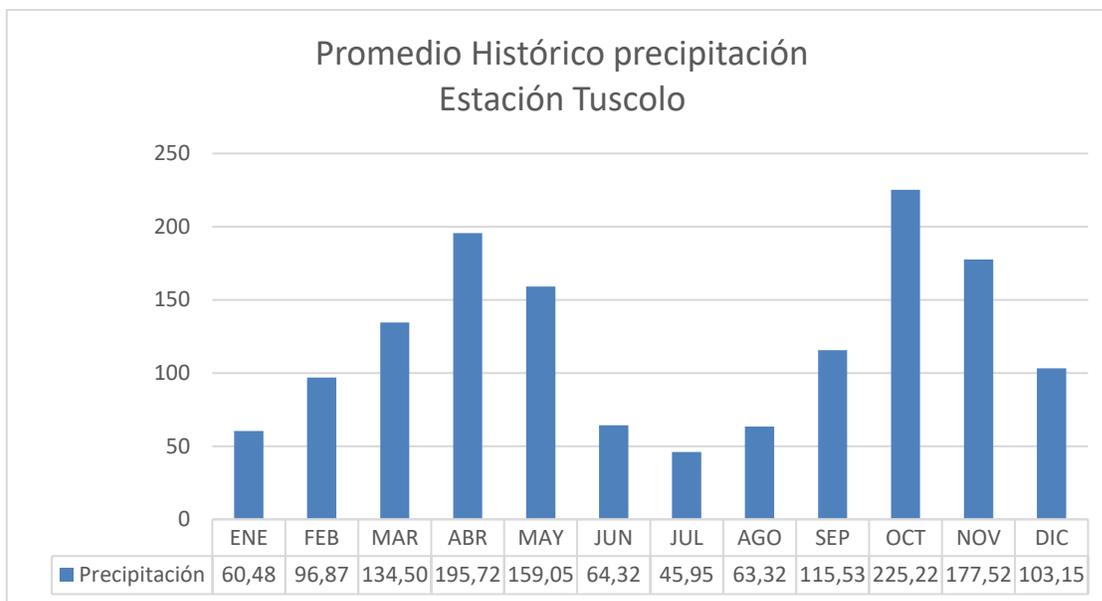


Gráfica 1 Precipitación histórica mensual estaciones cuenca quebrada La Negra.

Distribución Temporal

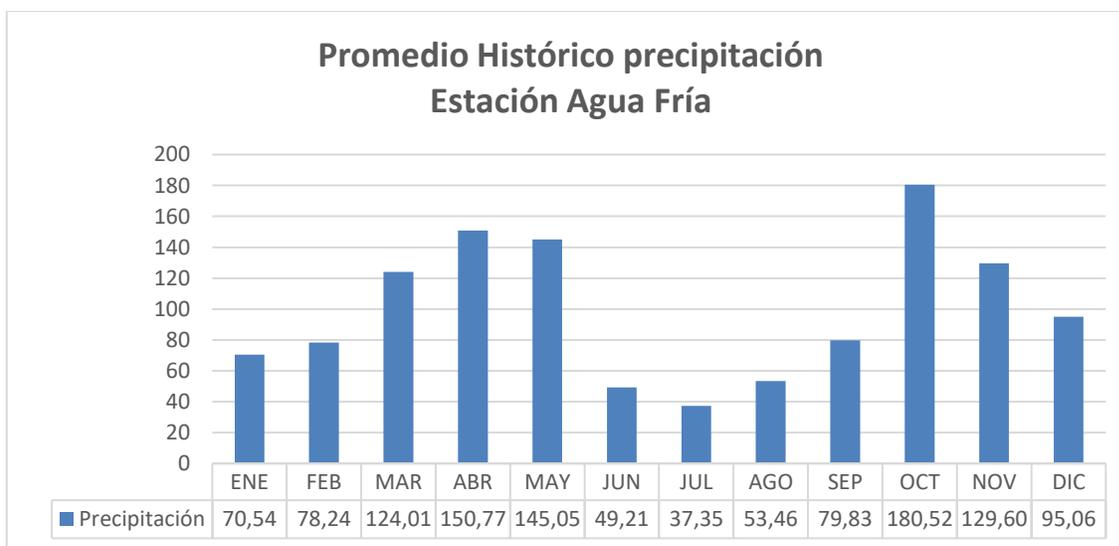
El área de estudio se caracteriza por presentar dos temporadas lluviosas a lo largo del año: la primera comienza en abril y se extiende hasta finales de mayo, mientras que la segunda inicia en el mes de octubre al mes de noviembre, esta distribución de la precipitación a lo largo del año está marcada por el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) sobre la zona ecuatorial, correspondiente a una franja de bajas presiones a donde llegan las corrientes de aire cálido y húmedo provenientes de los grandes cinturones de alta presión, ubicados en la zona subtropical de los hemisferios Sur y Norte, dando origen a la formación de grandes masas nubosas y abundantes precipitaciones.

En la parte alta del área de estudio se referenció la estación Tuscolo, como se presenta en la Gráfica 2, donde se evidencia los dos periodos de lluvia, iniciando el primer periodo en el mes de marzo y finalizando en mayo con valor máximo de precipitación mensual para el mes de abril con 195.72 mm y en el segundo periodo se evidencia que el mes de octubre es el que registra la mayor precipitación con 225.22 mm, en total la precipitación anual para esta estación es de 1441.62 mm.



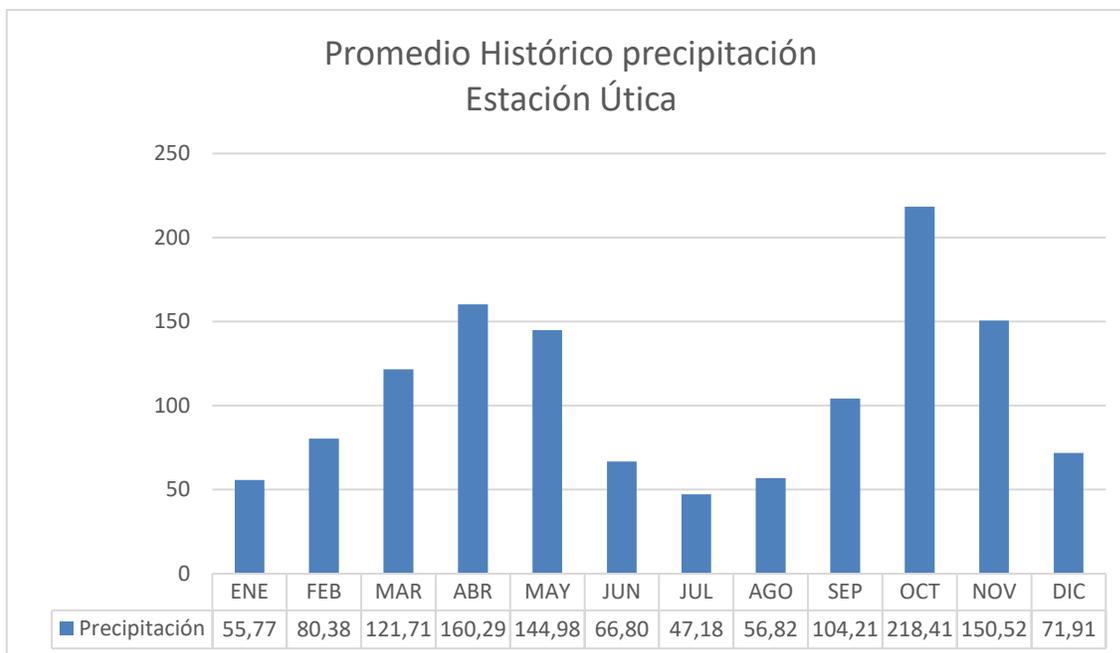
Gráfica 2 Promedio histórico precipitación, estación Tuscolo.

En la Gráfica 3 se observa el comportamiento típico de esta zona de acuerdo con la estación pluviométrica agua fría ubicada en la zona media de la cuenca, registrando los valores más altos de precipitación en el segundo periodo húmedo en el mes de octubre (189.52 mm) y para el primer periodo húmedo en el mes de abril (150.77 mm), para los meses de junio y julio se presenta el mayor déficit de precipitación en esta estación con valores de 49.21 mm y 37.35 mm respectivamente, para una precipitación total anual de 1193.64 mm.



Gráfica 3 Promedio histórico precipitación, estación Agua Fría.

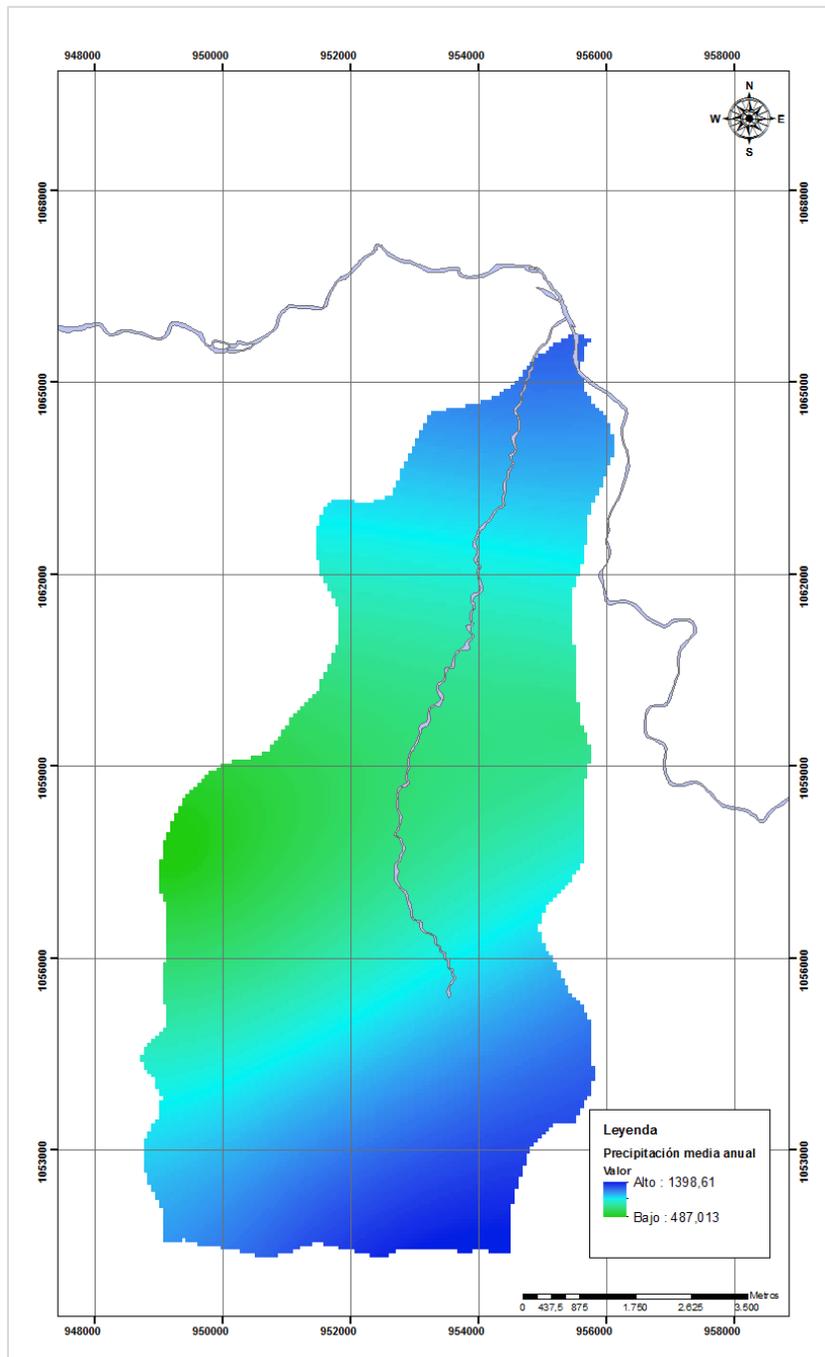
Con la estación útica como se presenta en la Gráfica 4 se realizó el análisis de la precipitación para la zona baja de la cuenca, en esta estación se registra una precipitación total anual de 1278.98 mm, igual que las anteriores estaciones registran sus máximas en el mes de abril y octubre (160.29 mm y 218.41 mm), y siendo el mes de julio con 47.18 mm el periodo más seco en esta estación.



Gráfica 4 Promedio histórico precipitación, estación Útica.

Distribución Espacial

La precipitación media anual en el área de estudio que conforma la cuenca de la quebrada La Negra, varía desde los 484.46 mm hasta 1480.67 mm al año. La zona más húmeda corresponde a la parte alta de la cuenca, donde alcanza valores que varían 1166.75 y 1480.67 mm anuales. La zona que registra valores más bajos de precipitación es la media occidental de la cuenca, donde las cantidades totales, en promedio, bordean los 484.46 mm al año. El promedio anual de la precipitación de la cuenca de la quebrada La Negra es de 1111.10 mm.



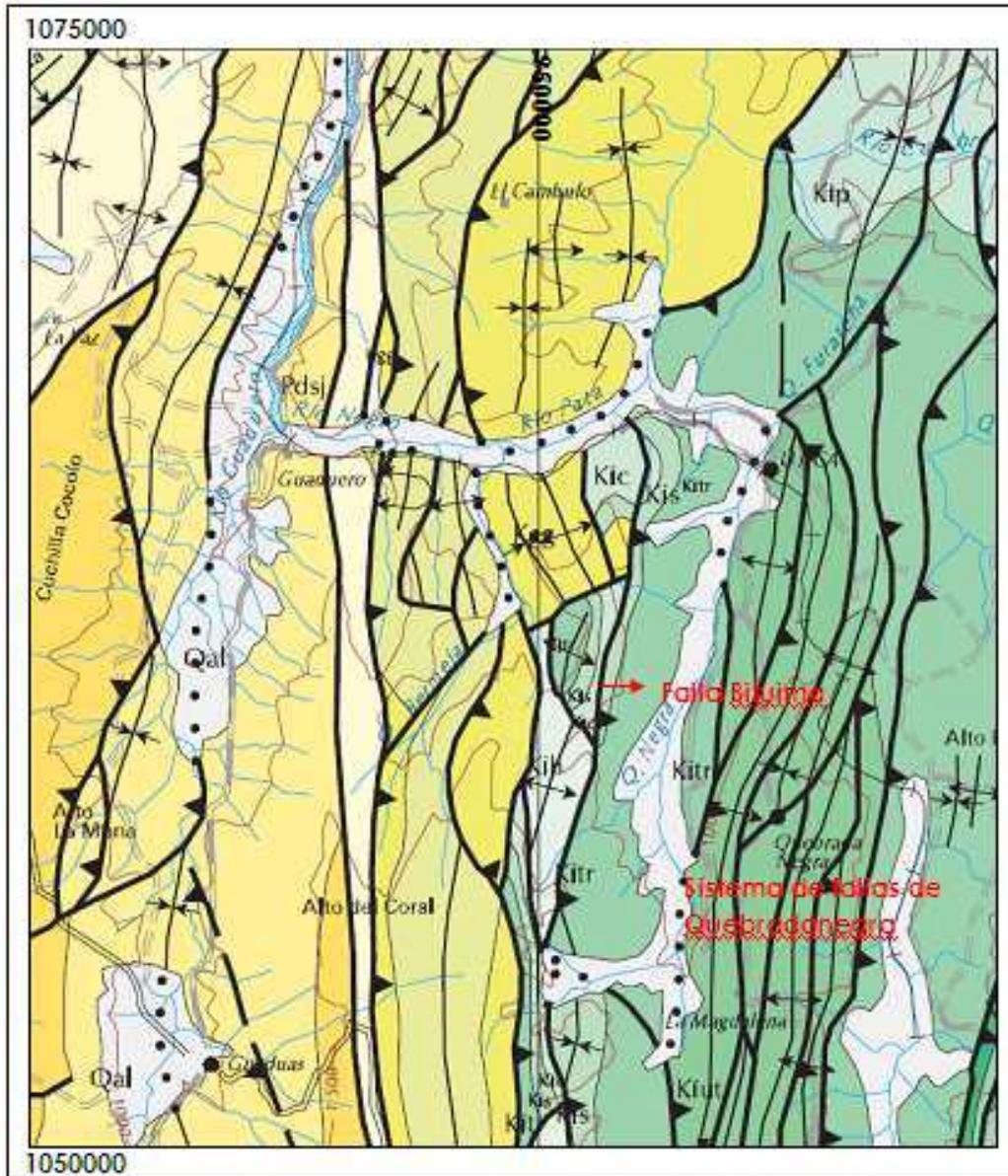
Mapa 3 Precipitación media anual, cuenca quebrada La Negra.

3.3 GEOLOGÍA

En el Mapa 4 se presenta el mapa geológico de la cuenca de la quebrada La Negra que de acuerdo con los resultados de la formulación de una guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo flujo (SGC, 2009), la cuenca está conformada por niveles de lutitas, limolitas y algunas calizas y areniscas en la vertiente occidental y por areniscas, limolitas y algunas lutitas en la vertiente oriental, todos intensamente fracturados y plegados.

Dichas rocas se agrupan en las siguientes unidades:

- Grupo Guaguaquí
- Grupo Olini (Formación Lidita Inferior y Formación Nivel de Lutitas y Arenitas)
- Grupo Villeta (Fm. Hiló, Fm. Capotes, Fm. Socotá y Fm. Trincheras)
- Formación Útica.



Mapa 4 Geología generalizada, cuenca quebrada La Negra. Tomado.(SGC, 2009).

Grupo Guaguaquí (kgg)

El grupo Guaguaquí fue un nombre definido por Ulloa et al. (1978), para designar la secuencia estratigráfica, que aflora bajo el Grupo Olini, en la parte norte (Acosta y Ulloa, 2002).

En la quebrada La Negra este grupo aflora principalmente en la parte alta de la vertiente izquierda y en la esquina noroccidental. Está constituido por lodolitas calcáreas, negras, con laminación paralela

continua, concreciones "gigantes" y capas concrecionales medias a gruesas de caliza micrítica; intercalados ocurren varios conjuntos de hasta 20m de liditas negras, en capas delgadas, con estratificación plana paralela (Acosta y Ulloa, 2002).

Etayo (1979; en Rodríguez y Ulloa, 1994), le asigna una edad comprendida desde el Albiano medio hasta el Coniaciano inferior, con base en la fauna colectada. El trabajo de Martínez (1990), con base en foraminíferos, no permitió establecer precisiones acerca de la edad, aunque sugiere sedimentación hemipelágica en ambiente de aguas profundas (Acosta y Ulloa, 2002).

Grupo olini (kso)

El grupo olini se encuentra constituido por dos niveles silíceos, el primero denominado Lidita Superior y el segundo Lidita Inferior, estos se encuentran separados por un nivel de lodolitas.

3.3.1.1 Formación lidita inferior (ksli)

Está constituida por capas muy delgadas de chert, liditas y limolitas silíceas, con estratificación ondulosa no paralela, y laminación paralela continua. El contacto inferior de la unidad se colocó en la base de la capa más baja de chert, la cual suprayace a una secuencia espesa de lodolitas laminadas grises oscuras; el contacto superior se colocó en el techo de la capa más alta de chert, la cual infrayace a una sucesión de lodolitas silíceas y calcáreas. Su espesor estimado a partir de cortes geológicos es de 150m (Acosta y Ulloa, 2002).

Bürgl y Dumit (1954), citan para la unidad Globigerina Cretácea, Inoceramus peruanus y Texanites aff. Serratmarginatus con la que le asignan a la unidad una edad Coniaciano temprano; sin embargo, Martínez (1990) cita la presencia de Globotruncana fornicata en la parte alta de la unidad y sugiere que la unidad podría alcanzar el Santoniano temprano. La Formación Lidita Inferior es probablemente el producto de sedimentación pelágica, en un ambiente rico en sílice (Acosta y Ulloa, 2002).

3.3.1.2 Formación nivel de lutitas (ksl)

El nombre de esta formación fue propuesto por De Porta (1965), para referirse al conjunto medio del Grupo Olini; está constituido por una secuencia de limolitas de cuarzo y lodolitas calcáreas y silíceas, ligeramente micáceas, con intercalaciones de arena fina a media, en capas muy gruesas; además ocurren esporádicas calizas lodosas, en capas delgadas a medias y concreciones micríticas. El contacto inferior de la unidad se trazó en la base de la capa más baja de lodolitas calcáreas, la cual suprayace a una secuencia de limolitas silíceas y chert; el contacto superior se trazó en el techo de la capa más alta de lodolitas calcáreas, la cual infrayace a una secuencia de liditas. El espesor de este nivel, estimado en cortes geológicos, es de aproximadamente 100m (Acosta y Ulloa, 2002).

Bürgl y Dumit (1954), citan para esta unidad Bulimina compreza, Dentalina lorneiana, Haplophragmoides excavata y Anomalina redmondi, a las que le asignan una edad Santoniano. Martínez (1990), con base en foraminíferos apoya esa edad. Las características faciales de la unidad soportan condiciones de depósito, en una plataforma calcárea – silícea (Acosta y Ulloa, 2002).

Grupo villeta

Este grupo se encuentra conformado dentro de la cuenca quebrada La Negra por las formaciones Trincheras, Socotá, Capotes, Hiló.

3.3.1.3 Formación trincheras (kitr)

Esta unidad conforma una faja amplia, principalmente en la parte media e inferior de la vertiente izquierda de la quebrada La Negra, la Formación Trincheras genera una morfología de relieves suaves, por lo general formando valles amplios. El nombre de esta formación fue propuesto por Cáceres y Etayo (1969), para designar la secuencia de lodolitas con intercalaciones de calizas y arenitas de la parte inferior del Grupo Villeta.

Esta formación se conforma litológicamente de arcillolitas laminadas de color gris oscuro a negro y café rojizo oscuro por meteorización; contiene algunos niveles calcáreos, ffsiles; ocasionalmente concreciones silíceas, ovaladas, de 1 a 5 cm de diámetro, que contienen algunos moldes de bivalvos. Hacia el tope ocurren bioesparitas y pelmicritas con abundantes restos de moluscos, equinoideos y briozoos. Igualmente presenta delgadas intercalaciones de areniscas de grano fino y limolitas calcáreas (Acosta y Ulloa, 2002).

De acuerdo con (SGC, 2009), el espesor de la unidad, con cortes geológicos regionales, se estimó en 600 m. No se conocen datos acerca de su edad, pero por su posición estratigráfica se puede asumir que corresponde al Aptiano. Su depósito ocurrió posiblemente bajo condiciones de aguas más profundas (Acosta y Ulloa, 2002).

3.3.1.4 Formación Socotá (Kis)

Esta formación consta de una secuencia interestratificada de arcillolitas y limolitas silíceas, a veces calcáreas, con laminación ondulosa y lenticular, intercaladas con areniscas de cuarzo, de grano fino a conglomerático, con cemento calcáreo, en secuencias gradadas (Acosta y Ulloa, 2002). Fue mencionada inicialmente por Cáceres y Etayo (1969). La Formación Socotá aflora en franjas delgadas, conformando escarpes fuertes y sus mejores exposiciones se presentan en la parte media alta de la vertiente izquierda de la quebrada La Negra (Acosta y Ulloa, 2002).

De acuerdo con la clasificación paleontológica, Etayo (1979) le asignó una edad Aptiano tardío. Polanía y Rodríguez (1978), interpretaron esta unidad como una variedad turbidítica, con áreas de aporte localizadas al N-NE y N-NW; sugieren además, "transporte longitudinal y paralelo a la mayor elongación del depósito, el cual se efectuó bajo condiciones de corrientes densas, con gradiente bajo y predominio de flujo laminar". Pimpirev (com. verb.) determina para esta formación un ambiente de plataforma submareal y manifiesta no haber encontrado las características que permitan considerarla de tipo turbidítico (Acosta y Ulloa, 2002).

3.3.1.5 Formación Capotes (Kic)

Esta unidad refleja lodolitas calcáreas laminadas de color negro y arcillolitas lodosas no calcáreas en la base; hacia el techo de la unidad ocurren capas medias a delgadas de caliza concrecional y concreciones micríticas de tamaño variable. El contacto inferior con la Formación Socotá es concordante, el contacto superior es igualmente concordante. (Acosta y Ulloa, 2002).

En la cuenca la quebrada La Negra esta unidad aflora en la parte media alta de la vertiente izquierda. Por el contenido de materia orgánica y la presencia de yeso, se sugiere una sedimentación en una cuenca cerrada de aguas tranquilas (Acosta y Ulloa, 2002).

3.3.1.6 Formación Hiló (Kih)

Está constituida por una secuencia de limolitas silíceas y calcáreas, en capas planas, con laminación plano paralela, interestratificadas con lodolitas calcáreas; a veces ocurren capas de chert y concreciones micríticas. Su contacto inferior es concordante y se marcó en la base de la capa más baja de limolita silícea; el contacto superior de igual forma es concordante (Acosta y Ulloa, 2002). En la cuenca esta unidad aflora en la parte media alta de la vertiente izquierda de la quebrada La Negra, formando franjas alargadas, que se destacan en el relieve, conformando un pliegue anticlinal (Acosta y Ulloa, 2002).

Esta unidad fue referenciada inicialmente por Hubach (1931), como Horizonte de Hiló, para referirse a la secuencia silícea aflorante en proximidades del Caserío Boquerón de Hiló. Posteriormente, Cáceres y Etayo (1969) la ascienden al rango de formación y es formalizada por Acosta (1993).

Bürgl (1957), con base en amonitas le asigna una edad Albiano medio a superior; sin embargo, Martínez (1990), con base en foraminíferos determina para esta formación una edad Albiano tardío -

Cenomaniano temprano. Las características faciales sugieren el depósito de sedimentos pelágicos y hemipelágicos, como producto del ascenso relativo del nivel del mar (Acosta y Ulloa, 2002).

Formación útica (kiut)

Esta unidad fue referenciada inicialmente por Hubach (1957b), Bürgl (1956), Thompson (1966) e Ingeominas (1975), y al trabajar esta unidad la denominan Arenisca de Cáqueza, por analogía con el oriente de la Cordillera Oriental; posteriormente Moreno (1989, 1990, 1991) la denomina informalmente Areniscas de Útica y Formación Útica. En la cuenca de la quebrada La Negra, la unidad aflora en los alrededores de la población de Quebradanegra, formando el núcleo de un anticlinorio y conforma las laderas de la vertiente Oriental de la quebrada La Negra (Acosta y Ulloa, 2002).

Está constituida litológicamente por areniscas subarcósicas y sublitoarenitas de grano fino a muy grueso y ocasionalmente conglomerados, en capas gruesas a muy gruesas, frecuentemente cuneiformes; a menudo se presentan intercalaciones rítmicas de limolitas y lodolitas negras, en capas delgadas y medias. Calizas arenosas, biomicríticas y micríticas son frecuentes dentro de la unidad (Acosta y Ulloa, 2002).

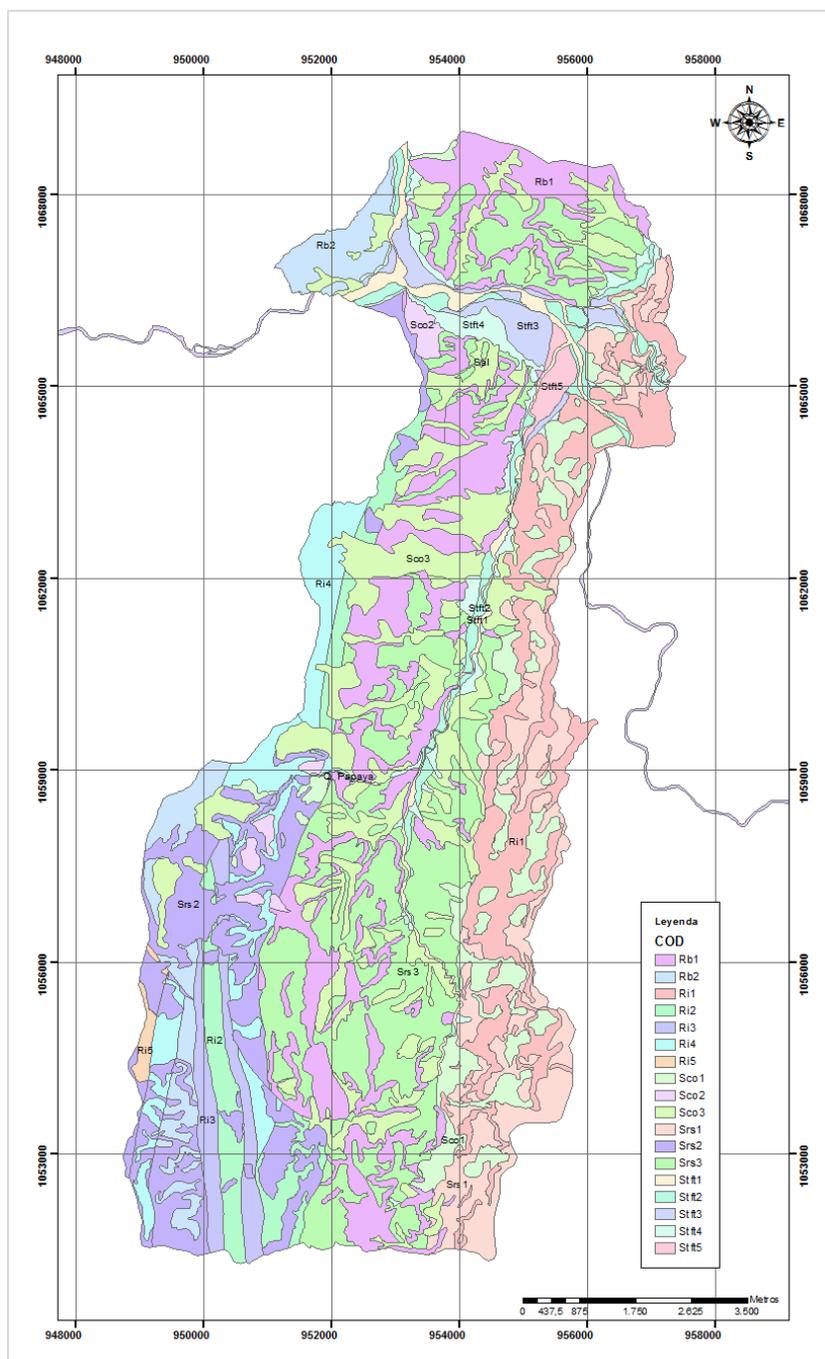
Esta unidad presenta una morfología en general abrupta, con laderas de pendientes altas. Moreno (1989, 1991), propone un depósito en condiciones marinas someras, Villamil (1988), propone un origen turbidítico, mientras Pimpirev et al. (1992), interpretan el depósito como de desborde de canales, en un ambiente de abanico turbidítico proximal (Acosta y Ulloa, 2002).

3.4 GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

La geología para ingeniería es el elemento de zonificación de las condiciones geológicas de los materiales superficiales, que permiten caracterizar el estado físico y poder determinar en forma semicuantitativa y cuantitativa las propiedades mecánicas de dichos materiales, para obtener una clasificación en unidades de comportamiento homogéneo, en cuanto a las propiedades básicas de geología para ingeniería. Los mapas de geología para ingeniería constituyen la base para la elaboración de mapas de zonificación geomecánica y otros documentos de utilidad.

Las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) corresponden a un conjunto (homogéneo) de materiales geológicos que afloran en la superficie, que provienen del mismo origen y conservan en general las mismas características físicas y de comportamiento geomecánico, hasta algunas decenas de metros por debajo de la superficie del terreno (Servicio Geológico Colombiano, 2017b).

Como resultado de los lineamientos metodológicos y a los criterios utilizados en la formulación de una guía metodológica para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa tipo flujo, 2009, los materiales geológicos superficiales que se presentan en el área de la cuenca de la quebrada La Negra, se caracterizan y clasifican en unidades de roca y unidades de suelo.



Mapa 5 Unidades geológicas superficiales, cuenca quebrada La Negra, basado (SGC, 2009).

Unidades de roca

Esta unidad está conformada por macizos rocosos de resistencia intermedia (macizos rocosos de las Formaciones Útica, Socotá, Capotes, Hiló, Lidita Inferior, Nivel de Lutitas y Arenitas) y macizos rocosos de baja resistencia (Fm Trincheras, Grupo Guaguaquí).

Para la cuenca de la quebrada La Negra, esta unidad de rocas se subdividió en rocas intermedias y blandas, las cuales fueron caracterizadas de acuerdo con su litología, en la cuenca no fueron identificados materiales de resistencia alta.

3.4.1.1 Macizos rocosos de resistencia intermedia

En esta unidad se integran los materiales de resistencia intermedia a alta. Por su litología, textura, su consistencia, fracturación y grado de meteorización, las rocas intermedias en la cuenca de la quebrada La Negra se dividen en 5 subclases.

3.4.1.1.1 *Rocas Intermedias Clase 1 (Ri1)*

Conforman relieves ondulados a montañosos, con baja densidad de drenaje e incisión baja a moderada. Estas rocas se presentan como fajas alargadas en dirección NNE, en la vertiente oriental de la cuenca, aflorando en la vía que conduce del corregimiento La Magdalena al municipio de Quebradanegra, en la vía que conduce del municipio de Quebradanegra a Útica y en las inmediaciones del municipio de Útica.

Estos materiales están compuestos por areniscas arcósicas a sublitoarenitas de grano fino conglomeráticas, en secuencias gradadas poco cementadas, con estratificación media a muy gruesa, intercaladas con lutitas negras en estratificación media a delgada y biomicritas.

La secuencia se presenta de moderadamente a altamente meteorizada, con desarrollo de suelo residual en algunos sectores. La consistencia es media a dura, la fracturación es baja, sin embargo, se presentan sectores altamente fracturados. El número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen 1m^3 de un macizo rocoso- Jv se encuentra entre 4 y 16 diaclasas/ m^3 y el GSI entre 50 y 70%. Estos materiales corresponden a la Formación Útica.



Fotografía 12 Rocas intermedias clase 1 (Ri1), areniscas arcósicas a sublitoarenitas. Sector vía La Magdalena – quebrada La Negra. Fuente. (SGC, 2009).

3.4.1.1.2 *Rocas Intermedias Clase 2 (Ri2)*

Conforman un relieve variado desde moderado hasta abrupto. Esta unidad aflora en la parte media alta de la margen izquierda de la quebrada La Negra, como fajas estrechas orientadas en dirección NNE, en la parte media – alta de la microcuenca de la quebrada Los Reyes y la parte media – baja de la microcuenca de las quebradas La Esmeralda y La Esmeraldita.

Estos materiales corresponden a una secuencia interestratificada de arcillolitas, y limolitas silíceas, ocasionalmente calcáreas, con laminación ondulosa y lenticular e intercalaciones delgadas de areniscas de cuarzo conglomeráticas, de grano fino, con cemento calcáreo, en secuencias gradadas.

La consistencia de estos materiales es blanda a media y se presentan moderadamente fracturadas, poco meteorizadas, con sectores altamente meteorizados con desarrollo de suelo residual. El Jv de las limolitas es 10 diaclasas/ m^3 y el GSI= 50% - 60%. Estos materiales corresponden a la Formación Socotá.



Fotografía 13 Roca Intermedia clase 2, sector confluencia Quebrada Los Reyes y La Esmeralda. Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.1.3 Rocas Intermedias Clase 3 (Ri3)

Esta clasificación de rocas exhiben una morfología muy variada, desde laderas con pendientes suaves hasta abruptas y escarpadas. Se presenta como una faja alargada en el sector suroccidental de la cuenca, en la parte media – alta de las microcuencas de las quebradas La Esmeralda, La Esmeraldita, Los Reyes, La Platanera y Agua Clara.

Estos materiales están constituidos por una secuencia interestratificada de lutitas calcáreas, a veces silíceas y limolitas silíceas, con estratificación delgada a media, laminación plana paralela y esporádicas capas de micrita con algunos niveles de concreciones grises oscuras a negras. En esta unidad rocosa las lutitas son fisibles, de consistencia blanda a dura, moderadamente fracturadas, su grado de meteorización varía entre poco meteorizada y altamente meteorizada con desarrollo de suelo residual en algunos sectores.

El Jv para los niveles limolíticos en esta unidad es de 10 – 20 diaclasas/m³ y el GSI varía entre regular y bueno (40 y 60%). Esta unidad corresponde a las Formaciones Capotes e Hiló.



Fotografía 14 Detalle de la roca intermedia clase 3 (Ri3), lutitas calcáreas, a veces silíceas y limolitas silíceas. Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.1.4 Rocas intermedias Clase 4 (Ri4)

Presentan una morfología en general de ondulada a escarpada, afloran en el sector suroccidental de la cuenca, como franjas alargadas en sentido NNE, en el nacimiento de la quebrada El Descanso, la parte alta – media de la microcuenca de la quebrada La Papaya y la zona media de la quebrada Agua Clara.

Su secuencia está constituida por capas muy delgadas de chert, liditas y limolitas silíceas, con estratificación ondulosa no paralela, y laminación paralela continua. La consistencia de este material es dura, están altamente fracturados y moderadamente meteorizados. El Jv está entre 20 y 30

diaclasas/m³ y el GSI es de regular a bueno (40% - 60%). Esta secuencia corresponde al Grupo Olini, Formación Lidita Superior.



Fotografía 15 Detalle de la roca intermedia clase 4, chert, liditas y limolitas silíceas. Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.1.5 Rocas Intermedias Clase 5 (Ri5)

Esta unidad de roca presenta una morfología en general de montañosa a escarpada, afloran en el límite suroccidental de la cuenca, como una pequeña franja alargada en sentido NNE. Su secuencia interestratificada de limolitas silíceas y lodolitas calcáreas ocasionalmente silíceas, intercaladas con areniscas de cuarzo finas a medias, en capas delgadas a medias. La consistencia de estos materiales es dura, están altamente meteorizados y moderadamente fracturados. El Jv 10 – 20 diaclasas/m³ y el GSI es de regular a bueno (40 – 60%). Esta secuencia corresponde al Grupo Olini, Formación Nivel de Lutitas.

3.4.1.2 Macizos rocosos de resistencia baja -rocas blandas

Está conformado de los materiales de consistencia blanda a muy blanda. Por su composición litológica, textura y grado de meteorización, en la cuenca de la quebrada La Negra se presentan en dos unidades: rocas blandas clase 1 y clase 2.

3.4.1.2.1 Rocas Blandas Clase 1 (Rb1)

Presentan en general una morfología ondulada, de relieves suaves, por lo general formando valles amplios, con laderas de pendiente topográfica de suaves a altas, en sectores localizados abruptas. Afloran principalmente en la parte media baja de las vertientes izquierda y derecha de la quebrada La Negra.

Esta unidad se constituye de lutitas negras, ocasionalmente silíceas y calcáreas, con estratificación delgada a laminar, fisibles, con concreciones de tamaños variables e intercalaciones esporádicas de calizas y areniscas. Estos materiales son muy fisibles de consistencia blanda, están moderadamente fracturadas y de baja a moderada meteorización, originando suelo residual de bajo espesor. Estos materiales corresponden a la Formación Trincheras.



Fotografía 16 Roca blanda clase 1, lutitas negras, diaclasadas. Fuente. (SGC, 2009).

3.4.1.2.2 Rocas Blandas Clase 2 (Rb2)

Al igual que la unidad de Rocas Blandas Clase 1 (Rb1), presenta una morfología en general ondulada, con laderas de pendiente topográfica desde suaves hasta altas. Afloran en el límite occidental de la cuenca de la Quebrada La Negra (Vereda Santa Lucía), en su parte media.

Estos materiales están conformados por lutitas calcáreas negras, en estratificación delgada a laminar, con concreciones calcáreas e intercalaciones de limonita silíceas, ocasionalmente chert y calizas arenosas. La consistencia es baja y están poco a moderadamente fracturadas y moderadamente meteorizadas. Estas rocas corresponden al Grupo Guaguaquí.



Fotografía 17 Detalle de la estratificación delgada laminar, de la roca blanda clase 2. Fuente. (SGC, 2009).

Unidades de suelo

El material de suelo fue clasificado de acuerdo a su origen y granulometría, los cuales se agruparon en las unidades: Residuales y Transportados (Coluviales y Fluvio-torrenciales); cada una de estas unidades se subdividieron teniendo en cuenta su granulometría y/o textura, de los cuales se obtiene; suelos residuales (predominantemente areno-limosos, predominantemente limo-arcillosos y predominantemente arcillo-limosos); suelos coluviales (matriz y fragmentos predominantemente areno-limosos (clase 1), matriz y fragmentos predominantemente limo-arcillosos (clase 2); y matriz y fragmentos predominantemente arcillo-limosos (clase 3) y depósitos fluvio-torrenciales actuales y antiguos.

3.4.1.3 Suelos residuales (Srs)

Los suelos residuales, son materiales producto de la meteorización y descomposición de las rocas in situ. De acuerdo con su composición litológica, textura y granulometría se clasifican en tres clases: predominantemente arenosos, (Clase 1); limosos (Clase 2) y arcillosos (Clase 3), a continuación, se mencionan cada una de estas clases en la cuenca de la quebrada La Negra.

3.4.1.3.1 Suelos Residuales Clase 1 (Srs 1)

Estos suelos son predominantemente arenosos, con arcillas y limos en menor proporción, producto de los procesos de meteorización de las areniscas de la Formación Útica. El espesor de esta unidad varía entre 0.5 y 4 m aproximadamente.



Fotografía 18 Suelo residual clase 1, derivado de rocas intermedias clase 1 (Fm. Útica). Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.3.2 Suelos Residuales Clase 2 (Srs 2)

Predominantemente limosos, con arcillas y arenas en menor proporción. Las rocas parentales de esta clase de suelos son las lutitas limolitas y areniscas de las Formaciones Socotá, Capotes, Hiló, Lidita Inferior, Nivel de Lutitas y Arenitas y Grupo Guaguaquí. El espesor de esta unidad oscila entre 0.5 y 2m.



Fotografía 19 Suelo residual clase 2, derivado de rocas intermedias clase 4 (Fm. Lidita Superior). Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.3.3 Suelos Residuales Clase 3 (Srs3)

Este tipo de clase de suelo es predominantemente arcillosos, con arenas y limos. Las rocas que dieron lugar a estos suelos son las lutitas de la Formación Trincheras. El espesor de esta clase de suelos oscila entre 0.5 y 1m aproximadamente.



**Fotografía 20 Suelo residual clase 3, derivado de rocas blandas clase 1 (Fm. Trincheras).
Fuente (SGC, 2009).**

Suelos transportados

Son los materiales resultantes de la acción dinámica de los procesos geomorfológicos y de los agentes naturales como la gravedad, los sismos, los medios de transporte como el agua, el hielo, y depositados o llevados a los sitios que ocupan actualmente.

3.4.1.4 Suelos coluviales (Sco)

Corresponden a los materiales depositados o acumulados en sitios puntuales y aislados, principalmente en la base de las laderas montañosas, colinas, lomas y escarpes rocosos que rodean la cuenca. Son el resultado principal de la acción de los fenómenos de remoción en masa en los cuales ha habido translocación de detritos por acción gravitacional e hidrogravitacional, tales como: flujos terrosos, deslizamientos, derrumbes, desprendimientos, etc.

Según las características granulométricas de la matriz, estos suelos se dividen en tres clases, los suelos coluviales con matriz arenosa (clase 1), los con matriz limosa (clase 2) y los coluviones de matriz arcillosa (clase 3). A continuación se describen estas clases evidentes en la cuenca quebrada La Negra.

3.4.1.4.1 Suelos Coluviales Clase 1 (Sco1)

Estos depósitos varían entre matriz-soportados y clastosoportados, con matriz arenosa, limos y arcillas en menor proporción, poco consolidados. Constituidos por fragmentos, clastos y algunos bloques heterométricos de areniscas angulares a subangulares. Estos depósitos alcanzan los 10 m de espesor aproximadamente. Las rocas origen de estos depósitos corresponden principalmente a macizos rocosos de areniscas y lutitas de la Formación Útica.



Fotografía 21 Depósitos coluviales clase 1, derivados de macizos rocosos de resistencia intermedia clase 1. Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.4.2 Suelos Coluviales Clase 2 (Scol2)

Estos depósitos varían entre matriz y clastosoportados, con matriz limosa, con arenas y arcillas en menor proporción, poco consolidada, constituidos por fragmentos, clastos y algunos bloques heterométricos de limolitas y arcillolitas silíceas y areniscas en menor proporción, de formas angulares a subangulares. Estos depósitos alcanzan los 10m de espesor.

Las rocas origen de estos materiales, corresponden a los macizos rocosos de composición limolítica, arcillolítica, lutítica y arenosa de las Formaciones Socotá, Capotes, Hiló, Lidita Inferior, Nivel de Lutitas y Areniscas y Grupo Guaguaquí.

3.4.1.4.3 Suelos Coluviales Clase 3 (Scol3)

Estos depósitos varían entre matriz y clastosoportados, con matriz arcillosa, con arenas y limos en menor proporción, poco consolidados. Constituidos por fragmentos, clastos y algunos bloques esporádicos de lutitas principalmente, calizas, limolitas y areniscas en menor proporción, de formas angulares a subangulares. Estos depósitos alcanzan los 10m de espesor. Los macizos rocosos origen de estos materiales corresponden principalmente a las lutitas de la Formación Trincheras.



Fotografía 22 Depósito coluvial clase 3 (Scol3), margen derecha quebrada La Negra. Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.5 Depósitos fluviotorrenciales

De acuerdo a los agentes y ambiente de formación (génesis u origen), composición litológica, granulometría, forma, tamaño de los componentes, posición geográfica o relacionados con o sin la topografía actual o con la cuenca tectónica de la quebrada La Negra, los depósitos de material se pueden clasificar en: aluviales (Stf), lacustres (Stl), fluvio-lacustres (Stfl), fluviotorrenciales (Stft), glaciares (Stg) y fluvio-glaciares (Stfg).

3.4.1.5.1 *Depósitos de Origen Fluviotorrencial Recientes de Cauces Actuales de Drenajes Principales (Stft1)*

Presentan una morfología de plana a moderadamente inclinada y en sectores ondulada, constituyendo la zona de transición entre el sector montañoso de cuenca y la parte más plana, conformando principalmente los denominados abanicos aluviales. Materiales de granulometría variable entre matriz soportados y clasto soportados. Constituidos por cantos y bloques heterométricos de areniscas, limolitas, calizas, lutitas, redondeados, subredondeados y subangulares, dentro de una matriz de arena, limo y arcilla en diferentes proporciones.



Fotografía 23 Depósito fluviotorrencial del cauce actual de la quebrada Juratena. Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.5.2 *Depósitos de Origen Fluviotorrencial Antiguos – Terrazas aluviales (Stft2)*

Estos depósitos se caracterizan por presentar una morfología plana a ligeramente ondulada y constituye una zona de transición entre el sector montañoso y la parte más plana de la cuenca y están conformados por las terrazas aluviales. Estos materiales son en general clasto soportados a matriz soportados, con matrices que varían entre arcillosas, limosas y arenosas, con fragmentos heterométricos de lutitas, areniscas, calizas y limolitas, en su mayoría subredondeados a redondeados y subangulares. En sectores se presentan en estratificación gradada (grosso – fino). Su espesor oscila entre 1 y 5m.



Fotografía 24 Niveles de terraza antiguos de la quebrada La Negra, aguas arriba del casco urbano. Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.5.3 Depósitos de Origen Fluviotorrencial – Abanicos Aluviales (Stft3)

Estos depósitos se caracterizan por su forma de cono en planta, por presentar una ligera inclinación entre 5° - 10° y decenas de metros de extensión; están ubicados en el punto donde las quebradas Negra, Juratena y Terama desembocan en el río Negro. Los materiales en general son matriz soportados (60-40% matriz-clastos), constituidos por fragmentos y clastos, y esporádicamente bloques heterométricos de areniscas, limolitas, calizas y lutitas, de forma redondeada y subredondeada, en una matriz de grava fina, arena, limo y arcilla, en sectores se presenta en capas gradadas (grueso-fino). Su espesor oscila entre 3.0 m y 6.0 m aproximadamente.

3.4.1.5.4 Depósitos de Origen Fluviotorrencial Antiguos – Conos de Deyección (Stft4)

Presentan una morfología de plana a moderadamente inclinada y en sectores ondulada, constituyendo la zona de transición entre el sector montañoso de cuenca y la parte más plana, conformando principalmente los denominados conos de deyección. Material matriz soportados de composición y forma variada y tamaños heterogéneos de areniscas, limolitas, calizas, lutitas, redondeados, subredondeados y subangulares, dentro de una matriz principalmente de areno, limo y arcilla, en diferentes proporciones



Fotografía 25 Abanico aluvial formado en la desembocadura de la quebrada La Negra en el río Negro. Fuente (SGC, 2009).

3.4.1.5.5 Depósitos de Origen Fluviotorrencial – Flujos de Detritos (Stft5)

Depósito originado por flujos muy rápido a extremadamente rápidos de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad menor al 5% de arenas y fracciones más finas), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce empinado. Los clastos más grandes tienden a quedar cerca de la superficie del flujo, lo que se conoce como gradación inversa. Cuando el flujo de detritos alcanza el ápice del abanico de depositación, el canal se amplía y los clastos más gruesos son expulsados hacia los lados para formar una especie de jarillones y el frente es sobrepasado por el material fino que viajaba tras ellos hasta detenerse tomando una forma lobulada gruesa.

Corresponde a materiales matriz soportados de composición y forma variada y tamaños heterogéneos, dentro de una matriz principalmente de arena limo y limo arcilloso. Su espesor oscila entre 3m y 10m aproximadamente.

3.5 GEOMORFOLOGÍA

Tomando como referencia los resultados obtenidos en la formulación de una guía metodológica para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa tipo flujo 2009, en la cuenca de la quebrada La Negra, se evidencian, según la morfología del terreno y los procesos morfodinámicos activos, las siguientes subunidades geomorfológicas:

- Unidades de origen fluvial
- Unidades de origen estructural denudacional (elementos inclinados y subparalelos)

- Origen antrópico
- Unidades de origen denudacional (activa estable y activa inestable).

Características geomorfológicas regionales

La cuenca de la quebrada La Negra, se encuentra ubicada geomorfológicamente en la morfogeoestructura correspondiente al sistema montañoso orogénico Andino que bordea el cratón Guayanés por su parte noroccidental. A través de su historia geológica, el Sistema Montañoso Orogénico Andino ha sufrido y se ha conformado debido a procesos de acumulación y levantamientos orogénicos y epirogénicos, con plegamientos asociados localmente con fuerte metamorfismo e intrusiones graníticas que han determinado a través de su historia desde el Paleozoico la forma tridente del relieve actual.

El Sistema Orogénico Andino, está conformado a su vez por las provincias geomorfológicas de la cordillera Occidental, la cordillera Central y la cordillera Oriental, separados geomorfológicamente por las provincias de los valles interandino Cauca –Patía y Magdalena respectivamente (Carvajal y Otros, 2003). De acuerdo con Irving (1971), las tres cordilleras son de características distintas y se formaron en tiempos diferentes: La Cordillera Central se formó durante el Paleozoico Tardío, la Cordillera Occidental en el Mesozoico y la Cordillera Oriental en el Terciario Medio, sufriendo las tres, levantamientos en bloques acompañados de intrusiones en el Terciario tardío y el Holoceno.

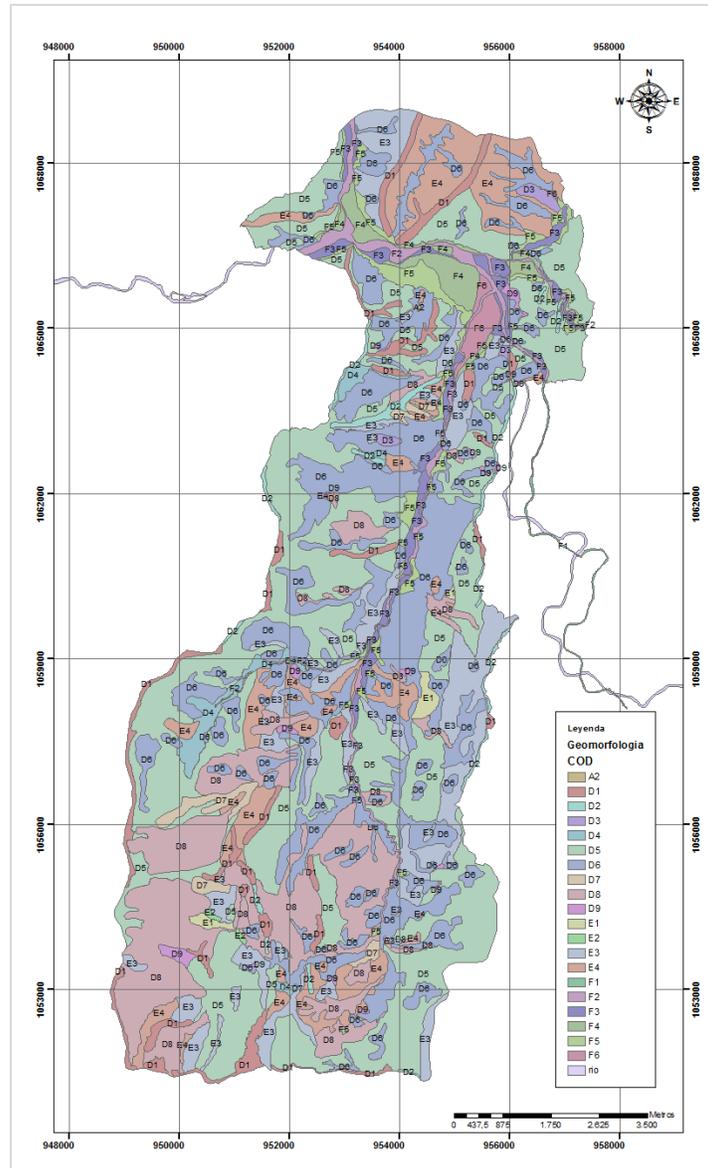
La cuenca de la quebrada La Negra, tiene su propia historia asociada con eventos de acumulación de sedimentos en cuencas inicialmente distensivas y subsidentes, afectadas luego por eventos compresivos que invirtieron el movimiento de las fallas ancestrales controlados al menos en parte en sus inicios, por procesos diapíricos.

El proceso en general ocasionó el levantamiento de la Cordillera, la generación de pliegues anticlinales en dirección noreste, apretados y localmente tumbados en asocio de fallas inversas longitudinales y fallas de desgarre y rumbo en dirección noroeste – sureste, que definen a lo largo de las estructuras mayores anticlinales y sierras homoclinales, con diferentes grados de plegamiento. El mencionado proceso de plegamiento ha generado un acortamiento de la corteza superior calculado en mínimo 63 Km equivalentes al 59% de acortamiento en la sección transversal que pasa por la Sabana de Bogotá (Mantilla 1998 en Velandia y Bermoudes, 2002).

Al nivel de regiones, definidas por los ambientes morfogenéticos, la cuenca de la quebrada La Negra, está enmarcada por una serie de serranías morfoestructurales que hacen parte de las vertientes occidental y oriental de la cordillera oriental, afectadas localmente tanto por procesos denudativos, pluviales y estructurales.

Subunidades y elementos geomorfológicos de la cuenca

En la cuenca de la quebrada La Negra, se identificaron subunidades y elementos de los ambientes morfogenéticos, morfoestructural, denudativo y fluvial las **subunidades geomorfológicas** están definidas por los contrastes morfométricos que relacionan el tipo de roca o sedimento, la topografía del terreno y los procesos dinámicos activos prevalecientes y los **elementos** se definen recurriendo a criterios morfométricos tales como la posición dentro del paisaje, relacionados con los procesos morfogenéticos activos, como se evidencia en el Mapa 6.



Mapa 6 Geomorfología cuenca de la quebrada La Negra, basado (SGC, 2009).

3.5.1.1 Subunidades y elementos de origen estructural, laderas estructurales denudacionales

Estas geoformas se originan por la influencia que tiene la actividad tectónica sobre las rocas y suelos del área de acción, cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural de las rocas aflorantes en la cuenca de la quebrada La Negra.

Las geoformas están afectadas por procesos erosivos de moderada a baja intensidad y se caracterizan por su relieve montañoso a colinado de pendientes abruptas y escarpadas localmente, en los sitios de afloramientos rocosos y pendientes onduladas en los sitios de predominio de suelos residuales y depósitos coluviales. Entre los elementos se tienen:

3.5.1.1.1 *Escarpes de Falla (E1)*

Estas geoformas son producto del desprendimiento del material fallado a partir del terreno “in situ” y hace parte de la superficie de ruptura. Es un desnivel topográfico abrupto marcando un terreno levantado y hundido en ambos lados de una falla. Inicialmente el escarpe puede corresponder al

afloramiento del plano de falla, siendo una situación transitoria, que rápidamente se transforma en una geoforma que sufre declinación y retroceso por procesos de degradación y erosión.

En la cuenca de la quebrada La Negra, corresponden a escarpes cortos, abruptos, de laderas rectilíneas y mixtas, drenaje subparalelo de baja densidad, originado por erosión acentuada a lo largo de una línea de falla. Se localizan en la margen derecha de la quebrada Los Reyes, en la margen derecha de la quebrada La Negra, entre las veredas Concepción y Santa Isabel y en la margen derecha de la quebrada Terama; están conformados por rocas sedimentarias de resistencia intermedia predominantemente arenosas (Ri1), en la vereda El Curapo, margen izquierda del río Negro, frente a la desembocadura del río Patá, conformados por rocas sedimentarias de resistencia intermedia, predominantemente arcillosas (Ri2).



Fotografía 26 Escarpe de falla, ubicado sobre la margen derecha de la quebrada La Negra, en el sector de la hacienda Los Monos. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.1.2 *Facetas triangulares (E2)*

Superficies planares y rugosas con bases amplias y con ápice en su terminación superior, que ocurren en la cara libre de los interfluvios, donde los materiales están cortados por una falla. En realidad las caras libres son el resultado de los procesos de degradación y declinación actuando sobre un escarpe de falla disectado. El plano de la faceta, representa un remanente erosivo de un escarpe de falla. Estas geoformas se localizan en la margen derecha de la quebrada Los Reyes y Río Patá.

3.5.1.1.3 *Laderas de Contrapendiente (E3)*

Distribuidas a lo largo de toda la cuenca, estas laderas están definidas por la inclinación de los estratos en contra de la pendiente del terreno, de longitud moderada a larga, de formas cóncavas irregulares escalonadas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas. Rocas intermedias y blandas interestratificadas componen este elemento. Es común la presencia de depósitos coluviales.

El patrón de drenaje en esta geoforma varía de subdendrítico a subparalelo, derivado de la acción de los sistemas de fallas actuantes y el carácter laminar de las rocas aflorantes, la densidad varía de baja a moderada – alta, dependiendo de la composición de los materiales parentales.



Fotografía 27 Laderas de contrapendiente, margen izquierda del río Negro. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.1.4 Laderas Estructurales (E4)

Incluye las laderas estructurales anticlinales, sinclinales y de sierra homoclinal denudadas. Se caracterizan debido a que sus estratos están inclinados a favor de la pendiente, con longitudes que varían de cortas a extremadamente largas, de formas convexas a rectas e inclinadas, con pendientes abruptas a muy escarpadas.

En los sectores donde estos elementos están conformados por rocas areníticas intermedias (margen derecha de la quebrada La Negra), se originan suelos residuales delgados y desarrollo local de procesos morfodinámicos; el drenaje es subparalelo de baja densidad. Localmente los estratos se presentan con inclinaciones menores de la pendiente natural del terreno.

Las laderas estructurales sinclinales que involucran rocas blandas a intermedias; originan suelos residuales con espesores muy variables, desde delgados a espesos; el drenaje desarrolla patrones dendríticos a subparalelos de moderada densidad, procesos de carcavamiento y reptación local.

El drenaje correspondiente a esta unidad geomorfológica varía de subdendrítico a subparalelo, derivados de la acción de los sistemas de fallas actuantes y el carácter foliado de las rocas aflorantes.

3.5.1.2 Subunidades y elementos de origen denudacional laderas activas – estables

Estas geoformas están relacionadas con los procesos denudacionales normales en zonas con clima tropical (erosión, depositación y movimientos en masa). Los elementos que conforman esta unidad se dividen en elementos subparalelos y elementos inclinados.



Fotografía 28 Laderas estructurales, margen derecha parte alta quebrada La Negra. Fuente (SGC, 2009).

ELEMENTOS SUBPARALELOS

3.5.1.2.1 Lomos anchos (D1)

Se presentan como franjas alargadas que bordean la cuenca y en algunas divisorias de aguas de las microcuencas, son cerros de morfología alomada o colinada, de cimas redondeadas, laderas cortas, convexas, poco inclinadas, asociadas con suelos residuales espesos. Su origen se debe posiblemente a procesos de meteorización diferencial intensa en climas tropicales diferentes al actual.

Corresponden a divisorias de aguas que presentan terminación en forma de crestas semirredondeadas, aplanadas e incluso llanas. Sus pendientes no superan los 20°. Rocas sedimentarias intermedias y blandas, estratificadas, componen este elemento.



Fotografía 29 Lomos Anchos, que constituyen el límite occidental de la cuenca quebrada La Negra, nacimiento quebrada La Papaya. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.2.2 Lomos angostos y redondeados (D2)

Se diferencian de los lomos anchos, debido a que estas divisorias de aguas terminan en crestas semiagudas, semirredondeadas a redondeadas, en donde la inclinación de sus partes externas oscila entre 20° y 35°. Rocas sedimentarias intermedias y blandas, estratificadas, componen este elemento.



Fotografía 30 Lomos angostos y redondeados, que constituyen el límite oriental de la cuenca quebrada La Negra. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.2.3 Laderas subhorizontales (D3)

Estas geoformas conforman una superficie natural inclinada del terreno, producto de procesos denudacionales, se caracterizan por presentar pendientes menores a 10°.

ELEMENTOS INCLINADOS

3.5.1.2.4 Escarpes denudacionales (D4)

Superficies verticales o semiverticales (inclinación entre 80° y 90°) que se forman en macizos rocosos o de depósitos de suelo debido exclusivamente a procesos denudativos. Localizados en el curso de la quebrada La Papaya, este elemento se caracteriza por desarrollar patrones de drenaje subdendrícos

a subparalelos de alta incisión, deslizamientos antiguos y activos asociados con procesos de socavación lateral y de fondo. Este elemento lo componen rocas sedimentarias intermedias y rocas sedimentarias blandas.



Fotografía 31 Escarpes denudacionales, parte alta de la quebrada La Papaya. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.2.5 Laderas moderadas (D5)

Superficie natural del terreno, producto de procesos principalmente denudacionales, caracterizada por presentar pendientes con inclinaciones entre 10° y 40° . Por lo general en estas zonas se presenta una buena cobertura vegetal.

Estos elementos se localizan en las inmediaciones de la quebrada La Seca, en el nacimiento de la quebrada El Descanso y la parte media de las microcuencas de las quebradas La Amargosa y La Jabonera y La Chorrera y están conformados por rocas sedimentarias blandas, predominantemente arcillosas.



Fotografía 32 Laderas moderadas, parte media de la microcuenca de la quebrada La Chorrera. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.2.6 Depósitos coluviales (D6)

Distribuidos a lo largo de toda la cuenca, estas geoformas son semejantes a conos o lóbulos de longitudes cortas a largas, de formas convexas y onduladas y pendientes inclinadas suaves a abruptas. Se originan por acumulación de materiales transportados sobre las laderas, por escorrentía superficial, por flujo lento y viscoso de suelo saturado y no saturado y por grandes movimientos en masa.

Los bloques de estos depósitos son angulares a subangulares de diferentes tamaños embebidos en matrices arcillosas, limosas o arenosas, dependiendo del material parental de donde provengan. Los espesores de estos depósitos son del orden de 5 a 10m.



Fotografía 33 Depósitos coluviales, margen izquierda quebrada La Negra, parte media – baja. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.2.7 Depresión denudacional (D7)

Subcuencas y microcuencas muy disectadas y erosionadas, por influencia estructural (disposición de los estratos, zonas de influencia de fallas). Las laderas que conforman este elemento son cóncavas y mixtas (cóncavas – convexas). El patrón de drenaje es subdendrítico, subparalelo, de moderada densidad y alta disección.

Estas depresiones se localizan en la parte media – alta de las microcuencas de las quebradas Los Reyes, Agua Clara, La Esmeralda, Verbena, Lázaro y la parte baja de las microcuencas de las quebradas La Abuelita y La Amargosa.



Fotografía 34 Depresión denudacional, parte alta de la microcuenca de la quebrada Los Reyes. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.2.8 Hondonada denudacional (D8)

Microcuencas disectadas y afectadas por procesos morfodinámicos, en rocas blandas o depósitos poco consolidados. En la cuenca de la quebrada La Negra, estas geformas se presentan en la parte alta de las microcuencas de las quebradas La Esmeralda y La Esmeraldita y en este sector están conformadas por rocas sedimentarias intermedias arcillosas y limolíticas y blandas arcillosas; en la parte media de la microcuenca de la quebrada Agua Clara, compuestas por rocas sedimentarias intermedias arcillosas y limolíticas y blandas arcillosas.

Las laderas que conforman estas hondonadas son alargadas, rectilíneas y mixtas (cóncavas y convexas), el patrón de drenaje es subdendrítico de moderada densidad y disección media a alta.



Fotografía 35 Hondonada denudacional, parte alta de la microcuenca de la quebrada La Esmeralda. Fuente (SGC, 2009).

MOVIMIENTOS EN MASA

3.5.1.2.9 *Escarpe de corona principal (D9)*

Zona adyacente arriba del escarpe principal de un deslizamiento que prácticamente no ha sufrido desplazamiento ladera abajo. Sobre ella suelen presentarse algunas grietas paralelas o semi-paralelas conocidas como grietas de tensión o de tracción. En un deslizamiento se refiere a la parte superior vertical o semi-vertical del plano de falla que queda expuesta en superficie por el movimiento ladera abajo del cuerpo principal.

3.5.1.2.10 *Deslizamientos recientes (D10)*

Movimientos en masa activos presentes a lo largo de toda la cuenca. De estos movimientos, predominan los flujos de tierras y detritos, seguidos por deslizamientos traslacionales, movimientos compuestos deslizamientos traslacionales – flujos de detritos y tierras, deslizamientos rotacionales, movimientos compuestos deslizamientos rotacionales – flujos de tierras y detritos, entre otros.

Estos deslizamientos están presentes en toda la cuenca, especialmente en la parte alta – media, en materiales débiles (lutitas), intermedios y depósitos.



Fotografía 36 Escarpe de corona principal. Vereda La Verbena, parte alta quebrada La Negra. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.3 Subunidades y elementos de origen fluvial

Estas geoformas están relacionadas con la distribución de los sedimentos, ocasionados por las corrientes de agua superficiales y el cambio en su movimiento en las diferentes fases del recorrido. Se pueden identificar un cauce actual de corriente, áreas de posible inundación y áreas que muestren el comportamiento anterior de la corriente.

3.5.1.3.1 *Cauces o lechos actuales (F1)*

Franja de terreno plano bajo, de morfología ondulada de 0.05 a 5km, eventualmente inundable, se presenta bordeando los cauces fluviales y se limita localmente por escarpes de terraza. Se constituye de 3 a 5m de arcillas y limos producto de la sedimentación durante eventos de inundación fluvial. Se incluyen los planos fluviales menores en forma de U o V y conos aluviales menores.

Estos elementos corresponden a los cauces fluviales actuales de las quebradas La Papaya, La Negra y el río Negro.



Fotografía 37 Cauce actual, parte media quebrada La Negra. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.3.2 *Planicie o llanura de inundación (F2)*

Franjas de terreno planas bajas de morfología ondulada de 0.05 - 5 km de amplitud, eventualmente inundables. Se presentan a lado y lado de los cauces fluviales y se limitan localmente por escarpes de terraza. Se constituyen de gravas, arenas y arcillas producto de la sedimentación durante eventos torrenciales e inundación fluvial. Se incluyen los planos y cauces fluviales menores en formas de “V” localizados en los flancos de los valles intramontanos.

Son de morfología plana ondulada y asociada en general con depósitos de tipo torrencial constituido de gravas, arenas y bloques subredondeados a subangulares hasta de 4m, particularmente en la quebrada La Negra y el río Negro.



Fotografía 38 Planicies o llanuras de inundación del río Negro. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.3.3 *Nivel de Terraza (F3)*

Terrazas alomadas de varios kilómetros de extensión en forma de abanico ampliamente explayado, de laderas moderadamente largas, de formas cóncavas y convexas con pendientes suaves a inclinadas. Su origen está asociado con la existencia de abanicos y planicies aluviales antiguos muy disectados y localmente tectonizados. Se constituyen de 2 a 3m de gravas y arenas con interstratificaciones de arcillas y limos en su parte distal.



Fotografía 39 Niveles de terraza antiguos de la quebrada La Negra, aguas arriba del casco urbano. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.3.4 *Abanico (F4)*

Geoforma similar a un abanico ampliamente explayado y aterrazado de varios kilómetros de extensión, de laderas rectas o cóncavas y pendiente suaves. Su origen está asociado con la acumulación de material aluvial en una zona plana o un valle amplio, a la salida de un valle tributario. Se constituyen de 5 a 8m de gravas y arenas con interstratificaciones de arcillas y limos en su parte distal.



Fotografía 40 Abanico aluvial, sobre el cual fue emplazado el municipio de Útica. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.3.5 *Conos de Deyección (F5)*

Semejante a un cono visto en planta, con una inclinación de 5 a 10° y decenas de metros de extensión, ubicados en el punto donde los canales o quebradas llegan a zonas de valles amplios. Se constituyen de tierras, arena y grava, con espesores de 3 a 5m. Este depósito de aluviones se genera al final de los valles torrenciales, en las zonas de pie de monte, donde la pendiente de las laderas enlaza con una zona llana. Su génesis está dada por la pérdida de energía de los ríos con una importante carga de sedimentos que son depositados al disminuir la pendiente a lo largo del cono. Su forma cónica hace que ejerzan de barrera natural en los ríos obligando a estos a desviar su curso y adaptarse al relieve. Sus dimensiones son variables y van desde los pocos metros a los cientos de kilómetros.



Fotografía 41 Cono de deyección, sector Mateguadua, cuenca quebrada Juratena. Fuente (SGC, 2009).

3.5.1.3.6 Flujo torrencial (F6)

Flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad >5%). El carácter de este tipo de movimiento es similar al de flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material. También se distingue de los deslizamientos por fluidificación de arcilla, en que el flujo de lodo incorpora agua superficial durante el movimiento, mientras la fluidificación ocurre por licuación in situ sin un incremento significativo del contenido de agua.



Fotografía 42 Depósito de flujo torrencial, sector Pueblo Nuevo. Fuente (SGC, 2009).

3.6 PENDIENTE

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje y se relaciona con los movimientos en masa, de manera que a mayor el grado de pendiente aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa. La pendiente se relaciona directamente con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad, las tensiones de corte tangencial y normal en la formación superficial e influye, también, en la distribución de agua en las laderas.

Esta variable, interviene en la velocidad de la escorrentía y la cantidad de infiltración, es por ello que las cuencas de mayor pendiente media y con cambios drásticos en la gradiente en diferentes segmentos del cauce principal o sus tributarios, son más susceptibles a la ocurrencia de este tipo de fenómenos (MINAMBIENTE, 2014).

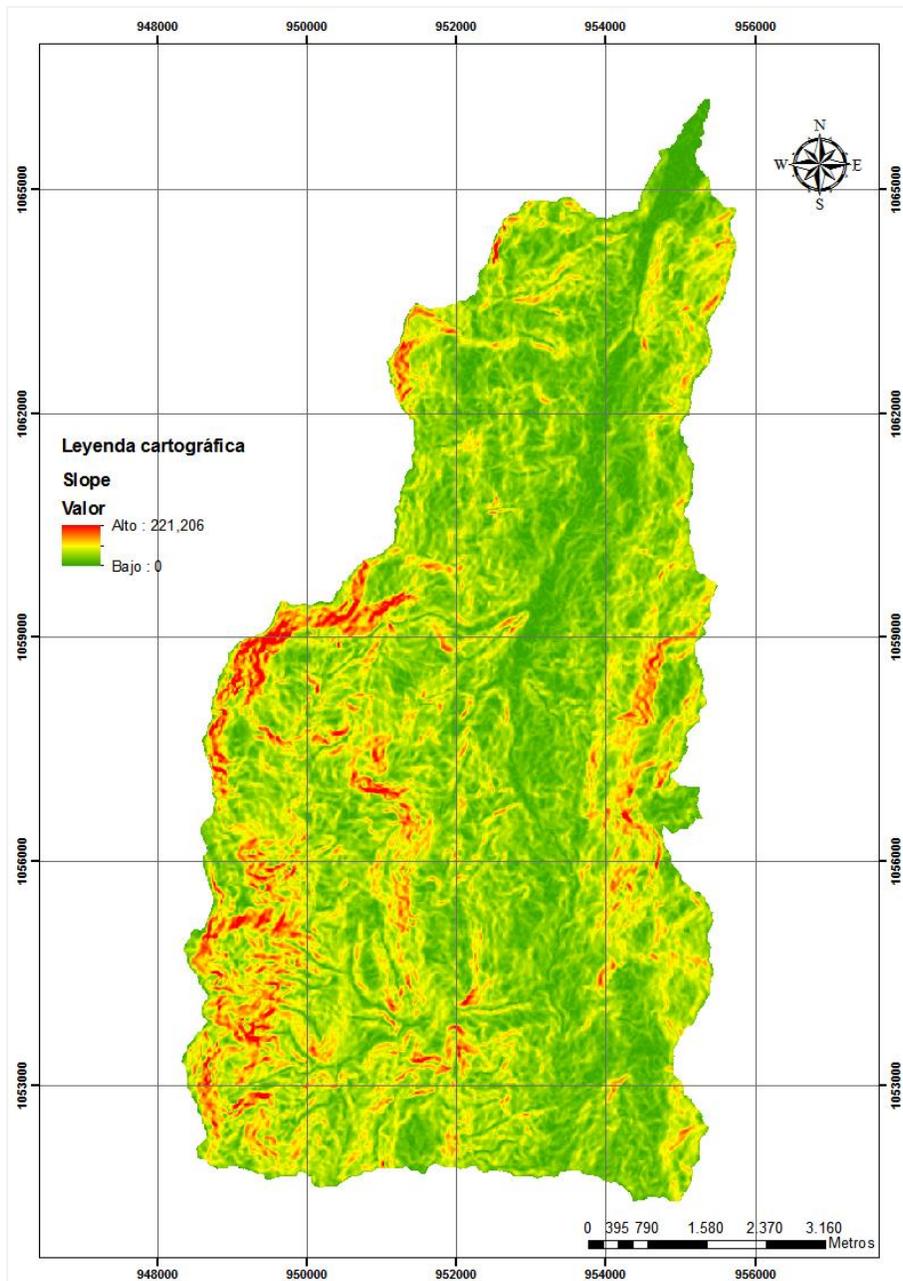
Para el análisis de la pendiente en la cuenca de la quebrada La Negra se utilizaron los siguientes rangos de inclinación de laderas.

Tabla 5 Calificación de pendientes con base en la susceptibilidad a los movimientos en masa

INCLINACIÓN (GRADOS)	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO
<7	PLANA A SUAVEMENTE INCLINADA	Muy baja tendencia a desarrollar movimientos en masa
7--11	INCLINADA	Baja tendencia a generar movimientos en masa
11--19	MUY INCLINADA	Media tendencia a generar movimientos en masa.
19--40	ABRUPTA	Alta tendencia a generar movimientos en masa
>40	ESCARPADA	Muy alta tendencia a generar movimientos en masa

Fuente. (Servicio Geológico Colombiano, 2017b).

Como resultado de esta clasificación el modelo digital de terreno con precisión de 30 metros, se encuentra que, el rango de pendiente predominante a lo largo de la cuenca se encuentra entre el 12 y 50% con topografías de fuertemente onduladas a fuertemente quebradas, localizados en los nacimientos de los drenajes principales que alimentan la corriente principal, la pendiente media de la cuenca es de 36%, es decir, se encuentra en una clasificación ABRUPTA de acuerdo con la Tabla 5, se presentan afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor, y con alta probabilidad a generar movimientos en masa, gráficamente, estos resultados quedan representados en el Mapa 7.



Mapa 7 Pendiente cuenca quebrada La Negra.

4 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO

Existen diferentes formas de aproximación para realizar análisis de susceptibilidad, desde métodos heurísticos o de conocimiento experto hasta métodos estadísticos y probabilísticos. En Colombia, las propuestas metodológicas para la evaluación de susceptibilidad y amenaza por flujos a escala 1:25.000 son frecuentemente geomorfológicas y de criterio experto, debido a la necesidad de información y la complejidad para el uso de modelos numéricos o analíticos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & UNAL, 2013).

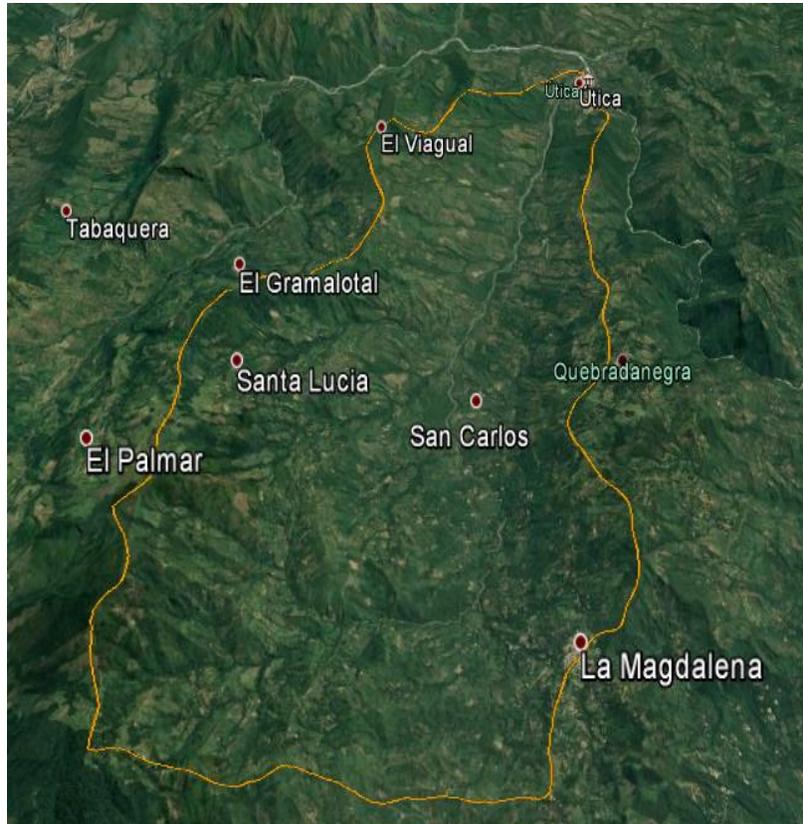
En la metodología propuesta para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo, se identifica y analiza las zonas susceptibles a ruptura con la ocurrencia de este tipo de eventos de acuerdo con algunos parámetros geomecánicos del suelo junto con la intensidad de lluvia asociada para los diferentes periodos de retorno propuestos. Por medio del programa cuantitativo infiniteslope se conoce el factor de seguridad identificando las posibles zonas estables e inestables por la ocurrencia de estos fenómenos de acuerdo con los escenarios planteados.

El modelo digital de elevación (DEM) es la información principal utilizada por los modelos físicos que se ejecutan en esta metodología propuesta, para lo cual se utiliza la información descargada proveniente de un satellite oficial, con el propósito de analizar la topografía del caso de estudio y así generar un mapa de pendiente, el cual sirve como un insumo para la generación de los rasters de los modelos de inicio y propagación del flujo.

Continuando con el análisis de la información, se recopila y analiza la información de los factores influyentes como las condiciones geológicas, las características geomorfológicas del caso de estudio.

4.1 INFORMACIÓN BASE

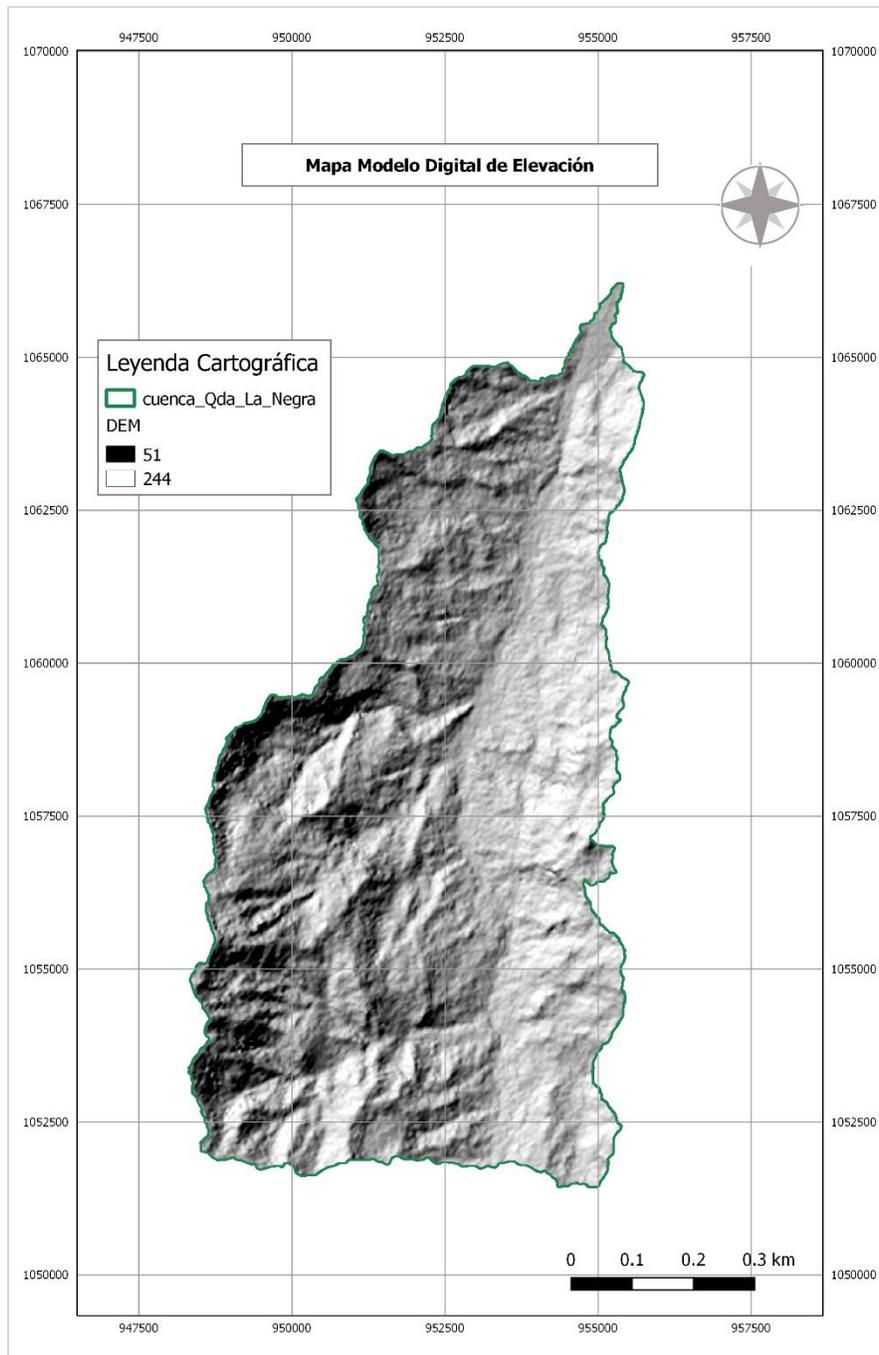
A continuación, se presenta la construcción de los insumos necesarios para la aplicación de la metodología propuesta los cuales fueron elaborados para la cuenca de la quebrada La Negra que es el caso de estudio.



Mapa 8 Cuenca de estudio. Fuente Google Earth 2020.

Modelo de elevación digital

El primer paso de la metodología propuesta, es el análisis de la información base de la zona de estudio, iniciando con el Modelo de Elevación Digital (DEM) el cual representa los cambios de altura de un determinado terreno, para esto se realizó la descarga de la información la zona de estudio proveniente del satélite ALOS PALSAR (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>), este sirvió de insumo para la generación de los rasters de los modelos de iniciación y propagación del flujo. El DEM utilizado para este trabajo de investigación se presenta en el Mapa 9.



Mapa 9 Modelo Digital de Elevación, cuenca quebrada La Negra.

Teniendo en cuenta las características físicas de la zona del caso de estudio mencionadas en el capítulo 3, se realizaron los rasters con la información de los parámetros geomecánicos requeridos por los modelos de inicio y propagación del flujo, a continuación se menciona como se construyeron cada una de las capas necesarias para el análisis de susceptibilidad por los posibles movimientos en masa en la zona planteada como caso de estudio.

Cohesión

De acuerdo con (GEMMA, 2007), es el parámetro de resistencia de un suelo que expresa la fuerza por la cual las moléculas homogéneas de un cuerpo se adhieren unas con otras (Holtz y Kovacs, 1991).

La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión. En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y a estos suelos se les denomina suelos no cohesivos.

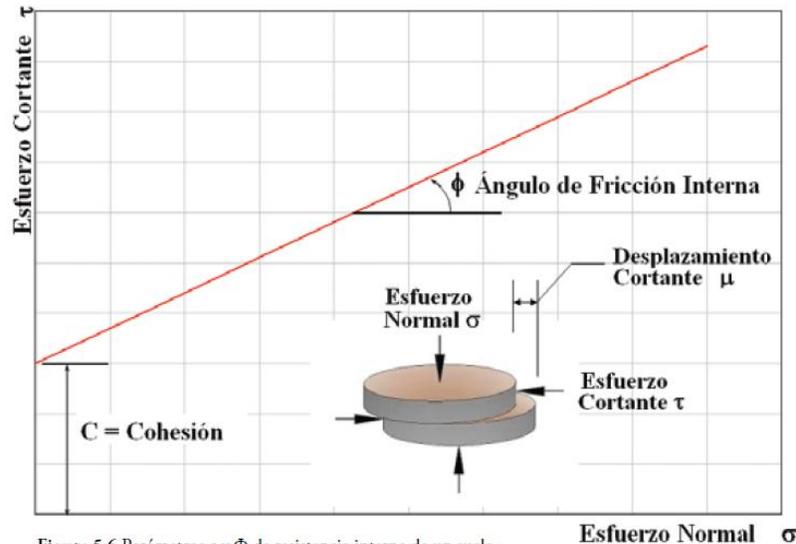


Figura 5.6 Parámetros c y Φ de resistencia interna de un suelo.

Ilustración 4 Parámetro cohesión-ángulo de fricción. Fuente (GEMMA, 2007).

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se tuvo en cuenta las unidades de las características geológicas de la zona del caso de estudio descritas en el numeral 3, además se tomó como referencia los valores de cohesión que se mencionan en la tesis modelación matemática de flujos de avalancha, Pedraza, 2016.

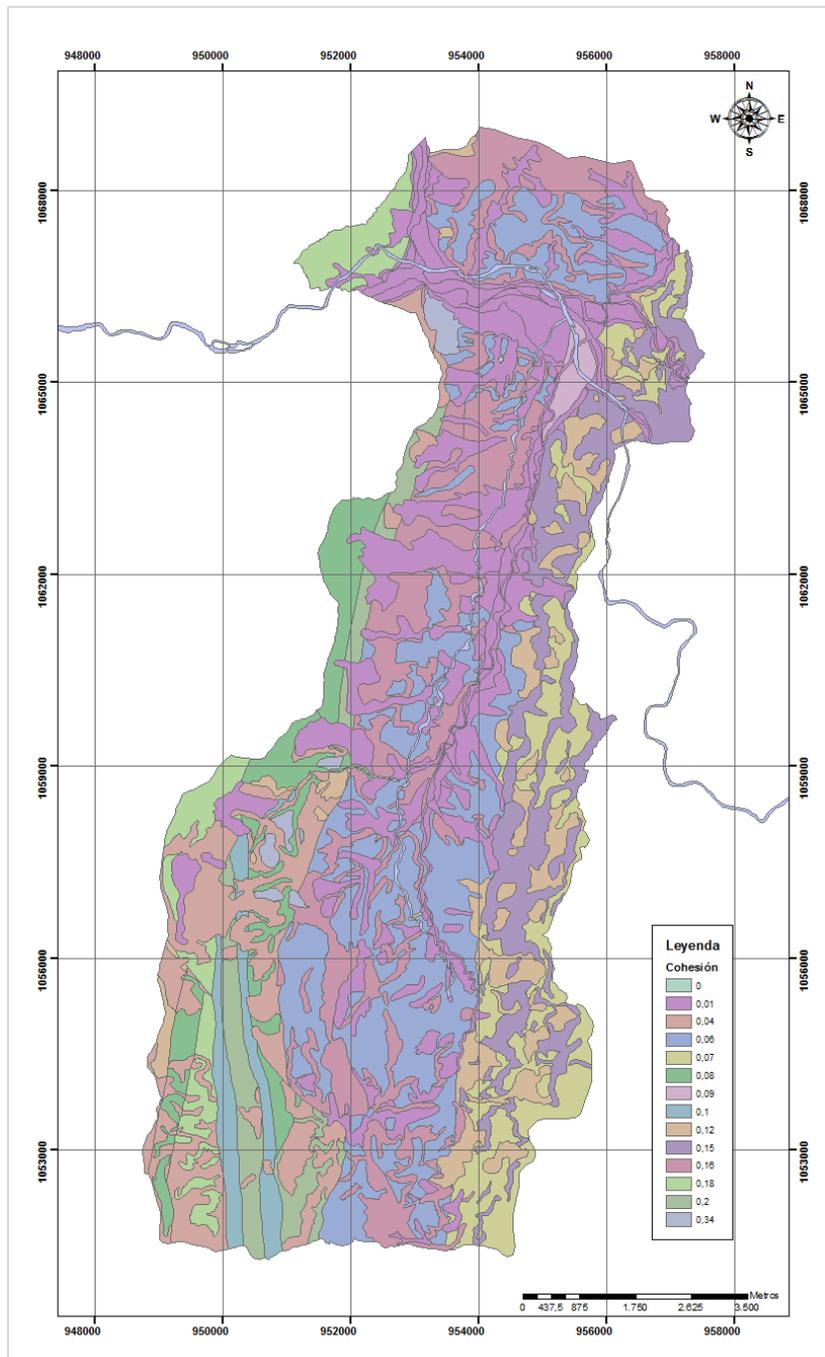
Tabla 6 Valores de referencia parámetro de cohesión

UNIDAD GEOLÓGICA	COHESIÓN (PA)
Rocas intermedias clase 1 Ri1	0.05 – 0.15
Rocas intermedias clase 2 Ri2	0.12 – 0.58
Rocas intermedias clase 3 Ri3	0.12 – 0.58
Rocas intermedias clase 4 Ri4	0.05 – 0.15
Rocas intermedias clase 5 Ri5	0.12 – 0.58
Rocas blandas clase 1 Rb1	0.12 – 0.58

UNIDAD GEOLÓGICA	COHESIÓN (PA)
Rocas blandas clase 2 Rb1	0.12 – 0.58
Roca sedimentaria arenosa Srs1	0.05 – 0.15
Roca sedimentaria limosa Srs2	0 – 0.13
Roca sedimentaria arcillosa Srs3	0 – 0.13
Suelo Coluvial Sco1	0 – 0.12
Suelo Coluvial Sco2	0.12 – 0.58
Suelo Coluvial Sco3	0 – 0.01
Depósito Fluvio-torrenciales Stft1	0 – 0.01
Depósito Fluvio-torrenciales Stft2	0 – 0.01
Depósito Fluvio-torrenciales Stft3	0 – 0.01
Depósito Fluvio-torrenciales Stft4	0 – 0.01
Depósito Fluvio-torrenciales Stft5	0.09 - 0.44

Fuente.(Pedraza, 2016)

En el Mapa 10 se presenta los valores referentes al parámetro de cohesión para la zona del caso de estudio la cuenca de la quebrada La Negra.



Mapa 10 Parámetro cohesión, cuenca quebrada La Negra.

Ángulo de fricción interna

Es el equivalente al coeficiente de fricción, es un parámetro de resistencia de suelos y rocas que mide la relación máxima entre un esfuerzo normal y uno tangencial a lo largo de una superficie de falla, como se puede observar la Ilustración 4 (GEMMA, 2007).

El ángulo de fricción depende de varios factores (Bilz, 1995) entre ellos algunos de los más importantes son: tamaño de los granos, forma de los granos, distribución de los tamaños de granos y la densidad (Suárez, 1989).

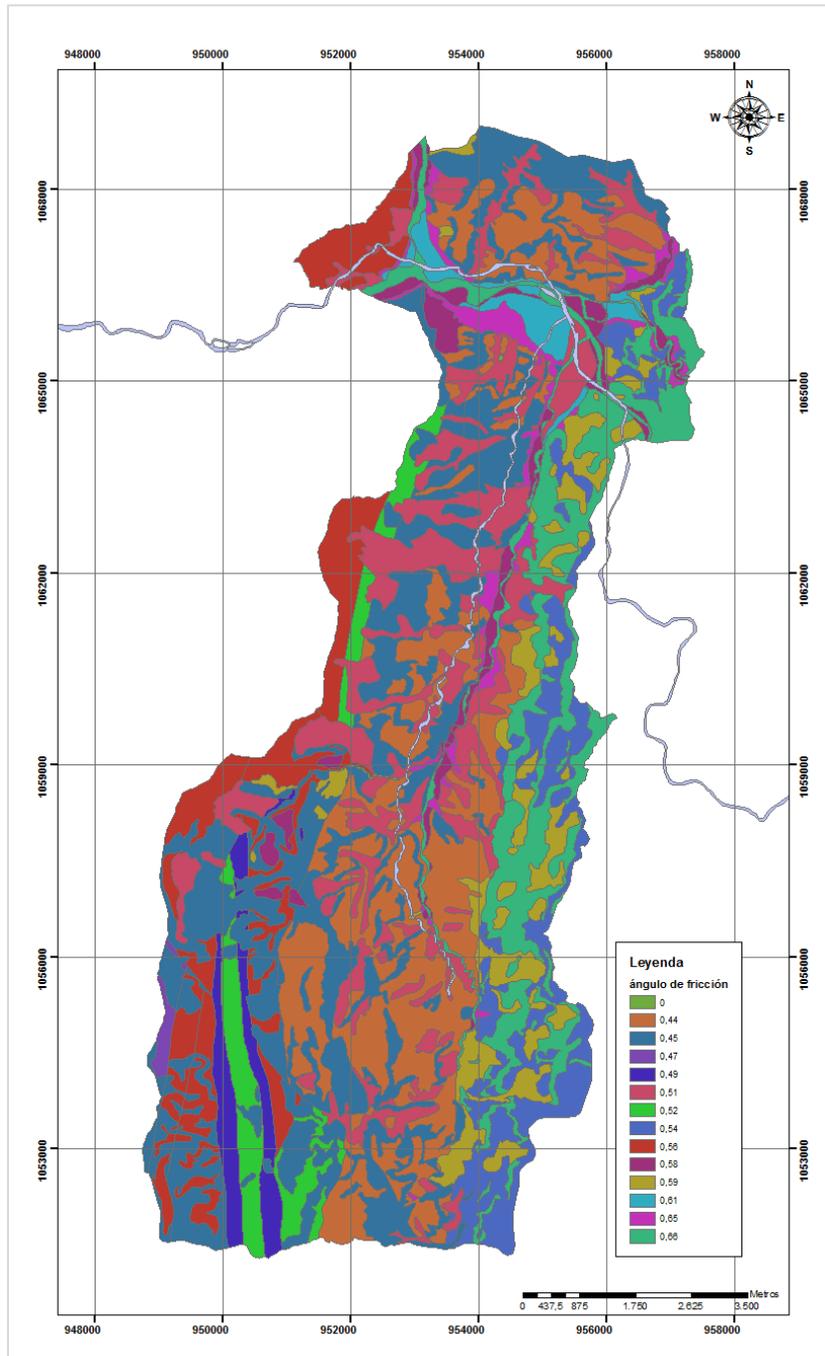
Los valores de referencia de ángulo de fricción seleccionados para el desarrollo de esta investigación fueron los propuestos por (Suárez, 1989).

Tabla 7 Valores de referencia parámetro de ángulo de fricción

UNIDAD GEOLÓGICA	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
Rocas intermedias clase 1 Ri1	35 – 45
Rocas intermedias clase 2 Ri2	25 – 35
Rocas intermedias clase 3 Ri3	25 – 35
Rocas intermedias clase 4 Ri4	30 – 40
Rocas intermedias clase 5 Ri5	25 – 35
Rocas blandas clase 1 Rb1	25 – 35
Rocas blandas clase 2 Rb1	25 – 35
Roca sedimentaria arenosa Srs1	30 – 35
Roca sedimentaria limosa Srs2	25 – 35
Roca sedimentaria arcillosa Srs3	25 – 35
Suelo Coluvial Sco1	25 – 35
Suelo Coluvial Sco2	25 – 35
Suelo Coluvial Sco3	25 – 35
Depósito Fluvio-torrenciales Stft1	30 – 40
Depósito Fluvio-torrenciales Stft2	30 – 40
Depósito Fluvio-torrenciales Stft3	30 – 40
Depósito Fluvio-torrenciales Stft4	30 – 40
Depósito Fluvio-torrenciales Stft5	25 - 30

Fuente. (Suárez, 1989)

En el Mapa 11 se presenta los valores referentes al parámetro del ángulo de fricción utilizados para el desarrollo de esta investigación en el caso de estudio.



Mapa 11 Ángulo de fricción, cuenca quebrada La Negra.

Espesor del suelo

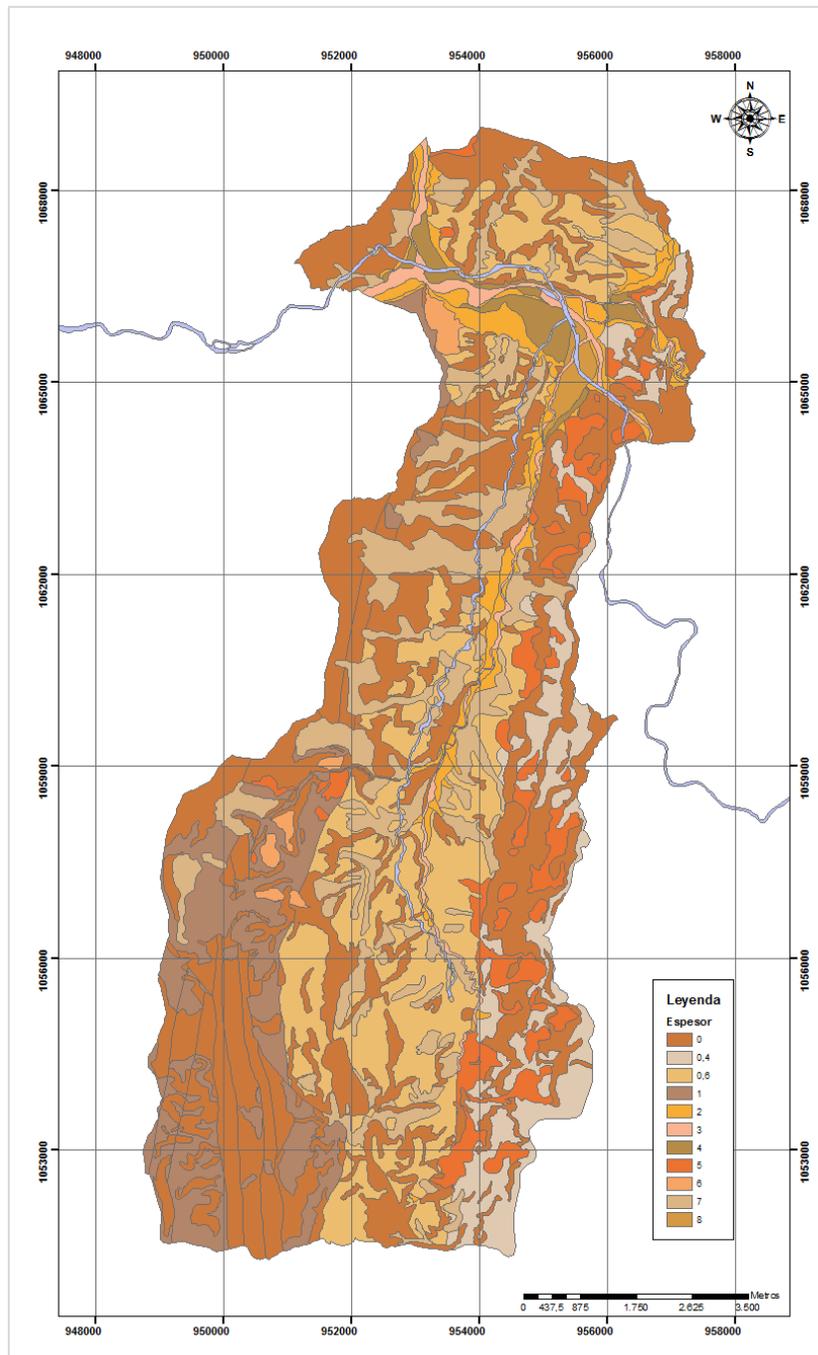
Como se menciona en el estudio de (Sepúlveda & Patiño, 2016), el espesor de la formación superficial influye en la cantidad de agua que puede contener y en la magnitud de las presiones que pueden generarse. Así mismo, un gran espesor puede reducir el efecto estabilizador de las raíces (Santacana, 2014).

También se menciona que el Asian Technical Committee on Geotechnology for Natural Hazards, establece que el espesor del suelo superficial es uno de los factores que se debe tener en cuenta para evaluación de susceptibilidad a deslizamientos detonados por lluvia (ISSMFE, 1997). Los rangos de los valores del espesor del suelo para el desarrollo de la investigación fueron los descritos en el numeral 3.

Tabla 8 Valores de referencia parámetro de ángulo de fricción

UNIDAD GEOLÓGICA	ESPESOR (m)
Roca sedimentaria arenosa Srs1	0.4-0.5
Roca sdimentaria limosa Srs2	0.5-2
Roca sedimentaia arcillosa Srs3	0.5-1
Suelo Coluvial Sco1	1-10
Suelo Coluvial Sco2	1-10
Suelo Coluvial Sco3	1-10
Depósito Fluviotorrenciales Stft1	1-4
Depósito Fluviotorrenciales Stft2	1-5
Depósito Fluviotorrenciales Stft3	3-6
Depósito Fluviotorrenciales Stft4	1-4
Depósito Fluviotorrenciales Stft5	3-10

En el Mapa 12 se presenta los valores referentes al parámetro del espesor del suelo para el desarrollo de esta investigación.



Mapa 12 Espesor de suelo, cuenca quebrada La Negra.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es una propiedad de los medios porosos que depende de la permeabilidad intrínseca, de la porosidad del medio y del grado de saturación que este tenga. La teoría más conocida para su tratamiento es la Ley de Darcy ya que describe la trayectoria del agua a través del suelo (Barbecho & Calle, 2012).

La conductividad hidráulica, K, es una función de las características intrínsecas de la matriz y de las propiedades del fluido contenido en dicho material. Se define como la velocidad de infiltración que se presenta en un medio poroso saturado, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$K = -v / \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad (14)$$

Donde v corresponde a la velocidad de Darcy y dh/dl es el gradiente hidráulico definido por la diferencia de presiones en un tramo determinado (Keith D., 2004).

La conductividad hidráulica de los suelos no es un valor constante debido a que en ella influyen muchos factores, por lo que no puede llegarse a determinar un valor exacto de ésta; pero sí un valor estimado que refleje las condiciones del movimiento del agua en el suelo por lo que se trata de proponer métodos de estimación de esta variable (Barbecho & Calle, 2012).

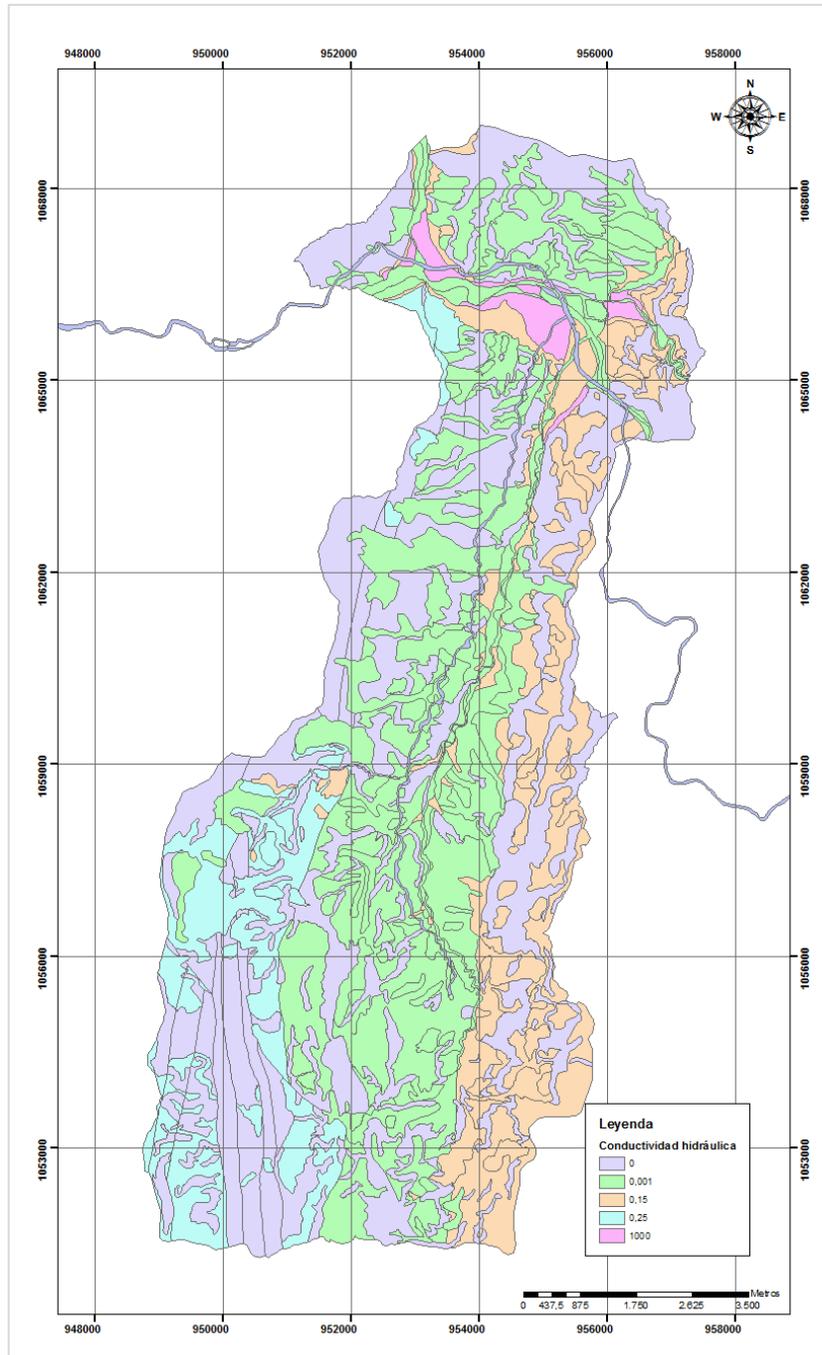
Para la generación del raster del parámetro de conductividad hidráulica en esta investigación, se tuvo en cuenta las características geológicas de la zona del caso de estudio descritas en el numeral 3, de acuerdo con esta composición del material se seleccionó un valor de referencia presentado en la Tabla 9 que permitió una aproximación de la conductividad hidráulica en la zona.

Tabla 9 Valores de conductividad hidráulica para diferentes rocas

Roca	K (m/día)	Grado de Permeabilidad	Tipo de formación
Grava limpia	1000	Buena-muy buena	Permeable
Arena gruesa limpia	10-1000	Buena-muy buena	Permeable
Mezcla de arena	5-10	Mala	Semi impermeable
Arena fina	1-5	Mala	Semi impermeable
Arena limosa	0.1-2	Mala	Semi impermeable
Limo	0.001-0.5	Mala	Semi impermeable
Arcilla	< 0.001	Nula	Impermeable

Fuente. Tomado (Unal, 2011)

Como se mencionó anteriormente, la conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección de flujo. En el Mapa 13 se presenta los valores referentes al parámetro de conductividad hidráulica utilizados en el desarrollo de esta investigación.



Mapa 13 Conductividad hidráulica, cuenca quebrada La Negra.

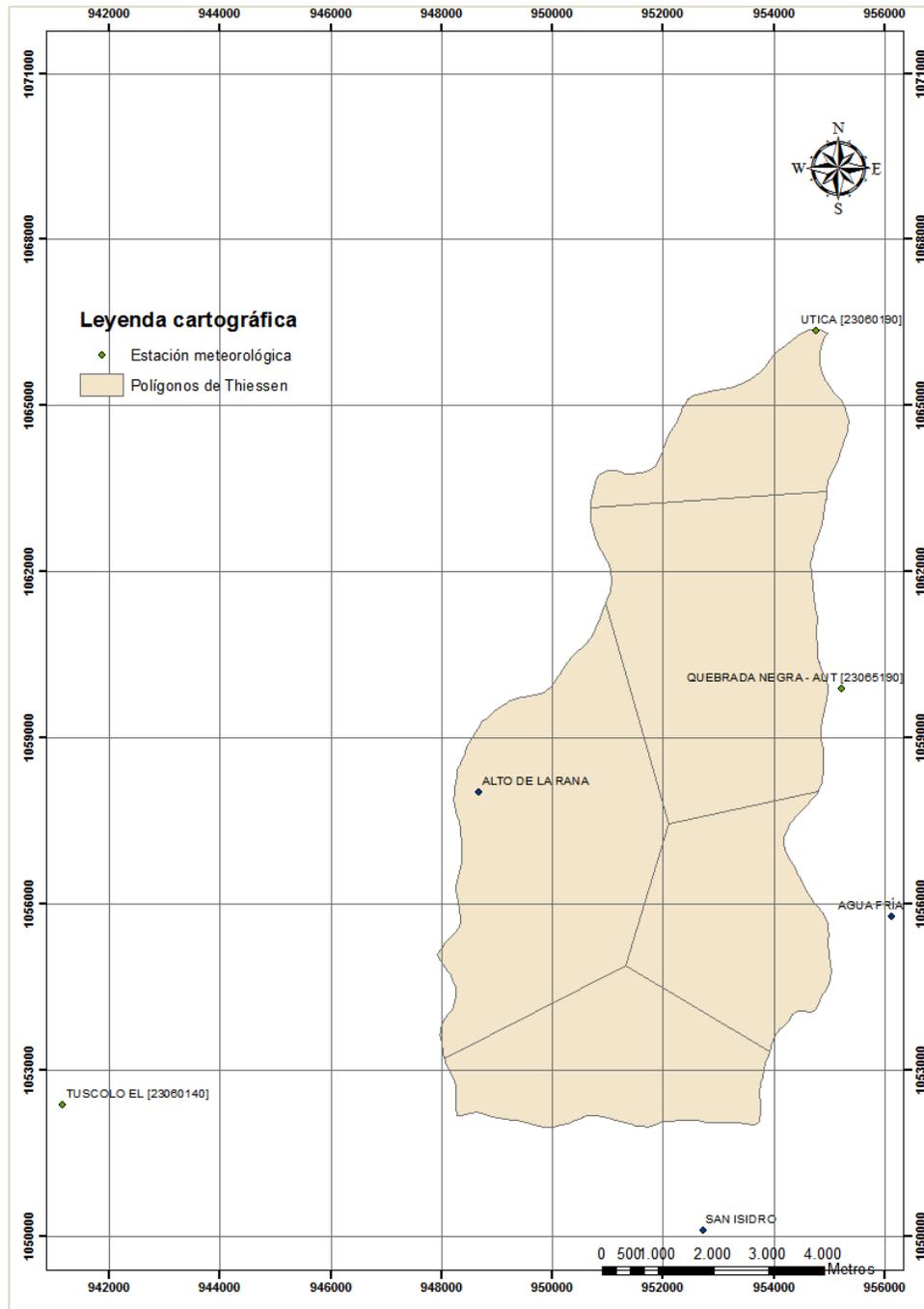
Intensidad de lluvia

Algunos movimientos en masa se pueden desencadenar durante la lluvia intensa cuando se produce una alta presión de poro dentro de una capa de sedimentos sueltos, lo que reduce la relación entre los esfuerzos de resistencia y los esfuerzos de acción (Bregoli et al., 2015).

Como ya se ha mencionado los movimientos en masa tipo flujo se presentan en zonas de ladera y tienden a acentuarse por efectos de lluvias. El efecto de las lluvias se tiene en cuenta a partir del

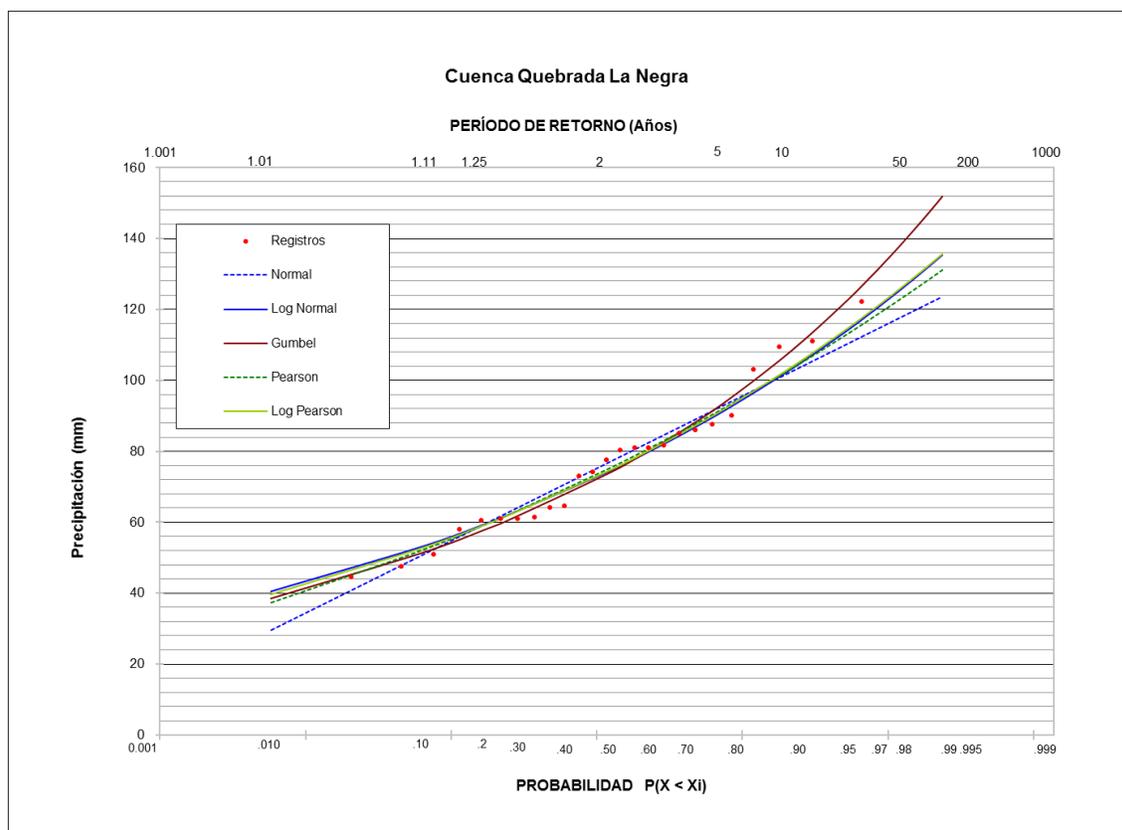
análisis de infiltración en el suelo para diferentes periodos de retorno de la lluvia. Para lo cual es necesario realizar los cálculos considerando las distribuciones de lluvia en la zona del caso de estudio.

Para esto fueron utilizados los polígonos de Thiessen, los cuales permitieron identificar las áreas representativas de las distintas estaciones pluviométricas presentes en la zona de estudio, y a partir de los datos de precipitación en 24 horas fueron calculados los valores de precipitación total y de precipitación de infiltración de la cuenca.



Mapa 14 Polígonos de Thiessen, cuenca quebrada La Negra.

A las series de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de las estaciones pluviométricas representativas seleccionadas, se les realizó el proceso de homogeneización correspondiente y se les efectuó las distribuciones de probabilidad adecuadas para valores extremos entre otras: normal, log-normal, Gumbel, Pearson III y Log Pearson III, adoptando la mejor distribución de acuerdo con el análisis de las pruebas de chi cuadrado. En la Gráfica 5 se presenta el ajuste de las diversas probabilidades para las precipitaciones máximas de la estación quebrada La Negra.



Gráfica 5 Ajuste de las distribuciones de probabilidad para la estación pluviométrica quebrada La Negra.

En la Tabla 10 se presentan los valores asociados para cada periodo de retorno con la distribución de mejor ajuste para todas las estaciones seleccionados.

Tabla 10 Precipitaciones máximas en 24 horas obtenidas en función del TR

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	DISTRIBUCIÓN DE MEJOR AJUSTE	PERIODO DE RETORNO		
		10	50	100
UTICA	GUMBEL	108,4	139,0	151,9
TUSCOLO	NORMAL	99,9	116,2	122,0
QDANEGRA	LOG-NORMAL	166,5	277,6	332,5
AGUAFRIA	GUMBEL	105,0	133,8	146,0

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	DISTRIBUCIÓN DE MEJOR AJUSTE	PERIODO DE RETORNO		
		10	50	100
ALTO LA RANA	LOG-PEARSON	116,4	142,5	153,7
SAN ISIDRO	PEARSON	81,3	90,7	94,1

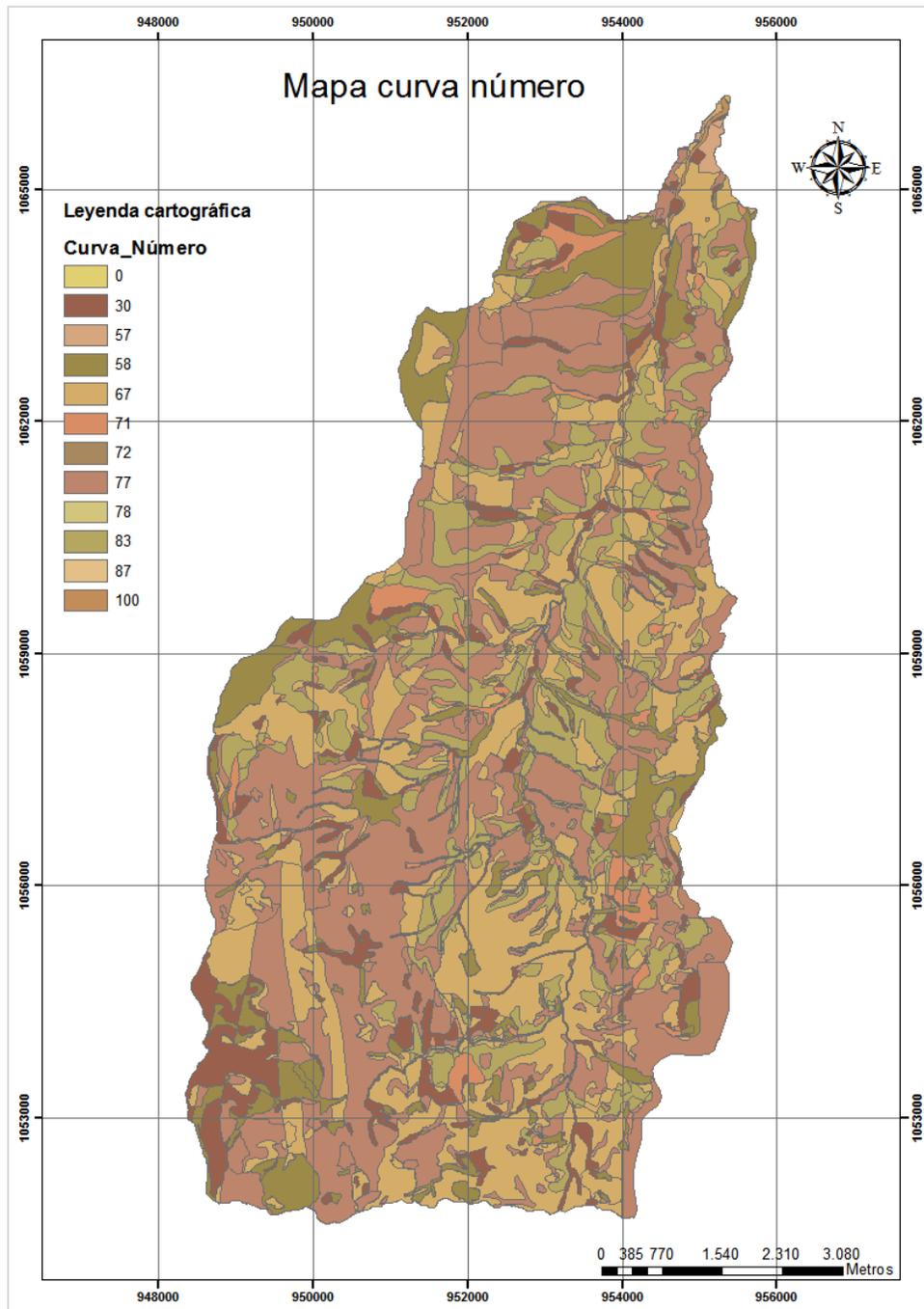
Por otra parte, fue calculado el valor medio del número de curva (CN) que depende del grupo hidrológico del suelo, el valor de CN se determina mediante los datos de la Tabla 11, clasificando los materiales de las diferentes UGS dentro de las categorías indicadas en la misma tabla, de esta manera se obtiene la distribución espacial de valores de grupo hidrológico en la zona de estudio.

Tabla 11 Clasificación hidrológica de los suelos

Grupo hidrológico	Descripción
Grupo A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
Grupo B	Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
Grupo C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
Grupo D	Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Fuente. Tomado de (Chow., 1994).

A partir de los registros de precipitación diaria (P), fue calculada la precipitación infiltrada en 24 horas (Pi), mediante la ecuación del método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), el cual fue establecido por el Soil Conservation Service SCS en el año 1986, el procedimiento para determinar el CN, consiste en establecer un número adimensional de curva que se encuentre dentro del rango $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables o con agua el CN=100 y para superficies naturales < 100 . En el Mapa 15 se presenta el resultado de la curva número para la cuenca quebrada La Negra.



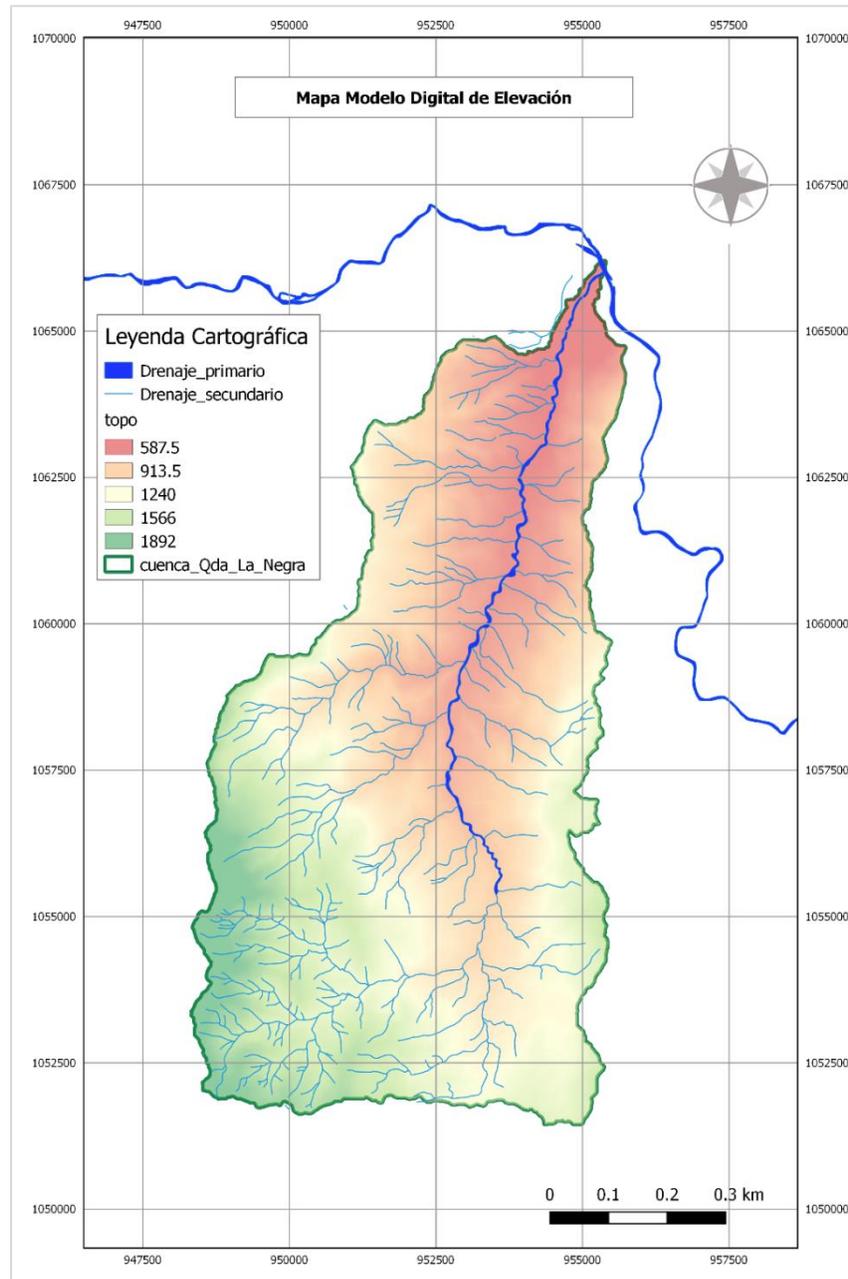
Mapa 15 Curva número, cuenca quebrada La Negra.

4.2 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

El análisis de susceptibilidad busca identificar si los factores influyentes como la geología y la geomorfología que tiene un talud son favorables o no para que en ella se presenten procesos de inestabilidad, ocasionando un proceso de movimiento en masa. De esta manera el objetivo de este análisis, es con base en la identificación de las variables del área de estudio determinar las zonas que presentan mayor probabilidad a sufrir procesos de inestabilidad y clasificarlas en categorías de alta, media y baja susceptibilidad para este tipo de movimientos.

Como ya se ha mencionado existen diferentes formas de aproximación para realizar un análisis de susceptibilidad, se conocen desde métodos heurísticos, métodos estadísticos, métodos probabilísticos y del conocimiento de un experto. Para esta investigación se realizó un análisis de susceptibilidad con un método tipo determinístico mediante el modelo de talud infinito, considerando diferentes intensidades de lluvia, con lo cual se obtienen factores de seguridad asociados a diferentes periodos de retorno.

Como parámetros de entrada se tienen el modelo digital de elevaciones, el análisis de la topografía (Mapa 16) y las demás capas generadas en el análisis temático 4.1, al ejecutar el modelo infiniteslope se obtienen los valores de factor de seguridad para cada escenario de lluvia en los periodos de retorno propuestos.



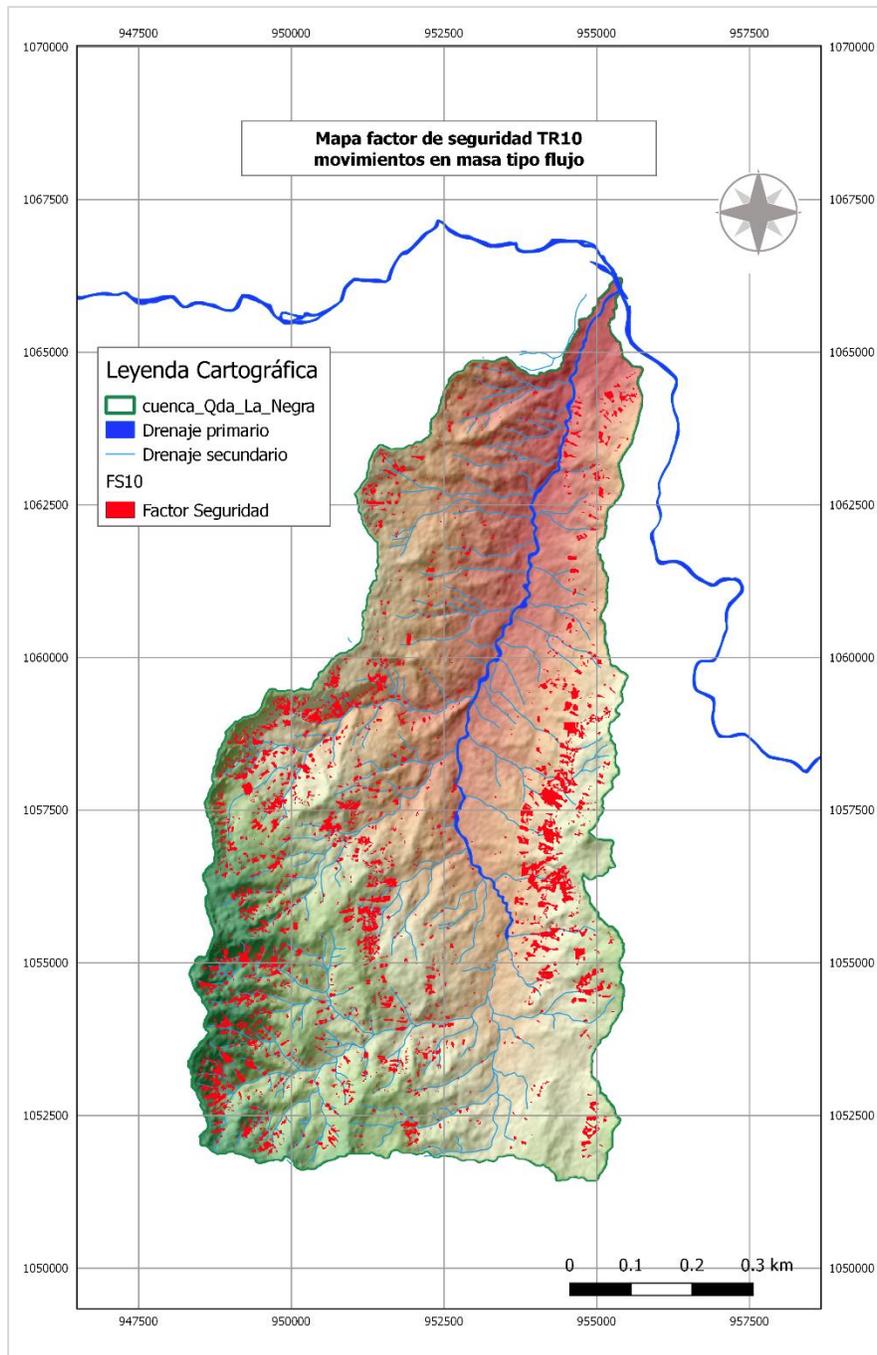
Mapa 16 Topografía, cuenca quebrada La Negra.

Determinación de zonas susceptibles

Las zonas susceptibles a ruptura se identificaron a partir de la información geológica y geomorfológica del área de estudio para cada uno de los escenarios de lluvia asociada a cada periodo de retorno.

Periodo de retorno 10 años

En el Mapa 17 se puede observar que de acuerdo con la intensidad de lluvia asociada para un periodo de retorno de 10 años un total de 487.8 ha que corresponde al 6.8% del área total de la cuenca de la quebrada La Negra cuenta con una posibilidad de ruptura del suelo, lo que ocasiona una alta probabilidad de ocurrencia de este tipo de fenómenos, con un 38.6% esta inestabilidad está asociada a las geoformas de laderas moderadas (D5) las cuales se caracterizan por presentar pendientes con inclinaciones entre 10° y 40°, estas geoformas se localizan en la zona occidental de la cuenca, en las inmediaciones de la quebrada La Seca, en el nacimiento de la quebrada El Descanso y la parte media de las microcuencas de las quebradas La Amargosa y La Jabonera y La Chorrera y están conformados por rocas sedimentarias blandas, predominantemente arcillosas, seguido con un 24.7% de las geoformas hondonada denudacional (D8) las cuales predominan en la zona alta de la cuenca con las quebradas La Esmeralda y La Esmeraldita y están conformadas por rocas sedimentarias intermedias arcillosas y limolíticas y blandas arcillosas.

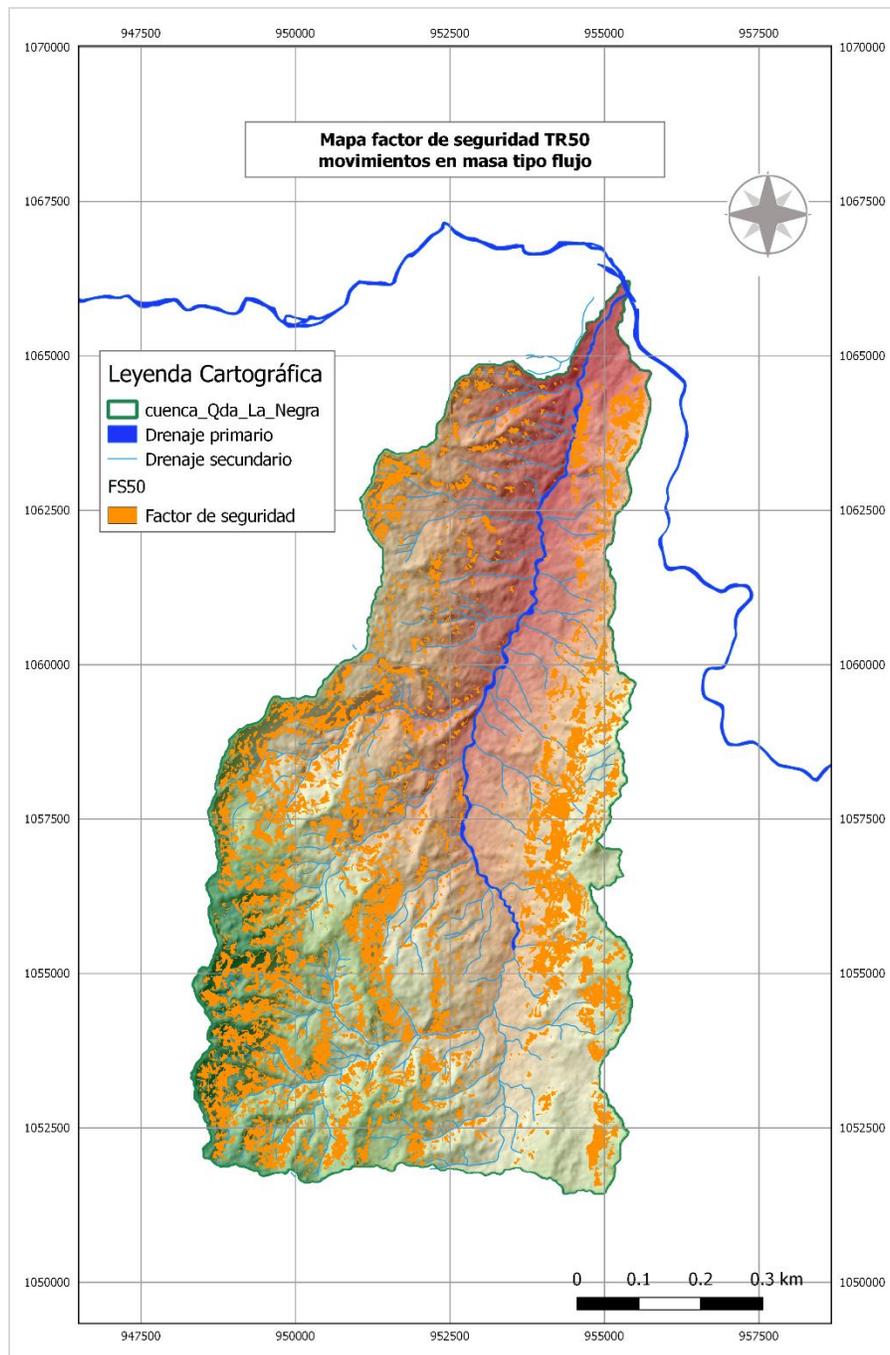


Mapa 17 Factor de seguridad asociado a un TR de 10 años.

Periodo de retorno 50 años

Para un periodo de retorno de 50 años la probabilidad de ruptura del suelo aumenta en un 14%, es decir que un total de 1475.74 ha que representan un 20.7% del área total de la cuenca presenta una susceptibilidad de que se inestabilice el suelo, aumentando esta posibilidad en la zona baja de la cuenca como se evidencia en el Mapa 18, en esta zona geológicamente se encuentra ubicado con un total 270.18 ha rocas intermedias clase 1 (Ri1), las cuales conforman relieves ondulados a montañosos, con baja densidad de drenaje e incisión baja a moderada, la consistencia es media a dura, la fracturación es baja, sin embargo, se presentan sectores altamente fracturados y están compuestos

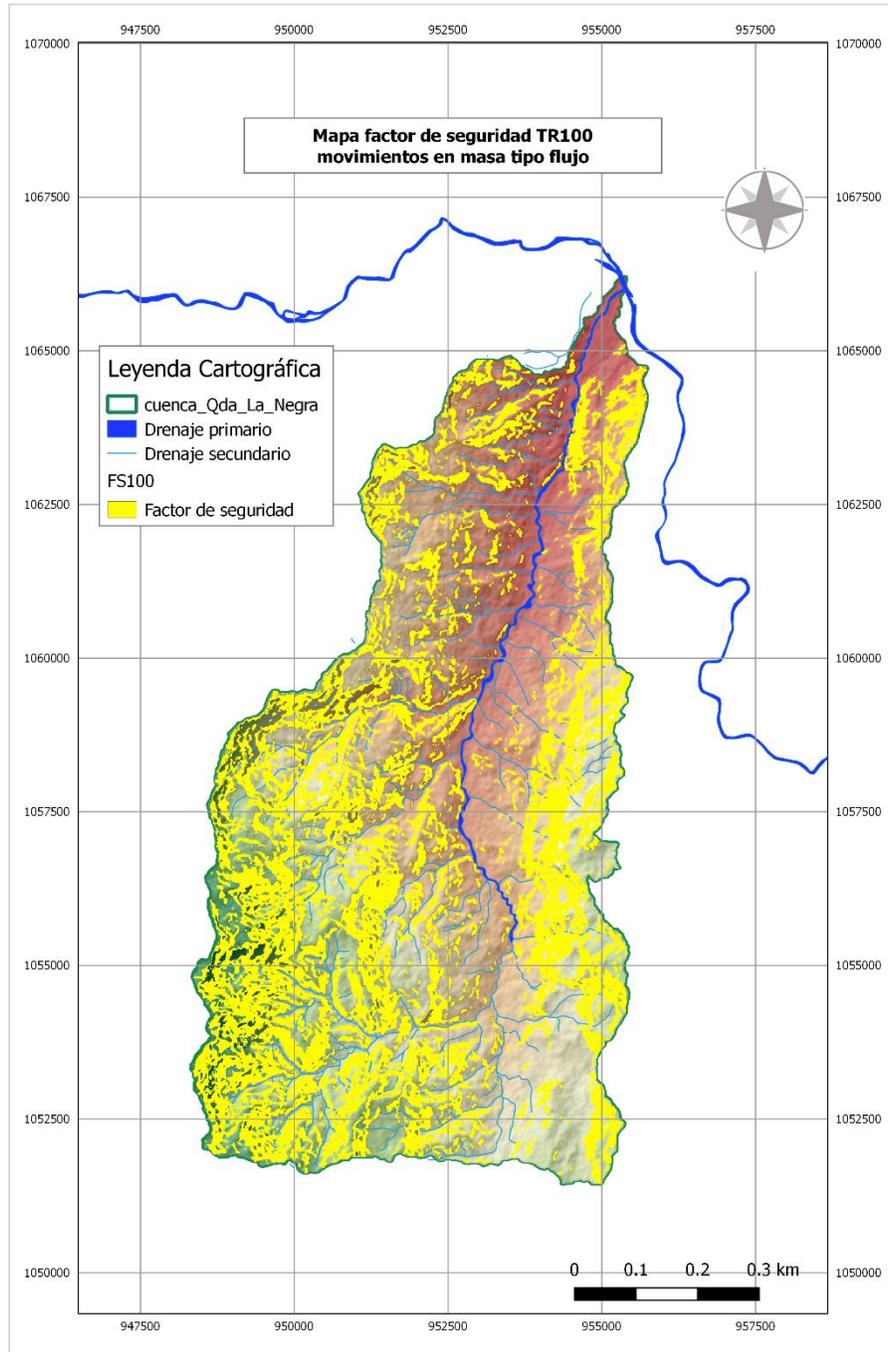
por areniscas arcóscicas a sublitoarenitas de grano fino conglomeráticas, en secuencias gradadas poco cementadas, con estratificación media a muy gruesa, intercaladas con lutitas negras en estratificación media a delgada y biomicritas y en la zona alta oriental con 180.63 ha se identifican suelos residuales clase 2 (Srs 2), en los cuales predominan limosos, con arcillas y arenas en menor proporción.



Mapa 18 Factor de seguridad asociado a un TR de 50 años.

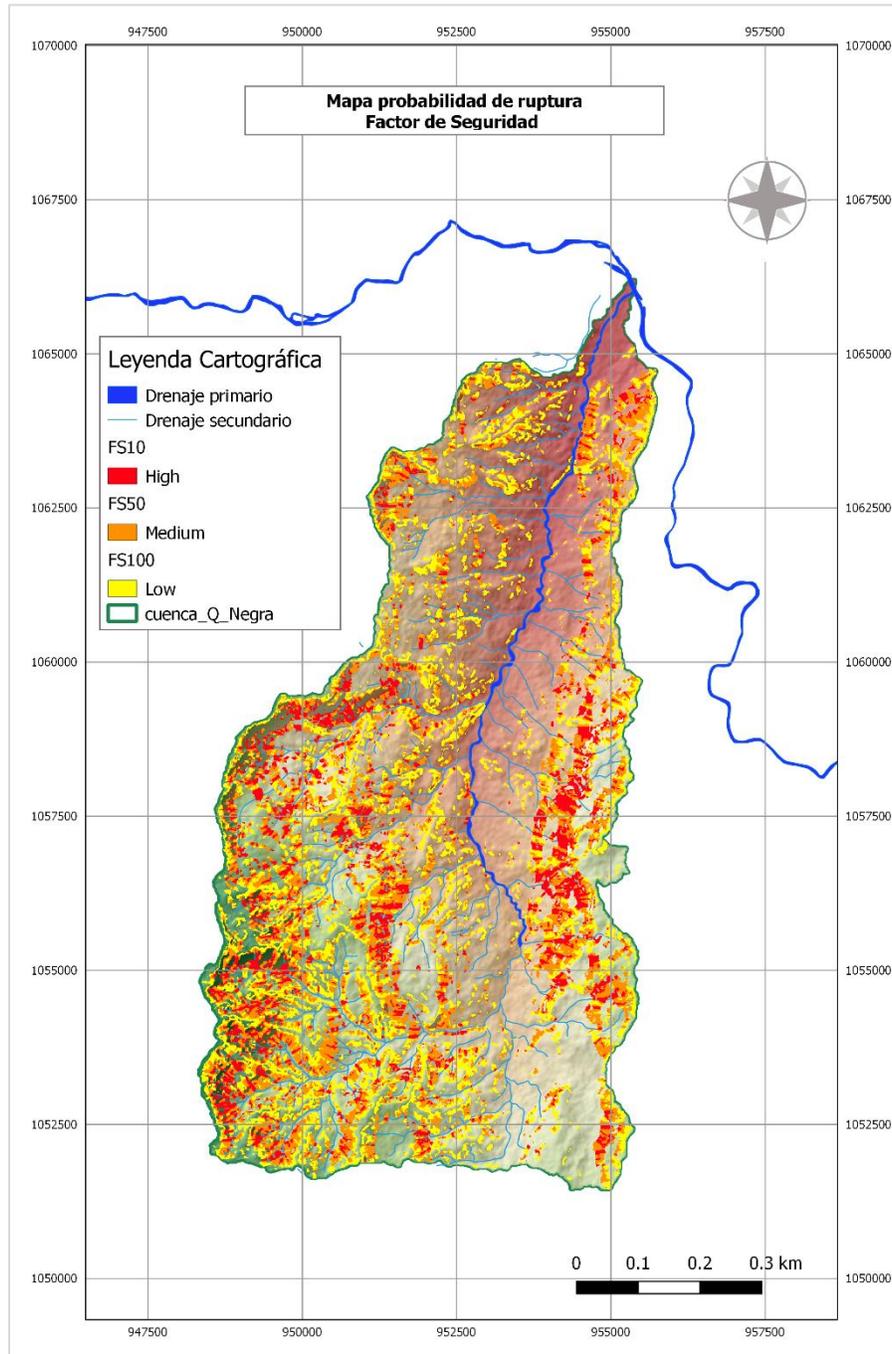
Periodo de retorno 100 años

La posibilidad de ruptura del suelo de acuerdo con la intensidad de la lluvia asociada para un periodo de retorno de 100 años aumenta notoriamente en la parte alta y oriental de la cuenca, es decir, en total el 36.4% del área total de la cuenca presenta una probabilidad de falla en las laderas con un total de 2592.24 ha posiblemente afectadas como se puede observar en el Mapa 19.



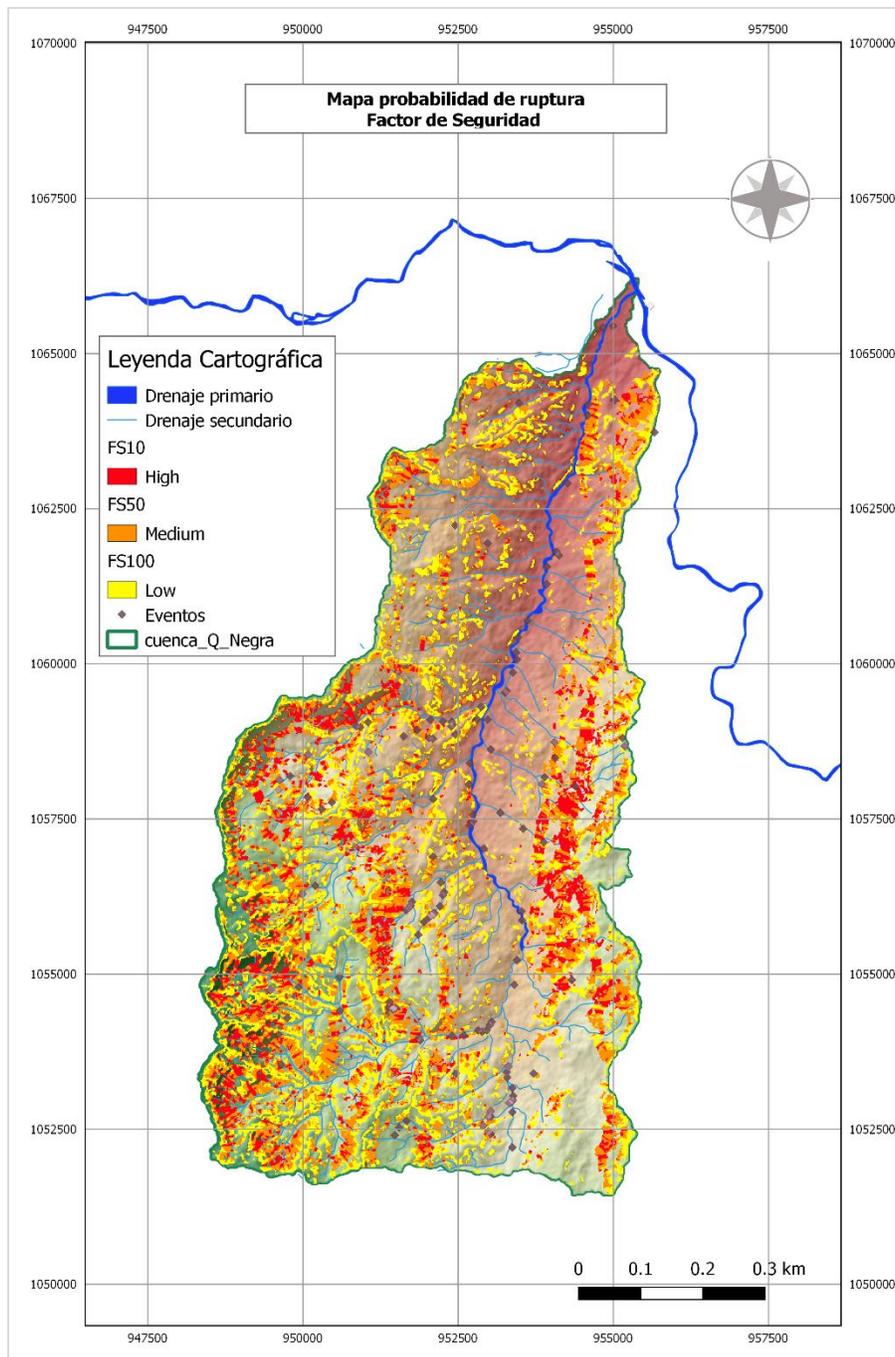
Mapa 19 Factor de seguridad asociado a un TR de 100 años.

En el Mapa 20 se puede observar el resultado de la aplicación de esta metodología, donde se presentan las zonas susceptibles a movimientos en masa tipo flujo para la cuenca de la quebrada La Negra, es decir, las áreas posiblemente afectadas por la probable ruptura del suelo lo que ocasiona una alta probabilidad de ocurrencia de este tipo de fenómenos. En total 1963.63 ha de la cuenca de la quebrada La Negra presentan un rango alto y medio a ser susceptibles por un movimiento en masa tipo flujo, esto equivale cerca del 28% del área total de la cuenca.



Mapa 20 Susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo, cuenca quebrada La Negra.

Por otra parte, se agregaron los eventos disponibles en el sistema de información de movimientos en masa SIMMA del Servicio Geológico Colombiano, se identificaron que de los 160 eventos de movimientos en masa tipo flujo, el 61.3% de estos se ajusta con el mapa de susceptibilidad generado con la aplicación de la metodología propuesta como se observa en el Mapa 21.



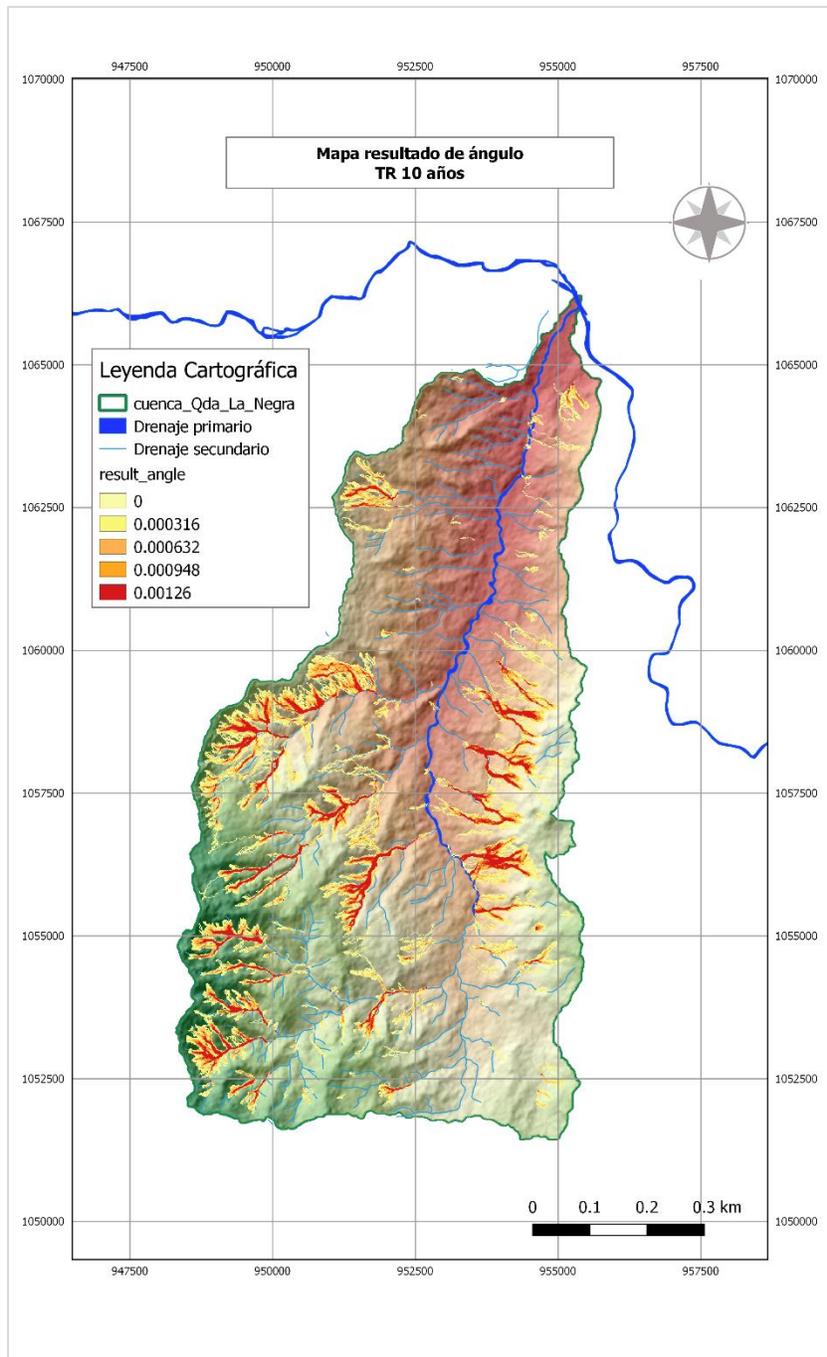
Mapa 21 Probabilidad de ruptura vs eventos.

Propagación del viaje del movimiento

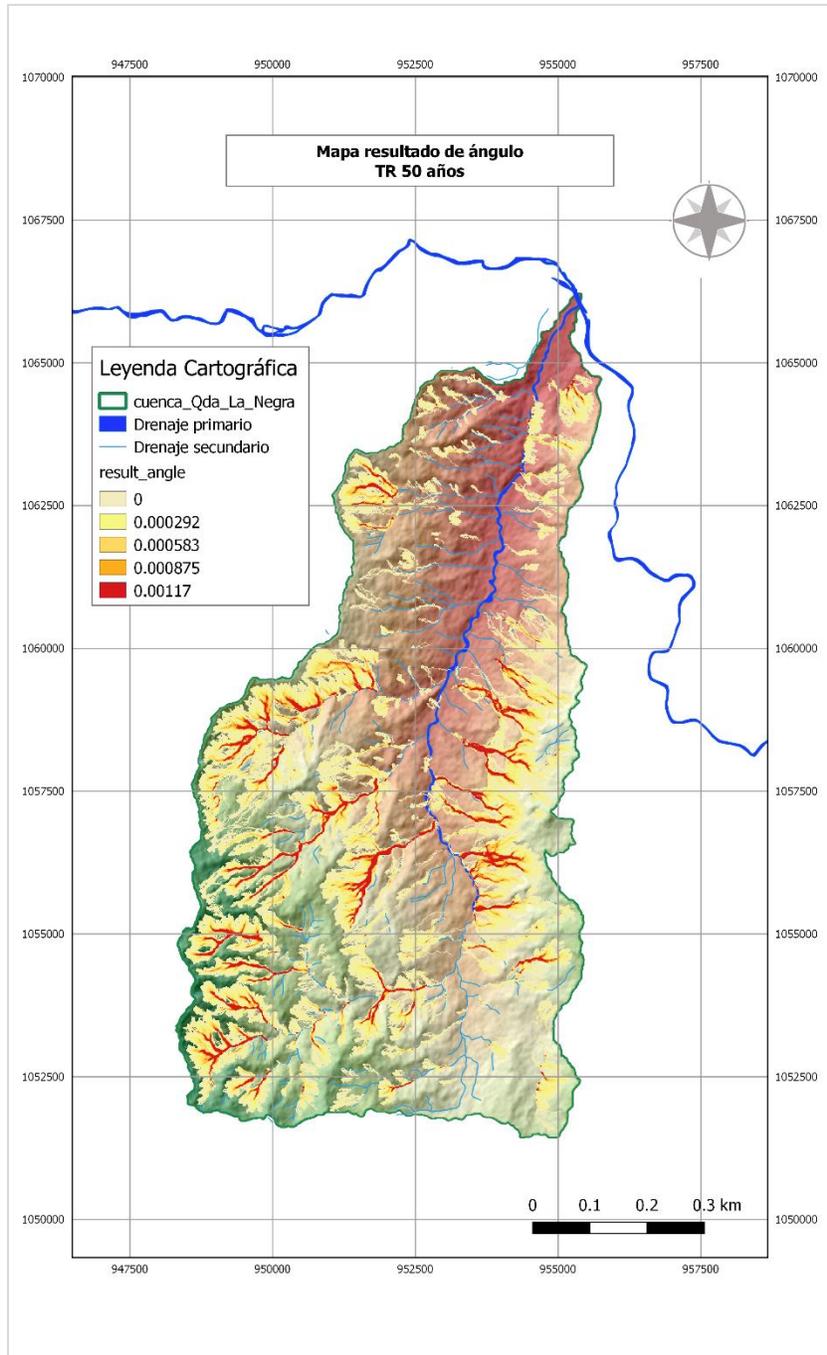
Considerando que el suelo que rompe se propaga, se toma el resultado de las zonas susceptibles y se ejecuta el modelo DebrisDice, el cual permitirá obtener los posibles resultados de la propagación del viaje del movimiento en masa para cada uno de los escenarios planteados en los periodos de retorno, teniendo en cuenta que estas propagaciones representan el desplazamiento del movimiento en masa una vez se encuentre estabilizado el flujo, cabe mencionar que estos resultados no tiene en cuenta el proceso de licuefacción del suelo. A continuación, se describen los principales resultados de las posibles zonas que serán afectadas por el alcance o distancia de viaje del movimiento:

Result_angle

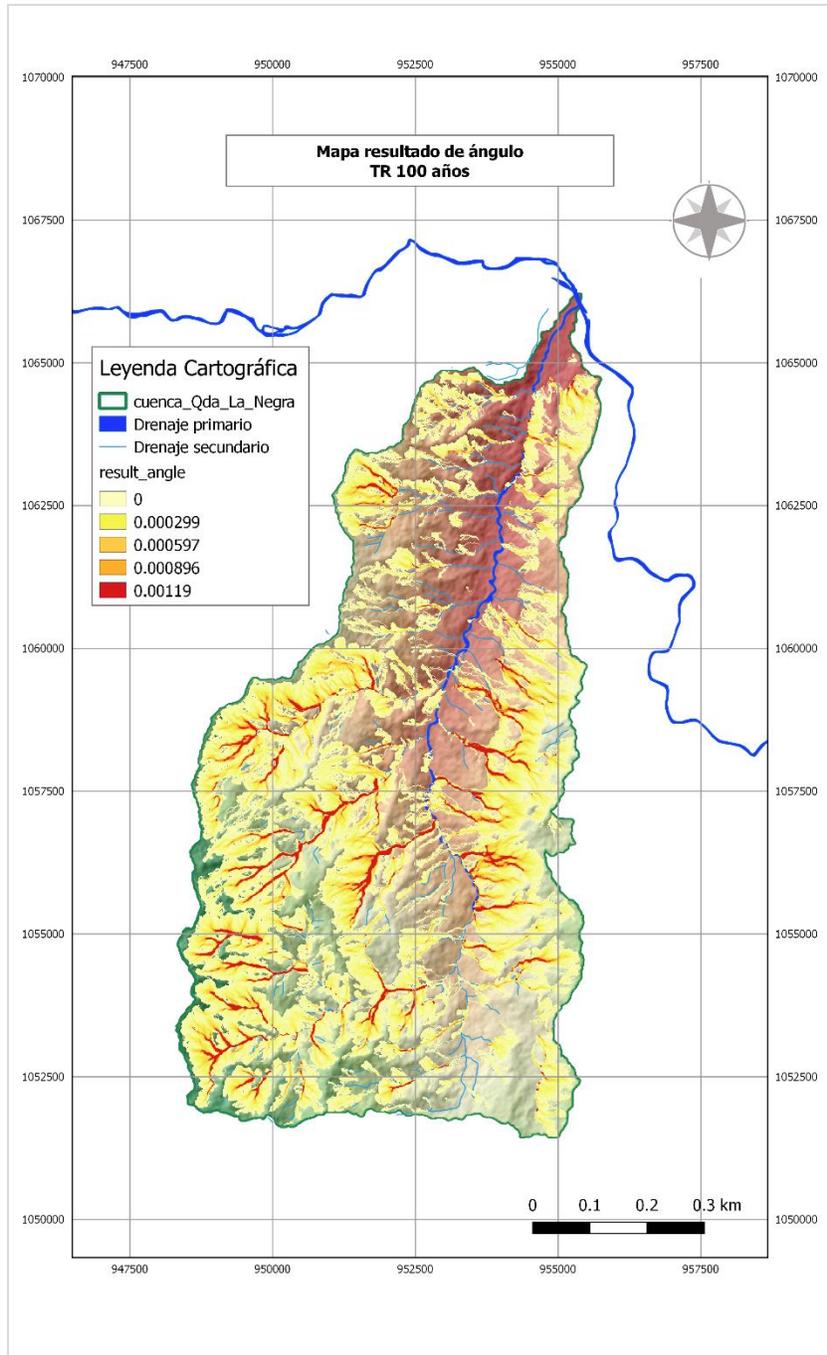
Es el número de veces que la celda es invadida por el flujo, este resultado se obtiene utilizando los criterios de ángulo de alcance; la representación de este resultado indica las zonas de mayor probabilidad que se tiene en ese conjunto de datos que puedan generar una ruptura y logren propagarse, es decir, pueden ser las zonas donde hay varios eventos actuando sobre un mismo punto lo que indica una mayor probabilidad de ruptura del mismo, lo que representaría un mayor nivel de riesgo en esa zona. En el Mapa 22, Mapa 23 y Mapa 24 se presenta los resultados del ángulo de reposo obtenidos al ejecutar el programa DebrisDice en el caso de estudio.



Mapa 22 Ángulo de reposo asociado a un TR de 10 años.



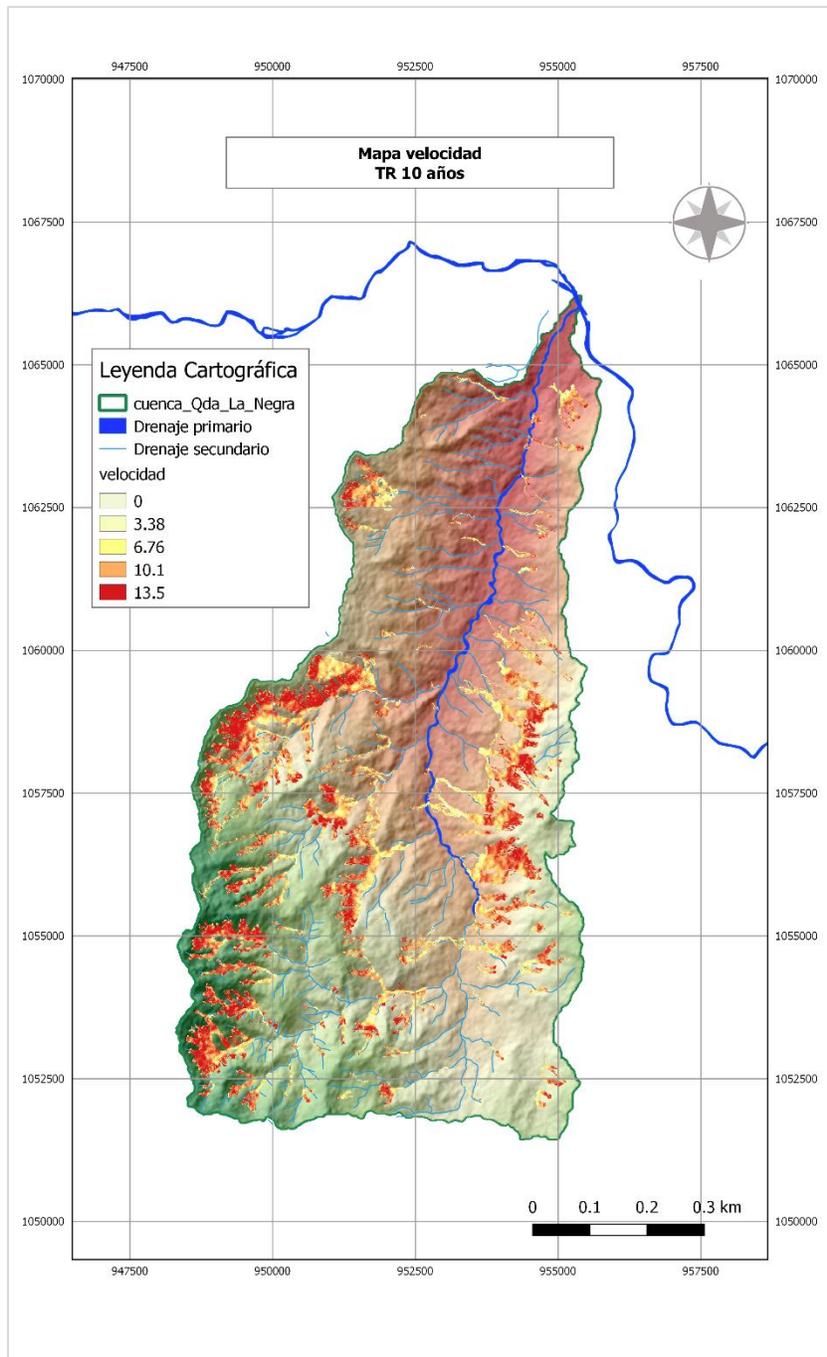
Mapa 23 Ángulo de reposo asociado a un TR de 50 años.



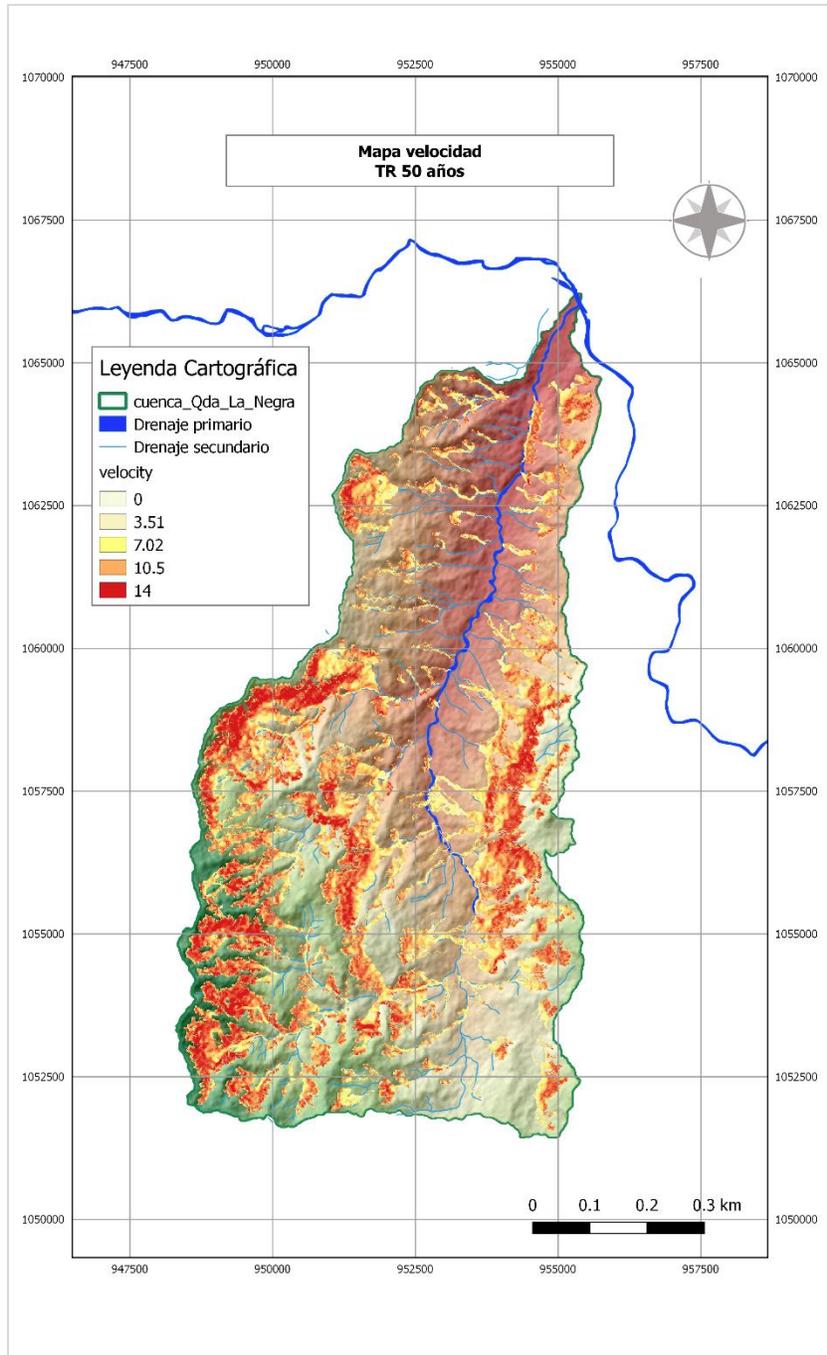
Mapa 24 Ángulo de reposo asociado a un TR de 100 años.

Velocidad del flujo

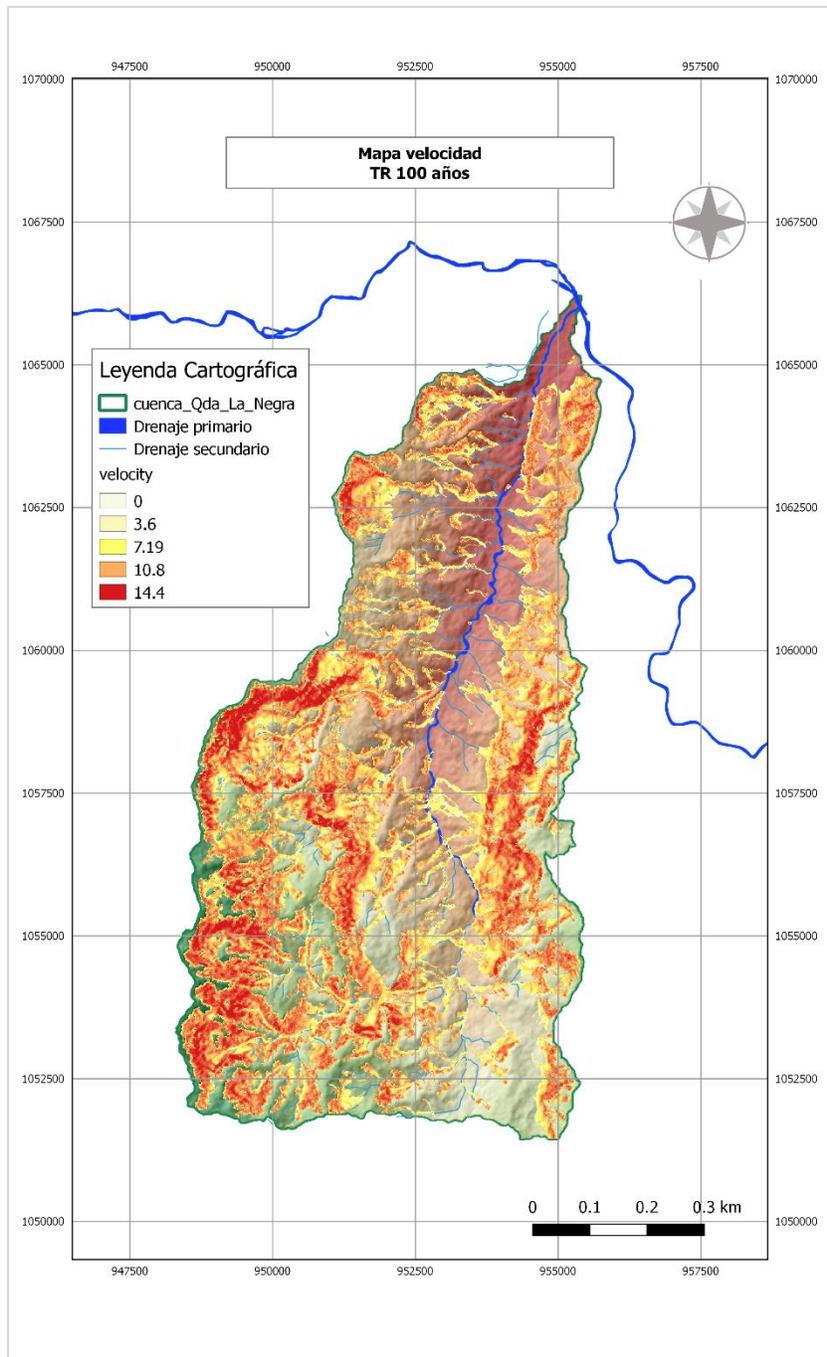
Este resultado indica el cálculo de la velocidad del flujo en m/s, para cada celda invadida incluida en "result_vel", es decir, cuando el flujo sale de la celda de ruptura siempre se acelera muy rápido como consecuencia de que las rupturas ocurren en zonas de alta pendiente, cuando pierden un poco de pendiente las fuerzas de fricción superan las fuerzas de gravedad y se frenan hasta llegar a la zona de depósito.



Mapa 25 Velocidad asociada a un TR de 10 años.



Mapa 26 Velocidad asociada a un TR de 50 años.



Mapa 27 Velocidad asociada a un TR de 100 años.

5 CONCLUSIONES

Los resultados de los mapas de susceptibilidad de una cuenca proporcionan información importante respecto de las zonas que dentro de la cuenca pueden presentar mayor o menor posibilidad de sufrir procesos de inestabilidad, por esta razón, el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa puede considerarse el primer paso para la zonificación de la amenaza y evaluación de riesgo, ya que en un análisis de susceptibilidad se deben identificar tanto las posibles zonas de ocurrencia del movimiento en masa (zonas o puntos de inicio), como aquellas que posiblemente serán afectadas por el alcance o distancia de viaje del movimiento (alcance del flujo).

Se generó una metodología basada en el acceso de la información disponible para el análisis de variables relevantes en la ocurrencia de este tipo de fenómenos, como lo son: la geología, la geomorfología, el clima, apoyada de modelos físicos que permiten evaluar la susceptibilidad con el fin de determinar las posibles zonas afectadas por este tipo de fenómenos.

El desarrollo de esta metodología aporta a los entes territoriales, autoridades ambientales y demás entidades interesadas una alternativa para el primer paso de la planificación ambiental del territorio en la reducción del riesgo desde el componente del conocimiento.

Un total de 1963.63 ha de la cuenca de la quebrada La Negra presentan un rango alto y medio a ser susceptibles por un movimiento en masa, esto equivale cerca del 28% del área total de la cuenca, estas zonas susceptibles se encuentran en geoformas relacionadas con los procesos de origen denudacional laderas.

Con el uso de herramientas computacionales como el modelo cuantitativo infiniteslope se permite modelar el comportamiento de los flujos granulares, donde se presentan deslizamientos en alta pendiente, identificando las posibles zonas de ruptura del suelo, lo que permite conocer las zonas susceptibles por la ocurrencia de este tipo de fenómenos de flujo, resaltando que los resultados de la propagación del flujo desarrollada no tuvieron en cuenta el proceso de licuación del suelo.

Los resultados de la metodología realizada sirven como una herramienta para proponer medidas y estrategias para la reducción de riesgos y de los efectos de un posible desastre en la cuenca por movimientos en masa tipo flujo, sin embargo, se debe mencionar que los resultados no deben asumirse como un mapa final de la zonificación del riesgo, las autoridades pertinentes deben elaborar estudios de acuerdo con la reología del flujo y a mayor escala para la toma de decisiones en el territorio.

6 RECOMENDACIONES

El mapa de susceptibilidad resultante puede utilizarse para estimar la ocurrencia de futuros movimientos en masa en una zona de estudio, sin embargo, se recomienda calibrar los resultados teniendo en cuenta el tipo de movimiento en masa, el tamaño del área de estudio, la información disponible, la escala de análisis, a fin de obtener la mejor correlación.

Los mapas de susceptibilidad brindan una información importante respecto de las zonas que dentro de la cuenca pueden presentar mayor o menor posibilidad de sufrir procesos de inestabilidad. Esta información se debe emplear, para realizar los posteriores análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en una zona de estudio.

Para realizar este primer paso en la evaluación de riesgo de una zona de estudio es importante contar con una buena base de datos de registros de eventos y con información disponible sobre los parámetros influyentes en la ocurrencia de este tipo de fenómenos de movimientos en masa.

El desarrollo de esta metodología permitió identificar que los modelos utilizados en la zona del caso de estudio no son el tipo de herramientas adecuadas para los fenómenos que posiblemente ocurren en la cuenca (flujo de lodos), por lo cual se recomienda que en la zonificación del riesgo se usen otras herramientas computacionales que permitan modelar las condiciones de este tipo de movimientos (HEC-RAS).

Es recomendable que los resultados de la modelación de este tipo de fenómenos se acompañen de trabajo en campo, para la validación del tipo de movimiento en masa tipo flujo que se evidencie en la zona de interés, y de esta manera reducir la incertidumbre de los resultados del modelo reológico seleccionado.

BIBLIOGRAFÍA

- Barbecho, & Calle. (2012). Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del Río Tarqui. In *Universidad de Cuenca*.
- Bateman, A., Medina, V., Hürlimann, M., & Velasco, D. (2007). Modelo bidimensional para simulación de flujos detríticos: FLATModel. Aplicación a una cuenca del Pirineo Catalán. *Ingeniería Hidráulica En México*, 22(4), 5–20. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/166/0>.
- Bregoli, F., Medina, V., Chevalier, G., Hürlimann, M., & Bateman, A. (2015). Debris-flow susceptibility assessment at regional scale: Validation on an alpine environment. In *Landslides* (Vol. 12, Issue 3). <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0493-x>
- Chow., V. Te. (1994). *Applied Hydrology International ed.*, McGraw Hill Higher Education. *McGraw Hill Higher Education.*, 1, 390.
- CMGRD Útica. (2012). *Plan Municipal para la Gestión del Riesgo del municipio de IcaÚt*.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2009). *Plan de Ordenación y Manejo cuenca del río Negro*.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2019). *Caso de estudio: Riesgo de desastre en Útica*. <http://oaica.car.gov.co/caso-de-estudio2.php>
- GEMMA. (2007). *Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. <https://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/442884/GuiaEvaPeligros.pdf>
- GITS-UPC. (n.d.). *Debris Flow Initiation Models*.
- Mantilla, G. et al. (2001). *Los suelos: estabilidad, productividad y degradación*. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/18777/43833_55592.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- MINAMBIENTE. (2014). *Protocolo Para La Incorporación De La Gestión Del Riesgo En Los Planes De Ordenación Y Manejo De Cuencas Hidrográficas*. 123. http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Plan-de-ordenamiento-del-Recurso-Hidrico/PROTOCOLO_INCORP._GESTION_DEL_RIESGO_-_POMCA.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo. (2014). *Guía Técnica para la formulación de los POMCAS*. 104.
- Pedraza, J. P. P. (2016). *Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Modelación matemática de flujos de avalancha Tesis Maestría en Ingeniería Civil – Recursos Hídricos e Hidroinformática Presentado por : Jessica Paola Páez Pedraza Asesor : Ing . Mario Día*.
- Sepúlveda, A., & Patiño, J. (2016). *Metodología Para La Evaluación De Riesgo Por Flujo De Detritos Detonados Por Lluvia*.

- Servicio Geológico Colombiano. (2017a). *Caracterización del Movimiento en Masa Tipo Flujo del 31 de marzo de 2017 en Mocoa – Putumayo*. (Issue March). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18803.43045>
- Servicio Geológico Colombiano. (2017b). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000*. <https://doi.org/10.1002/chem.201301917>
- SGC. (2009). *Formulacion de una guia metodológica para la evaluacion de la amenaza por movimientos en masa tipo flujo: caso piloto cuenca quebrada La Negra , Útica – Cundinamarca Tomo I Bogotá D . C . Junio 2009 Ministerio de Minas y Energía*.
- SGC. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Suárez, J. (1989). *Deslizamientos y Estabilidad Taludes en Zonas Tropicales*.
- Suárez, J. (1999). Deslizamientos: Análisis geotécnico Flujos, Capítulo 5. In *Deslizamientos: Análisis geotécnico*. <http://www.erosion.com.co/>
- Unal. (2011). *Hidráulica de aguas subterráneas*.