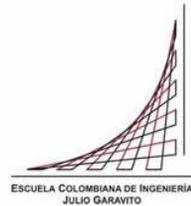


Maestría en Ingeniería Civil

Determinación de la amenaza por flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá

Leydy Caterine Cerquera Pedraos

Bogotá, D.C., 21 de julio de 2022



Determinación de la amenaza por flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá

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

Germán Ricardo Santos Granados

Director

Bogotá, D.C., 21 de julio de 2022



La tesis de maestría titulada “Determinación de la amenaza por flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá”, presentada por Leydy Caterine Cerquera Pedraos, 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

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Allen Bateman Pinzón

Jurado

Vicente Medina Iglesias

Bogotá, D.C., 21 de julio de 2022

Agradecimientos

A mis padres y mis hermanos, quienes siempre han sido un apoyo en mi vida, el cual se vio mayormente reflejado en el desarrollo de mis estudios. A los profesores Germán Santos, Allen Bateman y Vicente Medina por sus valiosos aportes y direccionamiento durante la elaboración de este trabajo.

Resumen

El flujo de avalanchas es uno de los desastres naturales más importantes en nuestro país, pues a lo largo del territorio colombiano se ha evidenciado la ocurrencia de eventos de gran magnitud, provocando la pérdida de vidas humanas y pérdidas económicas; uno de estos casos es la quebrada Estaquecá, localizada en el piedemonte llanero sobre en el municipio de Quetame, la cual ha evidenciado en las últimas tres décadas una fuerte actividad de este fenómeno, afectado la infraestructura vial de la zona.

Para un mejor entendimiento de los eventos ocurridos en la quebrada Estaquecá, en el presente documentos se realiza un análisis multitemporal para evaluar los deslizamientos ocurridos y la evolución de la cuenca. Así mismo, se realiza una caracterización hidrológica para identificar el comportamiento de la cuenca de acuerdo con sus parámetros morfométricos y las condiciones de precipitación de la zona. Adicionalmente, se analizan las relaciones de lluvia antecedente y la lluvia de los eventos donde ocurrieron avalanchas, con el fin de establecer un nivel umbral para la generación de flujos de detritos en la cuenca.

En cuanto a la determinación de la susceptibilidad, ésta se establece de acuerdo con el método estadístico bivariado por pesos de evidencia, el cual requiere como insumo un inventario de deslizamientos y una serie de mapas con los factores condicionantes a evaluar, para de esta manera establecer una correlación con el desarrollo de movimientos en masa en la zona.

Luego de establecidas las zonas con susceptibilidad alta a deslizamientos en la cuenca, se procede a modelar cómo estas áreas se propagan sobre el cauce, para lo cual se hace uso del modelo DebrisDice que simula una serie de caminos aleatorios (Montecarlo), para luego generar las trayectorias finales del flujo mediante su probabilidad.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GENERAL	14
2.1.1. <i>Objetivos específicos</i>	14
3. MARCO DE REFERENCIA	15
3.1. MARCO CONCEPTUAL.....	15
3.1.1. <i>Susceptibilidad</i>	15
3.1.2. <i>Vulnerabilidad</i>	15
3.1.3. <i>Amenaza</i>	15
3.1.4. <i>Riesgo</i>	16
3.2. MARCO TEÓRICO.....	16
3.2.1. <i>Hidrología</i>	16
3.2.1.1. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia	16
3.2.1.2. Tiempo de concentración	17
3.2.1.3. Hietograma de diseño	18
3.2.1.4. Estimación de caudales.....	19
3.2.1.4.1. Método racional.....	19
3.2.1.4.2. Método del hidrograma Unitario del SCS.	20
3.2.2. <i>Factores condicionantes y desencadenantes de flujo de detritos</i>	22
3.2.2.1. Geología	22
3.2.2.2. Geomorfología	23
3.2.2.3. Sismos	23
3.2.2.4. Flujos piroclásticos.....	23
3.2.2.5. Deshielo de nevados	24
3.2.2.6. Climatológicas	24
3.2.2.7. Uso del suelo.....	24
3.2.1. <i>Reologías y Mecánica de Movimiento</i>	25
3.2.2. <i>Tipos de flujo</i>	26
3.2.2.1. Deslizamientos	27
3.2.2.2. Flujo de lodos.....	27
3.2.2.3. Flujo hiperconcentrados granular	28
3.2.2.4. Flujo de detritos o escombros.....	28
3.2.2.4.1. Iniciación	29
3.2.2.4.2. Propagación	30
3.2.2.4.3. Depositación	30
3.2.3. <i>Lluvia detonante</i>	30
3.2.3.1. Lluvia detonante relación Intensidad - Duración	31
3.2.3.2. Lluvia detonante precipitación acumulada	31
3.2.4. <i>Metodologías de análisis de susceptibilidad</i>	32
3.2.4.1. Inventarios	33
3.2.4.2. Análisis heurístico	33
3.2.4.3. Análisis estadístico.....	34

3.2.4.3.1.	Análisis bivariado - Pesos de evidencia	35
3.2.4.4.	Análisis determinístico	38
3.2.5.	<i>Metodologías de análisis de amenaza</i>	39
3.2.5.1.	Modelo DebrisDice	40
4.	METODOLOGÍA	42
4.1.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	42
4.2.	INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS E IDENTIFICACIÓN DE SITIOS CRÍTICOS	42
4.3.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	43
4.3.1.	<i>Definición de curvas IDF</i>	43
4.3.2.	<i>Estimación de caudales</i>	43
4.3.3.	<i>Estimación de la lluvia detonante de flujo de detritos</i>	43
4.4.	ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD	43
4.5.	ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR FLUJO DE DETRITOS	44
5.	CASO DE ESTUDIO	45
5.1.	LOCALIZACIÓN	46
5.2.	ÁREA DE ESTUDIO	46
5.3.	ANTECEDENTES	48
5.4.	GEOLOGÍA	50
5.4.1.	<i>Geología regional</i>	51
5.4.1.1.	Grupo Quetame (Peq)	51
5.4.1.1.1.	Filitas y Cuarcitas de Guayabetal (PEqgu)	52
5.4.1.2.	Grupo Cáqueza (K1c)	52
5.4.1.2.1.	Formación Lutitas de Macanal (K1m)	52
5.4.2.	<i>Geología estructural</i>	53
5.4.2.1.	Falla del río Negro	53
5.4.2.2.	Falla Estaquecá	53
5.4.2.3.	Falla Quetame	53
5.5.	GEOMORFOLOGÍA	53
5.5.1.	<i>Laderas de contrapendiente de sierra homoclinal- Sshlc</i>	54
5.5.2.	<i>Ladera estructural de sierra homoclinal – Sshle</i>	55
5.5.3.	<i>Espolón – Ses</i>	55
5.5.4.	<i>Cono lóbulo coluvial y de soliflucción – Dco</i>	55
5.6.	COBERTURAS Y USOS DEL SUELO	55
5.6.1.	<i>Coberturas de suelo</i>	55
5.6.1.	<i>Usos de suelo</i>	56
6.	INVENTARIO DE FLUJO DE DETRITOS	58
6.1.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE	58
6.1.1.	<i>Procesamiento de información</i>	59
6.1.1.	<i>Análisis de la información</i>	61
6.1.1.	<i>Resultados</i>	62
7.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	64
7.1.	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS	64
7.1.1.	<i>Coefficiente de compacidad</i>	65
7.1.2.	<i>Factor de forma de Horton</i>	65

7.1.3.	<i>Densidad de drenaje</i>	65
7.1.4.	<i>Numero de curva</i>	65
7.1.5.	<i>Tiempo de concentración</i>	66
7.2.	PRECIPITACIÓN.....	69
7.2.1.	<i>Número de días</i>	69
7.2.2.	<i>Precipitación mensual</i>	70
7.2.3.	<i>Precipitación máxima en 24 horas</i>	71
7.3.	CURVAS INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA - IDF	72
7.4.	HETOGRAMA DE DISEÑO	73
7.5.	ESTIMACIÓN DE CAUDALES	74
7.6.	ESTIMACIÓN DE LA LLUVIA DETONANTE.....	76
8.	ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD	83
8.1.	MAPAS DE FACTORES CONDICIONANTES	83
8.1.1.	<i>Mapa de subunidades geomorfológicas</i>	83
8.1.2.	<i>Mapa de pendientes</i>	84
8.1.3.	<i>Mapa de longitud de la pendiente</i>	85
8.1.4.	<i>Mapa de curvatura</i>	87
8.1.5.	<i>Mapa litológico</i>	88
8.1.6.	<i>Mapa de la geología estructural</i>	89
8.1.7.	<i>Mapa del uso del suelo</i>	90
8.1.8.	<i>Mapa de drenaje</i>	91
8.1.9.	<i>Mapa de áreas de drenaje lateral</i>	92
8.2.	MÉTODO ESTADÍSTICO POR PESOS DE EVIDENCIA	93
8.3.	VALIDACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD	96
8.4.	RESULTADOS.....	96
9.	ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR FLUJO DE DETRITOS	98
9.1.	RESULTADOS.....	98
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
11.	BIBLIOGRAFÍA	104

Índice de tablas

Tabla 3-1. Ecuaciones empíricas para el cálculo del tiempo de concentración Tc.	17
Tabla 3-2. Coeficiente de escorrentía.....	20
Tabla 3-3. Metodologías de análisis de susceptibilidad.....	33
Tabla 6-1. Fotografías aéreas utilizadas para inventario de deslizamientos, quebrada Estaquecá. ..	59
Tabla 7-1. Parámetros físicos de las subcuencas de la quebrada Estaquecá.....	67
Tabla 7-2. Parámetros morfométricos de las subcuencas de la quebrada Estaquecá.	67
Tabla 7-3. Parámetros físicos de la cuenca de la quebrada Estaquecá.	68
Tabla 7-4. Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Estaquecá.	68
Tabla 7-5. Datos de la estación hidrometeorológica Monterredondo.	69
Tabla 7-6. Parámetros utilizados para la definición de curvas IDF.	72
Tabla 7-7. Parámetros utilizados para la modelación en HEC-HMS.....	75
Tabla 7-8. Caudales máximos según metodología del hidrograma unitario del SCS.	76
Tabla 7-9. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 1997. .	78
Tabla 7-10. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 2003.	78
Tabla 7-11. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 2004.	79
Tabla 7-12. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 2010.	79
Tabla 7-13. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 2019.	79
Tabla 7-14. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos por rangos de precipitación acumulada.	81
Tabla 7-15. Parámetros según regionalización (Mayorga, 2003).....	82
Tabla 7-16. Definición de umbrales de lluvia evento y precipitación acumulada.	82
Tabla 8-1. Clasificación de subunidades geomorfológicas.	83
Tabla 8-2. Clasificación de pendiente.....	85
Tabla 8-3. Clasificación del flujo acumulado.....	86
Tabla 8-4. Clasificación mapa de curvatura.	87
Tabla 8-5. Clasificación mapa litológico.	88
Tabla 8-6. Clasificación mapa de la geología estructural.....	89
Tabla 8-7. Clasificación mapa del uso de suelo.....	90
Tabla 8-8. Clasificación mapa de drenaje.	91
Tabla 8-9. Clasificación mapa de áreas de drenaje lateral.	93
Tabla 8-10. Evaluación de los pesos finales para los factores condicionales mediante el método pesos de evidencia.	95

Índice de figuras

Figura. 3-1. Hietograma de diseño mediante método del bloque alterno.....	19
Figura. 3-2. Hidrograma unitario sintético SCS.	21
Figura. 3-3. Modelo simplificado de hidrograma triangular.	21
Figura. 3-4. Comportamientos de los tipos de reologías.....	26
Figura. 3-5. Clasificación de los movimientos de masas en pendientes pronunciadas en función de la fracción sólida y el tipo de material.	27
Figura. 3-6. Perfil de flujo.....	29
Figura. 3-7. Partes de un flujo (Bateman y otros, 2006).	30
Figura. 3-8. Uso de herramientas GIS para análisis estadístico bivariado.	35
Figura. 3-9. Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante	36
Figura. 3-10. Ejemplo de curva de éxito categorizada.	38
Figura. 3-11. Diagrama del algoritmo D8.	40
Figura. 3-12. Diagrama del algoritmo D8.	41
Figura. 5-1. Quebrada Estaquecá.....	45
Figura. 5-2. Localización quebrada Estaquecá.	46
Figura. 5-3. Quebrada Estaquecá.....	47
Figura. 5-4. Sección típica quebrada Estaquecá.	47
Figura. 5-5. Bloques de roca sobre la quebrada Estaquecá.	48
Figura. 5-6. Avalancha de la quebrada Estaquecá, Julio de 1997.....	49
Figura. 5-7. Avalancha de la quebrada Estaquecá, 2019.....	50
Figura. 5-8. Geología quebrada Estaquecá.....	51
Figura. 5-9. Geomorfología quebrada Estaquecá	54
Figura. 5-10. Coberturas de suelo quebrada Estaquecá.....	56
Figura. 5-11. Usos de suelo quebrada Estaquecá.....	57
Figura. 6-1. Análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas quebrada Estaquecá A). Año 1985. B). Año 1997. C). Año 2009. D). Año 2010. E). 2011. F). Año 2019.	60
Figura. 6-2. Inventario de deslizamientos quebrada Estaquecá.....	63
Figura. 7-1. Delimitación de subcuencas en la Cuenca de la quebrada Estaquecá.	64
Figura. 7-2. Modelación en HEC-RAS de la quebrada Estaquecá.	67
Figura. 7-3. Localización de la estación hidrometeorológica Monterredondo.	69
Figura. 7-4. Número de días estación hidrometeorológica Monterredondo.	70
Figura. 7-5. Precipitación mensual estación hidrometeorológica Monterredondo.	71
Figura. 7-6. Precipitación máxima en 24 horas estación hidrometeorológica Monterredondo.	72
Figura. 7-7. Curvas IDF estación Monterredondo.	73
Figura. 7-8. Hietogramas de diseño	74
Figura. 7-9. Modelo en HEC-HMS de la quebrada Estaquecá.	75
Figura. 7-10. Gráfica de lluvia antecedente para los eventos de flujo de detritos reportados.	77
Figura. 7-11. Probabilidad de ocurrencia según rangos de lluvia acumulada para los eventos de flujo de detritos reportados.	80

Figura. 7-12. Regionalización del territorio nacional con base en los umbrales de la lluvia acumulada.....	81
Figura. 8-1. Mapa de subunidades geomorfológicas	84
Figura. 8-2. Mapa de pendientes.....	85
Figura. 8-3. Mapa de la longitud de la pendiente	86
Figura. 8-4. Mapa de curvatura.....	87
Figura. 8-5. Mapa de litológico	88
Figura. 8-6. Mapa de la geología estructural	89
Figura. 8-7. Mapa del uso del suelo	91
Figura. 8-8. Mapa de drenaje.....	92
Figura. 8-9. Mapa de las áreas de drenaje lateral.....	93
Figura. 8-10. Curva de éxito.....	96
Figura. 8-11. Mapa de la susceptibilidad en la cuenca quebrada Estaquecá.	97
Figura. 9-1. Mapa de amenaza de flujo de detritos en la cuenca quebrada Estaquecá.....	99

1. Introducción

A lo largo del territorio colombiano se ha evidenciado la ocurrencia de eventos de avalancha de gran magnitud, provocando la pérdida de vidas humanas y pérdidas económicas, pues en Colombia durante el periodo de 1998 al 2020 se han presentado eventos relacionados con el flujo de avalanchas, los cuales ocasionaron 574 muertes, 167 desaparecidos y han afectado cerca de 419.987 familias, esto según el consolidado anual de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres en Colombia (UNGRD).

Entre los eventos con mayor impacto a lo largo de la historia colombiana se encuentra la tragedia de Armero el 13 de noviembre 1985, donde tras la erupción del volcán Nevado del Ruiz, se originó una fuerte avalancha dejando más de 21.000 víctimas mortales en el municipio de Armero, y la más reciente se tiene la avalancha ocurrida en la madrugada del 31 de marzo de 2017 en el municipio de Mocoa con cerca de 332 víctimas mortales y más de 77 desaparecidos.

Adicionalmente, cerca del 18% del territorio nacional se encuentra localizado en zonas de amenaza alta por movimientos en masa, principalmente se encuentran los departamentos de la región Andina, los cuales tiene un gran porcentaje de su área expuesta a este fenómeno; por ejemplo, para el caso de Cundinamarca su área expuesta es de alrededor del 65% (UNGRD, 2016), estas zonas de deslizamientos localizadas dentro de las cuencas con una alta pendiente, como es el caso de las cuencas del piedemonte llanero, se pueden convertir en flujo de detritos, pues el desprendimiento de bloques y rocas de gran diámetro, son fácilmente transportados por los flujos de alta viscosidad característicos de estas zonas, los cuales son generados como producto de la escorrentía y la alta pendiente de las cuencas.

Por todo lo anteriormente expuesto, se considera que el flujo de avalanchas es uno de los desastres naturales más importantes en nuestro país; sin embargo, este fenómeno no ha sido lo suficientemente estudiado y diagnosticado en algunas zonas, pues existen sitios con un alto grado de amenaza ante el flujo de detritos, donde no se tienen estudios previos para la valoración de la amenaza ante estos eventos, como es el caso de la quebrada Estaquecá, localizada en el piedemonte llanero sobre en el municipio de Quetame, la cual ha evidenciado en las últimas tres décadas una fuerte actividad de este fenómeno, afectado la infraestructura vial de la zona, más exactamente el puente del PR46+100 de la vía Bogotá- Villavicencio, donde se han generado daños en la infraestructura vial que provocan

cierres viales y por ende pérdidas económicas a nivel local y regional, ya que esta es una de las vías más importantes del país, pues comunica la parte oriental con la capital del país.

En el desarrollo de este documento se pretende determinar el nivel de susceptibilidad y de amenaza ante flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá de una manera cualitativa, como un aporte al conocimiento de la cuenca, la planificación territorial y la gestión del riesgo en la zona.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Determinar el nivel de amenaza por flujo de detritos mediante herramientas de modelación cualitativas en la cuenca de la quebrada Estaquecá.

2.1.1. Objetivos específicos

- Identificar las zonas de deslizamientos ocurridas dentro de la cuenca mediante el uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales, estudiando los eventos de avalancha ocurridos.
- Realizar una caracterización hidrológica de la zona de estudio, que permita analizar las precipitaciones ocurridas en los eventos de avalancha.
- Estimar las áreas susceptibles por movimientos en masa que dan inicio al flujo de detritos en la cuenca.
- Determinar la amenaza por flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá.

3. Marco de Referencia

Con el fin de dar soporte a esta investigación, se recopilaron los conceptos, enfoques y teorías fundamentales para el desarrollo del proyecto, exponiendo los diferentes autores que han investigado sobre el flujo de detritos y la determinación de la amenaza.

3.1. Marco Conceptual

3.1.1. Susceptibilidad

La susceptibilidad hace referencia a aquellas áreas que son más propicias a la ocurrencia de un peligro específico (Rauld et al., 2015). En el caso del análisis por flujo de detritos, esta es una medida que puede ser evaluada de forma cualitativa o cuantitativa, estimando la magnitud y distribución espacial de los movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden generarse en una zona determinada. Los estudios de susceptibilidad se basan en el análisis de factores intrínsecos o condicionantes, en estos se puede estimar la intensidad de los movimientos (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

3.1.2. Vulnerabilidad

Se refiere a la susceptibilidad o fragilidad tanto física, económica, social, ambiental o institucional que tiene un área de ser afectada tras la ocurrencia de un peligro específico; en otras palabras, es el grado de daño que puede sufrir una comunidad en el caso de un evento peligroso, como es el caso de presentarse algún evento natural (Ley 1523 de 2012).

3.1.3. Amenaza

Se entiende como amenaza al evento o condición peligrosa, ya sea de origen natural o origen antrópico, originado por la acción humana de manera accidental, el cual es capaz de ocasionar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

La evaluación de la amenaza involucra la delimitación de un lugar geográfico específico, donde se puede evaluar su impacto bajo un tiempo determinado, todo en relación con una población o sus recursos, como, por ejemplo: ríos de alta pendiente, volcán activo y fallas geológicas (Jojoa Chantre, 2003).

3.1.4. Riesgo

La Ley 1523 de 2012 define como riesgo a todos aquellos daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse ante un evento físico peligroso de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, evaluados para un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

El riesgo está relacionado con la probabilidad de que se sufran ciertos daños que dependen de la combinación del nivel de amenaza y de la susceptibilidad de los elementos expuestos; es decir, el riesgo está en función de ambos factores, siendo directamente proporcional a ambos (Jojoa Chantre, 2003).

3.2. Marco Teórico

3.2.1. Hidrología

3.2.1.1. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia.

Para el desarrollo de proyectos de diseño, es fundamental la determinación del evento de lluvia, es decir la selección de la tormenta de diseño la cual involucra una relación entre la intensidad de la lluvia, la duración del evento y la frecuencia o periodo de retorno en que esta ocurre (Chow et al., 1994), para esto se hace uso de las curvas intensidad – duración – frecuencia, IDF, los cuales son arreglos en donde se presentan la estimación de la intensidad de precipitación contra su duración y el periodo de retorno asociado (INVIAS, 2009).

Una de las metodologías más utilizadas en Colombia es el método de Vargas (1998), en la cual se establecen ecuaciones formuladas específicamente para Colombia que permiten estimar las curvas IDF a partir de información pluviométrica para las diferentes regiones del país (Vargas & Diaz, 1998). A continuación, se presenta la ecuación que involucra un mayor número de parámetros según la metodología de Vargas.

$$I = a \cdot \frac{Tr^b}{t^c} \cdot M^d \cdot ND^e \cdot PT^f \cdot ELEV^g$$

Dónde:

$I =$	Intensidad (mm/h)
$Tr =$	Período de retorno, (años)
$t =$	Duración de la precipitación, (horas)
$M =$	Promedio del valor máximo anual de precipitación diaria (mm), de la estación respectiva.
$ND =$	Promedio de número de días anuales con precipitación, de la estación respectiva.
$PT =$	Promedio de precipitación media anual (mm), de la estación respectiva.
$ELEV =$	Elevación de la estación meteorológica de medición (msnm).
$a, b, c, d, e, f, y g =$	Son coeficientes propios de la ecuación que varían según la ubicación regional de la estación y de la cantidad de variables disponibles. Para el caso se utilizaron los recomendados por el autor del método.

3.2.1.2. Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración es uno de los parámetros más importantes, pues este ayuda a predecir la respuesta de una cuenca ante un evento de lluvia dado, jugando un papel clave en la simulación de los modelos lluvia - escorrentía. Este parámetro se define como el tiempo necesario para que el agua fluya desde el punto más lejano en una cuenca hasta la salida de ésta (Salimi et al., 2017); es decir, es el tiempo desde que una gota al inicio de la precipitación y desde los límites más externos de la hoya se gasta hasta llegar a la salida de la cuenca (INVIAS, 2009).

Para la estimación de este parámetro se han desarrollado diversas ecuaciones empíricas, las cuales han sido formuladas bajo condiciones específicas de las cuencas de estudio, lo que hace que en muchas ocasiones se tengan resultados variables al ser implementadas; algunas de las variables utilizadas involucran la longitud de la cuenca, la longitud del cauce principal, la longitud del centro de gravedad, el ancho de la cuenca, el área, la pendiente longitudinal del cauce, la pendiente media de la cuenca, entre otros.

Tabla 3-1. Ecuaciones empíricas para el cálculo del tiempo de concentración T_c .

Autor	Fórmula T_c [min]
Kirpich	$T_c = 0.0663 \cdot (L^{0.77} / S^{0.385})$
Témez	$T_c = 0.30 \cdot [L/S^{0.25}]^{0.76}$
Williams	$T_c = 0.272 \cdot L \cdot A^{0.4} / (D \cdot S^{0.2})$
Bransby - Williams	$T_c = 0.605 \cdot L / (1005^{0.2} \cdot A^{0.1})$
Johnstone y Cross	$T_c = 3.258 \cdot L^{0.5} / S^{0.5}$
Giandioti	$T_c = (4 \cdot A^{0.5} + 1.50 \cdot L) / (25.3 \cdot (S \cdot L)^{0.5})$
SCS- Ranser	$T_c = 0.947 \cdot (L^3 / H)^{0.385}$

Autor	Fórmula T_c [min]
Ventura	$T_c = 4 \cdot A^{0.5} \cdot L^{0.5} / H^{0.5}$
Ven Te Chow	$T_c = 0.1602 \cdot L^{0.64} / S^{0.32}$
Cartas de velocidad promedio SCS	$T_c = 60^{-1} \cdot \Sigma(1000 \cdot L \cdot v^{-1})$
USACE	$T_c = 0.191 \cdot [L^{0.76} / S^{0.19}]$
SCS	$T_c = 0.057 \cdot (100 / CN - 9)^{0.7} \cdot L^{0.8} / S^{0.5}$
USDA	$T_c = \Sigma(L / 3600 \cdot v)$

3.2.1.3. *Hietograma de diseño*

Con los registros pluviógrafos se pueden obtener la cantidad de agua que ha caído desde que inicio el aguacero mediante una curva de masas de precipitación, que es una curva de lluvias acumuladas. Esta curva de masas es el insumo para calcular los hietogramas de precipitación fundamentales para el cálculo de caudales sobre una cuenca (Monsalve, 1995). Un hietograma es una gráfica de profundidad o intensidad de la lluvia que está en función del tiempo, y representa la distribución de la lluvia en intervalos de tiempo iguales durante un evento de precipitación (Chow et al., 1994).

Para su cálculo a continuación se presenta el método del bloque alterno, donde a partir de las funciones IDF generada se calcula la precipitación que cae en cada intervalo de tiempo, multiplicando la intensidad por la duración.

1. Definir la duración de un aguacero típico de la zona, con base en registros pluviográficos o en el testimonio de la población.
2. A partir de las curvas IDF se determina el valor de la intensidad para los diferentes intervalos de tiempo.
3. Se calcula el valor de la precipitación generada en cada intervalo de tiempo, multiplicando la intensidad por la duración.
4. Se calcula la diferencia entre la cantidad de precipitación caída en un intervalo y el anterior para determinar el diferencial de precipitación que cae en cada intervalo de tiempo.
5. Se supone que la mayor precipitación está ubicada en el centro de la distribución, por lo que se asigna al tiempo aproximadamente medio de la duración de la lluvia, la precipitación mayor.
6. Alternar los resultados de precipitación de derecha e izquierda de la precipitación central, en orden descendente para cada intervalo de tiempo, de tal manera que las menores precipitaciones se presenten al inicio y final del hietograma.

Con este procedimiento se obtienen los hietogramas, los cuales son también obtenidos para diferentes periodos de retorno.

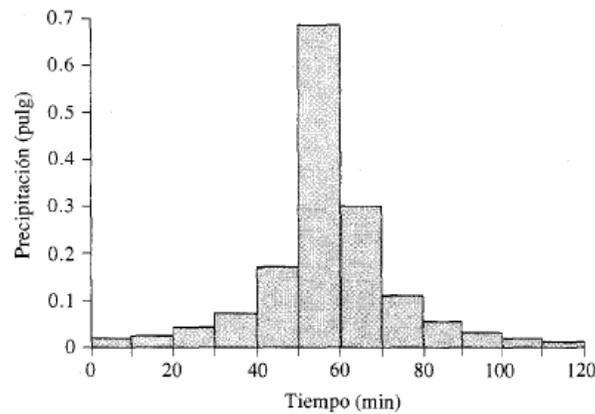


Figura. 3-1. Hietograma de diseño mediante método del bloque alterno.
Fuente: (Chow et al., 1994)

3.2.1.4. Estimación de caudales

Cuando no existe información de estaciones hidrométricas en las cuencas de estudio, se deben utilizar modelos lluvia-escorrentía para la determinación de los caudales de diseño, donde a partir de la información de precipitación de la zona, se pueden estimar estos caudales mediante diferentes métodos. A continuación, se presenta la descripción de dos de los métodos más utilizados.

3.2.1.4.1. Método racional.

Este método se basa en la idea de que, si una lluvia con intensidad i empieza de forma instantánea y continua en forma indefinida, la tasa de escorrentía continuara hasta que llegue al tiempo de concentración T_c , en este método se asume que toda la cuenca contribuye al flujo a la salida (Chow et al., 1994). El caudal se estima en función del área de la zona de influencia, la intensidad de precipitación y el coeficiente de escorrentía del suelo; mediante la fórmula:

$$Q = 0.278 * A * i * C$$

Donde:

- Q = Caudal (m³/s)
- A = Área (km²)
- i = Intensidad (mm/h)
- C = Coeficiente de escorrentía (Adimensional)

El coeficiente de escorrentía es la variable menos precisa de este método, la cual representa la porción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial, esta depende de las características y condiciones del suelo (cobertura vegetal, pendiente y tipo de suelo), además varía de acuerdo con la

magnitud de la lluvia, las condiciones de humedad antecedentes. Este coeficiente tiene valores entre 0 y 1, donde entre más grande sea este valor, mayor será la cantidad de agua precipitada que se convertirá en escorrentía superficial.

Tabla 3-2. Coeficiente de escorrentía.
Fuente: (Chow et al., 1994)

Característica de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
<i>Condición pobre</i> (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio</i> (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena</i> (cubierta de pasto mayor del 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Nota: Los valores de la tabla son los estándares utilizados en la ciudad de Austin, Texas. Utilizada con autorización.

3.2.1.4.2. Método del hidrograma Unitario del SCS.

El hidrograma adimensional de SCS es un hidrograma sintético en el cual se expresa el caudal como una relación entre dicho caudal (q) y el caudal pico (q_p) y el tiempo por la relación entre el tiempo (t) y el tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario (T_p). De esta manera, dados el caudal pico y el tiempo de retardo para la duración de exceso de precipitación, se puede estimar el hidrograma unitario puede estimarse a partir del hidrograma sintético adimensional (Figura. 3-2).

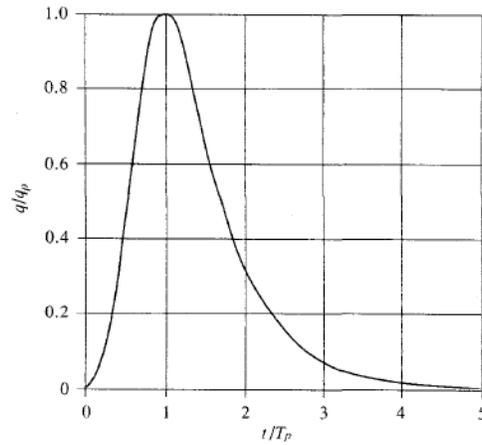


Figura. 3-2. Hidrograma unitario sintético SCS.
Fuente: (Chow et al., 1994)

Los valores de q_p y T_p , se estiman utilizando un modelo simplificado de un hidrograma triangular (Figura. 3-3), en donde el tiempo está dado en horas y el caudal en m^3/s .

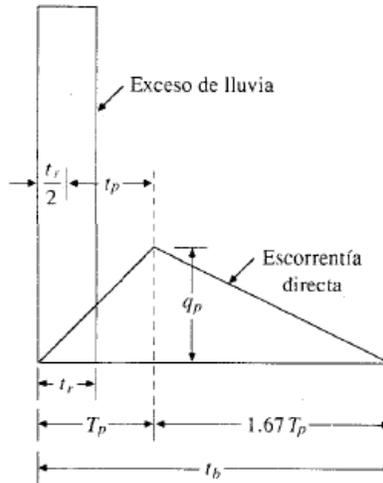


Figura. 3-3. Modelo simplificado de hidrograma triangular.
Fuente: (Chow et al., 1994)

El caudal pico es calculado con la siguiente ecuación:

$$q_p = \frac{CA}{T_p}$$

Donde:

q_p = Caudal pico ($m^3/s.m$)

C = Coeficiente de conversión de unidades igual 2.08 en el SI.

A = Área de la cuenca (km^2)

T_p = Tiempo de ocurrencia del pico (Adimensional)

El tiempo al pico del hidrograma puede expresarse en términos del tiempo de retardo y duración de la lluvia efectiva mediante la siguiente ecuación:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p$$

Donde:

T_p = Tiempo de ocurrencia del pico (Adimensional)

t_r = Duración de la precipitación efectiva (h)

t_p = Tiempo de retardo (h), el cual es $0.6 \times t_c$, siendo t_c = Tiempo de concentración de la cuenca (h).

3.2.2. Factores condicionantes y desencadenantes de flujo de detritos

Los factores condicionantes son propiedades intrínsecas a los materiales que inciden en los procesos de inestabilidad de los taludes, tales como la geología del sector, la geomorfología y características hidrogeológicas. En cuanto a los factores desencadenantes, éstos son capaces de modificar las fuerzas internas y externas sobre los suelos, afectando su condición de estabilidad, entre los factores que contribuyen a la activación del movimiento del suelo, se encuentran las condiciones climáticas, condiciones antrópicas, sismos, erupciones volcánicas, etc. A continuación, se describen algunos de los factores más relevantes.

3.2.2.1. Geología

Uno de los factores condicionantes para el desarrollo de flujo de detritos está íntimamente relacionada con la geología del sector, pues esta establece las características del suelo o roca, definiendo las propiedades físicas y de resistencia cuando existe la presencia de agua; por ejemplo, los materiales de origen residual tienen una alta probabilidad en el desarrollo de flujo de detritos, seguidos de los depósitos coluviales y de las laderas conformadas por estratos de ceniza (Osorio, 2006).

De igual manera la estructura geológica es altamente influyente, puesto que las fallas y discontinuidades afectan la estabilidad de los taludes haciéndolas más susceptibles al desarrollo de movimientos; por ejemplo, en suelos residuales y rocas, la estratificación y discontinuidades actúan

como conductores de corriente de agua subterránea que contribuyen al desarrollo de planos de debilidad (Suarez, 1998).

3.2.2.2. Geomorfología

El relieve es un factor condicionante, puesto que cuando existe cierta pendiente se incrementa la susceptibilidad a deslizamientos, además se ha comprobado que las regiones montañosas son las zonas más propensas a la ocurrencia de inestabilidades. La susceptibilidad está fuertemente relacionada a la geomorfología, pues sus diversos componentes son considerados parámetros esenciales en la dinámica de la superficie terrestre (Aristizábal & Yokota, 2006).

3.2.2.3. Sismos

Los sismos son a menudo una de las causas desencadenantes de deslizamientos, ya que estos producen cambios de deformaciones, fracturación o aumento de presión de poros, que provocan cambios en los esfuerzos del suelo, generando su disminución; estos pueden provocar falla por cortante y hasta licuación y generación de fuerzas de dinámicas sobre los taludes activando los deslizamientos de tierra (Suarez, 1998).

En comparación con los deslizamientos de tierra y avalanchas provocados por otros factores detonantes, las avalanchas y/o los deslizamientos de tierra provocados por sismos se caracterizan por movilizar materiales granulares mucho más gruesos, esto se debe a que los campos de tensión se desarrollan muy por debajo de la superficie, desencadenando avalanchas y deslizamientos de tierra profundamente asentados en el lecho rocoso (Wang et al., 2015).

Por ejemplo, en Colombia la avalancha de junio de 1994 ocurrida en el municipio de Páez, fue generada por un sismo de magnitud 6.4 grados, que ocasionó un deslizamiento en un área de 250 km², en suelos residuales con rocas, predominantemente de cuarcitas y esquistos.

3.2.2.4. Flujos piroclásticos

Las erupciones volcánicas también pueden desencadenar el desarrollo de un flujo de detritos, pues al ocurrir este fenómeno se genera un efecto vibratorio, ya que previamente a la erupción volcánica se producen sismos de pequeña magnitud con el ascenso del magma; adicionalmente, este fenómeno provoca cambios en la temperatura y la disposición de materiales sobre el talud contribuyendo a la generación de deslizamientos en las faldas del volcán, pues a causa del depósito de los materiales

piroclásticos se aumenta las pendientes de los taludes, es por lo que los deslizamientos pueden continuar por varios meses después de la erupción (Suarez, 1998).

3.2.2.5. *Deshielo de nevados*

Al ocurrir erupciones volcánicas sobre depósitos de nieve o glaciares por la alta temperatura de los materiales expulsados (flujos piroclásticos) se produce la fusión de nieve (Suarez, 1998). La erupción sobre glaciares puede generar lahares que son mezclas de agua con una alta concentración de sedimentos y escombros de rocas volcánicas que gracias a la influencia de la gravedad se desplazan pendiente abajo en los volcanes. los lahares se caracterizan por ser especialmente destructivos; ya que, el abundante líquido contenido en ellos les permite fluir fácilmente y alcanzar áreas alejadas de sus fuentes (Vallance & Iverson, 2015).

Uno de los desastres más grandes en Colombia fue la Erupción del Volcán Nevado del Ruiz, el cual derritió el hielo y la nieve en varias zonas que junto con el material piroclástico formaron lahares que fluyeron hasta 100 km aguas abajo por cuatro de los cinco cauces se conectan al volcán (los Molinos, Nereidas, los valles de Guali, Azufrado y Lagunillas). Se descargaron alrededor de $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ de agua en los tramos superiores; sin embargo, a lo largo de los cauces se transportó un aproximado de $9 \times 10^7 \text{ m}^3$ de lodo, es decir los volúmenes iniciales de lahares aumentaron hasta 4 veces con la distancia de la cumbre y las velocidades medias calculadas en el flujo máximo oscilaron hasta 17 m/s (Pierson et al., 1990).

3.2.2.6. *Climatológicas*

Una de los factores detonantes más estudiados en el flujo de detritos, son las condiciones climatológicas, puesto que la respuesta del suelo al exponerse a precipitaciones de gran magnitud durante días o horas, provocan la saturación del suelo que da lugar a la alteración de la presión de poros y por ende a la pérdida de resistencia de los materiales del tipo del suelo, además a esto se le suman los flujos subsuperficiales que se dan dentro de las formaciones generando planos de debilidad que terminan desencadenando deslizamientos en la zonas de los taludes.

3.2.2.7. *Uso del suelo*

Las condiciones antrópicas son factores que contribuyen a la formación de flujos de detritos, pues al generar cambios en los usos de suelos como por ejemplo actividades que impliquen la pérdida de cobertura vegetal, se afecta la protección contra la acción de la lluvia o corrientes de agua, lo cual

puede producir inicialmente una erosión laminar, que puede hasta llegar a convertirse en grandes surcos que debilitan el terreno; así mismo, todas aquellas actividades que generen cambios en los drenajes naturales o cambios de humedad del suelo; como por ejemplo, la irrigación de cultivos, afectan la estabilidad del suelo, pues se facilita la infiltración, que es la genera cambios en la presión de poros, que como se trató en el numeral anterior, se afecta directamente la resistencia del suelo.

Otra de las grandes actividades que está fuertemente relacionada con el desencadenamiento de este tipo de flujos, es la deforestación, esto debido que se producen cambios hidrológicos a nivel local, se disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial, se elimina el factor de refuerzo de las raíces y se facilita la infiltración masiva de agua, pues la vegetación retarda la escorrentía regulando los picos de caudal de las corrientes (Suarez, 1998).

En general, el cambio de la estructura y condiciones de la capa superficial de suelo por prácticas de agricultura, pastoreo, deforestación, o todas aquellas actividades en las cuales se generen fuerzas dinámicas como el tránsito de vehículos, vibraciones de maquinaria, detonaciones de explosivos, etc, conducen a un deterioro de la estructura de los materiales y hacen que el suelo sea más susceptible a deslizamientos.

3.2.1. Reologías y Mecánica de Movimiento

La reología se encarga de estudiar las deformaciones de los materiales sometidos bajo un esfuerzo, la relación entre las tensiones desviadoras y el tensor velocidad de deformación, determina el comportamiento del fluido. A esta relación se le llama modelo constitutivo o modelo reológico; es decir que, los modelos reológicos son a menudo expresados como una relación entre esfuerzo y deformación, cuando la relación esfuerzo y deformación es lineal el fluido es denominado un fluido Newtoniano, y cuando esta no es lineal es denominado un fluido No Newtoniano (Moreno, 2014).

Por ejemplo, el agua fluye bajo cualquier esfuerzo cortante aplicado y su viscosidad es constante a una temperatura constante, estas propiedades hacen del agua sea un fluido Newtoniano. Ahora si este comportamiento no es lineal los fluidos son No newtonianos. Si un fluido tiene una viscosidad que disminuye cuando se incrementa el esfuerzo al que está sometida es determinado como un fluido pseudoplástico, pero si sucede lo contrario, su viscosidad incrementa con la tasa de esfuerzo, este es denominado como un fluido dilatante, estos comportamientos se encuentran representados en la Figura. 3-4 (Pierson & Costa, 1987).

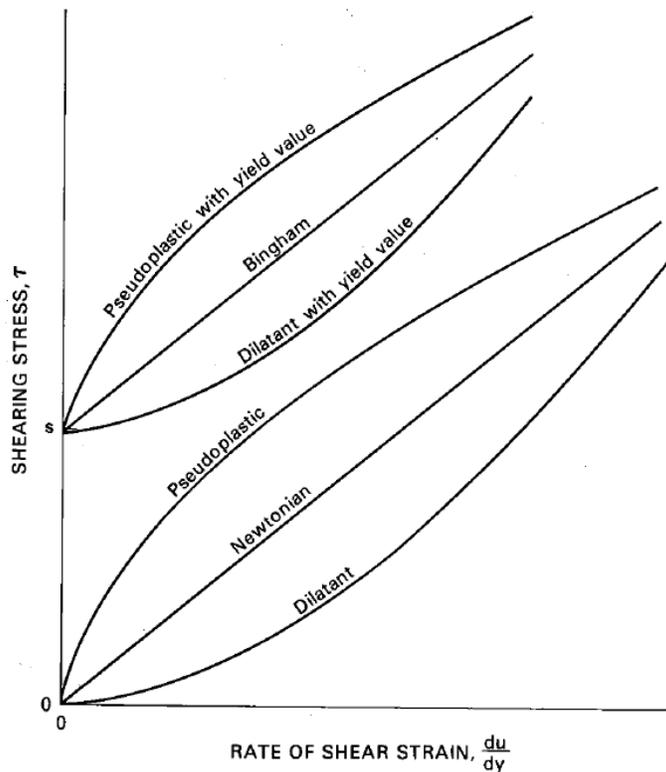


Figura. 3-4. Comportamientos de los tipos de reologías.
Fuente: (Pierson & Costa, 1987)

También existen otros fluidos que requieren de un esfuerzo cortante mínimo para poder fluir, si el esfuerzo cortante es proporcional a la tasa de deformación, este tipo de material es llamado un fluido plástico o fluido tipo Bingham, donde dentro de estos también se encuentran los fluidos pseudoplásticos y los fluidos dilatantes, como se presentan en la Figura. 3-4.

3.2.2. Tipos de flujo

Existen varios tipos de flujo o movimientos de masa que generalmente ocurren en zonas montañosas típicas de altas pendientes, los cuales se encuentran relacionados con la cantidad de agua y sedimentos que los componen, siendo llamados como deslizamientos de tierras, flujos de lodos, flujo detritos, flujos hiperconectados, flujos granulares, avalanchas entre otros. Esto hace que sea difícil distinguir entre un fenómeno y otro; es por lo que a continuación, se presenta una clasificación de los distintos de flujos, la cual ha sido basada en la concentración de sedimentos, y tipo de material (Figura. 3-5).

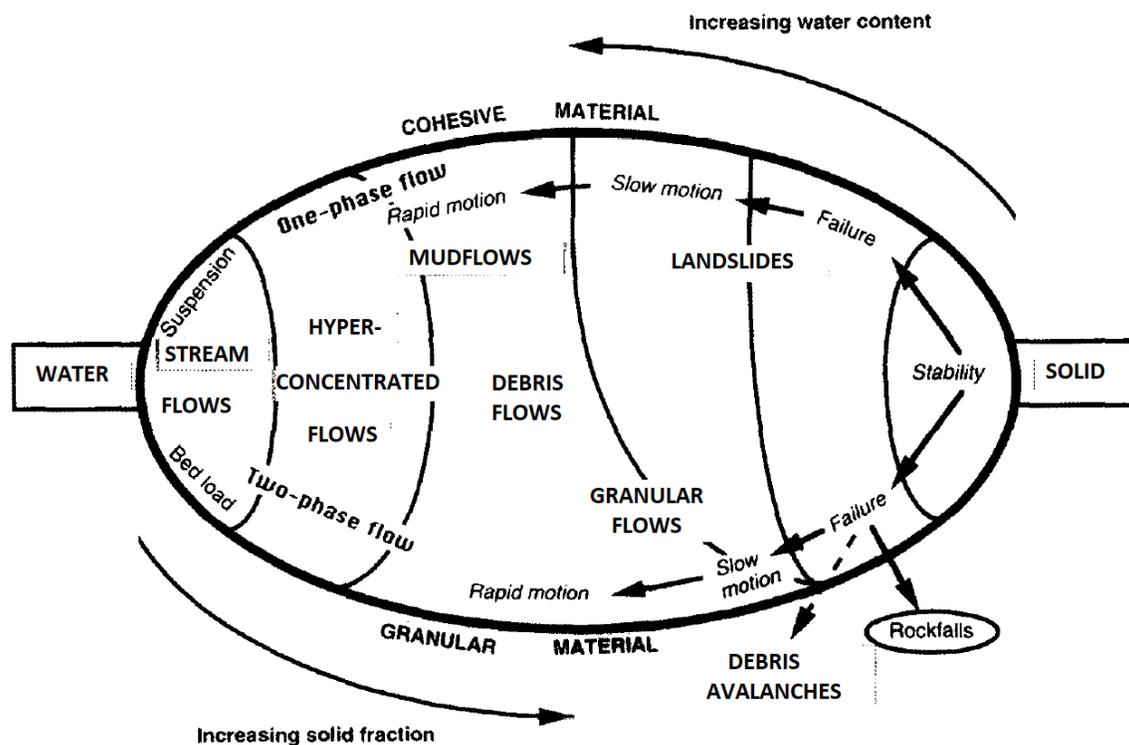


Figura. 3-5. Clasificación de los movimientos de masas en pendientes pronunciadas en función de la fracción sólida y el tipo de material.

Fuente: (Coussot & Meunier, 1996)

3.2.2.1. Deslizamientos

Son movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, que generalmente se dan por procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas, estos movimientos ocurren a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos (Suarez, 1998).

En los deslizamientos se puede tener una fase activa larga, durante la cual se pueden registrar los movimientos lentos del suelo (menos de unos centímetros por día), pero también es posible un movimiento rápido repentino debido a grandes fracturas o deslizamientos durante los cuales los deslizamientos de tierra pueden alcanzar una velocidad comparable a la de los flujos de escombros (Coussot & Meunier, 1996).

3.2.2.2. Flujo de lodos

Es un tipo de flujo donde la concentración de sedimentos de partículas finas es alta, en este flujo predominan materiales tipo limos y arcillas, lo que hace que el flujo tenga un comportamiento plástico, pues estos materiales junto con la dispersión del agua aumentan el límite elástico. A medida

que la concentración de sólidos aumenta en estos flujos, los sedimentos se flocculan rápidamente y la viscosidad aumenta formándose cohesión entre la mezcla suelo-agua (Suaréz, 1998).

Esta mezcla saturada presenta un límite líquido superior a 1. Si bien las partículas finas predominan en este tipo de flujo, dependiendo de la resistencia al corte de la mezcla y los mecanismos dinámicos de soporte de las partículas, se pueden suspender partículas del tamaño de grandes rocas, es decir también este es capaz de transportar grandes bloques o cantos de roca. El modelo Bingham a menudo se elige predecir el comportamiento de este tipo de flujo (Pierson & Costa, 1987).

3.2.2.3. *Flujo hiperconcentrados granular*

Es una mezcla entre agua y sedimento, un tipo de flujo con concentraciones de sedimento entre el 40 al 80 porcentaje por peso (20 al 60 porcentaje por volumen), el cual posee un límite elástico medible, pero aún puede fluir como un líquido (Pierson & Costa, 1987). La corriente hiperconcentrada puede parecer similar a la corriente flujos de lodos, pero posee una diferencia notable y es que la mezcla no tiene cohesión, pues su granulometría es mucho más gruesa, transportando materiales como gravas, cantos y bloques, además de grandes cantidades de arena en suspensión. Una característica de los de los flujos hiperconcentrados es que en los depósitos hay muy poca clasificación de los materiales y los cambios texturales no son abruptos (Suaréz, 1998).

Son flujos bifásicos, donde la fracción sólida más gruesa de estos tipos de flujo generalmente se deposita primero, mientras que los finos fluyen en suspensión como carga de lavado, antes de ser depositada en pendientes más suaves o en zonas de estancamiento locales. Las velocidades del flujo pueden estar entre 0,5 y 10 m/s (Coussot & Meunier, 1996).

3.2.2.4. *Flujo de detritos o escombros*

El flujo de detritos es un flujo de sedimento y una mezcla de agua como si fuera un fluido continuo impulsado por la gravedad (Takahashi, 2007). Esta es una masa móvil bajo una condición saturada, es decir que se encuentra compuesta de una mezcla de rocas, sedimentos, agua y gases, donde cerca del 50 al 80% de su composición es material sólido que se encuentra suspendido en agua (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2017).

Este tipo de flujos se da por el desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua; que generalmente, se forman en las laderas de una montaña y están asociados a fenómenos regionales dentro de una cuenca de drenaje, arrastrando gran cantidad de material rocoso

y vegetación, que movilizan grandes volúmenes de material, los cuales alcanzan altas velocidades con un gran poder destructivo, generando amenaza moderada a alta en las zonas donde estos se desarrollan (Suarez, 1998).

Los depósitos de este tipo de flujo contienen una gran variedad en el tamaño del material transportado, desde arcillas hasta cantos rodados, este tipo de flujo se caracteriza por ser monofásicos, si bien su perfil de flujo se divide en tres partes, donde se observa un frente que es la parte donde se concentran los materiales más gruesos y se alcanzan las máximas profundidades, el cuerpo que es en donde se desarrolla el flujo y la cola que es la parte donde la concentración de sedimentos disminuye (Figura. 3-6), todos estas se comportan como una fase homogénea. Son flujos con un comportamiento mecánicamente como fluidos no Newtonianos, es decir que su relación entre el esfuerzo y la tasa de deformación no es lineal, tendiendo hacia el comportamiento de un fluido plástico – viscoso (Coussot & Meunier, 1996).

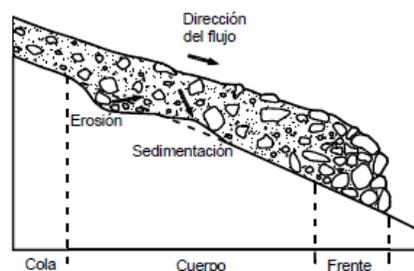


Figura. 3-6. Perfil de flujo.
Fuente: (Suarez, 1998).

El típico flujo de detritos presenta las zonas de incitación, propagación y deposición, tal como se describe en la Figura. 3-7.

3.2.2.4.1. Iniciación

Es la zona donde se da la formación del flujo, el cual puede darse por los mecanismos condicionantes y detonantes presentados en secciones anteriores; como por ejemplo lo pueden ser los eventos anómalos de precipitaciones de alta intensidad, sismos, deshielos etc. lo que provoca procesos de deslizamientos o erosión produciendo una alta concentración de sedimentos en los taludes o cauces, que con la integración del agua desenvuelve el flujo de detritos.

3.2.2.4.2. Propagación

Es la zona donde se desarrolla el flujo, en esta la velocidad y el caudal aumentan debido a la incorporación de nuevos y mayores sedimentos que por la fuerza que este representa, facilita el transporte de estos materiales.

3.2.2.4.3. Depositación

En esta zona se da la acumulación del material, donde generalmente es un área de menor pendiente en el cual el flujo pierde velocidad, también esta zona puede tener como característica el aumento en el ancho de la sección del cauce o la presencia de obstáculos que oponen una resistencia al flujo, lo que hace que se disminuya su velocidad, al disminuir las velocidades se genera la sedimentación o depositación del material, formando abanicos o barras de grandes bloques, donde primero se depositan las partículas de mayor tamaño, mientras las partículas finas tratan de recorrer una distancia mayor antes de producirse la sedimentación (Páez, 2016).

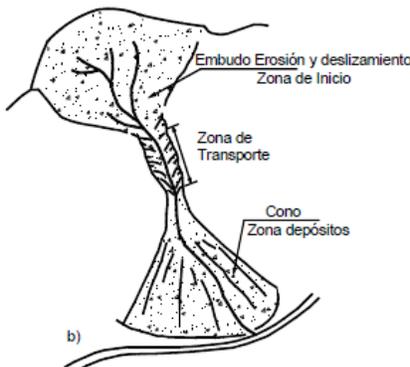


Figura. 3-7. Partes de un flujo (Bateman y otros, 2006).
Fuente: (Suarez, 1998).

3.2.3. Lluvia detonante

Como se explicó en apartados anteriores, la lluvia es uno de los factores desencadenantes de deslizamientos y de flujo de detritos; es por esto, que se desarrollan estudios con el fin de definir umbrales de precipitación, para emitir advertencias de peligro en las cuencas y zonas donde se tiene un alto nivel de amenaza. Para definir estos umbrales de precipitación, en el mundo se han desarrollado diferentes ecuaciones empíricas, las cuales se han centrado en la relación de intensidad – duración, pero también existen ecuaciones donde su variable principal es la precipitación

acumulada, estas últimas son más utilizadas cuando la información pluviométrica no dispone de escala horaria como para utilizar el parámetro de intensidad- duración (Ramos et al., 2015).

3.2.3.1. Lluvia detonante relación Intensidad - Duración

Durante la revisión de las ecuaciones que involucran la relación intensidad - duración, se analizaron las ecuaciones propuestas por Guzzetti et al. (2007), quienes definieron ecuaciones donde se relaciona la intensidad con la duración de la lluvia para diferentes lugares del mundo, las cuales pueden ser utilizadas dependiendo el tipo de extensión (global, regional y local), diferentes tipos de deslizamientos (flujo de detritos, lahar y deslizamientos) y diferentes rangos de duración del evento, siendo expresadas de la siguiente forma:

$$I = c + \alpha D^{\beta}$$

Donde:

I= Intensidad (mm/h)

D= Duración del evento (h)

C, α , β = Parámetros (Adim).

3.2.3.2. Lluvia detonante precipitación acumulada

Así mismo, se analizó la metodología propuesta por Mayorga (2003), quien establece los umbrales de lluvia detonante para Colombia, con una regionalización del territorio nacional con base en la lluvia acumulada, realizando una agrupación mediante métodos estadísticos definiendo cuatro grupos, los cuales muestran una correspondencia entre los umbrales de la lluvia acumulada y la susceptibilidad del terreno.

Esta metodología se basa, inicialmente, en la construcción de un modelo de probabilidad de ocurrencia para los deslizamientos acontecidos en Colombia. Para ello se utiliza un modelo de regresión logística, el cual permite obtener una combinación lineal de las variables que están asociadas al evento (precipitación acumulada y precipitación del día del evento) y permiten calcular las probabilidades de que se presente o no un deslizamiento, mediante la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p)}}$$

La anterior ecuación se transforma según lo expresado por Mayorga (2003) en:

$$P(\text{deslizamiento} \mid X_1, X_2) = \frac{1}{1 + e^{-(z)}}$$

$$Z = -19.2837 + 0.1546D + 0.0336LL_EV_D + 16.0931R_LL_D + 0.00152ALT$$

Donde:

D= Duración en días

LL_EV_D= Lluvia evento diaria

R_LL_D= Relación entre la lluvia acumulada diaria y lluvia anual

ALT= Altitud

Para estimar la lluvia detonante empleando esta metodología debe seguirse los pasos que se relaciona a continuación (Sepúlveda & Patiño, 2016):

- Identificar las estaciones pluviométricas de la zona de estudio de la cuenca y obtener los registros de precipitación diaria antecedente a uno o varios eventos históricos de flujo de detritos (hasta los 3 a 6 meses anteriores del día del evento).
- Realizar la gráfica de la lluvia acumulada para cada evento, donde el eje de abscisas corresponda a la duración en días y el eje de ordenadas corresponda a la precipitación acumulada en mm. Se toma como inicio el día en que ocurrió el evento de flujo de detritos; la curva debe realizarse de forma regresiva hasta obtener periodo seco, donde la precipitación sea cero, punto que determina la precipitación acumulada.
- Se emplea el modelo de regresión logística detallado anteriormente para establecer la relación entre la lluvia acumulada y la lluvia evento y definir el umbral de lluvia detonante.

En Colombia, la lluvia que contribuye en la generación de movimientos en masa es la lluvia acumulada y su probabilidad a desarrollar deslizamientos es alta a moderada cuando esta se encuentra alrededor del 30% de la lluvia media anual (Mayorga, 2003); es decir, que el umbral de precipitación crítico será el que tenga un mayor valor de probabilidad de ocurrencia al mencionado.

3.2.4. Metodologías de análisis de susceptibilidad

El análisis de susceptibilidad busca determinar aquellas áreas que son más propicias a movimientos en masa; es decir, todas aquellas zonas que son potencialmente susceptibles de ser el inicio de flujos de detritos. Estas zonas son delimitadas cartográficamente en un mapa, definiendo en éste el grado

de susceptibilidad mediante un color. Existen diferentes métodos y técnicas para mapear las zonas con potencial de deslizamientos como las que se detallan a continuación:

Tabla 3-3. Metodologías de análisis de susceptibilidad
Fuente: (Soeters & van Westen, 1996) Modificado

Tipo de Análisis	Técnica	Característica
Inventario	Análisis distribución del deslizamiento.	Análisis de la distribución y clasificación de deslizamientos.
	Análisis actividad del deslizamiento.	Análisis temporal de los cambios de los patrones del deslizamiento.
	Análisis de la densidad del deslizamiento.	Cálculo de la densidad del deslizamiento en unidades del terreno.
Heurístico	Análisis geomorfológico.	Usar la opinión de expertos en el campo para la zonificación.
	Combinación cualitativa de mapas.	Usar el criterio de los expertos para los valores de peso en los parámetros de los mapas.
Estadístico	Análisis estadístico bivariado.	Cálculo de la importancia de la combinación de los factores de contribución.
	Análisis estadístico multivariado.	Cálculo de la fórmula de predicción a partir de la matriz de datos.
Determinístico	Análisis del factor de seguridad.	Aplicación de la hidrología y modelos de estabilidad de taludes.

3.2.4.1. Inventarios

Es la forma más directa para realizar una zonificación de la susceptibilidad de deslizamientos, pues en los inventarios se realiza la distribución espacial de los movimientos en masa, plasmándolos en un mapa, ya sea como áreas afectadas o puntos, en estos también se determina tipo de movimiento que genera las instabilidades. En general los inventarios se basan en la fotointerpretación aérea, levantamientos topográficos y una base de datos de ocurrencia de deslizamientos. Se puede decir que es una herramienta de gran poder predictivo para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos (Soeters & van Westen, 1996).

3.2.4.2. Análisis heurístico

Los métodos heurísticos se basan principalmente en la opinión y criterios de expertos para clasificar la susceptibilidad, en estos se combinan el mapeo de movimientos en masa y su configuración geomorfológica como el principal factor de entrada para su determinación. Entre los métodos heurísticos se pueden distinguir dos tipos, el análisis geomórfico y combinación de mapas cualitativos (Soeters & van Westen, 1996).

En el análisis geomorfológico, la susceptibilidad se determina directamente en campo por el geomorfólogo, este proceso se basa en la experiencia individual y el criterio del profesional. En cuanto al método de la combinación cualitativa de mapas, en este se utiliza el conocimiento del experto para asignar los valores de ponderación de los mapas de parámetros utilizados; es decir, el método tiene alto grado de subjetividad por depender del criterio de expertos (Soeters & van Westen, 1996).

3.2.4.3. *Análisis estadístico*

Los métodos estadísticos establecen relaciones funcionales entre factores de inestabilidad y la distribución pasada y presente de los movimientos en masa (Aristizábal et al., 2019). La base de este tipo de evaluaciones es el inventario de movimientos en masa; por lo que, debe ser el primer insumo. Este método en comparación con los métodos heurísticos, evita la subjetividad de elegir los pesos de los factores, ya que no se utiliza el criterio de los expertos para escoger los pesos, pues la relación entre el factor condicionante y los movimientos en masa se evalúa con bases estadísticas. Estos métodos estadísticos se desglosan en dos, los métodos estadísticos bivariados y métodos estadísticos multivariados.

Los métodos estadísticos bivariados se fundamentan cruzado los mapas de cada parámetro y el mapa de movimientos. Estas relaciones generalmente corresponden a funciones de densidad de movimientos en masa que pueden ser establecidas para cada parámetro individual (Figura. 3-8). La mayoría de estos métodos se basan en la relación entre la densidad de deslizamientos por clase de parámetro en comparación con la densidad de deslizamientos en toda el área (Soeters & van Westen, 1996). Entre estos métodos se encuentran el método de pesos de evidencia, método de Superposición Ponderada, enfoque de relación de frecuencias y método del valor de la información (IVM).

En cuanto al método multivariado se basa en las relaciones combinadas entre los parámetros y la distribución de los movimientos en masa, determinando el peso que corresponde a la participación de cada uno de ellos (García Rodríguez, 2008). Entre estos métodos se encuentran el análisis discriminante, regresión logística, y el análisis condicional.

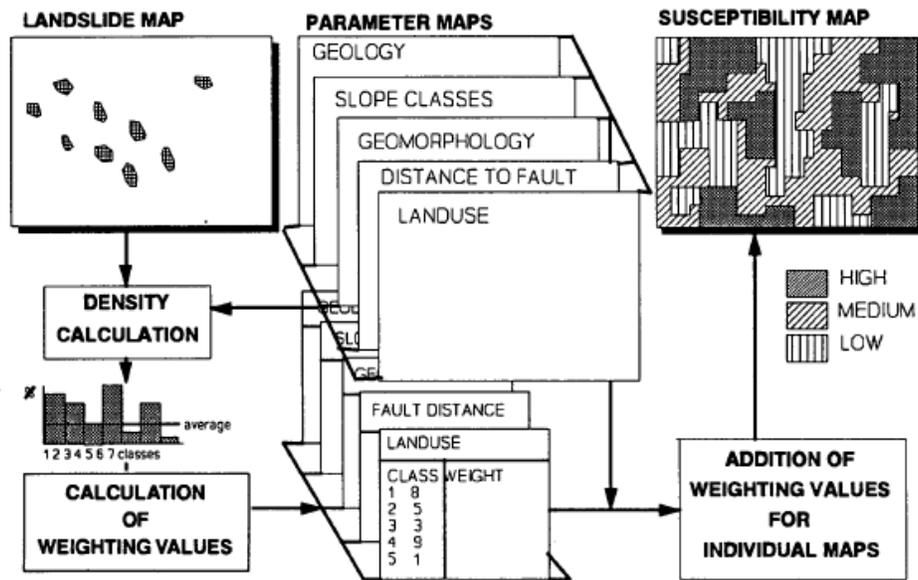


Figura. 3-8. Uso de herramientas GIS para análisis estadístico bivariado.
Fuente: (Soeters & van Westen, 1996)

3.2.4.3.1. Análisis bivariado - Pesos de evidencia

Este es el método recomendado para el análisis por movimientos en masa tipo deslizamiento por el Servicio Geológico Colombiano en su Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa. El método de Pesos de evidencia denominado WofE está basado en la teoría de la probabilidad bayesiana, en este se evalúan los patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante pesos. El peso de cada factor se calcula aplicando a la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa (SGC, 2017)

Definición de pesos

La probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento L que ha sucedido en un área p veces se da mediante la siguiente expresión; donde q el área total.

$$p(L) = \frac{n(L)}{q} = \frac{p}{q}$$

Si se plantea el en términos de pixeles (van Westen, 1993).

$$p = \frac{N_{pix1}}{N}$$

Donde q esta estaría compuesta por un número total de pixeles (N) que se cumplen las relaciones presentadas en la Figura. 3-9.

$$N = Npix1 + Npix2 + Npix3 + Npix4$$

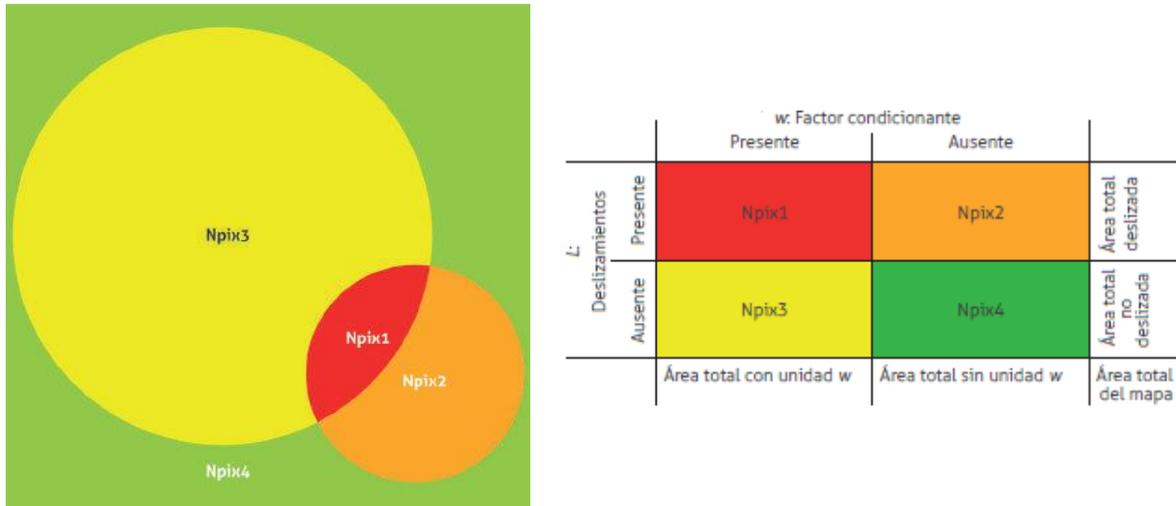


Figura. 3-9. Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante
Fuente: (SGC, 2017)

Los pesos asignados a cada clase del factor evaluado pueden ser pesos positivos (W^+) y negativos (W^-). Los pesos positivos (W^+) indican la presencia de la clase como parámetro que favorece los movimientos en masa y su magnitud indica su correlación. El peso negativo (W^-) indica la ausencia de la clase. En caso de ser cero, indica que la clase analizada no es de interés para el fenómeno por movimiento en masa (Aristizábal et al., 2019).

- **Peso positivo**

Donde el peso positivo indica la importancia de la presencia del factor en el deslizamiento de la siguiente forma:

$$W^+ = \ln \frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}}$$

Positivo: indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación directa o el grado de contribución.

Negativo: indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación inversa.

Cero: indica que el factor no es relevante.

- **Peso negativo**

Donde el peso negativo indica la importancia de la ausencia del factor en el deslizamiento de la siguiente forma:

$$W^- = \ln \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}}$$

Positivo: indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento.

Negativo: indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento.

Cero: indica que el factor no es relevante.

- **Peso final**

Para cada parámetro, se estima el peso de contraste o peso final (W_f) el cual da una medida de correlación entre el factor condicionante y los movimientos en masa.

$$W_f = W^+ - W^-$$

Positivo: indica que existe una asociación positiva.

Negativo: indica que existe una asociación negativa a la distribución de los movimientos en masa.

Cero: indica que la clase no afecta.

Índice de Susceptibilidad

El índice de susceptibilidad es la función final de la susceptibilidad, corresponde a la sumatoria de la ponderación de los pesos finales calculados para la clase a la que pertenece cada pixel de cada uno de los factores evaluados.

$$LSI = W_f Pendiente + W_f Curvatura + W_f UGS + \dots + W_f Uso del Suelo$$

El objetivo es encontrar una combinación de factores que en la función final de susceptibilidad tengan los pesos con más significancia, tratando de explicar cuáles son o serán las causas de ocurrencia de un movimiento en masa.

Curva de éxito

Para la validación de los resultados obtenidos se construye generalmente la curva de éxito, la cual mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados. El área bajo la curva establece la calidad de ajuste de los datos, un porcentaje aceptable de ajuste debe ser mayor a 70%. Así mismo, esta permite categorizar los valores de susceptibilidad, convirtiendo un mapa de celdas con valores continuos, en un mapa tipo semáforo con las categorías de susceptibilidad amenaza alta, media y baja (Aristizábal et al., 2019).

Para su construcción se deben ordenar los valores de los índices de susceptibilidad en orden descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías. Se grafica trazando en las abscisas los percentiles del LSI de menor a mayor cada 1%, siendo el 1% el percentil susceptible y 100 % el percentil no susceptible; en las ordenadas se ubican los valores porcentuales cada 1% de los movimientos en masa correspondientes con el percentil del LSI (SGC, 2017).

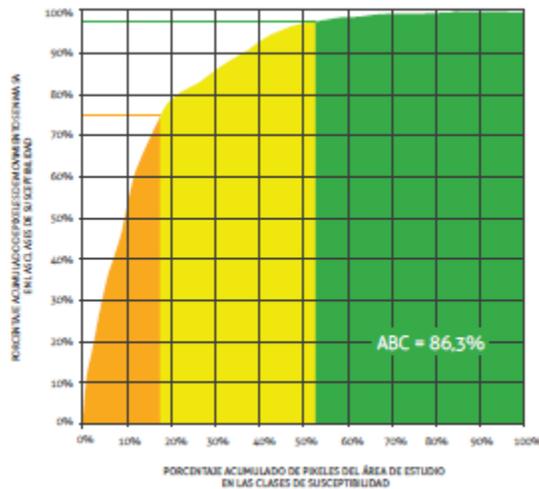


Figura. 3-10. Ejemplo de curva de éxito categorizada.
Fuente: (SGC, 2017)

3.2.4.4. Análisis determinístico

Estos métodos se basan en expresiones matemáticas que correlacionan los factores detonantes con los deslizamientos, el grado de susceptibilidad que permite definir esas áreas propensas a roturas se determina por medio de un factor de seguridad, estos métodos utilizan modelos de análisis de estabilidad de taludes que requieren información específica como parámetros geotécnicos, las propiedades de resistencia de los materiales.

El SHALSTAB es uno de los modelos más simples de este tipo de métodos, el modelo se basa en la teoría de talud infinito y la ley de Mohr-Coulomb en la que el competente pendiente abajo del peso del suelo justo en el momento de la falla es igual a la fuerza de resistencia causada por la cohesión C , y por la resistencia friccional debida a la tensión normal efectiva en el plano de rotura (Dietrich & Montgomery, 1998).

Otro de los métodos es el InfiniteSlope, el cual es un modelo cuantitativo se basa en el mecanismo de falla de Mohr-Coulomb con un flujo lateral en estado estable, el cual es válido para material de suelo granular y para condiciones iniciales de suelo seco (GITS-UPC, 2013).

3.2.5. Metodologías de análisis de amenaza

La simulación del flujo de detritos es importante en la gestión del riesgo en las zonas características de presentar este tipo de eventos; es por esto por lo que, en las últimas décadas y a lo largo del mundo se han realizado estudios e investigaciones definiendo metodologías para la determinación de la amenaza por flujo de detritos en zonas y cuencas específicas, pues la modelación de este tipo de flujo puede realizarse mediante diferentes métodos, donde proponen variedad de procesos, modelos numéricos, y softwares especializados en la simulación del comportamiento de este tipo de flujo.

El modelo que ha sido más ampliamente utilizado es el software FLO-2D disponible comercialmente, este es un modelo bidimensional de diferencias finitas que simula inundaciones de agua clara, flujo de lodos y flujo de detritos en abanicos aluviales y llanuras de inundación urbanas. Este modelo fue implementado en el caso de estudio Rudd Creek en 1983, donde la simulación de los flujos de lodo con el FLO-2D, arrojó resultados muy aproximados a los observados en cuanto el área de inundación observada, la profundidad máxima de flujo, profundidades de flujo de onda frontal, velocidades y depósitos finales basados en cese del flujo de lodo (O'Brien et al., 1993).

Entre otros modelos de simulación para la propagación del flujo de detritos se tiene el DebrisDice que es un método estocástico de propagación de la onda producida en el flujo de detritos, el cual se basa en la morfología del terreno. Este método arroja resultados cualitativos en términos de áreas afectadas y velocidad del flujo, donde sus resultados son muy aproximados a los obtenidos mediante métodos más complejos, esto si el modelo es correctamente calibrado (Bregoli et al., 2018).

3.2.5.1. Modelo DebrisDice

El modelo estocástico consiste en un algoritmo de enrutamiento del flujo de las celdas de susceptibilidad definidas, simula una gran serie de caminos aleatorios (Montecarlo) a través de las rutas identificadas por el algoritmo D8, para luego generar las trayectorias finales del flujo mediante su probabilidad. Generalmente el camino más empinado es el que tiene la mayor probabilidad.

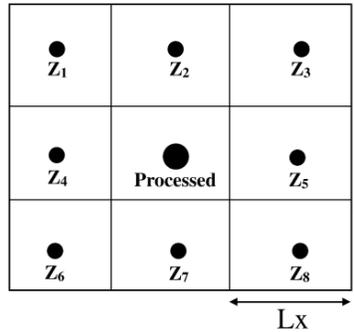


Figura. 3-11. Diagrama del algoritmo D8.
Fuente: (Zhou et al., 2003)

La probabilidad para cada celda se calcula usando la siguiente ecuación

$$P_{xy} = \frac{n_{afect}}{n_{iter}}$$

Donde:

n_{afect} = Número de trayectorias de flujo de detritos que invadieron una celda

n_{iter} = Número de iteraciones

Luego de definida la trayectoria del flujo, se debe establecer hasta qué punto se propaga el flujo, para esto se utilizan dos mecanismos de parada. El primer mecanismo de parada del flujo se evalúa mediante la relación entre el ángulo de alcance y el volumen total del flujo (Corominas, 1996):

$$\tan \beta = \frac{H}{L_{max}} = 0.97V^{-0.105}$$

Donde:

β = Ángulo de alcance

H = Gradiente entre el centro de masa del deslizamiento y el abanico (m)

Lmax = Distancia recorrida (m)

V = Volumen de la cantidad total de sedimentos movilizados (m³)

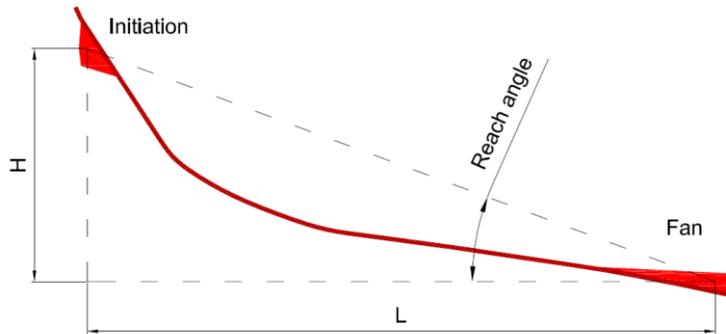


Figura. 3-12. Diagrama del algoritmo D8.
Fuente: (GITS-UPC, 2012)

El segundo mecanismo de parada está relacionado con la conservación de la energía, para este se calcula la velocidad de flujo aplicando la reología de Voellmy para flujo de detritos granulares (1955).

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

Donde:

V= Velocidad de la mezcla

S = Línea de trayectoria del flujo

μ_m = Coeficiente de fricción por deslizamiento

k = Coeficiente de turbulencia

4. Metodología

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos a continuación se enumeran cada una de las etapas y actividades a desarrollar, las cuales han sido ajustadas de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada.

4.1. Recopilación y análisis de información

En esta etapa se recolecta toda la información secundaria de la zona, que contribuye a la caracterización del área de estudio y a la determinación y/o estimación de parámetros de entrada para los modelos y métodos a desarrollar. La información fue recopilada de entidades públicas y privadas. A continuación, se enlistan la información más relevante compilada y analizada:

- Cartografía a escala 1:25.000 - Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
- Cartografía geológica a escala 1:100.000 Plancha 247 - Cáqueza - Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS)
- Mapa de Geomorfología con escala 1:100.000 - Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca hidrográfica Rio Guayuriba.
- Mapa uso de suelo - Esquema de Ordenamiento territorial del municipio Quetame
- Mapas de Cobertura de la Tierra Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100,000 - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2014)
- Fotografías aéreas y satelitales- Instituto Geográfico Agustín Codazzi y plataforma de PlanetScope.
- Modelo digital de terreno ALOS PALSAR con resolución espacial de 12.5 x 12,5.
- Información hidrometeorológica de la estación Monterredondo operada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)
- Estudios previos del área de estudio

4.2. Inventario de deslizamientos e identificación de sitios críticos

Se propone realizar un inventario de deslizamientos e identificación de sitios críticos y/o vulnerables dentro de la cuenca, mediante el uso de imágenes satelitales y fotografías aéreas. Después de una cuidadosa selección y análisis de las fotografías aéreas, se digitalizan sobre los mapas topográficos las áreas de deslizamientos activos o inactivos que se detectan en el área estudiada. Teniendo como producto final un inventario de deslizamientos, definidos por polígonos de origen y clasificándolos con la fecha del evento. Además de identificar las zonas de deslizamientos, se pretende estudiar las actividades antrópicas, analizando cuáles son los usos de suelo que se dan en la cuenca, esto con el

fin establecer si existen relaciones entre el uso de suelo y el desarrollo de zonas inestables en los taludes de la cuenca.

4.3. Caracterización hidrológica de la zona de estudio

4.3.1. Definición de curvas IDF

De acuerdo con la información de precipitación recolectada para la estación más cercana al sitio de estudio, se realiza la definición de las curvas intensidad duración frecuencia (IDF), las cuales se estiman mediante el método de Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia (Vargas & Diaz, 1998), utilizando datos de precipitación diaria.

4.3.2. Estimación de caudales

Para la estimación de caudales líquidos en la cuenca, se determinarán los parámetros morfométricos de la cuenca, estableciendo los tiempos de concentración, el cual es uno de los parámetros más relevantes para la estimación de caudales. De acuerdo con lo anterior, se estiman los caudales mediante el método del Hidrograma unitario del United States Soil Conservation Service, SCS.

4.3.3. Estimación de la lluvia detonante de flujo de detritos

Para la estimación de la lluvia detonante, se utiliza la metodología propuesta por Mayorga (2003) quien establece una correspondencia entre los umbrales de la lluvia acumulada y la susceptibilidad del terreno. Para la estimación de la lluvia acumulada, se realiza un análisis de las precipitaciones ocurridas en los eventos de avalanchas reportados, con el fin de establecer la precipitación acumulada en los días previos al evento.

4.4. Análisis de la susceptibilidad

Para la estimación de la susceptibilidad en la zona se implementa el método estadístico bivariado pesos de evidencia, para lo cual se requiere el inventario de deslizamientos y los mapas de los factores condicionantes que se toman como parámetros, los cuales son:

- Subunidades geomorfológicas
- Pendientes
- Longitud de la pendiente
- Convexidades y concavidades
- Litología
- Geología estructural

- Uso del suelo
- Drenaje

Para la generación de los mapas de los factores condicionantes a evaluar, lo primero que se debe realizar es la selección y verificación de la información de base, pues esta información debe ser digitalizada y homogenizada en cuanto a escala y convenciones, para así poderlos procesar mediante la herramienta de información geográfica Qgis. Posteriormente, cada uno de los mapas se subdividen en clases de acuerdo con los valores de cada parámetro.

4.5. Análisis de la amenaza por flujo de detritos

Para la generación de mapas de amenaza mediante el uso de herramientas computacionales, se implementa el modelo DebrisDice con el fin de identificar para la propagación de la susceptibilidad clasificada como alta y poder establecer el grado de amenaza de acuerdo con los valores de la velocidad del flujo.

5. Caso de Estudio

Existen cuencas que, por su naturaleza y la alta degradación en los ríos y quebradas, pueden llegar a tener un alto potencial de amenaza por flujo de detritos, afectando a la población asentada en sus orillas y aguas abajo de estas. Un ejemplo de este tipo de cuencas es la quebrada Estaquecá, donde en el invierno su caudal tiene un comportamiento tipo torrencial, lo cual unido a las altas pendientes de la cuenca, sus características geológicas, geomorfológicas y de sismicidad, se convierte en amenaza para la población; así como, para la infraestructura de la zona, como vías y puentes; lo que repercute en la libre movilización por la carretera afectando el normal desarrollo de la región (CORPORINOQUIA, 2012).

Según el Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Quetame – Cundinamarca, la Vereda Estaquecá Bajo (Sector las lajas), que hacen parte de la cuenca de estudio, se encuentran dentro del acuerdo 009 del 27 de mayo de 1996 por el cual se faculta al alcalde y comité local para la atención y prevención de desastres, para realizar los estudios de riesgo del municipio y reglamentar el uso de las zonas de riesgo. Así mismo, la zona se encuentra dentro del Programa de Recuperación de Áreas Degradadas y Prevención de Procesos Erosivos, esto debido a los diferentes eventos ocurridos en la zona (*Esquema de Ordenamiento Territorial. Municipio de Quetame*, 1999).



Figura. 5-1. Quebrada Estaquecá.
Fuente: Coviandina, 2021.

5.1. Localización

La quebrada Estaquecá se localiza en el sector sur oriental del departamento de Cundinamarca sobre el municipio de Quetame, dentro del piedemonte llanero, su desembocadura se da sobre la margen derecha del río Negro, la cual se encuentra a unos 3.00Km del casco urbano de Quetame, colindando con vía Bogotá- Villavicencio, más exactamente en el puente del PR46+100 (Figura. 5-2).

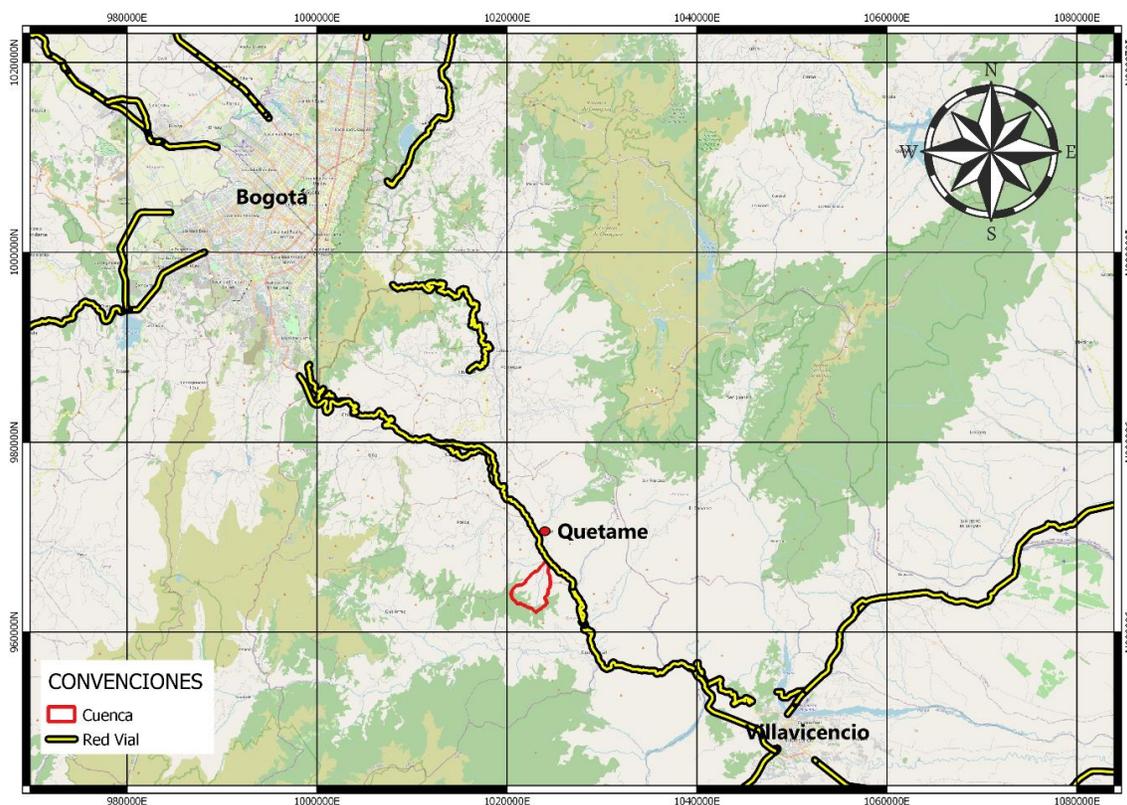


Figura. 5-2. Localización quebrada Estaquecá.
Fuente: OpenStreetMap modificado.

5.2. Área de estudio

La cuenca cuenta con un área de 12 Km² y con una longitud de cauce de aproximadamente 6.18Km, entre sus afluentes se encuentran la quebrada Las Lajas y la quebrada Las Cajitas (Figura. 5-3), esta última evidencia más problemas de degradación en el cauce. El punto más alto de la cuenca se localiza a los 3221msnm y su punto más bajo, que es la desembocadura con el río Negro, se encuentra a los 1298 msnm, la cuenca cuenta con una pendiente media del cauce del 25.9%, lo que representa una pendiente alta, dando capacidad al flujo para erosionar y transportar sedimento.

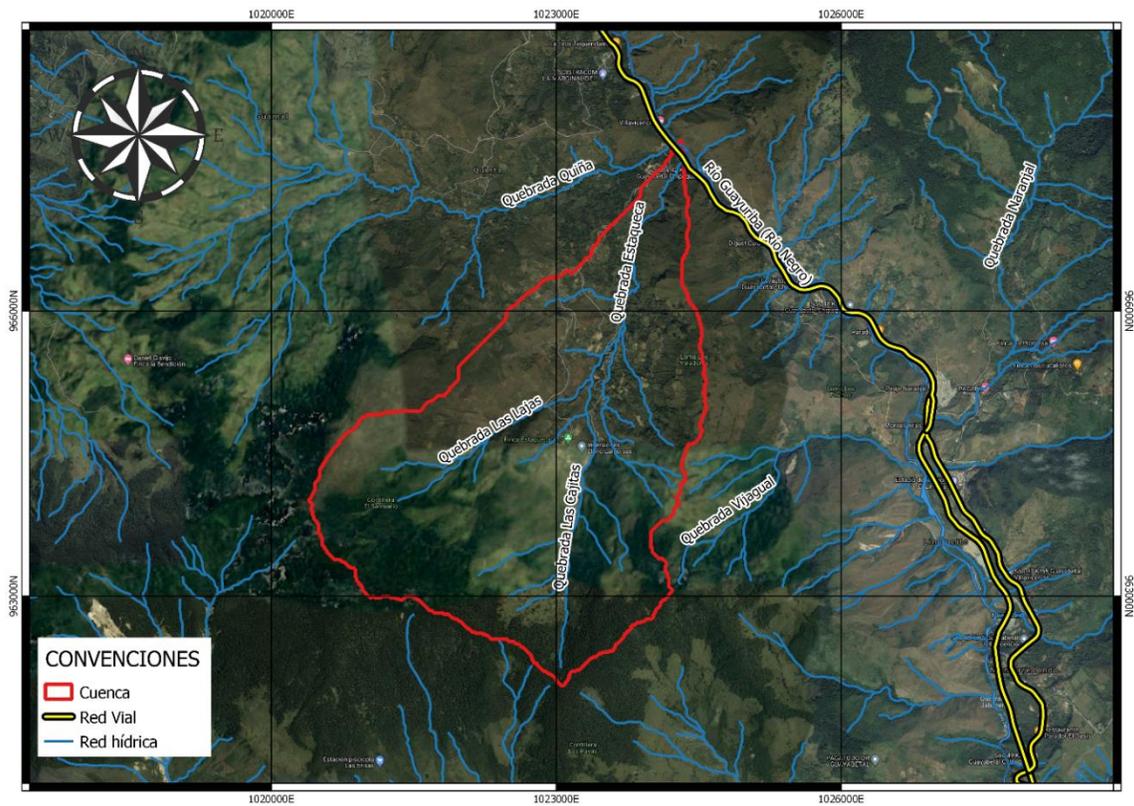


Figura. 5-3. Quebrada Estaquecá.
Fuente: Google Hybrid modificado.

El cauce de la quebrada corresponde a un cauce típico de alta montaña, con sección tipo v, encañonado y conformado por taludes con altas pendientes, los cuales presentan un alto estado de erosión, sólo en algunas zonas se evidencian taludes recubiertos con baja vegetación.



Figura. 5-4. Sección típica quebrada Estaquecá.
Fuente: Coviandina, 2021.

Así mismo, se evidencia la alta capacidad de transporte de sedimentos que tiene la quebrada, puesto que a lo largo del cauce se encuentran grandes bloques de roca (Figura. 5-5).



Figura. 5-5. Bloques de roca sobre la quebrada Estaquecá.
Fuente: Hidroconsulta, 2012.

5.3. Antecedentes

Sobre la cuenca se ha evidenciado en las últimas tres décadas una fuerte actividad de flujo de detritos donde se han generado daños en la infraestructura vial que provocan cierres viales y por ende pérdidas económicas a nivel local y regional.

Entre los eventos ocurridos en la quebrada se reporta como primer evento el del año 1988, del cual no se encontró registro fotográfico y se desconoce la magnitud de la avalancha. El segundo registrado que fue el 14 y 15 de julio de 1997, donde se rompió el gasoducto de ECOGAS que transporta gas desde Apiay hacia Usme, esta tubería rota de seis pulgadas provocó una explosión dejando sin el servicio a más de un millón de habitantes en Bogotá y Cundinamarca (El Tiempo, 1997); así mismo, ocasionó el taponamiento en la carretera Bogotá - Villavicencio dejándola cerrada por cerca de 4 días y con paso restringido posterior a estos días, debido a que media banca de la carretera en varios metros quedó afectada como se puede evidenciar en la Figura. 5-6.



Figura. 5-6. Avalancha de la quebrada Estaquecá, Julio de 1997
Fuente: A. Martínez.

Seis años más tarde en el año 2003 ocurrieron en el mismo año dos eventos el 29 de julio y el 26 agosto, los cuales obligaron a suspender el tránsito vehicular por varios días (Hidroconsulta S.A.S., 2019). Para el 19 y 20 de junio de 2004 ocurrió una nueva avalancha de unos 2.000 metros cúbicos de material, la cual ocasionó un nuevo cierre vial, puesto que la carretera quedo completamente cubierta por cerca de 250 metros en su carpeta asfáltica (El Tiempo, 2004).

En el año 2010 ocurrieron dos avalanchas seguidas en el mes de julio, se estimó que el volumen transportado por las avalanchas fue del orden de 400.000 metros cúbicos (El Tiempo, 2010). El material transportado por el evento sobrepasó la rasante del puente localizado en PR46+100 por cerca 4.00m de altura, colmatándolo de sedimentos, además se produjo el represamiento del río Negro, por material transportado por la creciente.

Por los eventos del 2010 se estima que hubo una mayor afectación sobre la infraestructura vial, específicamente sobre el puente de la quebrada Estaquecá, el cual había sido construido en el año 2005, como solución al paso de las avalanchas generadas en la zona en los últimos años. Entre los daños causados en la infraestructura vial, esta avalancha generó el agrietamiento de las vigas inferiores, afectó las riostras, los topes sísmicos en ambos estribos, las barandas del puente, y desplazó

el tablero en aproximadamente 0.30m a 0.45m; por lo que, fue necesario por cerca de 4 meses tener tráfico restringido en la zona para poder ejecutar las labores de reforzamiento y reconstrucción del puente (Hidroconsulta S.A.S., 2019).

La última avalancha registrada fue en el año 2019, donde se suspendió el tránsito en la zona por la gran cantidad de material sobre la carretera (Figura. 5-7), todas estas avalanchas reportadas generan pérdidas de vidas humanas y desastres económicos, ya que se ha tenido que suspender el tránsito en la zona, lo que provoca que los transportadores busquen rutas alternas, que en realidad se traducen a mayores tiempos de movilidad, además se genera un desabastecimiento de alimentos.



Figura. 5-7. Avalancha de la quebrada Estaquecá, 2019
Fuente: Hidroconsulta S.A.S

Por lo anterior, es fundamental el desarrollo de estudios enfocados a la determinación de zonas de amenaza con el fin de prevenir estos desastres y los riesgos que estos conllevan, como lo son las pérdidas de vidas humanas y las pérdidas económicas.

5.4. Geología

El área de estudio está cubierta por cartografía geológica a escala 1:100.000 correspondiente a la plancha 247 - Cáqueza realizado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS (ahora Servicio Geológico Colombiano). En esta se puede evidenciar que la cuenca se localiza en una región sobre vertientes de Cordillera Oriental, donde afloran rocas metamórficas y sedimentarias las cuales se presentan discordantes entre sí y constituyen el basamento del área (INGEOMINAS, 2011).

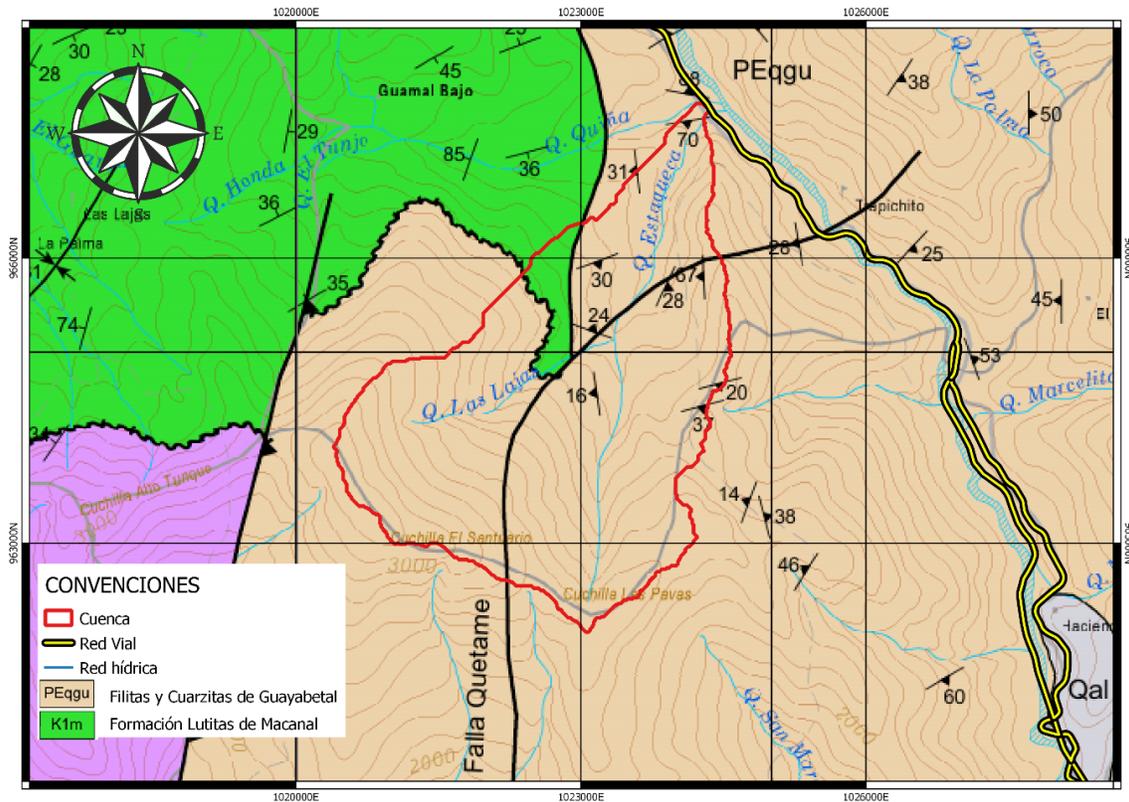


Figura. 5-8. Geología quebrada Estaquecá
 Fuente: Plancha 247 – Cáqueza escala 1:100.000, (INGEOMINAS, 2011a) modificado.

5.4.1. Geología regional

5.4.1.1. Grupo Quetame (Peq)

El Grupo Quetame está conformado principalmente por rocas metamórficas y metasedimentarias, son las rocas más antiguas que afloran en este sector, haciendo parte del núcleo o basamento de la cordillera oriental (Macizo de Quetame), está constituido por una secuencia monótona de filitas seríticas con intercalaciones de filita clorítica de un color verde oliva y pizarras gris a negra, intercaladas con meta-Areniscas cuarcíticas de color gris clara a blanca. Afloran sobre la vía Bogotá-Villavicencio, al sur del municipio de Quetame, hacia el sur del sector denominado Naranjal y la parte oriental de la Quebrada Estaquecá (EOT Quetame, 1999) al igual que en el municipio de Guayabetal y al sur del río Guamal. Dentro del área de estudio se encuentran las formaciones Filitas y Cuarzitas de Guayabetal (PEqgu) (CORMACARENA, 2018).

5.4.1.1.1. Filitas y Cuarzitas de Guayabetal (PEqgu)

Esta formación corresponde filitas de color verde y morado, son filitas sericíticas con intercalaciones de filitas cloríticas y cuarcitas, metareniscas y pizarras con metamorfismo de esquistos verde. Las filitas cloríticas y cuarzosas presentan una foliación bien desarrollada. La pizarra gris a negra presenta buena foliación y con frecuencia la estratificación original. La textura es lepidoblástica y su composición corresponde a sericita, clorita y cuarzo. La porción cuarzosa corresponde a meta areniscas cuarzosas, meta-areniscas arcósicas y metaconglomerados polimícticos con fragmentos de cuarzo (INGEOMINAS, 2011).

Presenta contacto fallado con las rocas de la formación Lutitas de Macanal. Esta unidad se encuentra foliada, altamente diaclasada, fracturada y fallada lo que produce caída de grandes bloques, ya que se trata de rocas metamórficas que se presentan con topografía abrupta de altas pendientes. De otra parte, y de acuerdo con observaciones en campo y recolección bibliográfica se infiere un espesor no menor a 2000m (CORMACARENA, 2018).

5.4.1.2. Grupo Cáqueza (K1c)

El grupo Cáqueza se encuentra conformado por una secuencia de areniscas cuarcíticas, arcillas esquistosas, esquistos, lutitas negras y un conglomerado cuarcítico basal que aflora en la carretera Bogotá-Villavicencio entre el puente sobre el Río Caqueza y la población de Quetame (INGEOMINAS, 2011).

5.4.1.2.1. Formación Lutitas de Macanal (K1m)

La formación está compuesta por lodolitas negras, micáceas, compactas, ligeramente calcáreas, con láminas de yeso y localmente fosilíferas en la parte intermedia, contiene intercalaciones de estratos gruesos de areniscas cuarzosas de grano fino y de color gris oscuro de pocos metros de espesor (CORPORINOQUIA, 2012). principalmente hacia la parte media de la unidad y niveles ricos en restos de plantas amonitas y bivalvos (INGEOMINAS, 2011).

5.4.2. Geología estructural

5.4.2.1. *Falla del río Negro*

Controla el cauce del río Negro presentando un rumbo general N45W, es una de las fallas más importantes en la zona, puesto que ejerce una influencia de carácter regional afectando las rocas del grupo Quetame y Grupo Cáqueza. Alrededor de esta falla se estructuran otras de menor magnitud como la de Servitá, Jabonera y Montereondo. El efecto de este sistema se refleja en la ocurrencia de movimientos de diversa magnitud que afectan la resistencia de los materiales y aceleran los procesos de remoción en masa (EOT Quetame, 1999).

5.4.2.2. *Falla Estaquecá*

Se localiza en el nacimiento y cauce alto de la quebrada del mismo nombre, tiene una dirección N30E. Pone en contacto fallado las unidades del Grupo Quetame y Areniscas de Gutiérrez, cuyos estratos presentan en general un rumbo N30W y buzamiento 25 hacia el EN, con la unidad formación Areniscas de Gutiérrez con rumbo N-S y buzamiento hacia el este. La falla controla geomorfológicamente la Quebrada Estaquecá (EOT Quetame, 1999).

5.4.2.3. *Falla Quetame*

Es una falla de carácter regional y cortical, presumiblemente de alto ángulo, ya que a ella se encuentra asociada la presencia del cuerpo intrusivo Riodacítico, y algunas fuentes termales reportadas al sur de la población de Quetame. Tiene un rumbo con una dirección N25E y controla el curso de la Quebrada Negra (INGEOMINAS, 2011).

5.5. Geomorfología

La zona de estudio se encuentra ubicada geomorfológicamente en la morfogeoestructura correspondiente al Sistema Montañoso Orogénico Andino que bordea el cratón Guayanés por su parte noroccidental (CORMACARENA, 2018). La región natural de montaña está conformada por superficies profundamente disectadas, que se caracteriza por un modelado en vertientes concavo-convexas con alta frecuencia de movimientos en masa, derrumbes y desprendimientos. En el sector inferior del municipio de Quetame se tienen vertientes cóncavas en el que las pendientes se hacen más fuertes, por lo que los procesos morfogenéticos son más intensos, allí las pendientes han

alcanzado un perfil cóncavo con gran inestabilidad por la acción de socavación del río Negro (EOT Quetame, 1999).

A continuación, se presentan las subunidades geomorfológicas encontradas dentro de la cuenca de acuerdo con el mapa de Geomorfología con escala 1:100.000 desarrollado en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca hidrográfica Río Guayuriba (CORMACARENA, 2018).

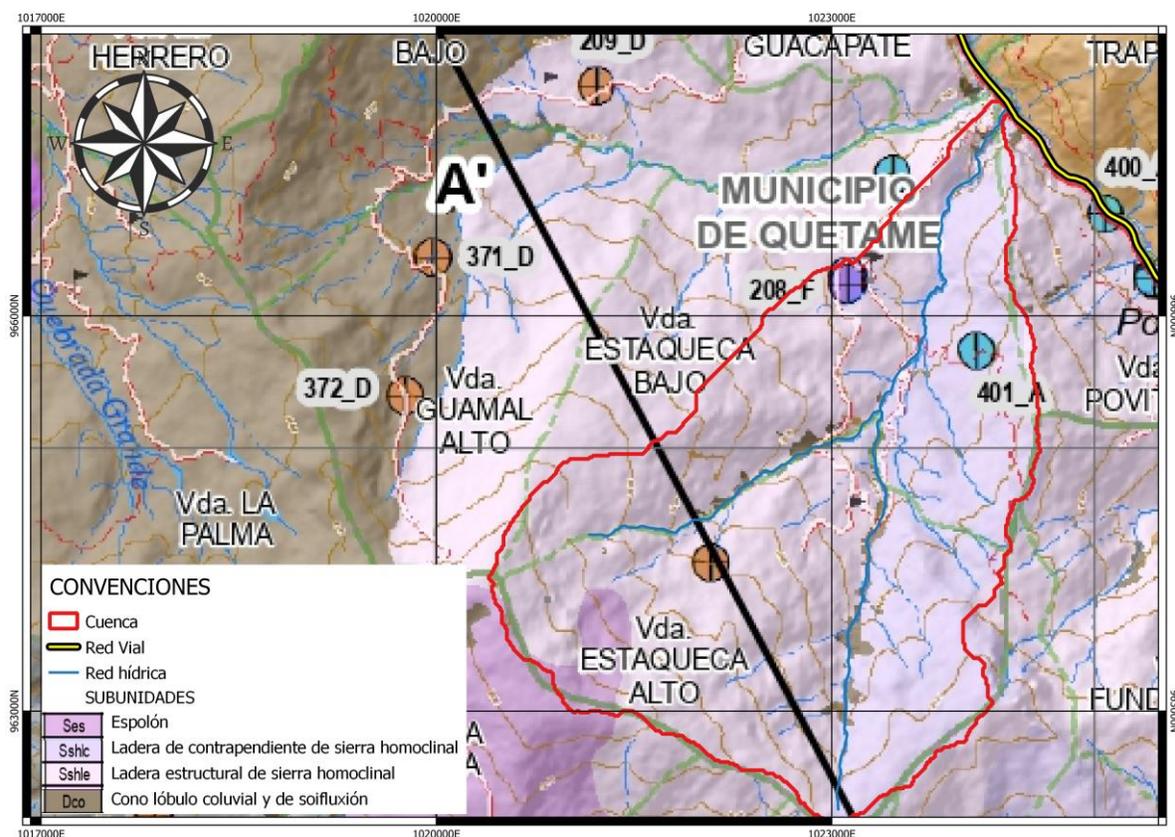


Figura. 5-9. Geomorfología quebrada Estaqueca
Fuente: Mapa de Geomorfología con escala 1:100.000 POMCA Río Guayuriba.

5.5.1. Laderas de contrapendiente de sierra homoclinal- Sshlc

Esta subunidad se caracteriza por presentar una superficie estructural generalmente denudada, vertical a subvertical de longitud moderada a larga, se identifica por tener formas cóncavas a irregular, con pendientes abruptas a escarpadas. Esta subunidad se encuentra definida por la inclinación de los estratos en contra de la pendiente y se constituye de una interstratificación de rocas duras, intermedias y blandas (SGC, 2014).

5.5.2. Ladera estructural de sierra homoclinal – Sshle

La subunidad presenta una superficie definida por la inclinación de los estratos a favor de la pendiente, con longitud entre corta a moderada larga, cuyas formas son rectas a convexas, además se identifica por tener pendientes escarpadas a muy escarpadas, relacionada a una estructura homoclinal (CORMACARENA, 2018).

5.5.3. Espolón – Ses

Se identifica por presentar una morfología alomada, dispuesta perpendicularmente a la tendencia estructural general de la región, sus laderas son festoneadas de longitudes moderadamente largas con pendientes abruptas. Se encuentra limitado por drenajes paralelos a subparalelos y es el resultado de la alternancia de capas duras y blandas (SGC, 2014). La subunidad se desarrolla sobre rocas con muy bajo grado de metamorfismo del Grupo Quetame y Farallones (CORMACARENA, 2018).

5.5.4. Cono lóbulo coluvial y de solifluxión – Dco

La subunidad es un depósito en forma de cono o de lóbulos alomados bajos, cuyo origen está relacionado con los procesos de transporte y depositación de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos hidrogravitacionales; es decir que, este tipo de depósitos se ha desplazado a lo largo de laderas con forma cóncava, hasta llegar a una base relativamente amplia y de menor pendiente. Generalmente estos depósitos son soportados por una matriz con materiales arcillosos o arenosos (SGC, 2014).

5.6. Coberturas y usos del suelo

5.6.1. Coberturas de suelo

De acuerdo con el mapa de coberturas de la tierra realizado a través de la metodología Corin Land Cover por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, se obtuvieron las coberturas del suelo de la quebrada Estaquecá (IDEAM, 2012a); de éstas se identificó que la mayor parte del área se encuentra compuesta por coberturas de mosaicos de pastos con espacios naturales con cerca de un 28.5% del área, y de mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales con un 25.7%; de otra parte, existe cerca del 23.6% del área dentro de la cuenca cubierta por bosque denso.

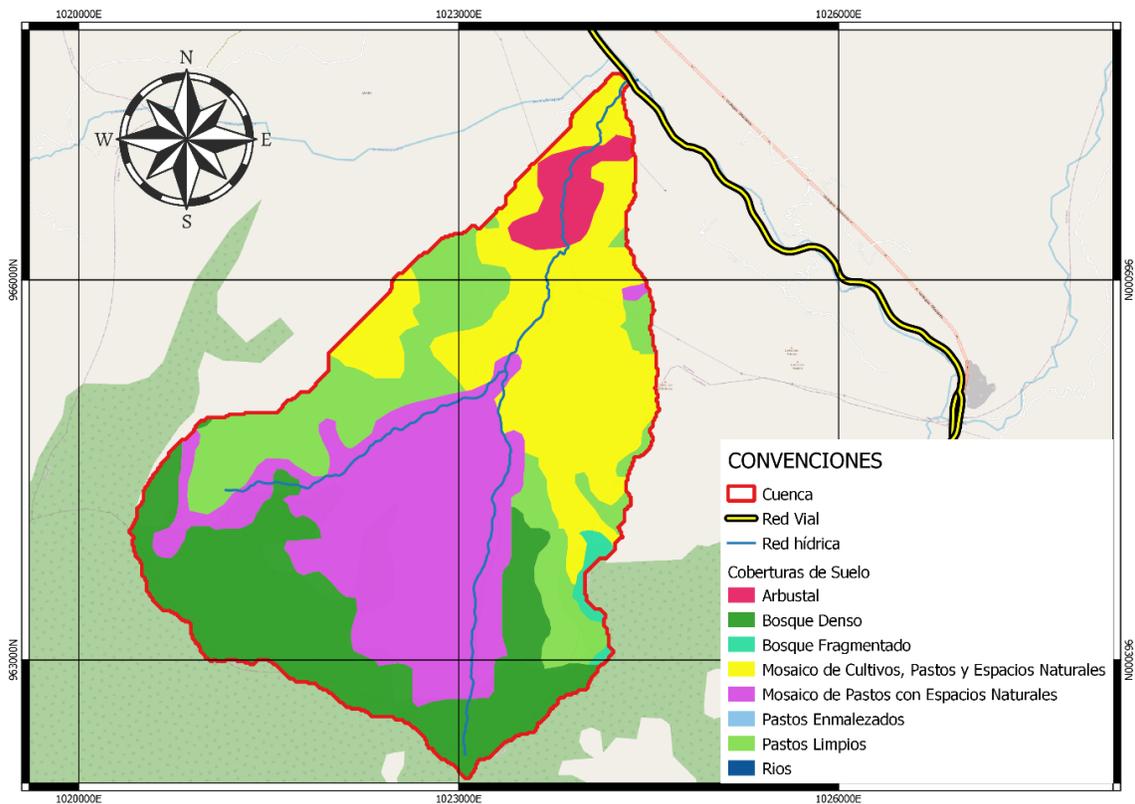


Figura. 5-10. Coberturas de suelo quebrada Estaquecá
Fuente: (IDEAM, 2012a) modificado.

5.6.1. Usos de suelo

De acuerdo con la cartografía desarrollada para la clasificación del uso de suelo en la zona rural de municipio de Quetame, presentado en el Esquema de Ordenamiento territorial del municipio (EOT Quetame, 1999), se tiene que en la cuenca de estudio hay una mayor parte del área con uso de suelo de protección y de importancia ambiental, uso que se desglosa como: zonas de conservación de bosques naturales, zonas de protección de los recursos naturales, zonas de recuperación ambiental y zonas de protección hídrica; de otra parte, en la cuenca también se presentan usos de suelo con desarrollo rural, tales como: zonas de desarrollo agropecuario sin restricciones y zonas de actividad turística y/o ecoturística.

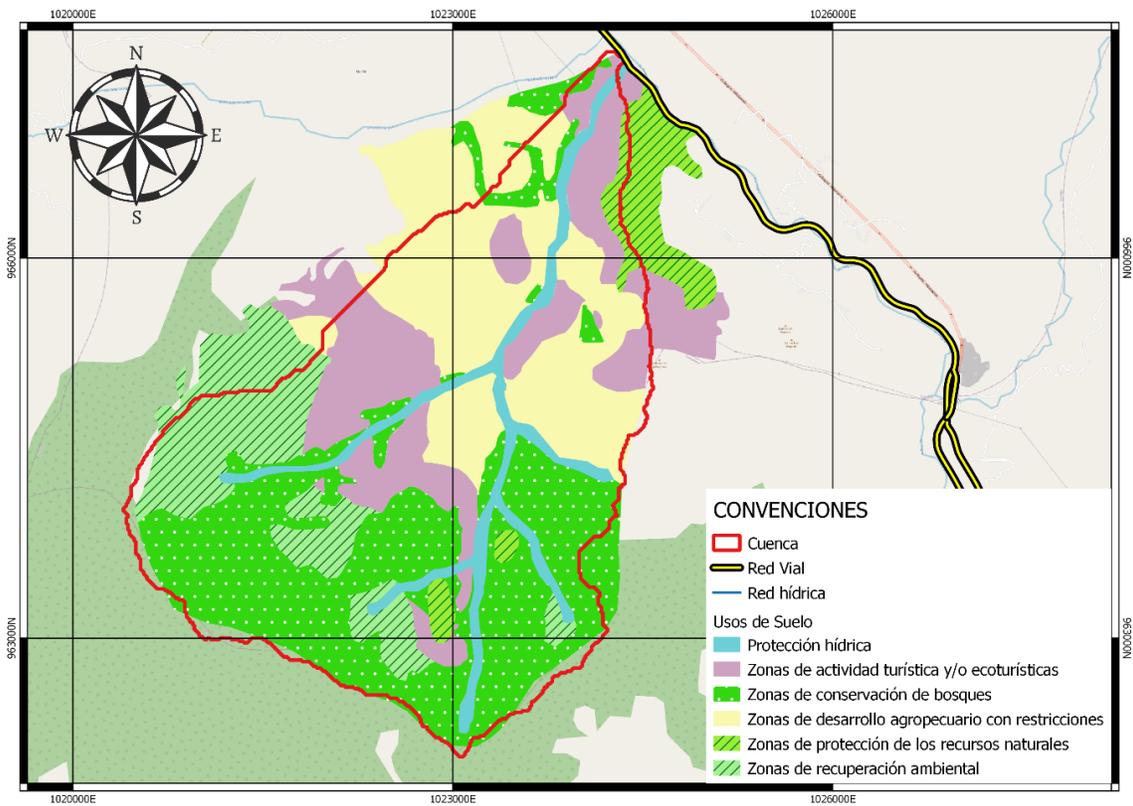


Figura. 5-11. Usos de suelo quebrada Estaquecá
Fuente: (EOT Quetame, 1999) modificado.

6. Inventario de flujo de detritos

Los inventarios de movimientos en masa son la representación de eventos únicos o múltiples, multitemporales, los cuales presentan las inestabilidades de manera puntual o zonalmente; es decir que, en inventario se registra la ubicación como punto o polígono; así mismo, en estos se registra la fecha de ocurrencia, y los factores que intervinieron o intervienen en su ocurrencia o su potencialidad de ocurrencia; por lo que, permiten la formulación y comprobación de una hipótesis con la que se pueda establecer la relación entre diferentes factores y la ocurrencia del movimiento (SGC, 2017). Los inventarios de movimientos en masa constituyen la base para los análisis de la susceptibilidad, de amenaza y del riesgo por deslizamientos; así como, de la estimación de volúmenes de materiales aportados por dichos procesos (Legorreta Paulín et al., 2014).

Estos se pueden construir mediante la compilación de información secundaria como interpretación de imágenes de sensores remotos, medios de comunicación y estudios del sitio, o información primaria como los levantamientos de campo.

En cuanto a la interpretación de imágenes de sensores remotos, se puede decir que son una herramienta sumamente útil para caracterizar la zona de estudio; ya que, entregan una visión general del área, permiten observar y distinguir la continuidad o repetición de patrones; así como, interrelaciones entre topografía, drenaje, cobertura superficial, material geológico y las actividades humanas, entre otros (Rib & Liang, 1978). Principalmente este método es utilizado para aquellas zonas cuyas condiciones de accesibilidad dificultan el levantamiento del inventario en campo, como es el caso de la quebrada Estaquecá, donde debido a sus altas pendientes es difícil hacer este tipo de levantamientos en campo; por lo anterior, se decidió realizar el inventario por este método.

6.1. Recopilación y análisis de la información existente

Inicialmente se evaluó la información disponible, adquiriendo información de sensores remotos como imágenes satelitales y fotografías aéreas las cuales fueron adquiridas mediante el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC y por la plataforma de PlanetScope, la información obtenida data desde el año 1985 hasta el 2021, la cual se relaciona en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Fotografías aéreas utilizadas para inventario de deslizamientos, quebrada Estaquecá.

ENTIDAD	NOMBRE	SENSOR	RESOLUCIÓN (m)	FECHA
IGAC	C-2183-0071	RMK-A-15/23	8	25/01/1985
IGAC	15008057_05719970830	Landsat	30	30/08/1997
IGAC	C-2801-0125	WILD RC-30	8	1/02/2007
IGAC	24703008122009-0150	ULTRA CAM	0.3	8/12/2009
IGAC	24703008122009-0152	ULTRA CAM	0.3	8/12/2009
IGAC	24703008122009-0154	ULTRA CAM	0.3	8/12/2009
PlanetScope	20100210_161157_1841020_RapidEye-3	RapidEye	6.5	10/02/2010
PlanetScope	20100213_161615_1841020_RapidEye-1	RapidEye	6.5	13/02/2010
IGAC	052435495010_01_P006	WorldView	0.613	1/02/2011
PlanetScope	20120102_161313_1841020_RapidEye-3	RapidEye	6.5	2/01/2012
PlanetScope	20140102_161642_1841020_RapidEye-5	RapidEye	6.5	2/01/2014
PlanetScope	20151227_160117_1841020_RapidEye-1	RapidEye	6.5	27/12/2015
PlanetScope	20160117_155658_1841020_RapidEye-3	RapidEye	6.5	17/01/2016
PlanetScope	20170207_143553_0e0d	4- band PlanetScope	3	7/02/2017
PlanetScope	20170207_143552_0e0d	4- band PlanetScope	3	7/02/2017
PlanetScope	S2B_MSIL1C_20180124T152629_N0206_R025_T18NXX	Sentinel-2	10	24/01/2018
PlanetScope	20190102_150212_0f46	4- band PlanetScope	3	2/01/2019
PlanetScope	20190102_150211_1_0f46	4- band PlanetScope	3	2/01/2019
PlanetScope	20190830_151653_89_105c	4-band PlanetScope	3	30/08/2019
PlanetScope	20200105_144742_0e19	4-band PlanetScope	4	5/01/2020
PlanetScope	20210116_150403_0f15	4-band PlanetScope	3	16/01/2021
PlanetScope	20210116_150402_0f15	4-band PlanetScope	3	16/01/2021

6.1.1. Procesamiento de información

Para un mejor entendimiento de los eventos ocurridos en la quebrada Estaquecá, se realizó un análisis multitemporal para evaluar además de los deslizamientos ocurridos, la evolución de la cuenca. De la información obtenida se seleccionaron los años que representaban una mejor calidad de la información, procurando incluir las fotografías e imágenes satelitales de los años previos y posteriores a los eventos ocurridos descritos en el numeral 5.3. Antecedentes. Para el procesamiento de la información, para cada año se realizó la delimitación de los deslizamientos mediante polígonos para así identificar las áreas que fueron afectadas por movimientos en masa dentro de la cuenca.

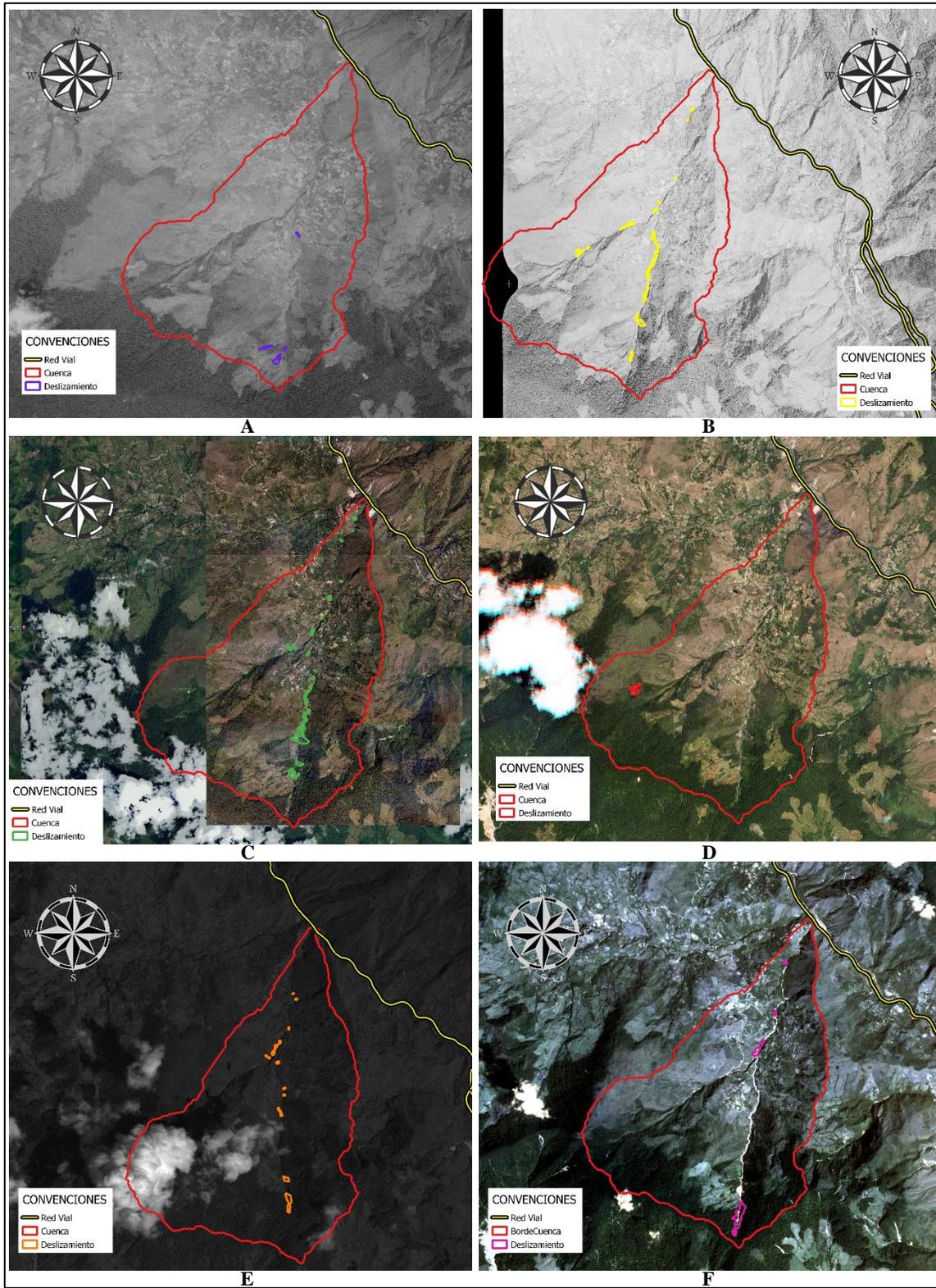


Figura. 6-1. Análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas quebrada Estaquecá A). Año 1985. B). Año 1997. C). Año 2009. D). Año 2010. E). 2011. F). Año 2019.

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi y PlanetScope modificado.

6.1.1. Análisis de la información

La primera foto analizada es una fotografía aérea de 1985, antes del primer evento por flujo de detritos registrado en 1988, en esta fotografía la cuenca se aprecia con buena estabilidad en sus laderas, pues sólo se identificaron algunos deslizamientos aislados en la parte alta de la cuenca, sobre la quebrada Cajitas. Para el año 1997, en la fotografía aérea posterior a uno de los eventos reportados, ya se evidencia una fuerte actividad de deslizamientos, la cual es más apreciable en la quebrada Cajitas, donde casi en toda su longitud las laderas del cauce se ven afectadas, se intuye que los deslizamientos identificados son en su mayoría causados por el evento reportado en el año 1997.

Para los años 2003 y 2004 que fueron los años donde se reportaron nuevas avalanchas, no hay información disponible de la zona que permitiera analizar los puntos de iniciación de las avalanchas; se obtuvo información de la zona con buena precisión hasta el año 2009, en esta fotografía se pudo identificar nuevas zonas de deslizamientos y las cicatrices de los deslizamientos de los años anteriores, pero con una mayor área de afectación, para este año ya comienza a evidenciarse una afectación en la parte baja de la cuenca.

Se analizó una imagen satelital de febrero de 2010, antes de uno de los eventos reportados para este año en el mes de julio, donde se identificaron únicamente 3 deslizamientos nuevos, los cuales se localizan en la parte alta de la quebrada las Lajas; es decir, no hubo una diferencia significativa con respecto al año anterior.

En la imagen satelital analizada de febrero 2011, posterior al evento del año 2010, se identificaron nuevos deslizamientos en la cuenca, específicamente en la parte alta de la quebrada cajitas, en la parte alta de la quebrada las Lajas y en la zona de confluencia de las quebradas las Lajas y Cajitas.

Para el evento reportado del 2019, se analizó una fotografía posterior al evento, en esta se sigue evidenciando que las zonas vulnerables se localizan en la parte alta y en la zona de confluencia de la cuenca, pues las cicatrices de los deslizamientos anteriormente reportados son de mayor magnitud.

6.1.1. Resultados

Del análisis de las imágenes con sensores remotos se obtuvieron los polígonos de deslizamientos presentados en la Figura. 6-2, de los resultados se identificaron que los procesos de inestabilidad se están generando principalmente en las laderas de los cauces, pues no se evidenciaron deslizamientos en otras áreas de la cuenca.

Si bien del análisis se identificó que la quebrada con una mayor afectación a estos eventos es la quebrada Cajitas, quebrada con una mayor intervención antrópica (expansión de algunos cultivos cuyo drenaje descarga a los taludes de la quebrada), no se atribuye que ésta sea la causa de los deslizamientos, pues las inestabilidades se han desarrollado a lo largo de ambas quebradas y no únicamente en la zona donde se encuentran las descargas del drenaje de los cultivos; no obstante, cabe anotar que esta situación si es un factor contribuyente, pues se ve una mayor concentración de deslizamientos en la zona de cultivos de la quebrada Cajitas.

De otra parte, se evidencio que, en los años recientes en la zona de confluencia de las dos quebradas, punto medio de la cuenca, se ha desarrollado una mayor inestabilidad en las laderas; de igual manera, es de resaltar que en los últimos años se ve que se han activado otros puntos en la parte baja de la cuenca.

De lo anteriormente expuesto, se puede concluir que las inestabilidades dentro de la cuenca están relacionadas con la geología del sector y con procesos de socavación del lecho del cauce, pues se intuye que el arrastre de material dentro del cauce, genera la pérdida del pie de los taludes, provocando de esta manera la inestabilidad de las laderas y su remoción en masa.

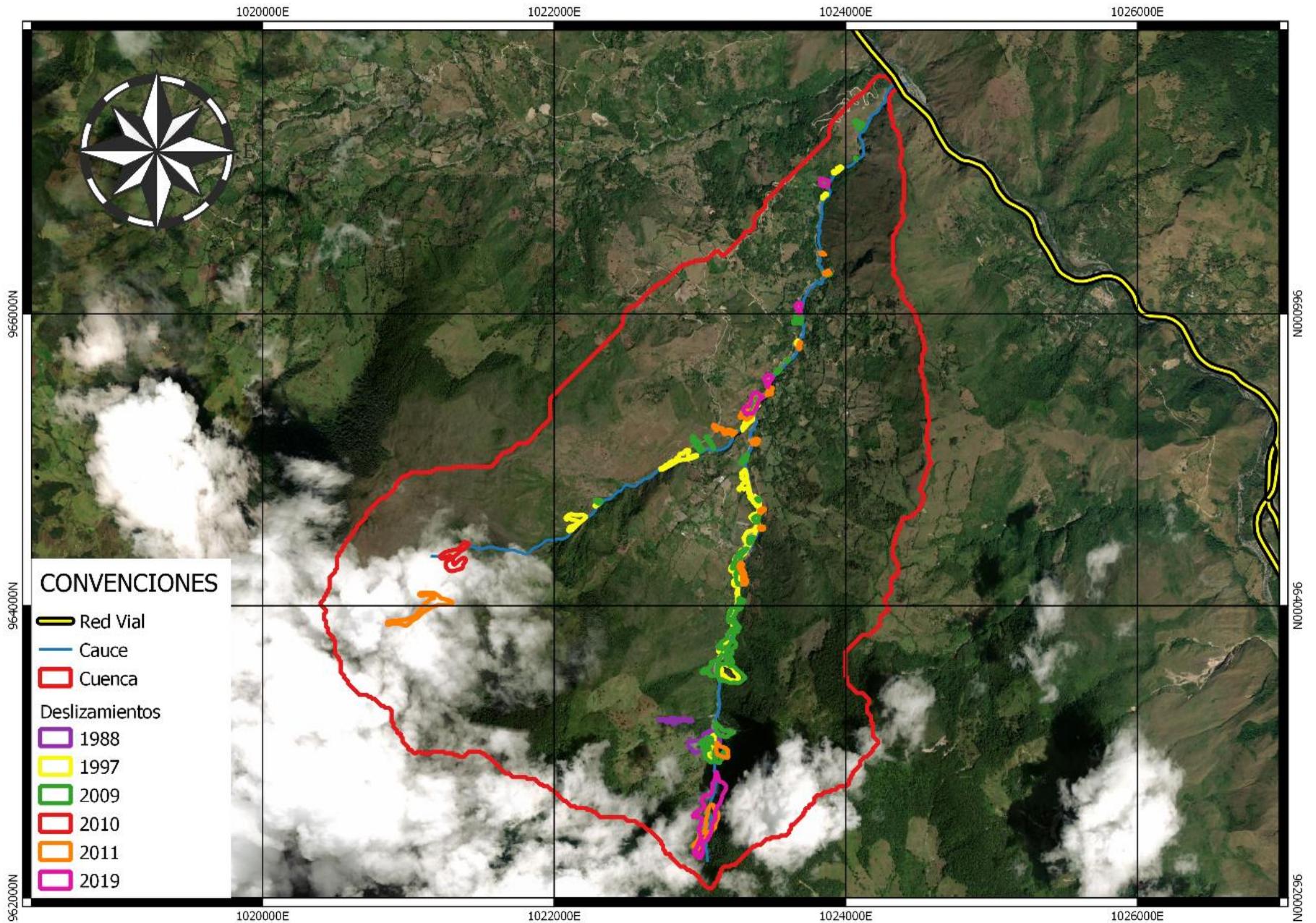


Figura. 6-2. Inventario de deslizamientos quebrada Estaquecá
 Fuente: Google Hybrid modificado.

7. Caracterización hidrológica

Con la caracterización hidrológica se pretende identificar el comportamiento de la cuenca de acuerdo con sus parámetros morfométricos, además de determinar las condiciones de precipitación que se dan en la zona de estudio; a partir de esta información se establecerán las curvas IDF, los hietogramas de diseño y finalmente la estimación de caudales. De otra parte, se analizarán las relaciones de lluvia antecedente y la lluvia de los eventos donde ocurrieron avalanchas, con el fin de establecer un nivel umbral para la generación de flujos de detritos en la cuenca.

7.1. Parámetros morfométricos

Para la delimitación de cuencas se utilizó un modelo de elevación de terreno obtenido del satélite ALOS-PALSAR el cual fue corregido para evitar puntos sumideros mediante Sistema de información geográfica (SIG), Qgis. De la delimitación se obtuvieron 3 subcuencas, correspondientes a la quebrada Cajitas, quebrada las Lajas y la parte baja de la quebrada Estaquecá como se puede ver en Figura. 7-1.

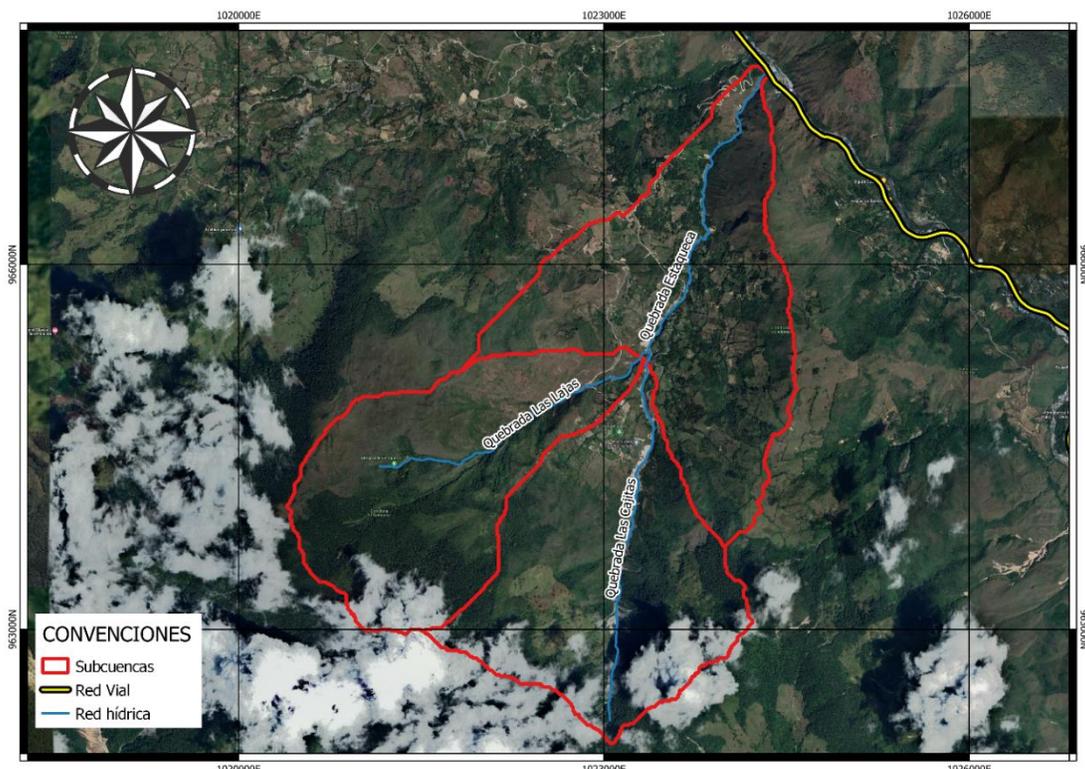


Figura. 7-1. Delimitación de subcuencas en la Cuenca de la quebrada Estaquecá.
Fuente: Google Hybrid modificado.

Posteriormente, se procedió a calcular el área, perímetro, las longitudes del cauce principal, las alturas máximas y mínimas dentro de las subcuencas, la pendiente media del cauce; además de los siguientes parámetros morfométricos.

7.1.1. Coeficiente de compacidad

Este coeficiente define la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de una circunferencia igual al área de la cuenca, valores de esta relación igual a 1.0 indican que la cuenca tiende a ser redonda, y valores mayores indican que la cuenca es irregular a alargada (Monsalve, 1995).

$$K_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Entre más bajo sea el coeficiente de compacidad, mayor será la concentración de agua dada la simetría de la cuenca.

7.1.2. Factor de forma de Horton

El factor determina la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud del cauce principal. Una cuenca con factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño, pero con mayor factor de forma (Monsalve, 1995).

$$H_f = \frac{A}{L^2}$$

7.1.3. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje determina la relación entre la longitud total de los cursos de agua y el área total de la cuenca (Monsalve, 1995). Entre mayor sea el valor de densidad de drenaje, más eficiente será el drenaje dentro de la cuenca, permitiendo el transporte de grandes volúmenes de agua y mayores velocidades del flujo.

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A}$$

7.1.4. Numero de curva

El número de curva (NC) fue desarrollada por el SCS, este parámetro permite caracterizar el potencial de escorrentía de una cuenca hidrográfica, la cual a partir de la combinación de la cobertura del suelo y el grupo hidrológico del suelo (son cuatro grupos hidrológicos existentes, van desde A hasta D)

se define el numero adimensional CN con valores entre 0 y 100, donde 100 indica que se trata de una superficie completamente impermeable (Chow et al., 1994).

Para el caso de la quebrada Estaquecá las coberturas del suelo se definieron de acuerdo con el mapa de coberturas de la tierra Corin Land Cover del IDEAM (Figura. 5-10), y el grupo hidrológico del suelo se estableció como el grupo C, por tratarse de filitas y cuarcitas.

7.1.5. Tiempo de concentración

Este parámetro estima el tiempo en el que tarda una gota de lluvia desde el punto más lejano en una cuenca hasta la salida de esta, es uno de los parámetros más importantes, ya que ayuda a predecir la respuesta de una cuenca ante un evento de lluvia dado. Para el caso de la quebrada Estaquecá se realizó el cálculo para cada una de las ecuaciones descritas en la Tabla 3-1. Ecuaciones empíricas para el cálculo del tiempo de concentración T_c . Sin embargo, se seleccionó el tiempo de concentración obtenido mediante la ecuación propuesta por la United States Department of Agriculture (USDA).

$$T_t = \frac{L}{3600V}$$

$$T_c = T_{t1} + T_{t2} + \dots + T_{tm}$$

Donde;

T_c = Tiempo de concentración

T_t = Tiempo de viaje

L = Longitud del flujo

V = Velocidad promedio

Para el cálculo de la velocidad promedio se realizó una modelación en el software HEC- RAS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) (Figura. 7-2).

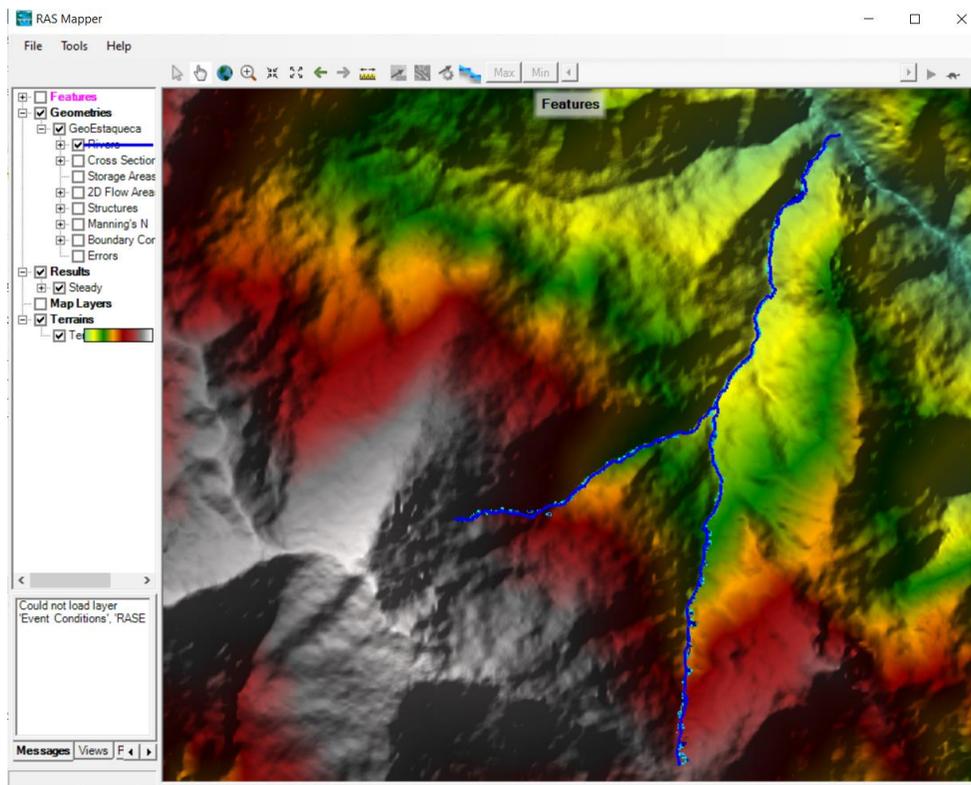


Figura. 7-2. Modelación en HEC-RAS de la quebrada Estaquecá.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7-1 y Tabla 7-2 se presentan el resumen de los parámetros físicos y morfométricos de las 3 subcuencas delimitadas.

Tabla 7-1. Parámetros físicos de las subcuencas de la quebrada Estaquecá.

Subcuenca	ÁREA (Km ²)	PERÍMETRO (Km)	LONG CAUCE PRINCIPAL (Km)	ALTURA MÁX (msnm)	ALTURA MÍN (msnm)	PEND. MEDIA DE CAUCE (%)	LONGITUD TOTAL DE CAUCES (KM)
Q. Estaquecá baja	4.468	14.8	2.98	2468	1298	14.03	9.55
Q. Las Lajas	3.728	10.8	2.63	3221	1721	39.92	3.96
Q. Las Cajitas	4.111	12.0	3.20	3055	1716	23.75	8.25

Tabla 7-2. Parámetros morfométricos de las subcuencas de la quebrada Estaquecá.

Subcuenca	Coeficiente de compacidad, Kc		Factor de forma de Horton, Hf		Densidad de drenaje, Dd		CN	TC (min)
Q. Estaquecá baja	1.97	CLASE III	0.50	Ligeramente ensanchada	2.14	Moderada	79	14
Q. Las Lajas	1.57	CLASE III	0.54	Ligeramente ensanchada	1.06	Baja	74	8
Q. Las Cajitas	1.66	CLASE III	0.40	Ni Alargada ni ensanchada	2.01	Moderada	73	11

De los parámetros calculados se puede ver que las subcuencas tienen factores de compacidad superiores a 1.50, lo que indica que su forma es tipo Oval – oblonga a rectangular – oblonga. En cuanto al factor de forma de Horton, las subcuencas son en su mayoría ligeramente ensanchadas, indicando de esta manera que tienen tendencia a ocurrencia de avenidas torrenciales cuando se presentan lluvias intensas.

De otra parte, la densidad de drenaje es baja para la quebrada las Lajas y moderada para la quebrada las Cajitas, lo que indica que estas subcuencas tienen baja capacidad de respuesta frente a un evento de lluvia.

Con relación al tiempo de concentración, se determinaron valores menores a 15 minutos indicando una mayor intensidad de la lluvia, y por ende caudales con una mayor magnitud.

Ahora si se analiza los parámetros físicos y los parámetros morfométricos (Tabla 7-3 y Tabla 7-4 respectivamente) de la cuenca general de la quebrada Estaquecá, se puede ver que, se trata de una cuenca con pendientes superiores al 25%, con un factor de forma ligeramente alargado, con baja densidad de drenaje, lo que no mejora las condiciones en cuanto a la respuesta frente a un evento de lluvia.

Tabla 7-3. Parámetros físicos de la cuenca de la quebrada Estaquecá.

Cuenca	ÁREA (Km ²)	PERÍMETRO (Km)	LONG CAUCE PRINCIPAL (Km)	ALTURA MÁX (msnm)	ALTURA MÍN (msnm)	PEND. MEDIA DE CAUCE (%)	LONGITUD TOTAL DE CAUCES (KM)
Q. Estaquecá	12.306	20.9	6.18	3221	1298	25.90	107.68

Tabla 7-4. Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Estaquecá.

Cuenca	Coeficiente de compacidad, Kc		Factor de forma de Horton, Hf		Densidad de drenaje, Dd		CN	TC (min)
Q. Estaquecá	1.68	CLASE III	0.32	Ligeramente alargada	1.77	Baja	75	24

7.2. Precipitación

Para el análisis del régimen de precipitación se recopiló la información hidrometeorológica de la estación Monterredondo operada por el IDEAM, ya que cuenta con una buena calidad de información y un registro de años completo adecuado; se localiza en la parte sur del área de estudio como se puede observar en la Figura. 7-3. En la Tabla 7-5 se presenta la información asociada a la estación.

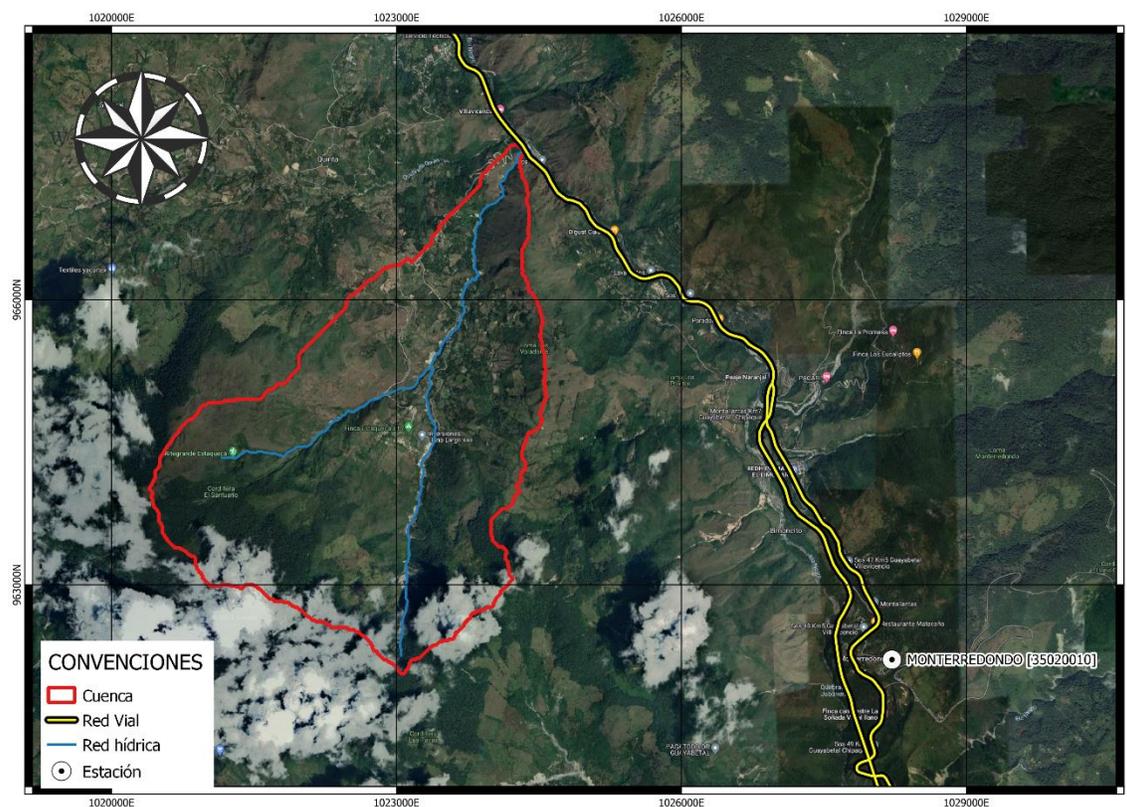


Figura. 7-3. Localización de la estación hidrometeorológica Monterredondo.
Fuente: Google Hybrid modificado.

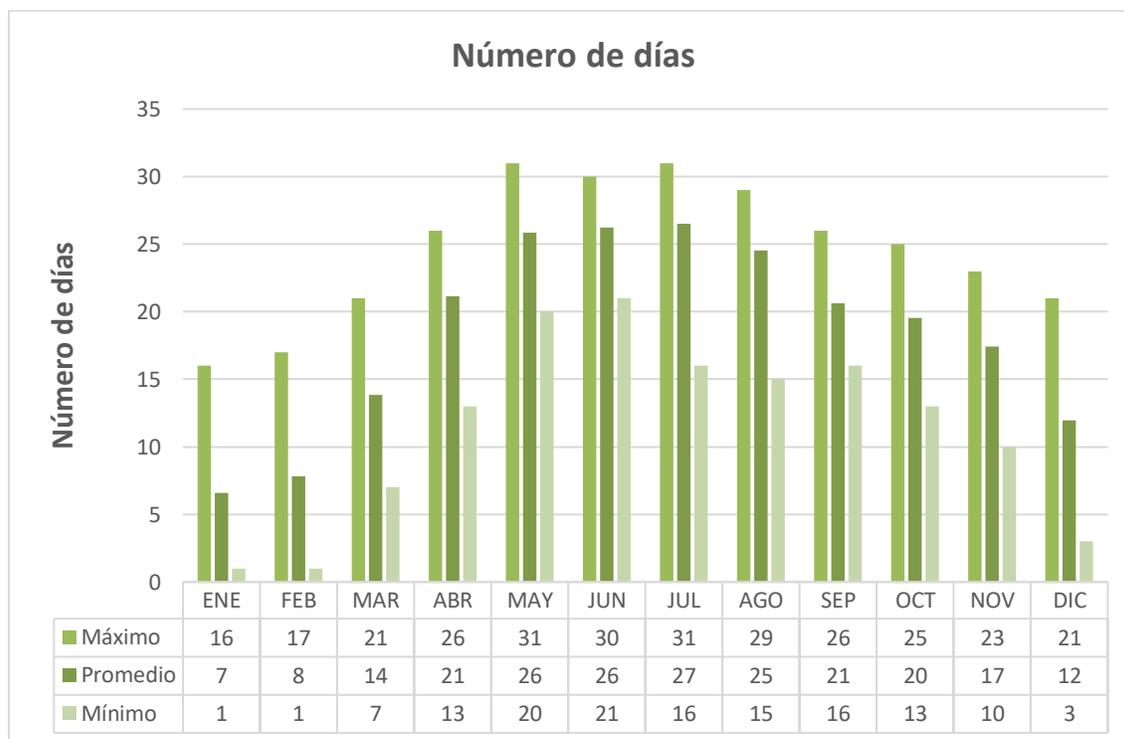
Tabla 7-5. Datos de la estación hidrometeorológica Monterredondo.

Código	Tipo	Nombre	Departamento	Corriente	Elevación (msnm)	Fecha de instalación	Fecha de suspensión
35020010	PM	Monterredondo	Cundinamarca	Coello	1300	15-07-1951	Activa

7.2.1. Número de días

En la Figura. 7-4 se presentan los resultados del análisis multianual del número de días con lluvia para los diferentes meses, en promedio se registra que en el año se tienen 222 días con lluvia, siendo los meses de abril a septiembre con más número de días reportados. Entre los valores extremos se

han llegado a reportar un máximo de 31 días con lluvia en el mes de julio, que es uno de los meses donde más se han reportados eventos de avalanchas.

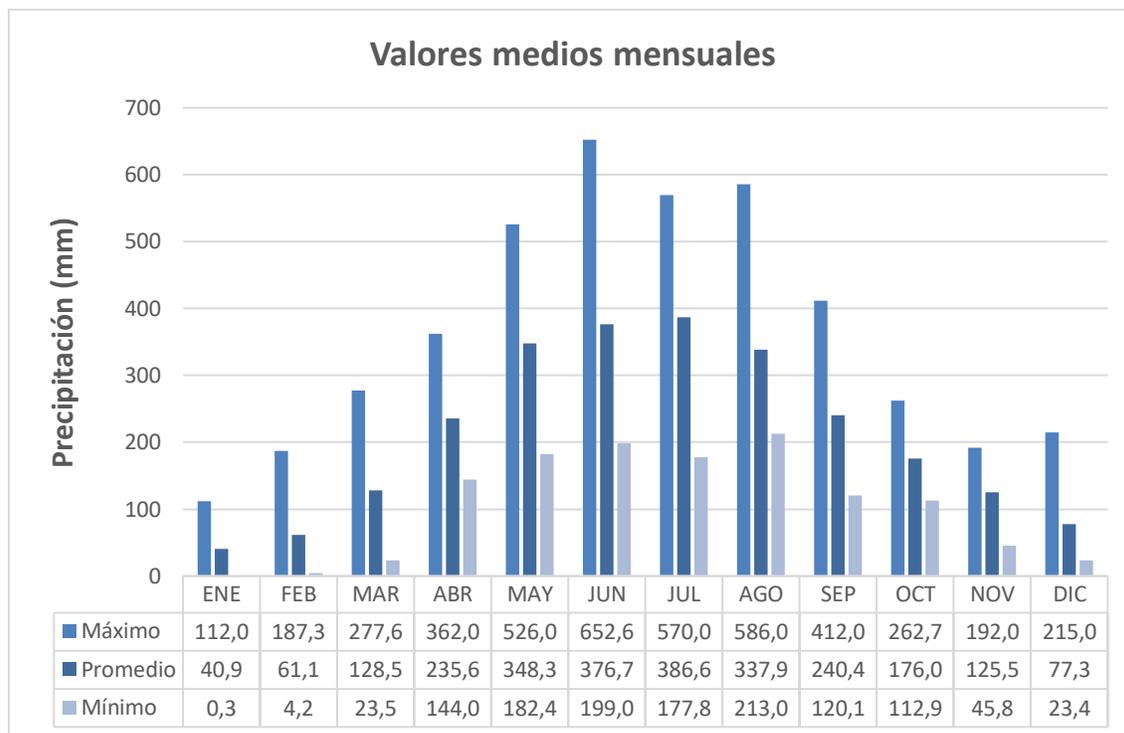


**Figura. 7-4. Número de días estación hidrometeorológica Monterredondo.
Fuente: Elaboración propia.**

7.2.2. Precipitación mensual

Del análisis multianual se obtuvieron los valores de precipitación media mensual presentados en la Figura. 7-5, en esta se puede evidenciar que el régimen de precipitaciones en la zona tiene un comportamiento monomodal, con un periodo lluvioso entre los meses de abril a septiembre con un pico de lluvias en el mes de julio, llegando a registrar en promedio precipitaciones de 386.6mm en este mes, el periodo que corresponde al más seco durante el año se da entre los meses de octubre a marzo, siendo el mes de enero quien registra precipitaciones menores con 40.9mm. La precipitación total anual en promedio es de 2534.86mm.

De otra parte, para los valores extremos, el mes que ha reportado las máximas precipitación corresponde el mes de junio con 652.6 mm en el mes.



**Figura. 7-5. Precipitación mensual estación hidrometeorológica Monterredondo.
Fuente: Elaboración propia.**

7.2.3. Precipitación máxima en 24 horas

En la Figura. 7-6 se presentan los resultados obtenidos para la precipitación máxima en 24 horas, el cual es coherente con el régimen monomodal analizado para precipitación mensual y el número de días de precipitación. El mayor valor máximo en 24 horas promedio del análisis multianual se reporta para el mes de julio con una precipitación de 54.3mm. Los meses que presentan los menores valores promedios son enero y febrero, con valores entre 13.4 y 18.4 mm respectivamente. El valor anual de precipitaciones máximas en 24 horas es de 80.67mm.

En cuanto a los valores máximos históricos, se reportan precipitaciones máximas en 24 horas hasta de 148mm para el mes de julio.



Figura. 7-6. Precipitación máxima en 24 horas estación hidrometeorológica Monterredondo.
Fuente: Elaboración propia.

7.3. Curvas intensidad duración frecuencia - IDF

De acuerdo con la información de precipitación recolectada de estación Monterredondo, se realiza la definición de las curvas intensidad duración frecuencia (IDF), las cuales se estiman mediante el método de Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia (Vargas & Diaz, 1998).

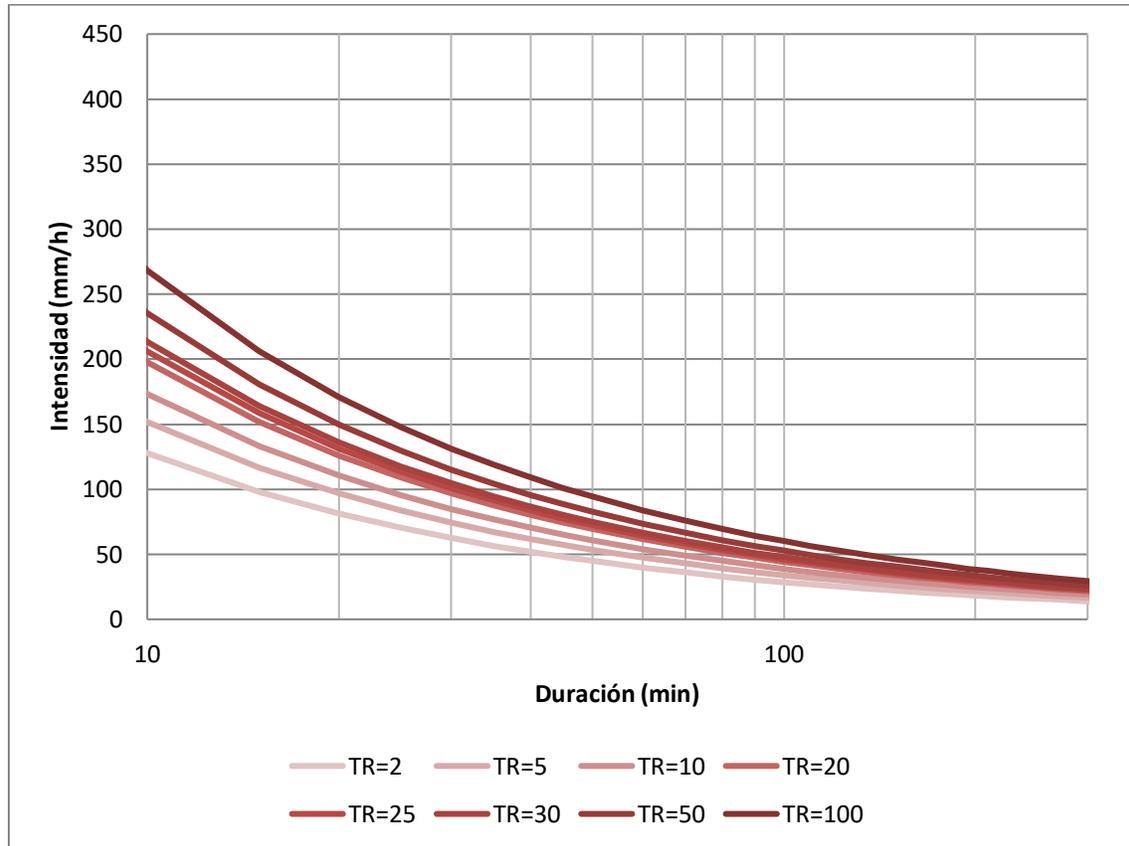
$$I = a \cdot \frac{Tr^b}{t^c} \cdot M^d \cdot ND^e \cdot PT^f \cdot ELEV^g$$

Región	a	b	c	d	e	f	g	h
Andina	1.64	0.19	0.65	0.73	-0.13	0.08	-0.01	34.91

Tabla 7-6. Parámetros utilizados para la definición de curvas IDF.

Precipitación máxima anual (mm) - M	80.67
Número de días de precipitación anual - ND	222
Precipitación total anual (mm) - PT	2534.86
Elevación (msnm) - ELEV	1300

En la Figura. 7-7 se muestran las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia obtenidas para diferentes periodos de retorno.



**Figura. 7-7. Curvas IDF estación Monterredondo.
Fuente: Elaboración propia.**

7.4. Hietograma de diseño

A partir de las curvas IDF se realizó la construcción de los hietogramas diseños mediante el método del bloque alternativo, definiendo la duración del aguacero en 30 minutos en la Figura. 7-8 se presentan los hietogramas obtenidos para los diferentes periodos de retorno.

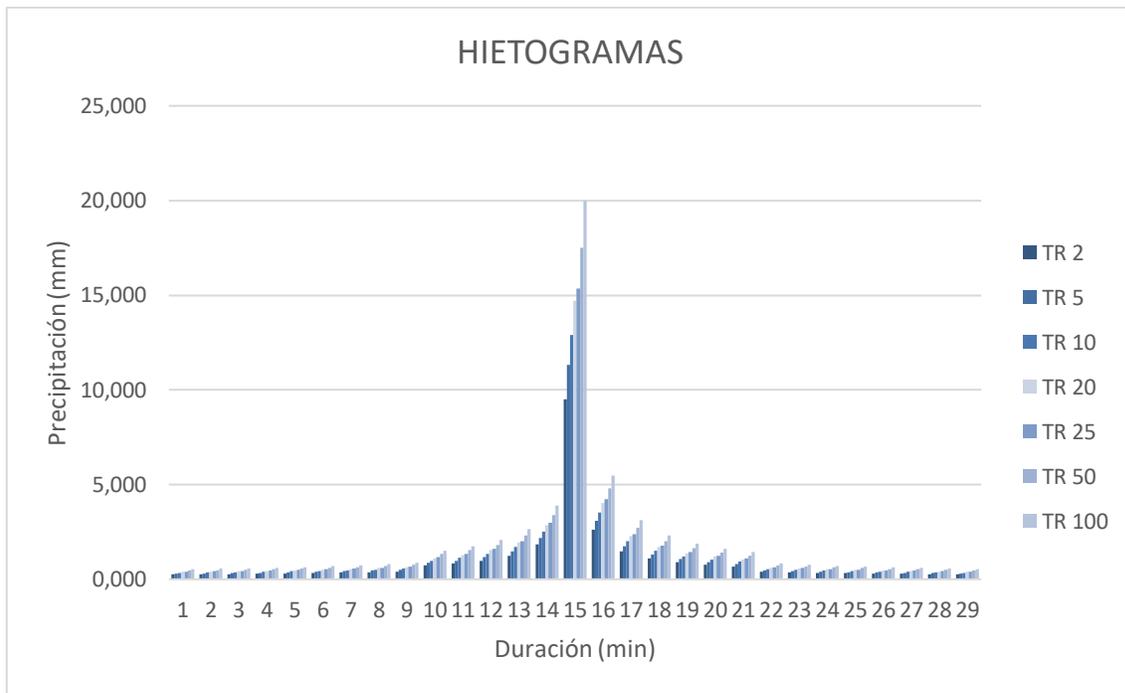


Figura. 7-8. Hietogramas de diseño
Fuente: Elaboración propia.

7.5. Estimación de caudales

Debido a que en la cuenca de estudio no se cuenta con información de estaciones hidrométricas, se debe utilizar un método indirecto para la estimación de los caudales, como lo es el Hidrograma unitario del SCS; para la implementación de este método se utilizó el software HEC- HMS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, USACE).

El programa HEC-HMS permite calcular el hidrograma producido por la cuenca, a partir de datos morfológicos de una cuenca y datos de precipitación de la zona, para esto se establecieron varias subcuencas en el modelo de cuencas "Basin Model", junto con los demás elementos hidrológicos como tramos, uniones y salidas, tal como se presenta en la Figura. 7-9.

Posteriormente, para cada subcuenca se ingresaron los datos de área, número de curva, porcentaje de impermeabilidad y el tiempo de retardo (Tlag).

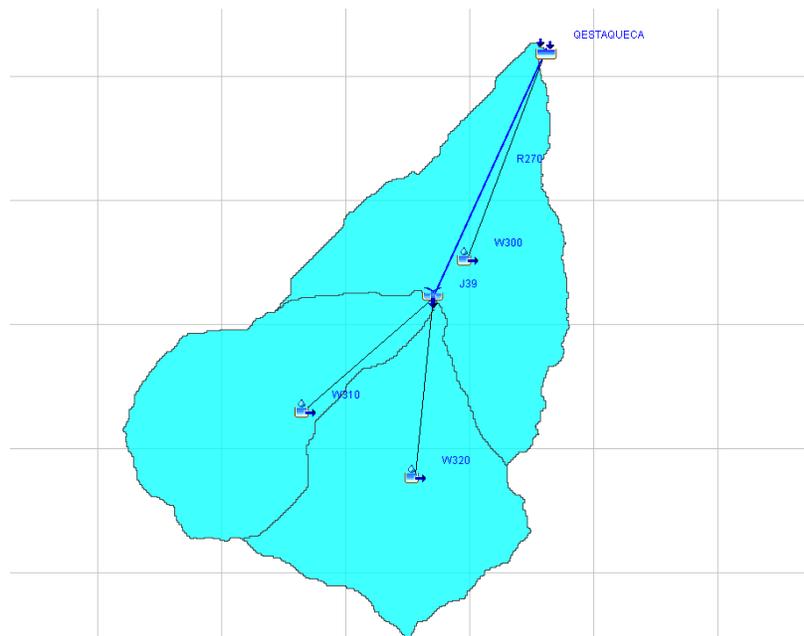


Figura. 7-9. Modelo en HEC-HMS de la quebrada Estaquecá.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7-7 se presentan los parámetros definidos para la modelación de cada subcuenca.

Tabla 7-7. Parámetros utilizados para la modelación en HEC-HMS.

SUBCUENCA	ÁREA (Km ²)	CN	TLag (min)
Q. Estaquecá baja	4.4677	78.577	8.3
Q. Las Lajas	3.7278	73.635	4.8
Q. Las Cajitas	4.1105	73.016	6.5

Una vez ingresada la información en el Basin Model, se procedió con el ingreso de la información de precipitación en el componente del modelo meteorológico “Meteorologic Model”, en este se utilizaron los datos de precipitación de la estación Monterredondo y los hietogramas determinados en el numeral 7.4 para distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años), para luego a cada uno de los hietogramas ser asignado a cada subcuenca.

En las especificaciones de control se indicó el inicio y final de la modelación, junto con el intervalo de modelación, se estableció un tiempo de simulación de 5 horas, el cual abarca la duración de cada hietograma y un periodo de tiempo posterior a la finalización del evento de lluvia, con el propósito incluir el intervalo de tiempo que comprende el tránsito de las avenidas. En cuanto a los intervalos de modelación se estableció que estos fueran de 1 minuto.

Luego de ejecutado el software, en cada subcuenca se modelan los fenómenos que transforman la precipitación en escorrentía directa, obtenido los resultados presentados en la Tabla 7-8, para cada periodo de retorno.

Tabla 7-8. Caudales máximos según metodología del hidrograma unitario del SCS.

Cuenca	Q Máx, m ³ /s					
	Tr (años)					
	2	5	10	25	50	100
Q. Estaquecá baja	15.5	26.8	38.6	59.8	80.7	106.4
Q. Las Lajas	7.5	15.7	25.3	44.2	64.2	89.8
Q. Las Cajitas	6.4	13.7	22.3	38.7	56.3	79.0
Q. Estaquecá	15.5	29.1	44.4	72.5	101.1	137.9

7.6. Estimación de la lluvia detonante

Para la estimación de la lluvia detonante de deslizamientos se implementó el método propuesto por Mayorga (2003), el cual se basa en el análisis de la lluvia antecedente a los eventos de avalanchas reportados y la misma lluvia del evento. Para realizar este análisis se utilizó la información de precipitación diaria de la estación Monterredondo, obteniendo los registros de los años 1997, 2003, 2004, 2010 y 2019 que son los años donde se reportaron eventos de flujo de detritos.

Con el fin de establecer la Lluvia antecedente, se realizó la sumatoria de la precipitación de forma regresiva hasta obtener periodo seco, con la acumulación de esta lluvia y la cantidad de días se construyó un gráfico para cada evento, donde las abscisas corresponden a la cantidad de días y las ordenadas a la precipitación acumulada en mm (Figura. 7-10).

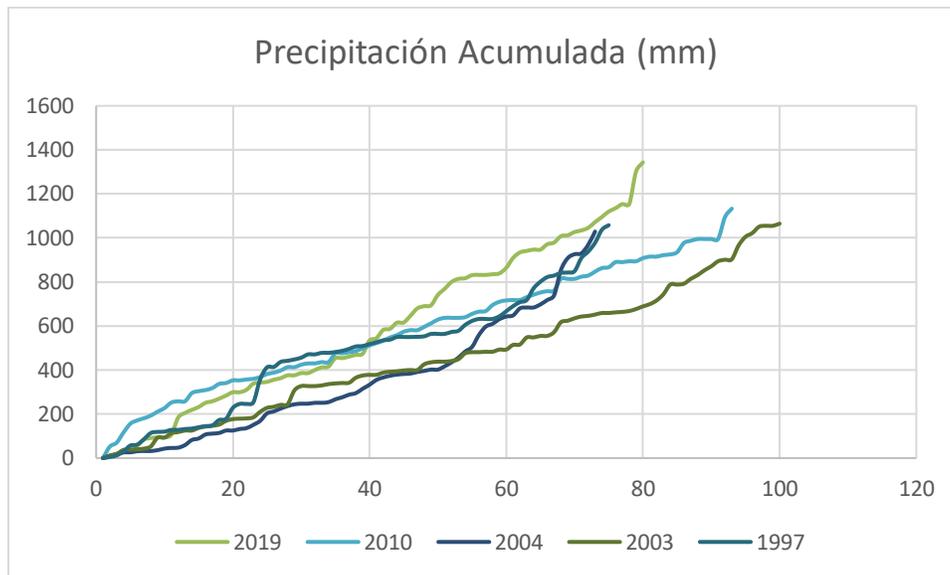


Figura. 7-10. Gráfica de lluvia antecedente para los eventos de flujo de detritos reportados.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la definición de la lluvia antecedente o acumulada, junto con la duración de días, se implementó el modelo de regresión logística para establecer la probabilidad de que se presente un deslizamiento.

$$P(\text{deslizamiento} \mid X_1, X_2) = \frac{1}{1 + e^{-(z)}}$$

$$Z = -19.2837 + 0.1546D + 0.0336LL_EV_D + 16.0931R_LL_D + 0.00152ALT$$

$$R_LL_D = \frac{LL_AC_D}{LL_T_A}$$

Donde:

D= Duración en días

LL_EV_D= Lluvia evento diaria

R_LL_D= Relación entre la lluvia acumulada diaria y lluvia anual

LL_AC_D = Lluvia acumulada diaria

LL_T_A = Lluvia total anual

ALT= Altitud

Este procedimiento de análisis probabilístico debe realizarse para cada evento de flujo de detritos analizado. A continuación, se presentan los resultados de las probabilidades obtenidas para cada evento estudiado de acuerdo con la lluvia antecedente y la lluvia diaria (lluvia del evento).

Tabla 7-9. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 1997.

D (días)	LL_AC_D (mm)	LL_EV_D (mm)	Probabilidad
5	57	27	0.00
10	120	1	0.00
15	140	6	0.00
20	228	50	0.00
25	412	54	0.00
30	456	8	0.00
35	482	4	0.00
40	518	9	0.00
45	550	0	0.00
50	564	0	0.00
55	623	18	0.01
60	667	23	0.05
64	771	53	0.32
65	801	30	0.24
70	849	6	0.29
71	909	60	0.81
72	938	29	0.68
73	978	40	0.82
74	1037	59	0.94

Tabla 7-10. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 2003.

D (días)	LL_AC_D (mm)	LL_EV_D (mm)	Probabilidad
5	38	1	0.00
10	93	0	0.00
15	137	12	0.00
20	177	8	0.00
25	228	18	0.00
30	327	20	0.00
35	339	3	0.00
40	378	3	0.00
45	398	4	0.00
50	438	3	0.00
55	481	5	0.00
60	493	0	0.01
65	555	7	0.03
70	635	11	0.11
75	659	0	0.18
80	689	12	0.46
85	788	0	0.70
90	871	18	0.94
91	894	23	0.96
92	901	7	0.95
93	903	2	0.95
95	1005	39	0.99
100	1065	10	0.99

Tabla 7-11. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 2004.

D (días)	LL_AC_D (mm)	LL_EV_D (mm)	Probabilidad
5	26	0	0.00
10	43	7	0.00
15	89	7	0.00
20	125	0	0.00
25	203	34	0.00
30	247	3	0.00
35	267	13	0.00
40	333	18	0.00
45	382	3	0.00
50	402	0	0.00
55	505	21	0.01
60	643	12	0.03
65	698	14	0.09
66	718	20	0.13
67	739	21	0.17
68	854	115	0.92
69	908	54	0.72
70	926	18	0.50
71	930	4	0.43
72	969	39	0.78
73	1029	60	0.93

Tabla 7-12. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 2010.

D (días)	LL_AC_D (mm)	LL_EV_D (mm)	Probabilidad
5	156	40	0.00
10	227	16	0.00
15	304	9	0.00
20	353	12	0.00
25	382	14	0.00
30	424	11	0.00
35	476	40	0.00
40	512	13	0.00
45	574	16	0.00
50	629	17	0.01
55	655	15	0.02
60	716	6	0.04
65	752	10	0.10
70	814	0	0.21
75	867	4	0.48
80	908	14	0.79
85	935	10	0.89
90	995	0	0.95
93	1133	39	1.00

Tabla 7-13. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos según la lluvia antecedente, año 2019.

D (días)	LL_AC_D (mm)	LL_EV_D (mm)	Probabilidad
5	36	10	0.00
10	94	0	0.00
15	232	13	0.00
20	299	15	0.00
25	346	3	0.00

D (días)	LL_AC_D (mm)	LL_EV_D (mm)	Probabilidad
30	386	10	0.00
35	454	38	0.00
40	534	60	0.00
45	616	1	0.00
50	741	47	0.04
55	831	14	0.04
60	864	25	0.15
65	947	0	0.22
70	1027	15	0.63
75	1120	25	0.90
80	1343	41	0.99

Los resultados obtenidos para los diferentes eventos fueron agrupados por rangos de precipitación acumulada y graficados con el fin de visualizar de acuerdo con los rangos, cuáles son los valores de probabilidad de ocurrencia para que se desarrolle un evento de flujo de detritos (Figura. 7-11).

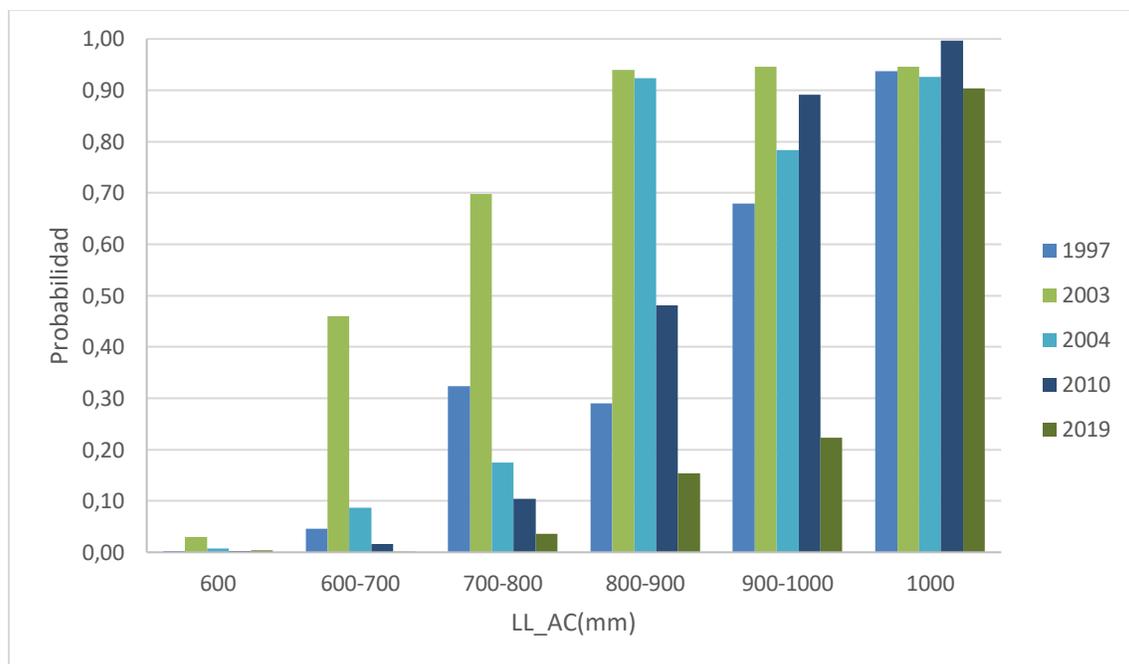


Figura. 7-11. Probabilidad de ocurrencia según rangos de lluvia acumulada para los eventos de flujo de detritos reportados.

Fuente: Elaboración propia.

De la gráfica anterior se puede visualizar que en los rangos superiores a 800 mm de precipitación acumulada tienen una mayor probabilidad de desarrollar eventos de flujo de detritos, con el fin de establecer los umbrales de precipitación acumulada como detonante, se procede a categorizar en 4

clases: bajo, media, media alta y alta, los rangos de precipitación acumulada de acuerdo con su probabilidad (Tabla 7-14).

Tabla 7-14. Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos por rangos de precipitación acumulada.

Rango (mm)	Probabilidad						Clase
	1997	2003	2004	2010	2019	Promedio	
600	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	Baja
600-700	0.05	0.46	0.09	0.02	0.00	0.12	Media
700-800	0.32	0.70	0.17	0.10	0.04	0.27	Media alta
800-900	0.29	0.94	0.92	0.48	0.15	0.56	Alta
900-1000	0.68	0.95	0.78	0.89	0.22	0.70	Alta
1000	0.94	0.95	0.93	1.00	0.90	0.94	Alta

Ahora, para analizar la lluvia del evento y su efecto inmediato sobre el deslizamiento, se utilizó la ecuación definida por Mayorga (2003), quien regionalizó el territorio colombiano en 4 grupos, clasificados como se presenta en la Figura. 3-1.

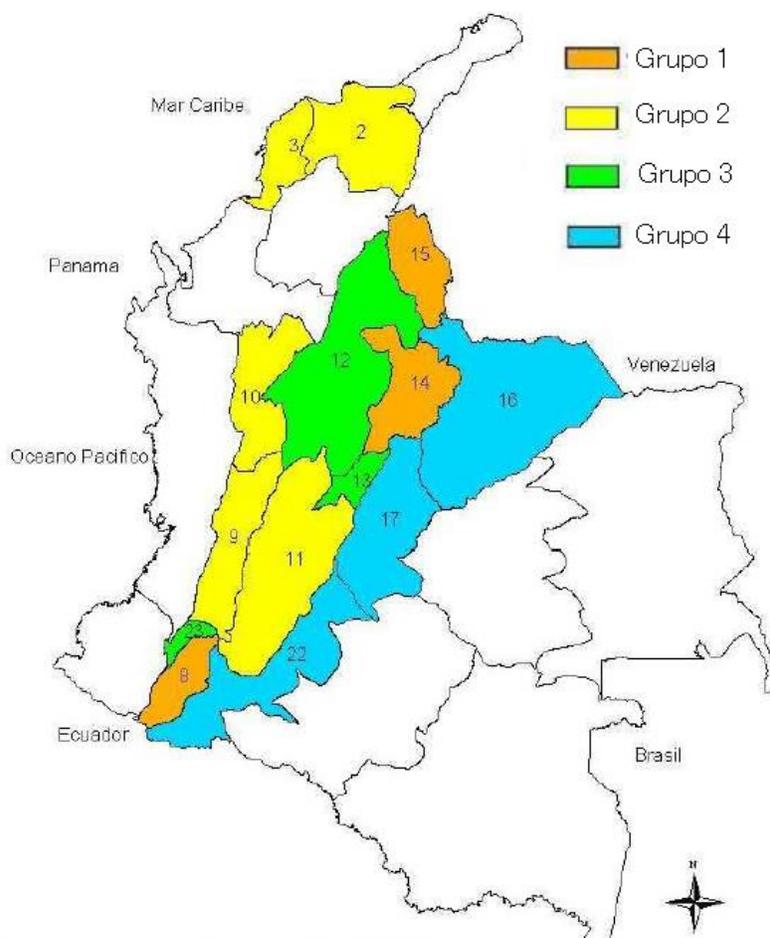


Figura. 7-12. Regionalización del territorio nacional con base en los umbrales de la lluvia acumulada
Fuente: (Mayorga, 2003)

Para esto se utiliza la siguiente expresión:

$$LL_{EV} = A * LL_{AC} + B$$

Donde:

LL_EV= Lluvia evento

LL_AC = Lluvia acumulada

A y B = Parámetros según clasificación (Tabla 7-15)

Tabla 7-15. Parámetros según regionalización (Mayorga, 2003)

GRUPO	A	B
Grupo 1	-1.5824	421.5517
Grupo 2	-0.7479	470.2936
Grupo 3	-0.5172	509.0898
Grupo 4	-0.3550	525.6627

Para el caso de la quebrada Estaquecá, ésta se localiza en el grupo 3 los resultados obtenidos de umbrales de lluvia evento y precipitación acumulada se presentan en la Tabla 7-16.

Tabla 7-16. Definición de umbrales de lluvia evento y precipitación acumulada.

AÑO	LL_EV (mm)	LL_AC (mm)
1997	59	870.2432328
2003	10	964.9841454
2004	60	868.3097448
2010	39	908.912993
2019	41	905.046017
Promedio	41.8	903.4992266

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que con una lluvia antecedente superior al 800 mm y un evento con una precipitación superior a los 41mm se tiene una probabilidad alta para el desarrollo de evento por flujo de detritos.

8. Análisis de Susceptibilidad

El método seleccionado para determinar la susceptibilidad es el método estadístico por pesos de evidencia, este requiere del inventario de deslizamientos y una serie de mapas con los factores condicionantes a evaluar, de acuerdo con la información recopilada estos factores se digitalizaron homogenizando su escala y formato gráfico para ser utilizados en la herramienta información geográfica Qgis, para cada factor se realizó una subdivisión en clase de los valores; a continuación se presentan la elaboración de los mapas con los factores condicionantes a evaluar.

8.1. Mapas de factores condicionantes

8.1.1. Mapa de subunidades geomorfológicas

Las subunidades geomorfológicas caracterizan el terreno de acuerdo con sus rasgos topográficos, estas formas de la superficie del terreno ayudan a identificar los procesos que las formaron, la evolución, su interacción con el entorno y como inciden en fenómenos como son los movimientos en masa (CORMACARENA, 2018).

Para la obtención del mapa de subunidades geomorfológicas se utilizó como mapa base de Geomorfología con escala 1:100.000 desarrollado en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca hidrográfica Rio Guayuriba (CORMACARENA, 2018), clasificando el mapa en 4 clases a evaluar como se presenta en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1. Clasificación de subunidades geomorfológicas.

CLASE	SUBUNIDADES GEOMORFOLOGICAS
1	Laderas de contrapendiente de sierra homoclinal – Sshlc
2	Ladera estructural de sierra homoclinal - Sshle
3	Espolón - Ses
4	Cono lóbulo coluvial y de soiflucción - Dco

El mapa obtenido se presenta en la Figura. 8-1. Mapa de subunidades geomorfológicas.

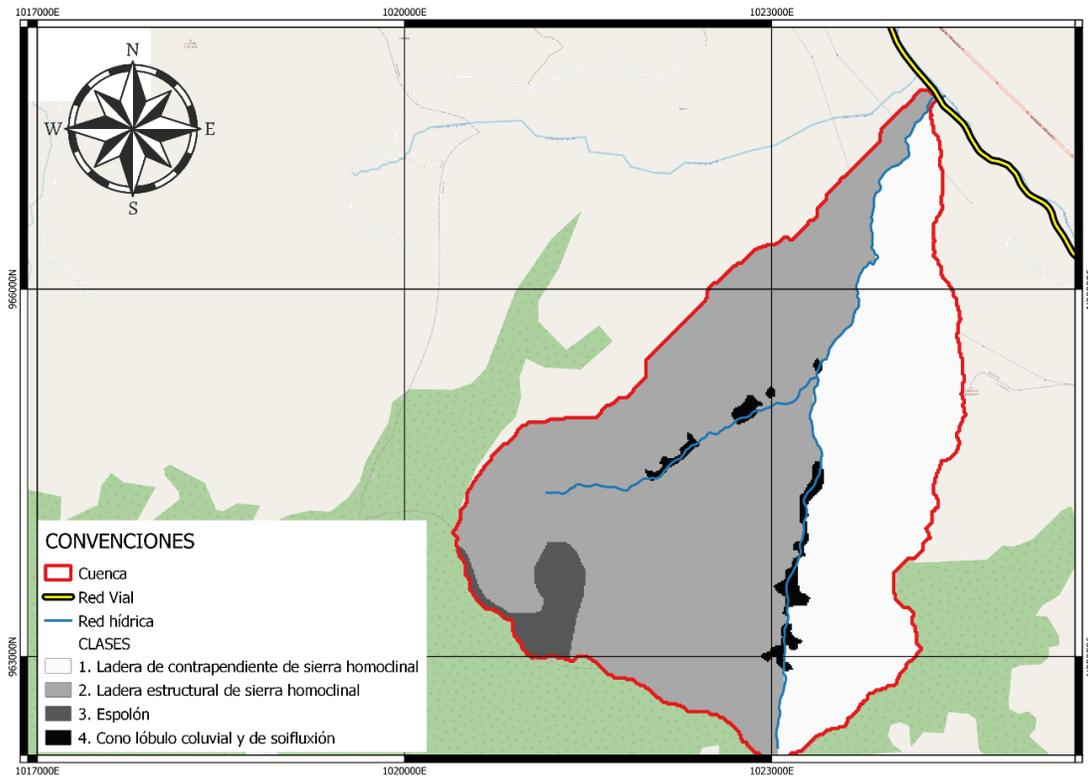


Figura. 8-1. Mapa de subunidades geomorfológicas
Fuente: Elaboración propia

8.1.2. Mapa de pendientes

El mapa de pendientes es uno de los principales factores geométricos que aparece en los análisis de estabilidad, pues permite conocer el comportamiento del terreno, relacionando la condición de estabilidad de una ladera con los componentes de las fuerzas favorables al movimiento y de las fuerzas resistentes (Vidal, 2011), la variable se relaciona directamente con las tensiones de cortes tangenciales y normales, además permite estimar la distribución de agua en una ladera (IDEAM, 2012b). Este factor se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, este puede ser expresado en grados o en porcentajes.

Como base para la obtención del mapa se utilizó un modelo de elevación obtenido del satélite ALOS-PALSAR el cual fue corregido para evitar puntos sumideros utilizando la herramienta QGIS, con este mismo software se calculó el valor de la máxima pendiente a partir del máximo valor de gradiente de las 8 celdas adyacentes. Posteriormente, se realizó una clasificación en clases de las pendientes empleando la categorización establecida por Van Zuidam, 1986.

Tabla 8-2. Clasificación de pendiente
Fuente: (Van Zuidam, 1986)

CLASE	CLASE	GRADOS	PORCENTAJE
1	Pendiente baja	Pendiente menor a 8°	Pendiente menor a 14.05%
2	Pendiente moderada	Pendiente entre 8° y 16°	Pendiente entre 14.05% y 28.67%
3	Pendiente fuerte	Pendiente entre 16° y 35°	Pendiente entre 28.67% y 70.02%
4	Pendiente muy fuerte	Pendiente mayor a 35°	Pendiente mayor a 70.02%

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura. 8-2. Mapa de pendientes.

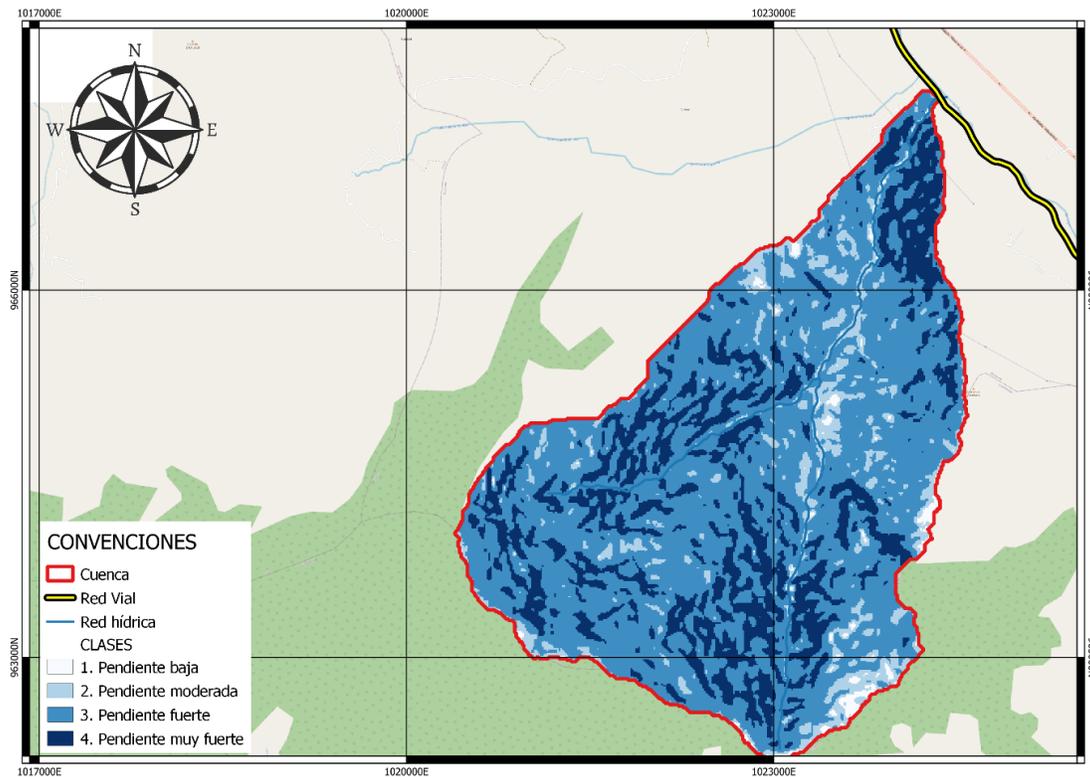


Figura. 8-2. Mapa de pendientes
Fuente: Elaboración propia

8.1.3. Mapa de longitud de la pendiente

El mapa de longitud de la pendiente permite conocer el flujo acumulado de la escorrentía del área de estudio, este factor ayuda a analizar si existe susceptibilidad a desarrollarse movimientos en masa con la presencia de cauces; por ejemplo, se ha evidenciado que la susceptibilidad es menor a una mayor longitud de flujo, ya que significa que es un cauce bien formado; por tanto, el agua tiene una mayor facilidad para desplazarse, disipando velocidad y perdiendo capacidad para desarrollar deslizamientos (IDEAM, 2012b).

Este factor es una variable cuantitativa cuyo valor es medido por el número de píxeles acumulados aguas arriba a la celda a evaluar, entre mayor sea su valor, mayor es la escorrentía que llega a la celda estudiada. Para el presente estudio el mapa se desarrolló mediante el procesamiento del modelo de elevación del satélite ALOS-PALSAR, realizando una clasificación donde las clases fueron definidas de acuerdo con los valores máximos obtenidos (Tabla 8-3).

Tabla 8-3. Clasificación del flujo acumulado.

CLASE	FLUJO ACUMULADO
1	<500
2	500-1000
3	1000-2000
4	>2000

De la clasificación se obtuvo el mapa presentado en Figura. 8-3. Mapa de la longitud de la pendiente.

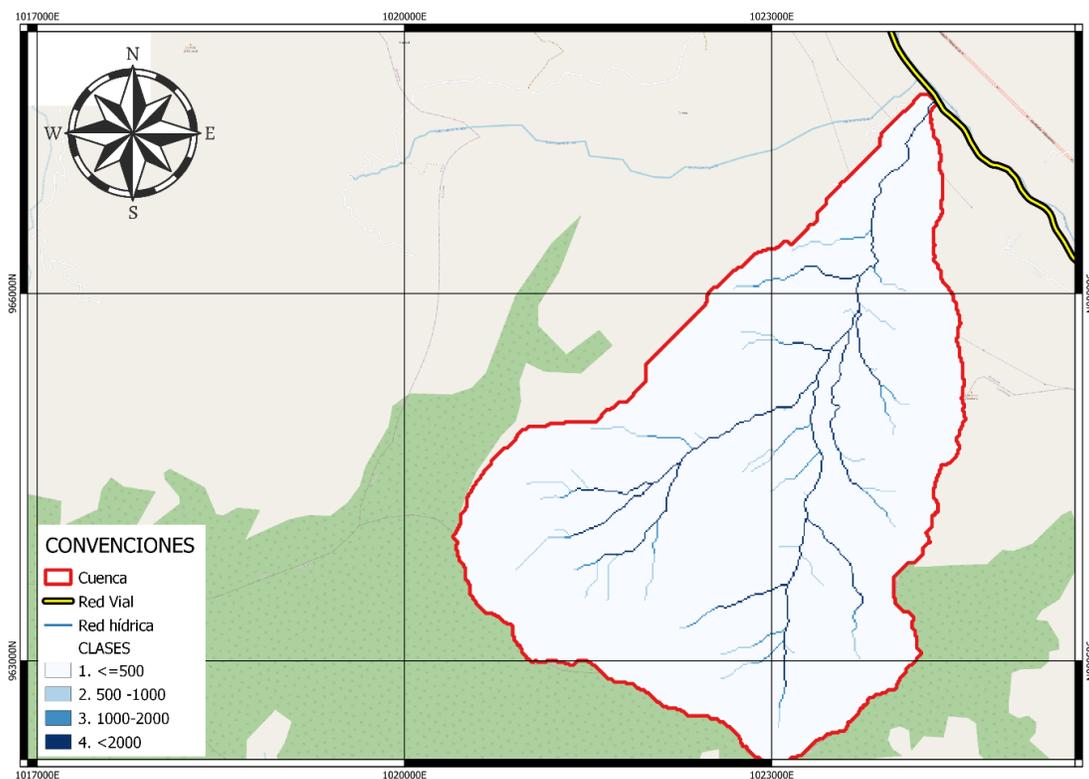


Figura. 8-3. Mapa de la longitud de la pendiente
Fuente: Elaboración propia

8.1.4. Mapa de curvatura

El mapa de curvatura indica la forma de la superficie del terreno en la dirección de la pendiente, definiendo zonas con convexidades y zonas con concavidades, de esta manera se analiza si el terreno tiene la propiedad de concentrar o propagar el agua; mediante este factor se puede ver como la forma del terreno afecta la infiltración y la escorrentía, como contribuye a la aceleración y deceleración del flujo, y finalmente como influye en la erosión y sedimentación (IDEAM, 2012b).

Un valor positivo indica que la superficie es convexa, un valor negativo indica que la superficie es cóncava y un valor de cero indica que la superficie es plana, mediante el procesamiento del modelo de elevación del satélite ALOS-PALSAR, se obtiene los valores de curvatura. De acuerdo con lo anterior se realiza la clasificación del mapa en estas tres clases (Tabla 8-4 y Figura. 8-4).

Tabla 8-4. Clasificación mapa de curvatura.

CLASE	CURVATURA
1	Cóncavo <0
2	Plano 0
3	Convexo >0

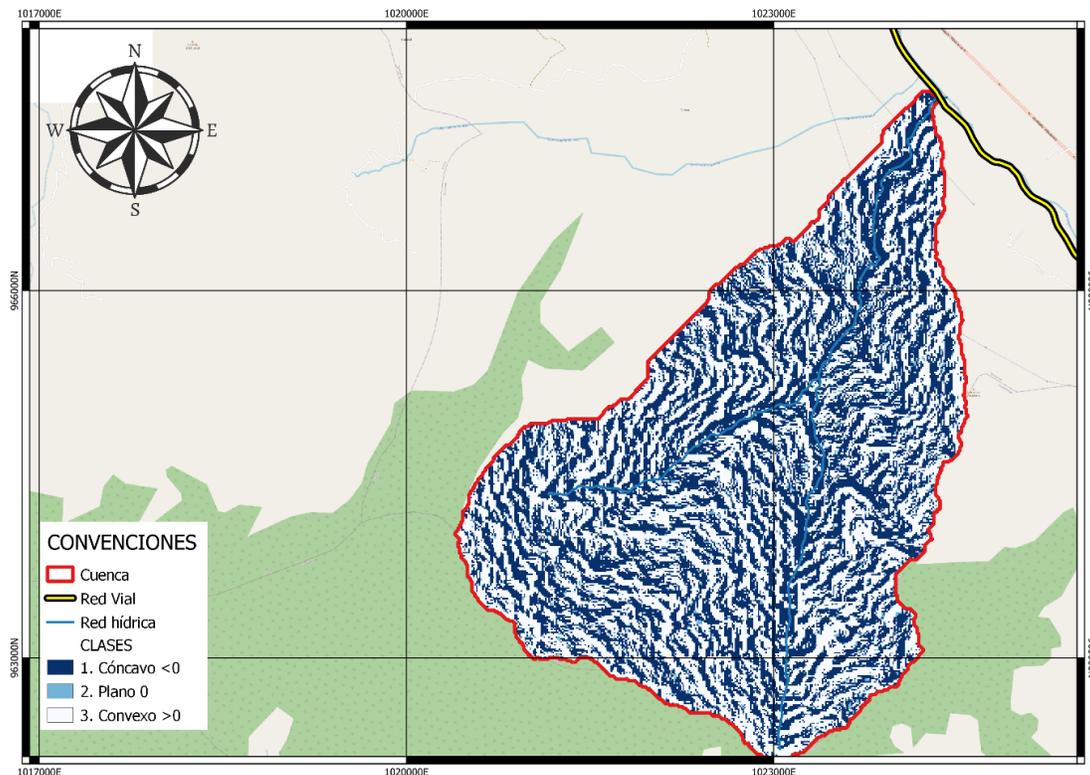


Figura. 8-4. Mapa de curvatura
Fuente: Elaboración propia

8.1.5. Mapa litológico

El mapa litológico indica las características geomecánicas de los diferentes depósitos de rocas, de esta manera se puede relacionar el comportamiento de las propiedades físicas y de resistencia cuando existe la presencia de agua; pues su composición mineralógica, capacidad de retención de humedad, grado de meteorización o fracturación influyen en la estabilidad de una ladera, es uno de los factores que más se tiene en cuenta para el análisis de susceptibilidad, puesto que ofrece respuestas de cómo actúan los diferentes agentes para su alteración (IDEAM, 2012b). Para la elaboración de este mapa se utilizó la cartografía geológica a escala 1:100.000 correspondiente a la plancha 247 – Cáqueza, realizada por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS, 2011a), para este factor se definieron dos clases para su clasificación que corresponden a los dos tipos de formaciones presentes en el área de estudio, tal como se presenta en la Tabla 8-5 y Figura. 8-5.

Tabla 8-5. Clasificación mapa litológico.

CLASE	LITOLOGIA
1	Filitas y Cuarcitas de Guayabetal - PEggu
2	Formación Lutitas de Macanal - K1m

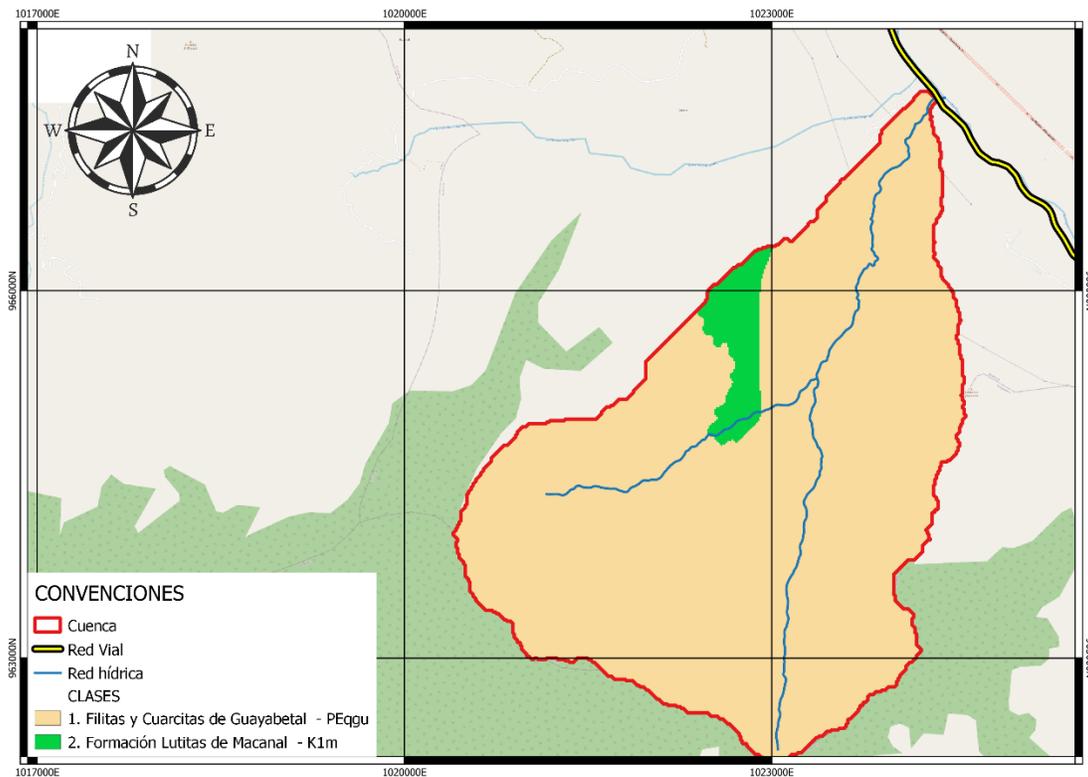


Figura. 8-5. Mapa de litológico
Fuente: Elaboración propia

8.1.6. Mapa de la geología estructural

El mapa de geología estructural involucra el grado de fracturación de las formaciones presentes en la cuenca, este parámetro es influyente a procesos de inestabilidad, puesto que las fallas y discontinuidades afectan la estabilidad de los taludes haciéndolas más susceptibles al desarrollo de movimientos.

Para la obtención de este mapa se utilizó la cartografía geológica, plancha 247 – Cáqueza (INGEOMINAS, 2011a), digitalizando las fallas presentes en la cuenca, se genero un buffer alrededor de la falla con una distancia de 200m de influencia; posteriormente se clasifico el mapa en dos clases, la primera clase representa la presencia de la falla, y en la segunda clase no se tiene presencia de la falla. En la Tabla 8-6 y la Figura. 8 6 se presentan el mapa obtenido.

Tabla 8-6. Clasificación mapa de la geología estructural.

CLASE	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL
1	Fallas
2	No falla

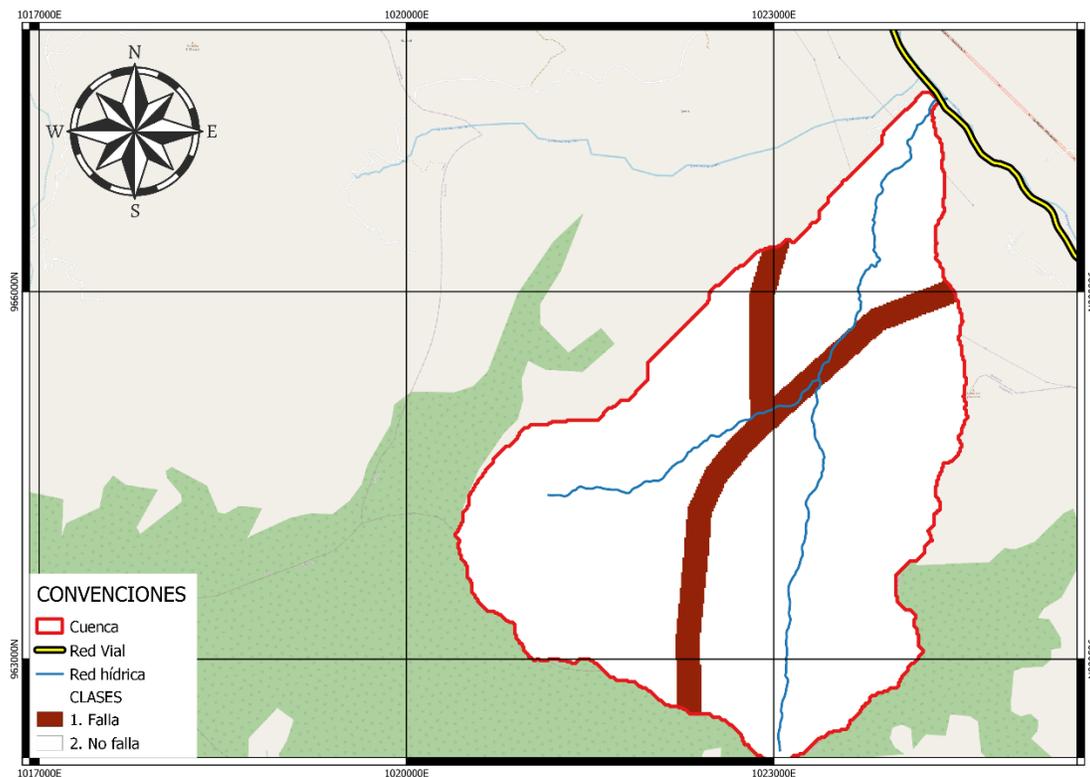


Figura. 8-6. Mapa de la geología estructural
Fuente: Elaboración propia

8.1.7. Mapa del uso del suelo

El mapa del uso de suelo compila las actividades desarrolladas dentro de la cuenca, dando un indicio de las condiciones antrópicas desarrolladas en la zona, las cuales pueden estar relacionadas con la pérdida de cobertura vegetal, que a su vez indica un cambio en los drenajes naturales o cambio de humedad del suelo, lo cual contribuye a la formación de inestabilidades de laderas; es por lo que, es importante tener en cuenta este factor como uno de los parámetros para analizar la susceptibilidad ante flujo de detritos.

Para la generación de este mapa se utilizó como base el mapa de uso de suelo del municipio de Quetame, presentado en el Esquema de Ordenamiento territorial del municipio (EOT Quetame, 1999), del cual se realizó una reclasificación de los usos mediante 6 clases, como se presenta en la Tabla 8-7)

Tabla 8-7. Clasificación mapa del uso de suelo.

CLASE	USOS DE SUELO
1	Zonas de conservación de bosques
2	Zonas de protección de los recursos naturales
3	Zonas de recuperación ambiental
4	Protección hídrica
5	Zonas de desarrollo agropecuario con restricciones
6	Zonas de actividad turística y/o ecoturísticas

En la Figura. 8-7 se presenta el mapa de uso de suelo clasificado en 6 clases.

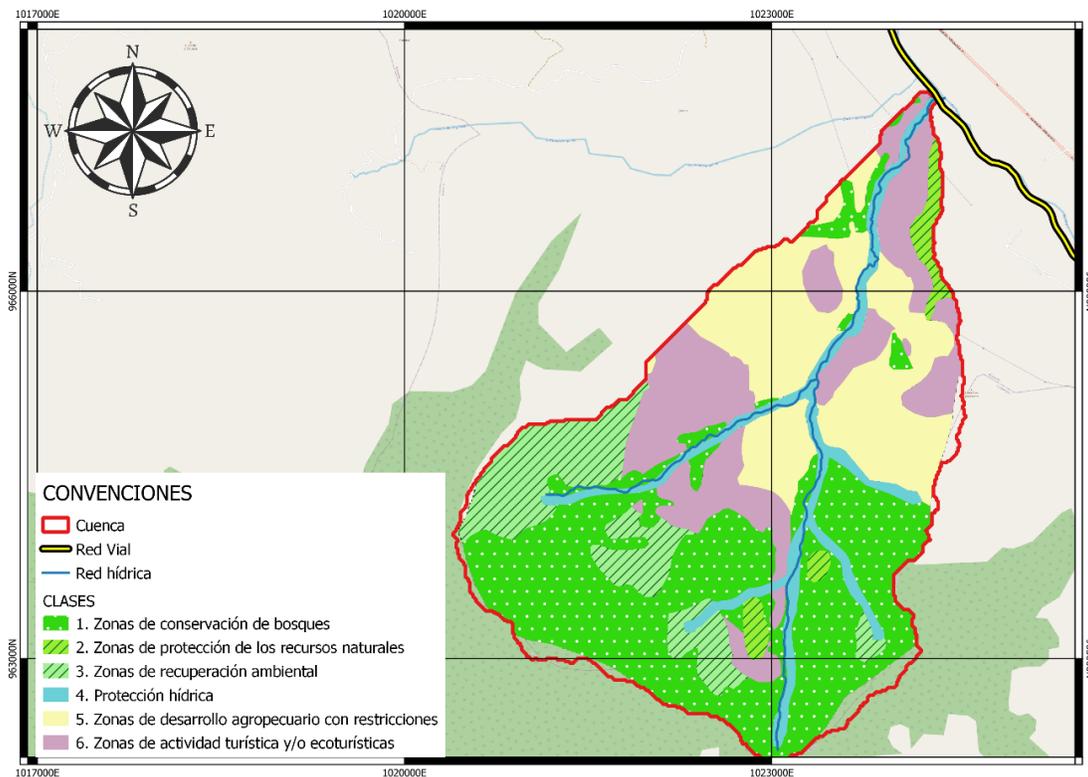


Figura. 8-7. Mapa del uso del suelo
Fuente: (EOT Quetame, 1999) modificado.

8.1.8. Mapa de drenaje

El mapa de áreas de drenaje representa la presencia de cauces en la zona de estudio, este sirve para evaluar como la presencia de estos cuerpos de agua influyen en las inestabilidades que se estén estudiando, pues existe la erosión fluvial que afecta directamente el pie de las laderas, generando deslizamientos de mayor magnitud; este factor es más influyente en las zonas de intensa morfología y densas redes de drenaje.

Para la obtención de este mapa se utilizó la cartografía base digitalizando los cauces, de estos se generó un buffer del drenaje con una distancia de 200m de influencia. La clasificación del factor se realizó en dos clases, que indican la presencia o no del cauce.

Tabla 8-8. Clasificación mapa de drenaje.

CLASE	DRENAJE
1	Drenaje
2	No drenaje

El mapa obtenido se presenta en la Figura. 8-8. Mapa de drenaje.

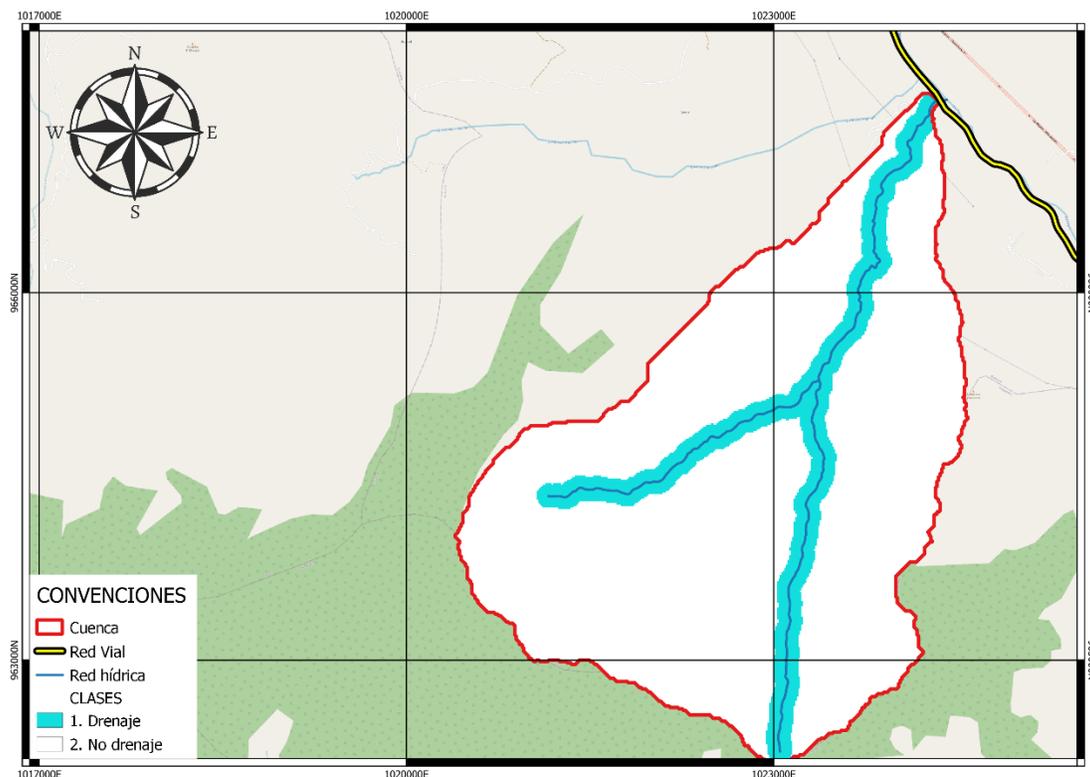


Figura. 8-8. Mapa de drenaje
Fuente: Elaboración propia

8.1.9. Mapa de áreas de drenaje lateral

El mapa de áreas de drenaje lateral representa el aporte de escorrentía que se está aportando en los taludes de los cauces presentes en la cuenca, este factor no había sido considerado en los análisis de susceptibilidad estudiados, para el caso de la cuenca de la quebrada Estaquecá es importante analizar cual es el área aferentes a las laderas, ya que las mayores inestabilidades que se están generando en la cuenca, corresponden a las presentadas en los taludes de los cauces, por lo que se quiere observar si la escorrentía que llega a los taludes tiene la mayor influencia en las inestabilidades de la cuenca.

Para la elaboración del mapa se realizó mediante la herramienta Qgis, la delimitación de las áreas aferentes al cauce utilizando el modelo digital de terreno ALOS-PALSAR de la zona. De esta delimitación de cuencas se realizó una clasificación del mapa en 5 clases teniendo en cuenta el valor máximo del área de drenaje Tabla 8-9.

Tabla 8-9. Clasificación mapa de áreas de drenaje lateral.

CLASE	DRENAJE LATERAL
1	< 107323.6
2	107323.6 - 214558.2
3	214558.2 - 321792.8
4	321792.8 - 429027.4
5	> 429027.4

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura. 8-9. Mapa de las áreas de drenaje lateral.

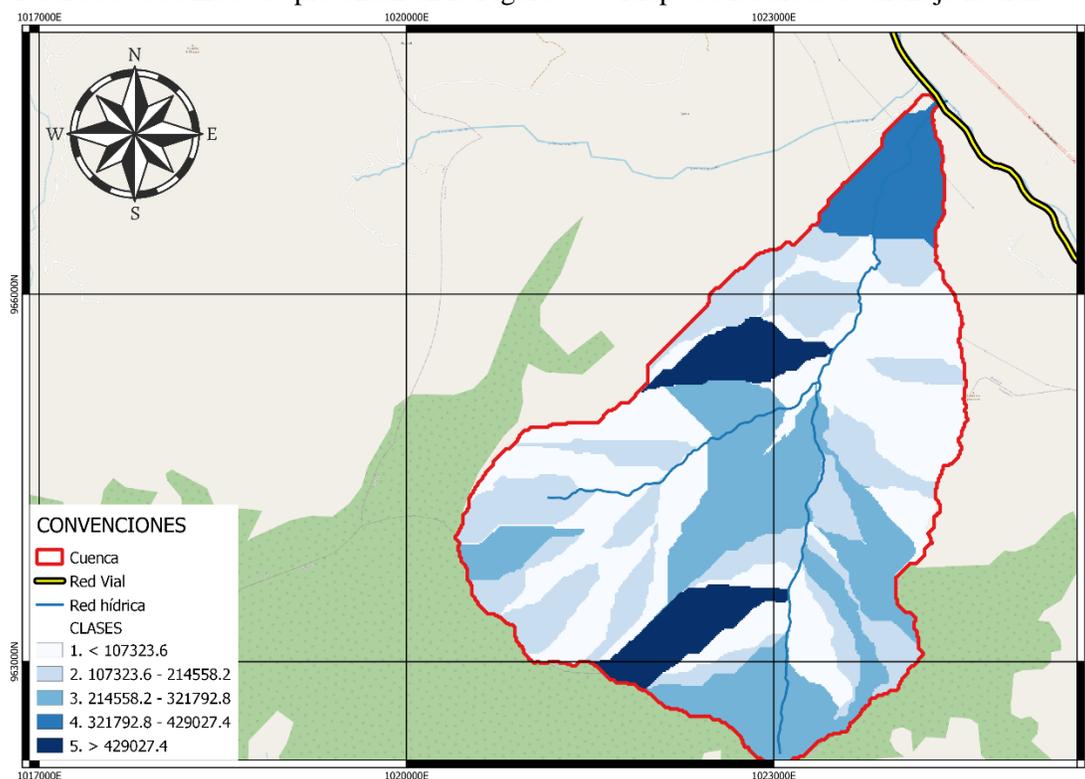


Figura. 8-9. Mapa de las áreas de drenaje lateral
Fuente: Elaboración propia

8.2. Método estadístico por pesos de evidencia

Una vez obtenidos y reclasificados los mapas de los factores condicionantes y de acuerdo con el inventario de deslizamientos realizado, se procede a evaluar el peso tanto positivo como negativo de cada factor, aplicando el método de pesos de evidencia, para lo cual se debe establecer inicialmente el número de píxeles con presencia de flujo de detritos dentro de la clase del factor a evaluar, el número de píxeles con flujo de detritos dentro del factor para las demás clases, el número de píxeles para la clase a evaluar y el número de píxeles para las demás clases del factor evaluado.

$$W^+ = \ln \frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}} \qquad W^- = \ln \frac{\frac{Npix2}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3 + Npix4}}$$

Donde;

Npix1 = número de pixeles que contienen flujos de detritos en la clase

Npix2 = número de pixeles que contienen flujos de detritos en las demas clases del factor

Npix3 = número de pixeles de la clase

Npix4 = número pixeles de las demas clases del factor

Simplificando, las anteriores expresiones se pueden presentar como:

$$W^+ = \ln \frac{\frac{Npix1}{NpixFD}}{\frac{Npix3}{NpixTotal}} \qquad W^- = \ln \frac{\frac{Npix2}{NpixFD}}{\frac{Npix4}{NpixTotal}}$$

Donde;

NpixFD = número total de pixeles que contienen flujos de detritos en el factor

NpixTotal = número total de pixeles del factor

Finalmente se calcula el peso final para cada clase del factor evaluado mediante la resta del peso positivo y el peso negativo.

$$W_f = W^+ - W^-$$

En la Tabla 8-10 se presentan los resultados de los pesos finales obtenidos para cada una de las clases evaluadas en los diferentes factores condicionantes seleccionados. De estos se resaltan en rojo los pesos finales con valores positivos, ya que indican que la clase evaluada tienen una correlación con el desarrollo de movimientos en masa en la zona. Siendo los más altos la clase “Protección hídrica” del factor “Uso de Suelo” con $W_f = 2.574$ y la clase “Drenaje” del factor condicionante “Drenaje” con $W_f = 3.587$, lo cual quiere decir que si existe una fuerte relación entre la presencia de corrientes hídricas y el desarrollo de las inestabilidades.

Tabla 8-10. Evaluación de los pesos finales para los factores condicionales mediante el método pesos de evidencia.
Fuente: Elaboración propia

FACTOR	CLASE	DESCRIPCIÓN	N° Pixeles FD (Npix1)	% Pixeles FD	Pixeles Clase (Npix3)	% Pixeles Clase	Wi +	Wi -	Wf	Pixeles Factor (NpixTotal)	Pixeles FD Factor (NpixFD)
Subunidades geomorfológicas	1	Laderas de contrapendiente de sierra homoclinal - Sshlc	285	17.50	26320	33.94	-0.663	0.222	-0.885	77559	1629
	2	Ladera estructural de sierra homoclinal - Sshle	765	46.96	47149	60.79	-0.258	0.302	-0.560		
	3	Espolón - Ses	0	0.00	2539	3.27	0.000	0.000	0.000		
	4	Cono lóbulo coluvial y de soiflución - Dco	579	35.54	1551	2.00	2.878	-0.419	3.297		
Pendiente	1	Baja (<8°) (<14.05%)	53	3.27	1361	1.73	0.637	-0.016	0.653	78751	1622
	2	Moderada (8° - 16°) (14.05% - 28.67%)	231	14.24	7688	9.76	0.378	-0.051	0.429		
	3	Fuerte (16°-35°) (28.67% - 70.02%)	957	59.00	51355	65.21	-0.100	0.164	-0.264		
	4	Muy fuerte (>35°) (>70.02%)	381	23.49	18347	23.30	0.008	-0.003	0.011		
Longitud de la pendiente	1	<500	1448	88.89	76786	97.50	-0.092	1.493	-1.585	78753	1629
	2	500-100	31	1.90	605	0.77	0.907	-0.012	0.919		
	3	1000-2000	32	1.96	333	0.42	1.536	-0.016	1.552		
	4	>2000	118	7.24	1029	1.31	1.713	-0.062	1.775		
Curvatura	1	Concavo <0	981	60.48	37747	47.93	0.233	-0.276	0.508	78751	1622
	2	Plano 0	24	1.48	2158	2.74	-0.616	0.013	-0.629		
	3	Convexo >0	617	38.04	38846	49.33	-0.260	0.201	-0.461		
Litología	1	Filitas y Cuarzitas de Guayabetal - PEgu	1596	97.97	74359	95.88	0.022	-0.711	0.732	77557	1629
	2	Formación Lutitas de Macanal - K1m	33	2.03	3198	4.12	-0.711	0.022	-0.732		
Geología estructural	1	Fallas	196	12.04	7300	9.41	0.246	-0.029	0.276	77555	1628
	2	No falla	1432	87.96	70255	90.59	-0.029	0.246	-0.276		
Uso del suelo	1	Zonas de conservación de bosques	570	35.12	27627	36.61	-0.042	0.023	-0.065	75460	1623
	2	Zonas de protección de los recursos naturales	29	1.79	1928	2.55	-0.358	0.008	-0.365		
	3	Zonas de recuperación ambiental	7	0.43	9199	12.19	-3.342	0.126	-3.467		
	4	Protección hídrica	822	50.65	5476	7.26	1.943	-0.631	2.574		
	5	Zonas de desarrollo agropecuario con restricciones	96	5.91	16480	21.84	-1.306	0.185	-1.492		
	6	Zonas de actividad turística y/o ecoturísticas	99	6.10	14750	19.55	-1.165	0.155	-1.319		
Drenaje	1	Drenaje	1389	85.27	10713	13.81	1.820	-1.766	3.587	77561	1629
	2	No drenaje	240	14.73	66848	86.19	-1.766	1.820	-3.587		
Áreas de drenaje Laterales	1	< 107323.6	436	26.76	26456	34.21	-0.245	0.107	-0.353	77340	1629
	2	107323.6 - 214558.2	276	16.94	20778	26.87	-0.461	0.127	-0.588		
	3	214558.2 - 321792.8	830	50.95	19311	24.97	0.713	-0.425	1.138		
	4	321792.8 - 429027.4	46	2.82	4557	5.89	-0.736	0.032	-0.768		
	5	> 429027.4	41	2.52	6238	8.07	-1.165	0.059	-1.223		

Posterior a la determinación de los pesos de cada factor, el objetivo fue encontrar una combinación de los factores en donde la función final de susceptibilidad (LSI) tenga los pesos con más significancia, de la evaluación realizada se obtiene la siguiente función de susceptibilidad.

$$LSI = W_f \text{Geomorfología} + W_f \text{Pendiente} + W_f \text{L. Pendiente} + W_f \text{Curvatura} + W_f \text{Litología} + W_f \text{Geología estructural} \\ + W_f \text{Uso del Suelo} + W_f \text{áreas de drenaje laterales}$$

Es decir, se descartó el factor condicional “Drenaje”, ya que era redundante con el delimitado en la clase “Protección Hídrica” del factor condicionante “Usos de Suelo”.

8.3. Validación del mapa de susceptibilidad

Para la validación de los resultados obtenidos se construye la curva de éxito, la cual mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados, obteniendo así que el área bajo la curva tiene un porcentaje del 74%, siendo aceptable ya que el de ajuste debe ser mayor al 70%.

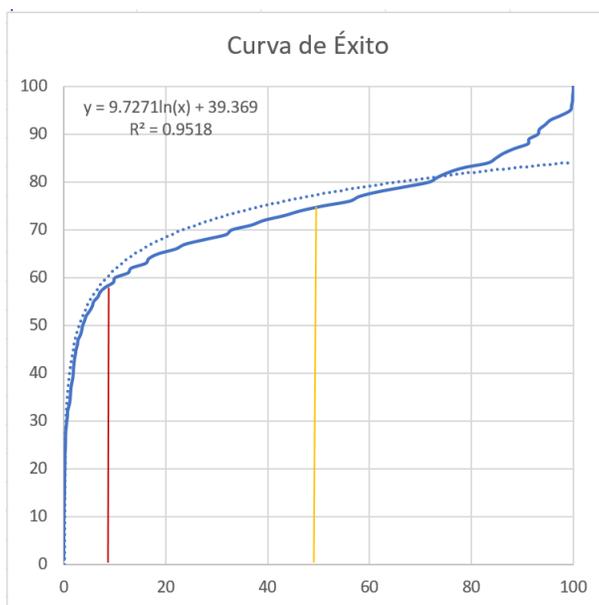


Figura. 8-10. Curva de éxito.
Fuente: Elaboración propia

8.4. Resultados

Para la obtención de mapa de susceptibilidad se procede a generar los mapas por cada factor condicionante de acuerdo con los pesos finales obtenidos de cada clase, para posteriormente sumar

estos pesos de evidencias de la función de susceptibilidad establecida (LSI) mediante la herramienta Calculadora Ráster del software de Sistema de Información Geográfica, Qgis.

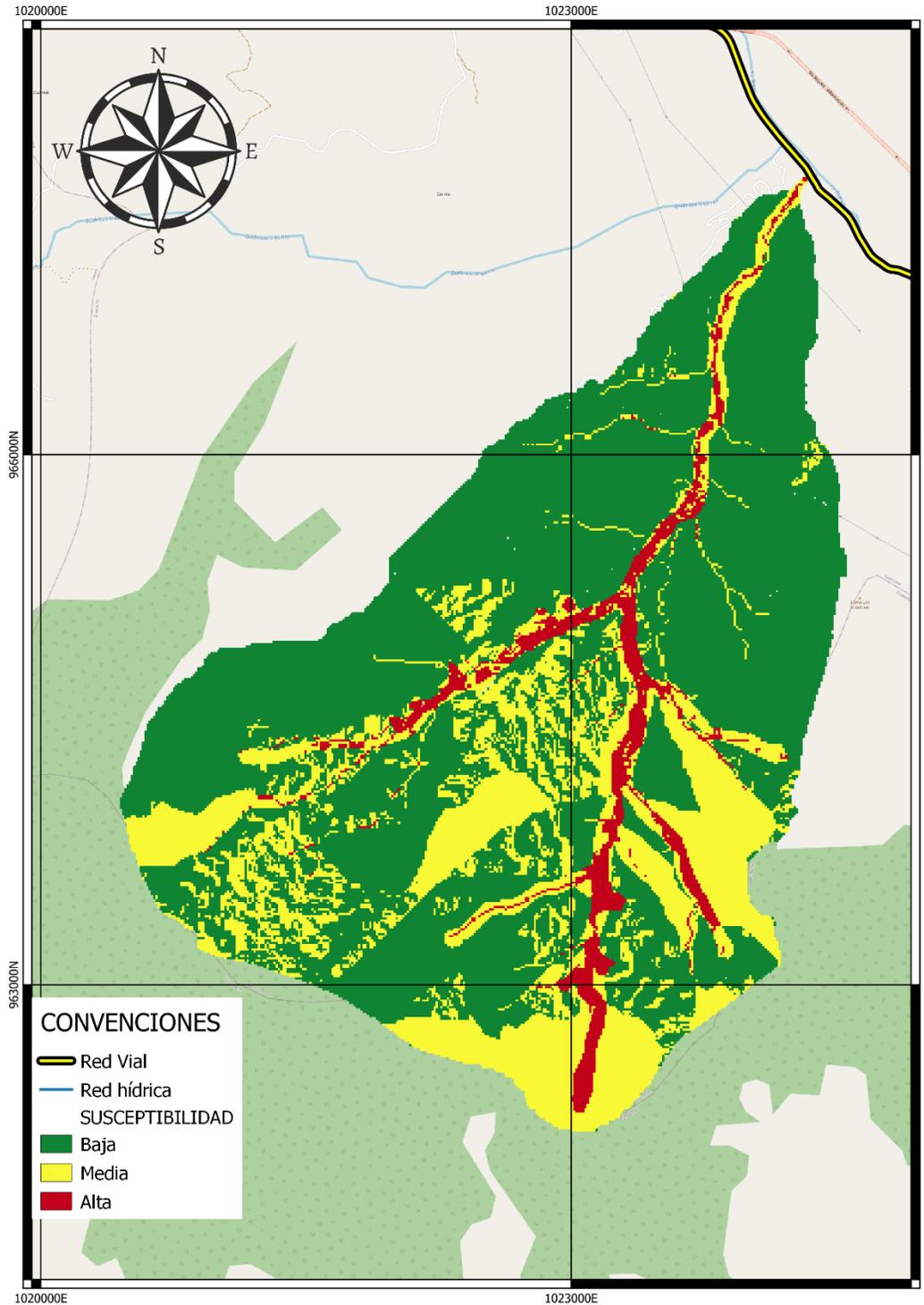


Figura. 8-11. Mapa de la susceptibilidad en la cuenca quebrada Estaquecá.
Fuente: Elaboración propia

9. Análisis de la Amenaza por flujo de detritos

Luego de establecidas las zonas de susceptibilidad alta a deslizamientos en la cuenca, se procede a modelar como estas áreas se propagan sobre el cauce, para lo cual se hace uso del modelo DebrisDice que simula una serie de caminos aleatorios (Montecarlo), para luego generar las trayectorias finales del flujo mediante su probabilidad. Luego de definida la trayectoria del flujo, para establecer hasta qué punto se propaga el flujo, se utilizan dos mecanismos de parada. El primer mecanismo de parada del flujo se evalúa mediante la relación entre el ángulo de alcance y el volumen total del flujo (Corominas, 1996):

$$\tan \beta = 0.97V^{-0.105}$$

Donde:

β = ángulo de alcance

V = volumen de la cantidad total de sedimentos movilizados (m³)

De acuerdo con información suministrada por la concesión de la vía CONIANDINA, el volumen de sedimentos que se ha tenido que retirar en la zona del puente es de un volumen aproximado de 50.000m³, reemplazando este valor se puede estimar que el ángulo de alcance es:

$$\beta = \tan^{-1} 0.97(50.000)^{-0.105}$$

$$\beta = 0.302$$

9.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de amenaza por flujo de detritos evaluada para la propagación de la susceptibilidad clasificada como alta. De igual manera se realiza una clasificación de la amenaza de acuerdo con los valores obtenidos de velocidad, estableciendo esta por medio de cuantiles.

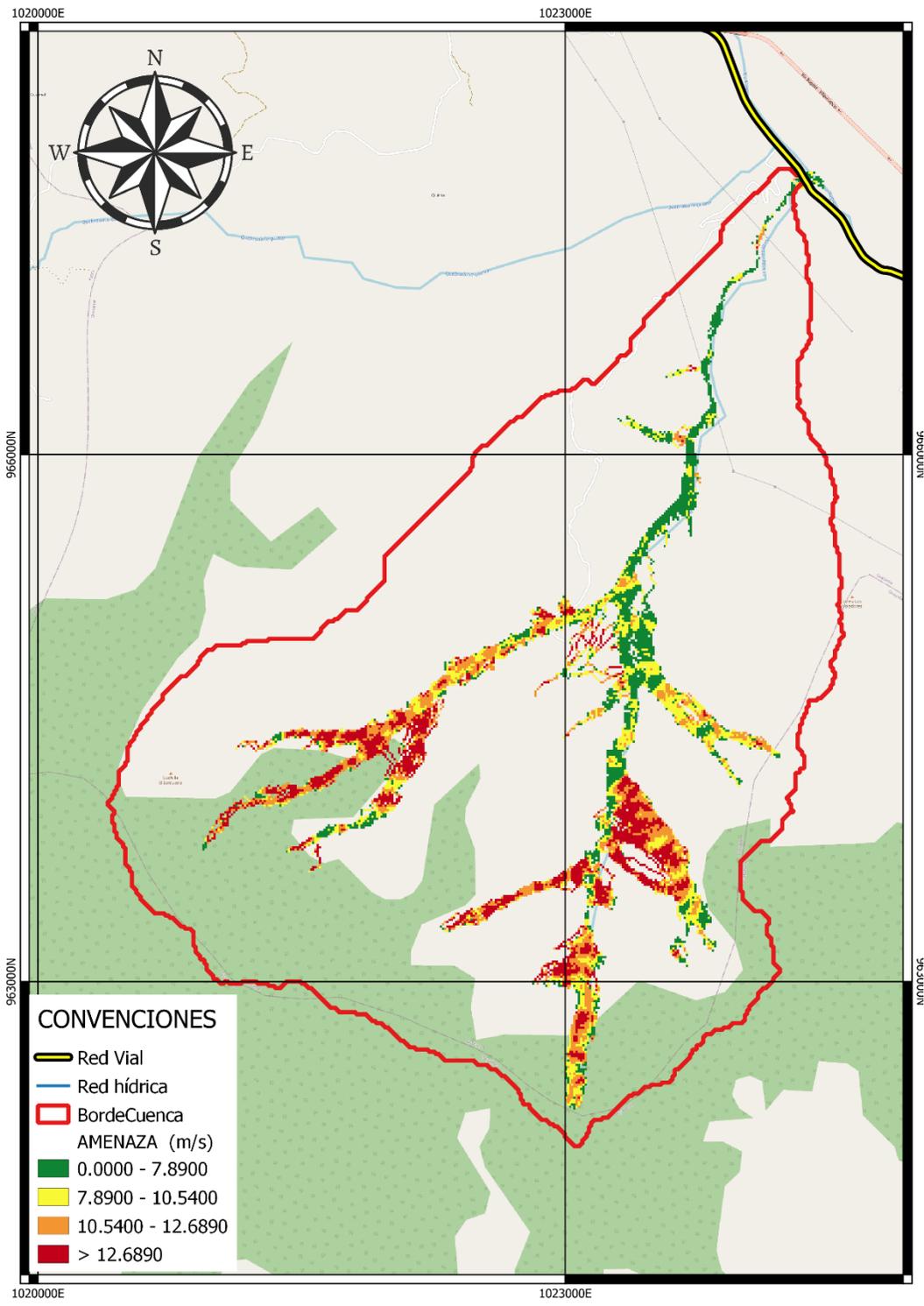


Figura. 9-1. Mapa de amenaza de flujo de detritos en la cuenca quebrada Estaquecá.
Fuente: Elaboración propia

10. Conclusiones y recomendaciones

La cuenca de la quebrada Estaquecá tiene un área de 12 Km² y una longitud de cauce de aproximadamente 6.18 Km con una pendiente del 25.9%, lo que representa una pendiente alta, dando capacidad al flujo para erosionar y transportar sedimentos; adicionalmente, por ser un cauce típico de alta montaña, presenta una sección tipo v, encañonado y conformado por taludes con altas pendientes, los cuales presentan un alto estado de erosión, sólo en algunas zonas se evidencian taludes recubiertos con baja vegetación. Entre sus afluentes se encuentran la quebrada Las Lajas y la quebrada Las Cajitas, esta última evidencia más problemas de degradación en el cauce.

Sobre la cuenca se ha evidenciado en las últimas tres décadas una fuerte actividad de flujo de detritos donde se han generado daños en la infraestructura vial que provocan cierres viales y por ende pérdidas económicas a nivel local y regional. De los eventos ocurridos en la quebrada se reportan los años de 1988, 1997, 2003, 2004, 2010 y 2019.

Una de las razones por las que se puede concluir que se están generando estos eventos de avalanchas, es porque la quebrada se localiza en una zona geológica donde su material es inestable, constituido por filitas cloríticas y cuarzosas que presentan una foliación bien desarrollada, altamente diaclasada, fracturada y fallada, lo que produce caída de grandes bloques, ya que se trata de rocas metamórficas que se presentan en una topografía abrupta de altas pendientes. Adicionalmente, la quebrada se localiza en una zona donde hay presencia de fallas, específicamente se tiene la falla del rio Negro, la falla Quetame y la falla Estaquecá.

De otra parte, del análisis de las imágenes con sensores remotos se identificó que los procesos de inestabilidad se están generando principalmente en las laderas de los cauces, pues no se evidenciaron deslizamientos en otras áreas de la cuenca; por lo que, se intuye que pueden estar relacionados con la evolución dinámica del cauce, como lo son los procesos de socavación.

En cuanto a la intervención antrópica dentro de la cuenca, se considera que es un factor contribuyente en el desarrollo de las inestabilidades, pues se ve una mayor concentración de deslizamientos en la zona de cultivos de la quebrada Cajitas, quebrada con una mayor afectación y una mayor intervención antrópica; sin embargo, no se atribuye que ésta sea la causa principal de los deslizamientos, pues las inestabilidades se han desarrollado a lo largo de ambas quebradas y no únicamente en la zona donde se encuentran las descargas del drenaje de los cultivos.

Adicionalmente; del análisis del uso de suelo se evidenció que la cuenca tiene la mayor parte del área con un uso de suelo de protección y de importancia ambiental, con zonas de conservación de bosques naturales, zonas de protección de los recursos naturales y zonas de recuperación ambiental, lo anterior fue corroborado con el mapa de coberturas donde la mayor parte del área se encuentra compuesta por coberturas de mosaicos de pastos con espacios naturales y coberturas por bosque denso, zonas que también se han visto afectadas en la generación de inestabilidades dentro del cauce.

De lo anteriormente expuesto, se puede concluir que las inestabilidades dentro de la cuenca están relacionadas con la geología del sector y con procesos de socavación del lecho del cauce, pues se intuye que el arrastre de material dentro del cauce, genera la pérdida del pie de los taludes, provocando de esta manera la inestabilidad de las laderas y su remoción en masa.

Por otra lado, de los parámetros morfométricos se pudo corroborar que las subcuencas de la quebrada Las Cajitas y quebrada Las Lajas, tienen características de cuencas con tendencia a ocurrencia de avenidas torrenciales, ligeramente ensanchadas, con tiempos de concentración bajos, lo cual pudo ser confirmado con el inventario de deslizamientos, pues son las subcuencas que presentan una mayor afectación; en cuanto, a la subcuenca de la parte baja de la quebrada Estaquecá, su subcuenca tiene menores pendientes lo que representa un mayor tiempo de concentración, permitiendo que sea más efectiva respuesta frente a un evento de lluvia, lo cual se ve reflejado en el inventario puesto que esta tiene una menor afectación.

En relación con las condiciones hidrológicas, la zona donde se localiza la quebrada Estaquecá presenta en promedio 222 días con lluvia, lo que representa que cerca del 60% del año se tienen condiciones lluviosas, pues tiene un régimen de precipitaciones con comportamiento monomodal con un periodo lluvioso entre los meses de abril a septiembre y un pico de lluvias en el mes de julio, la precipitación total anual se estima sea de 2534.86mm. Referente a los caudales, estos se estimaron que son del orden de 15.5m³/s para un periodo de retorno de 2 años y de 137.9m³/s para un periodo de retorno de 100 años.

De otra parte, como uno de los factores desencadenantes de deslizamientos y de flujo de detritos es la lluvia, se realizó el análisis para la estimación de los umbrales de precipitación acumulada como detonantes, de lo cual se obtuvieron 4 rangos de precipitación acumulada de acuerdo con probabilidad a desarrollar eventos de flujo de detritos, los cuales fueron categorizados de la siguiente manera: para rangos inferiores a una precipitación acumulada de 700mm se tiene una probabilidad baja, de 700 -

800mm una probabilidad media, de 800-900mm una probabilidad media a alta y para una precipitación acumulada superior a 900mm una probabilidad alta.

En general, se puede concluir que con una lluvia antecedente superior al 800 mm y un evento con una precipitación superior a los 41mm se tiene una probabilidad alta para el desarrollo de evento por flujo de detritos.

Referente a la evaluación por el método estadístico por pesos de evidencia de la susceptibilidad, se identificó que las clases de los factores condicionantes que más tenían correlación con el inventario de deslizamientos, son la clase “Protección hídrica” del factor “Uso de Suelo” con $W_f=2.574$ y la clase “Drenaje” del factor condicionante “Drenaje” con $W_f=3.587$, de esta manera se confirmó que si existe una fuerte relación entre la presencia de corrientes hídricas y el desarrollo de las inestabilidades.

Del mapa de susceptibilidad se obtuvo que la susceptibilidad clasificada como alta se localiza sobre los cauces de la cuenca, la susceptibilidad media se desarrolla principalmente en la parte alta de la cuenca y la susceptibilidad baja en la parte baja de la cuenca.

En cuanto al mapa de amenaza, se ve que las mayores velocidades se desarrollan en la parte alta de la cuenca, en las quebradas Las Lajas y Las Cajitas, que es donde se tienen las mayores pendientes y donde se presentan los mayores volúmenes de propagación, en esta zona se reportan velocidades superiores a los 12.689m/s; por el contrario, en la parte baja de la cuenca se presentan las menores velocidades; no obstante, estas aún son altas con valores de hasta 7.89m/s.

Si bien en el presente trabajo se estimaron las zonas de susceptibilidad y el mapa de amenaza presentando los valores de velocidad del flujo, se recomienda realizar estudios más profundos donde se analice de manera multidisciplinaria la cuenca, empleando metodologías que puedan establecer las alturas del flujo y de depositación, para de esta manera lograr establecer el riesgo que podría sufrir la infraestructura existente, específicamente el puente que da paso a la vía Bogotá - Villavicencio del PR46+600, pues se debe analizar el gálibo del puente teniendo en cuenta el caudal sólido que transporta la quebrada. Adicionalmente, estos estudios deben estar enfocados en establecer el grado de deterioro de la cuenca y la propuesta de acciones preventivas y correctivas.

Así mismo, se recomienda dar un manejo integral y control de la cuenca mediante la ejecución del plan de ordenación y manejo de la cuenca, pues en cuanto a los usos del suelo se debe ejercer un

control en el drenaje de los cultivos que descargan en las márgenes de las quebradas, ya que contribuye a inestabilizar los taludes del cauce.

De otra parte, durante el desarrollo de esta tesis se evidenció que en la zona existen cuencas con características y problemáticas similares a la cuenca de la quebrada Estaquecá, por lo que se recomienda en futuros trabajos realizar un inventario de estos cauces con tendencias al desarrollo del flujo de detritos, para de esta manera tener un mayor conocimiento a nivel regional de la zona.

Del mismo modo, se recomienda como futuro trabajo académico el desarrollo un modelo de rotura de talud, para entender y simular con mayor detalle las inestabilidades que se están generando en las laderas de los cauces.

11. Bibliografía

- Aristizábal, E., Vásquez, M., & Ruíz, D. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *TecnoLógicas*, 22(46), 39–60.
- Aristizábal, E., & Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra. *DYNA*, 73(149), 5–16.
- Bregoli, F., Medina, V., & Bateman, A. (2018). TXT-tool 3.034-2.1 a debris flow regional fast hazard assessment toolbox. In *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools* (Vol. 2, pp. 225–234). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57777-7_10
- Chow, V. te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw Hill Interamericana S.A.
- Ley 1523 de 2012, Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones, (2012).
- CORMACARENA. (2018). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Guayuriba*.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 260–271.
- CORPORINOQUIA. (2012). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Negro (Jurisdicción de Corporinoquia). Informe Técnico*.
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3–4), 209–227. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8)
- Dietrich, W. E., & Montgomery, D. R. (1998). *SHALSTAB*.
- el Tiempo. (1997, July 19). *Territorio entre el agua y el fuego*.
- el Tiempo. (2004, June 21). *Una quebrada volvió a cerrar la vía al llano*.
- el Tiempo. (2010, July 23). *Vía al Llano con paso restringido por deslizamientos*.
- Esquema de Ordenamiento Territorial. Municipio de Quetame*. (1999).
- García Rodríguez, M. J. (2008). *Metodología para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. Universidad de Alcalá.

- GITS-UPC. (2012). DebrisDice. In *Universidad Politécnica de Cataluña. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos*.
- GITS-UPC. (2013). *Debris Flow Initiation Models*.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98, 239–267.
- Hidroconsulta S.A.S. (2019). *Visita técnica a la quebrada Estaquecá en su cuenca media y en el sitio de cruce con el corredor vial Bogotá-Villavicencio*.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2011a). *Plancha 217 Cáqueza. Escala 1:100.000*.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2011b). *Cartografía geológica de la plancha 217 Cáqueza. Memoria explicativa. Escala 1:100.000*.
- Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2012a). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000*.
- Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2012b). *Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa*.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. In *Ministerio de Transporte, Presidencia de la República*.
- Jojoa Chantre, O. A. (2003). *Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de Mocoa departamento del Putumayo*.
- Legorreta Paulín, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo Hubp, J., Paredes Mejía, L. M., & Aceves Quesada, F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Oletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 343–354.
- Mayorga, R. (2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7(ISSN-0124-6984), 157–168.
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería* (Escuela Colombiana de Ingeniería, Ed.; Primera edición).
- Moreno, E. (2014). *Elementos finitos mixtos estabilizados para flujos viscoplásticos*.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., & Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119, 244–261.

- Osorio, E. (2006). *Relaciones entre lluvias horarias y la generación de avalanchas en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Páez, J. P. (2016). *Modelación matemática de flujos de avalancha*.
- Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, VII, 1–12.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1–4), 17–66. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90082-Q](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90082-Q)
- Ramos, A. M., Trujillo, M. G., & Prada, L. F. (2015). Niveles umbrales de lluvia que generan deslizamientos: Una revisión crítica. *Ciencia e Ingeniería Neogranandina*, 25–2, 61–80.
- Rauld, R., Fock, A., García, F., Letelier, V., Bandilla, P., Gallardo, J., Luca, R., Muñoz, L., & Cancino, O. (2015, October). Estudio de peligro, susceptibilidad, vulnerabilidad y medidas de mitigación en la ruta de alta montaña 115-Ch, Paso Internacional Pehuenche, Región del Maule (~36°S). *XIV Congreso Geológico Chileno*.
- Rib, H. T., & Liang, T. (1978). Recognition and identification. In *Landslides, Analysis and Control. Transportation Research Board, National Academy of Sciences*, 176, 97–114.
- Salimi, E. T., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M., & Holisaz, A. (2017). Estimating time of concentration in large watersheds. *Paddy and Water Environment*, 15, 123–132.
- Sepúlveda, B. A., & Patiño, F. J. (2016). *Metodología para la evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia*.
- Servicio Geológico Colombiano. (2014). *Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 Plancha 111 – Toledo, departamento de Norte de Santander*.
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2017, November 9). *Flujo de detritos*. <https://www.sernageomin.cl/faq-items/flujo-de-detritos/#:~:text=Es%20una%20masa%20m%C3%B3vil%20saturada,movilidad%20y%20gran%20capacidad%20destruictiva>
- Soeters, R., & van Westen, C. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides, investigation and mitigation (Transportation Research Board, National Research Council, Special Report ; 247)* (pp. 129–177). National Academy Press.

- Suaréz, J. (1998). *Deslizamientos: Análisis geotécnico* (Vol. 1).
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda.
- Takahashi, T. (2007). *Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasure*. Taylor & Francis e-Library.
- Vallance, J. W., & Iverson, R. M. (2015). Lahars and Their Deposits. In *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- van Westen, C. J. (1993). *Application of geographic information systems to landslide hazard zonation* (Vol. 1). International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial Photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping* (Smits Publishers, Ed.).
- Vargas, R. M., & Diaz, G. M. (1998). *Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Universidad de los ANdes.
- Vidal, J. (2011). *Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante S.I.G. en el municipio de Berlín, El Salvador*. Universidad Complutense de Madrid.
- Wang, Z. Y., Lee, J. H. W., & Melching, C. S. (2015). Debris Flows and Landslides. In *River Dynamics and Integrated River Management*. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-25652-3_5
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M., & Mori, J. (2003). Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Engineering Geology*, 68, 373–386.