

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Aplicabilidad del método del Índice de Susceptibilidad Compuesto para la identificación de cuencas susceptibles a la ocurrencia de flujos torrenciales

Sergio Alejandro Gómez Muñoz

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2019

Aplicabilidad del método del índice de susceptibilidad compuesto, para la identificación de cuencas susceptibles a la ocurrencia de flujos torrenciales

Sergio Alejandro Gómez Muñoz

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director:
Carlos Eduardo Cubillos Peña, I.C., M.Sc.

Línea de Investigación:
Modelación de fenómenos y amenazas naturales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2019

Agradecimientos

Al profesor Carlos Eduardo Cubillos por dedicar tiempo a la revisión de mi trabajo, su valioso apoyo en la dirección durante el proceso de elaboración del presente trabajo final de maestría, sus comentarios y observaciones me ayudaron de gran manera para cumplir con los objetivos propuestos.

Resumen

En este trabajo se realizó la aplicación y validación de una metodología para la determinación de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales a nivel de cuenca, esta metodología se denomina el Índice de Susceptibilidad Compuesto (ISC), la cual, a partir de parámetros morfométricos y unidades de cobertura de la tierra realiza una estimación de la susceptibilidad. Los resultados obtenidos fueron validados por medio de comparación con otras metodologías totalmente independientes, las cuales corresponde al análisis cuantitativo de registros históricos, el Mapa de Remoción en Masa del Servicio Geológico Colombiano y el Ordenamiento de cauces de Horton – Strahler. Los resultados obtenidos muestran un buen desempeño del indicador, mostrando que se trata de una herramienta eficaz en la priorización de cuencas susceptibles a este tipo de eventos.

Palabras clave: Flujos torrenciales, susceptibilidad, Índice de Susceptibilidad Compuesto

Abstract

In this work, the application and validation of a methodology for the determination of the susceptibility to the occurrence of torrential flows at basin level was done, this methodology is called the Compound Susceptibility Index (CSI), which, from morphometric parameters and land cover units estimate the susceptibility. The results obtained were validated by means of comparison with other totally independent methodologies, which correspond to the quantitative analysis of historical records, the Mass Removal Map of the Colombian Geological Service and the Horton - Strahler river order. The results obtained show a good performance of the indicator, showing that it is an effective tool in the prioritization of watersheds susceptible to this type of events.

Keywords: Torrential flows, susceptibility, Compound Susceptibility Index

Contenido

	Pág.
1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo General	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
2 Marco Conceptual	3
2.1 Índice de Susceptibilidad Compuesto	4
2.1.1 Indicador Morfométrico	4
2.1.2 Indicador de cobertura	14
2.1.3 Indicador compuesto	16
3 Metodología	17
3.1 Selección área de estudio	17
3.1.1 Información empleada	17
3.1.2 Delimitación de cuencas hidrográficas	18
3.2 Aplicación del indicador de susceptibilidad compuesto (ISC)	18
3.2.1 Determinación de los parámetros morfométricos	18
3.2.2 Identificación de las coberturas del suelo	20
3.2.3 Indicador de Susceptibilidad Compuesto	20
3.3 Verificación de Resultados	20
3.3.1 Registros históricos de ocurrencia de flujos torrenciales	21
3.3.2 Mapa de amenaza por movimientos en masa 2015	21
3.3.3 Ordenamiento de cauces	24
4 Desarrollo	26
4.1 Selección de las cuencas de estudio	26
4.1.1 Quebrada La Liboriana	27
4.1.2 Río Fraile	31
4.1.3 Río Tapartó	32
4.1.4 Río Combeima	34
4.1.5 Quebrada La Negra	36
4.1.6 Ríos Mulato y Sangoyaco	37
4.2 Aplicación del Índice de susceptibilidad compuesto	41
4.2.1 Parámetros Morfométricos	41
4.2.2 Coberturas del suelo	51
4.2.3 Indicador de Susceptibilidad	61
5 Análisis de Resultados	62
5.1 Validación de resultados	65
5.2 Análisis Comparativo	70
6 Conclusiones	73
7 Recomendaciones	75

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2.1 Curva Hipsométrica y función de densidad	9
Figura 3.1 Modelo de elevación de terreno cuenca	19
Figura 3.2 Mapa de amenaza por movimientos en Masa - SGC	22
Figura 3.3. Esquema definición orden de Horton	24
Figura 4.1 Delimitación cuenca quebrada Liboriana	26
Figura 4.2 Perfil longitudinal quebrada Liboriana	29
Figura 4.3. Localización general cuenca quebrada La Liboriana	30
Figura 4.4. Localización general cuenca río Fraile	31
Figura 4.5 Perfil longitudinal río Fraile	32
Figura 4.6. Localización general cuenca río Tapartó	33
Figura 4.7 Perfil longitudinal río Tapartó	34
Figura 4.8 Perfil longitudinal río Combeima	35
Figura 4.9. Localización general cuenca río Combeima desembocadura	35
Figura 4.10. Localización general cuenca quebrada La Negra	36
Figura 4.11 Perfil longitudinal quebrada La Negra	37
Figura 4.12 Perfil longitudinal río Mulato	38
Figura 4.13 Perfil longitudinal río Sangoyaco	38
Figura 4.14. Localización general cuenca ríos Mulato y Sangoyaco	40
Figura 4.15 Relaciones entre los parámetros de forma y el área de drenaje	43
Figura 4.16 Relaciones entre los parámetros de la curva hipsométrica y el área de drenaje	45
Figura 4.17 Relación entre los parámetros asociados al relieve y el área de drenaje.....	47
Figura 4.18. Coberturas cuenca quebrada La Negra.....	52
Figura 5.1 Componente del indicador Morfométrico del estudio de Rogelis	64
Figura 5.2 Componente del indicador Morfométrico	64
Figura 5.3 Indicador de Susceptibilidad compuesto (Rogelis)	65
Figura 5.4 Indicador de Susceptibilidad compuesto	65
Figura 5.5 Amenaza movimientos en masa cuenca río Fraile	67
Figura 5.6 Relación entre el Indicador Morfométrico y el área de las cuencas	71
Figura 5.7 Relación del Número de Orden de Horton con el Indicador Morfométrico	72

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2.1 Componentes principales y sus variables correspondientes	5
Tabla 2.2 Leyenda nacional de coberturas niveles 1 y 2	15
Tabla 2.3 Matriz de clasificación de susceptibilidad.....	16
Tabla 4.1 Cuencas hidrográficas seleccionadas.....	27
Tabla 4.2. Parámetros asociados al tamaño de la cuenca.....	41
Tabla 4.3. Parámetros asociados a la forma de la cuenca	42
Tabla 4.4. Parámetros asociados a la curva hipsométrica de la cuenca	44
Tabla 4.5. Parámetros asociados a la energía potencial de la cuenca	46
Tabla 4.6. Componente del tamaño de la cuenca.....	48
Tabla 4.7. Componente de forma de la cuenca	48
Tabla 4.8. Componente hipsométrica de la cuenca	49
Tabla 4.9. Componente de energía de la cuenca	49
Tabla 4.10. Indicador morfométrico	50
Tabla 4.11. Coberturas (2010-2012) Cuenca quebrada La Negra	51
Tabla 4.12. Coberturas subcuenca quebrada La Negra (2010-2012)	53
Tabla 4.13. Coberturas Cuenca Río Fraile (2010-2012)	53
Tabla 4.14. Coberturas Subcuenca Río Fraile (2010-2012).....	54
Tabla 4.15. Coberturas (2010-2012) Cuenca quebrada La Liboriana	54
Tabla 4.16. Coberturas Subcuenca quebrada Liboriana (2010-2012).....	55
Tabla 4.17. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Mulato.....	55
Tabla 4.18. Coberturas subcuenca río Mulato (2010-2012).....	56
Tabla 4.19. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Sangoyaco.....	56
Tabla 4.20. Coberturas subcuenca río Sangoyaco (2010-2012).....	57
Tabla 4.21. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Combeima – Villa Restrepo	57
Tabla 4.22. Coberturas subcuenca río Combeima – Villa Restrepo (2010-2012).....	57
Tabla 4.23. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Combeima – Ibagué.....	58
Tabla 4.24. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Tapartó	59
Tabla 4.25. Coberturas subcuenca río Tapartó (2010-2012)	59
Tabla 4.26 Porcentajes de cobertura para indicador	60
Tabla 4.27 Calificación del estado de la cobertura de las cuencas	60
Tabla 4.28 Indicador de susceptibilidad compuesto.....	61
Tabla 5.1 Evaluación de la susceptibilidad a partir del número de eventos registrados en cada cuenca.....	66
Tabla 5.2 Comparación resultados	66
Tabla 5.3 Categorías de Amenaza	68
Tabla 5.4 Comparación resultados	69
Tabla 5.5 Orden de Horton – Strhaler.....	69
Tabla 5.6 Resumen resultados obtenidos.....	70
Tabla 5.7 Resultado del Indicador Morfométrico y el Periodo de retorno	70

Introducción

Los impactos generados sobre las poblaciones por la ocurrencia de los flujos torrenciales están directamente relacionados, por lo general, con la ocupación de los cauces, que se da para facilitar la obtención del recurso hídrico para consumo doméstico y el desarrollo de otras actividades económicas como pesca, agricultura y ganadería. A través de la historia se han registrado grandes pérdidas, tanto económicas como de vidas humanas, asociadas a la ocurrencia de estos eventos; por ejemplo, en Venezuela, en diciembre de 1999, tuvo lugar uno de los eventos más catastróficos a nivel mundial, en cerca de 20 corrientes simultáneamente, a lo largo de 50 km de la franja costera; este desastre causó la muerte de unas 20.000 personas (García et al. 2008).

En Colombia, numerosos casos de este tipo han ocurrido a lo largo de la historia. El caso más reciente, fue el ocurrido el 1° de abril de 2017 en el municipio de Mocoa, capital del departamento del Putumayo, en el cual, por intensas lluvias en la parte alta de las cuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco, se produjeron flujos torrenciales que provocaron la muerte de aproximadamente 320 personas. En el municipio de Salgar, Antioquia, las fuertes lluvias de la noche del 17 y madrugada del 18 de mayo de 2015, sobre Cerro Plateado, generaron grandes movimientos en masa y deslizamientos que cayeron al cauce de la quebrada La Liboriana, la cual, transportó un flujo de rocas, detritos y material vegetal hasta el casco urbano del municipio, que terminó con la vida de 104 personas y dejó más de 17.000 habitantes afectados. En 1994, en la cuenca del río Fraile se presentó un fenómeno que generó graves consecuencias para los habitantes de Florida (Valle del Cauca). En el río Tapartó, en el municipio de Andes, Antioquia, ocurrió una avenida torrencial el 25 de abril de 1993, que dejó depósitos de lodos con un espesor promedio de 30 cm y causó socavación del lecho del río (Montoya, Silva, and González 2009). Con este panorama, se crea la necesidad de entender cómo se presentan, e identificar dónde pueden ocurrir estos eventos y evitar o mitigar los impactos de la mejor manera posible.

Debido a la dificultad de implementar sistemas de alerta temprana efectivos ante la ocurrencia de flujos torrenciales en todos los municipios del país susceptibles a estos fenómenos naturales, para efectos de la valoración y mitigación del riesgo es importante identificar las áreas que presentan un mayor grado de amenaza a causa de estos eventos; esto, con el fin de priorizar las cuencas en las cuales sea imperativo desarrollar estudios detallados e implementar sistemas de alerta temprana, como parte esencial de la prevención de desastres. Por esta razón, resulta de interés evaluar la aplicabilidad de un método sencillo para determinar áreas susceptibles a la ocurrencia de flujos torrenciales; de manera que se plantea aquí evaluar la aplicabilidad del método denominado Indicador de Susceptibilidad Compuesto para tal fin, que fue desarrollado por Rogelis y Werner en 2014 en el marco del proyecto FORESEE de la UNESCO.

El método se basa en la determinación de parámetros morfométricos de las cuencas estudiadas, que representan de alguna forma su potencial comportamiento torrencial, así como la determinación de las coberturas del suelo presentes. Es un método de carácter regional, que para su implementación requiere el uso de información de libre acceso a nivel global y nacional, y su procesamiento se realiza por medio de software de uso libre. Este trabajo se desarrolla con el fin de evaluar la aplicabilidad del método propuesto y de esta manera, contar con una herramienta efectiva en la determinación de áreas susceptibles a la ocurrencia de flujos torrenciales a escala regional. El área de estudio corresponde a cuencas de diferentes regiones del país, localizadas en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Putumayo, Valle del Cauca y Tolima.

1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Como objetivo general de este Trabajo Final de maestría, se planteó evaluar la aplicabilidad de la metodología del Indicador de Susceptibilidad Compuesto, para determinar el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales a nivel de cuenca.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Definir las unidades hidrológicas en las cuales se implementará la metodología, es decir, determinar las cuencas que cuenten con evidencias de ocurrencia de este fenómeno y con la información requerida disponible para evaluar la aplicabilidad de la metodología.
- Determinar la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales, por medio de la aplicación de la metodología del Indicador de Susceptibilidad Compuesto, a cada una de las unidades hidrológicas seleccionadas, en términos de sus características morfométricas y de la cobertura del terreno presentes en cada una de ellas.
- Verificar los resultados de la aplicación de la metodología con base en la información disponible, partiendo de registros históricos de la ocurrencia de flujos torrenciales, así como de información temática generada por el Servicio Geológico Colombiano.

2 MARCO CONCEPTUAL

Los flujos torrenciales son definidos como fluidos en movimiento que se desplazan generalmente por los cauces de las quebradas, en los cuales es transportada una gran cantidad de material sólido (Caballero 2011; García et al. 2008). El material sólido es medido en términos de concentración volumétrica, en cuyo caso la concentración de sedimento se establece como la relación entre el volumen ocupado por la fracción sólida y el volumen total de la mezcla de agua y sedimento. Estos flujos pueden clasificarse como flujos de lodo o flujos de detritos. Los flujos de lodo a su vez pueden ser clasificados como, flujos hiperconcentrados de partículas no cohesivas como arena, que muestran un comportamiento muy fluido y poseen un rango de concentración de sedimentos de hasta el 40%, y como flujos con una concentración alta de limos y arcillas, entre el 45 y el 55%, que presentan un comportamiento altamente viscoso, capaz de transportar adicionalmente clastos de gran tamaño (García et al. 2008). Por su parte, los flujos de detritos son flujos de una mezcla de materiales sólidos y agua impulsados por la gravedad, que incluyen cantos rodados y restos de otros materiales como madera (Takahashi 2014). La concentración de sólidos en la parte frontal de estos flujos varía entre el 30 y el 65%, y generalmente decrece hacia la parte trasera, por tal razón se caracterizan por un destructivo impacto frontal (Hutter and Svendsen 1994). En la literatura se encuentran tres principales sistemas de clasificación para este tipo de flujos, uno basado en la concentración de sedimentos; otro, basado en el mecanismo desencadenante del flujo, y un tercero, de acuerdo con el comportamiento reológico y cinemático del flujo (García et al. 2008).

Como se sabe, la susceptibilidad está referida a la mayor o menor predisposición a que un evento suceda en un determinado espacio geográfico. Determinar el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de este tipo de fenómenos permitiría generar alertas y priorizar aquellos lugares para realizar estudios más detallados que permitan precisar las áreas de una mayor probabilidad de afectación. Para determinar esta susceptibilidad es necesario conocer las características morfométricas de las unidades hidrográficas estudiadas, así como el estado de las coberturas del terreno en la cuenca. Si la cuenca ha sufrido este tipo de fenómenos en el pasado, sus características morfométricas deben mostrar tales efectos, razón por la cual resulta lógico establecer la susceptibilidad examinando tales características.

La cuenca constituye la unidad básica de análisis hidrológico, ya que es una unidad de territorio donde las aguas fluyen mediante un sistema de drenaje natural interconectado hacia un punto de concentración de las aguas; en la cual pueden interactuar componentes biofísico-socioeconómicos y culturales (IDEAM 2013). El comportamiento hidrológico de la cuenca se ha estudiado a través de los años por numerosos autores, dando lugar a la determinación de parámetros que permiten agrupar, identificar y resaltar ciertas características físicas del terreno que ponen de presente la ocurrencia de los fenómenos naturales en la cuenca.

Para la implementación de la metodología del Indicador de Susceptibilidad Compuesto (ISC), en primer lugar, se debe realizar la delimitación de las cuencas de interés, a partir de la información cartográfica disponible y el modelo digital de elevación, considerando como punto de concentración de las cuencas, los sitios de interés, en los cuales se tiene evidencia o se desea conocer la susceptibilidad a flujos torrenciales. A partir de las cuencas definidas, se procede a determinar sus parámetros morfométricos, que en la literatura han sido relacionados con la susceptibilidad a flujos torrenciales, los cuales se detallan más

adelante. Posteriormente se debe realizar el análisis y calificación del tipo de coberturas presentes en cada una de las cuencas, con el fin de determinar el grado de atenuación o intensificación que puede ofrecer el tipo de cobertura ante la ocurrencia de un flujo torrencial. Como su nombre lo indica, el método se basa en la determinación de un indicador compuesto, el cual es una medida cualitativa derivada de una serie de observaciones, en este caso parámetros morfométricos, que pueden revelar condiciones que sugieren posiciones relativas en un ordenamiento de áreas susceptibles consideradas, a partir de indicadores que se compilan en un solo índice sobre la base de un modelo subyacente (OECD 2008). En este caso el modelo corresponde al Análisis de Componentes Principales, que es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables), es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número, perdiendo la menor cantidad de información posible.

El área de estudio considerada por Rogelis y Werner (2014) para el desarrollo del método, correspondió a las áreas montañosas que rodean la ciudad de Bogotá, donde se ha llevado a cabo un proceso de urbanización acelerado durante las últimas décadas. Los autores compararon los resultados obtenidos con los de un método independiente basado en la propagación de flujos torrenciales utilizando un modelo de elevación digital, así como con los registros históricos de flujos torrenciales disponibles en el área (Rogelis and Werner 2014).

2.1 ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD COMPUESTO

El índice desarrollado por Rogelis y Werner (2014) constituye un método regional para la evaluación de susceptibilidad a flujos torrenciales y para identificar la predisposición a la ocurrencia de estos fenómenos a escala de cuenca, es decir que se determina una susceptibilidad para la cuenca analizada. El método se basa en un índice compuesto por un indicador morfométrico y un indicador de cobertura del suelo, el cual se sometió a prueba a 106 cuencas pequeñas de montaña periurbanas de la ciudad de Bogotá, Colombia. El indicador de susceptibilidad es obtenido de información de libre acceso y puede ser usado para priorizar cuencas para someterse a observación y estudio de amenaza más detallados. Es un indicador de carácter regional que no pretende proporcionar una evaluación absoluta, sino identificar las cuencas que podrían potencialmente ser más susceptibles que otras en la misma región.

2.1.1 Indicador Morfométrico

Rogelis y Werner (2014) por medio del análisis de componentes principales de los parámetros morfométricos que se describen en el numeral 2.2 del presente documento, determinados por medio de software de información geográfica y subrutinas en R, para cada una de las 106 cuencas consideradas, identificó cuatro grupos de variables: El primero relacionado con el tamaño de la cuenca (P_{size}), el segundo relacionado con la forma (P_{shape}), el tercero relacionado con la altimetría (proporcional a la integral hipsométrica, P_{hypso}) y el cuarto relacionado con la energía potencial (P_{Energy}). En la Tabla 2.1 se presentan los componentes principales derivados por los autores del método, junto con las variables correspondientes a cada uno y en la columna denominada Loading, se presenta la correlación de cada variable con su componente principal correspondiente.

Tabla 2.1 Componentes principales y sus variables correspondientes

Variable	Symbol	Loading
PC1 – size – % of variability explained = 30 %		
log)Perimeter*	P	0.96
log)Length of the watershed*	L_{wshd}	0.97
(log)Length of the mainstream*	L_{Str}	0.95
(log)Area*	A	0.92
(log)Watershed width*	W_{wshd}	0.83
PC2 – shape – % of variability explained = 28 %		
Elongation ratio	E	0.93
Watershed length to width*	LW	0.93
Circularity coefficient	C	0.95
Shape factor	SF	0.90
Drainage density*	DrD	0.66
PC3 – hypsometry – % of variability explained = 22 %		
Hypsometric skewness*	Hs	0.98
Hypsometric integral	Hi	0.90
Density skewness*	DHs	0.88
Hypsometric kurtosis*	Hk	0.91
Density kurtosis*	DHk	0.37
PC4 – energy – % of variability explained = 20 %		
Relief ratio	R_{ra}	0.85
Watershed slope	S	0.89
Stream slope	$StrS$	0.63
Melton number	M	0.72
MRI mean*	$MRIm$	0.90

* Estas variables fueron normalizadas empleando los valores máximo y mínimo (ver 2.1.1.5)
Fuente: (Rogelis and Werner 2014)

De la variabilidad explicada por cada componente principal, el indicador morfométrico sería:

$$P_{morp} = 0.28P_{shape} + 0.20P_{hypso} + 0.22P_{energy} + 0.30P_{size} \quad (1)$$

De acuerdo con el análisis de Rogelis, valores bajos del indicador morfométrico, es decir de 0 a 0.35 corresponden a cuencas de baja susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales; los valores de susceptibilidad media se encuentran entre 0.35 y 0.61, mientras

que valores entre 0.61 y 1.0, corresponden a cuencas con alta probabilidad de propagar flujos torrenciales. Cada uno de los componentes del indicador morfométrico se determinan a partir de la combinación de los parámetros morfométricos que componen a cada uno, aplicando los factores de ponderación empleados por los autores, tal como se presenta a continuación.

2.1.1.1 Componente del tamaño de la cuenca

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de componentes principales, el componente de tamaño de la cuenca se determinó a partir de la medición directa de los parámetros que lo componen, a partir de los factores de ponderación para cada parámetro encontrado por los autores, y se define de la siguiente manera:

$$P_{size} = 0.21L_{Str} + 0.22P + 0.20A + 0.22L_{wshd} + 0.16W_{wshd} \quad (2)$$

Donde:

P_{size} : Es el componente de tamaño de la cuenca

L_{Str} : Longitud del drenaje principal (m)

P : Perímetro de la cuenca (m)

A : Área superficial de la cuenca (m)

L_{wshd} : Longitud de la cuenca (m)

W_{wshd} : Ancho de la cuenca (m)

Los parámetros morfométricos empleados en el presente análisis han sido reconocidos en la literatura como discriminadores de los procesos hidrogeomorfológicos que ocurren en las unidades hidrográficas. Por ejemplo, el tamaño de la cuenca y los parámetros relacionados, como el área superficial de la cuenca (A), y la longitud del cauce principal (L_{Str}), son parámetros que determinan la respuesta hidrológica de la cuenca.

La descarga en el punto de concentración y el almacenamiento de sedimento en la cuenca son proporcionales al tamaño de la cuenca, grandes cuencas almacenan grandes cantidades de agua, es decir que durante un evento de precipitaciones altas, la cuenca tiene la capacidad de recibir y transitar el agua, lo cual puede atenuar las crecientes y reducir la probabilidad de formación de flujos torrenciales (De Scally and Owens 2004). Grandes cuencas permiten el almacenamiento de sedimentos en los canales afluentes al cauce principal, este almacenamiento causa reducción en la tasa de sedimentación y una retención de flujos sedimentarios gravitacionales (Crosta and Frattini 2004). Adicionalmente, grandes cuencas por lo general presentan cauces permanentes que remueven sedimentos finos continuamente por medio de un gran número de crecientes periódicas (Kostaschuk, Macdonald, and Putnam 1986). Otros parámetros asociados al tamaño de la cuenca son el perímetro (P), que corresponde a la longitud total de la línea divisoria de aguas de la cuenca, la longitud de la cuenca (L_{wshd}) que es el distancia comprendida entre el punto de concentración y el punto más alejado sobre la divisoria de aguas, el ancho promedio de la cuenca (W_{wshd}) y la longitud del cauce principal (L_{Str}), la cual corresponde a la distancia medida a lo largo del cauce principal desde la cabecera hasta la desembocadura de la cuenca.

2.1.1.2 Componente de la forma de la cuenca

El componente de forma de la cuenca se define de la siguiente manera, en la cual sus coeficientes suman en total 0.99, esto puede explicarse por el truncamiento de los decimales de las ecuaciones presentadas por los autores del método:

$$P_{shape} = 0.21SF + 0.23C + 0.22E + 0.22LW + 0.11DrD \quad (3)$$

Donde:

P_{shape} : Componente asociado a la forma de la cuenca

SF : Factor de forma

C : Coeficiente de circularidad

E : Razón de elongación

LW : Relación ancho-longitud

DrD : Densidad de drenaje

La forma de la cuenca puede explicar la ocurrencia de ciertos procesos hidrológicos y de la forma en la cual se producen. Por ejemplo, las crecientes se producen más rápidamente en una cuenca redondeada que en una alargada, son más intensas y presentan mayor velocidad, por lo tanto se presenta una mayor capacidad de erosión y transporte (Zavoianu 1985).

Cuencas con formas circulares presentan mayores posibilidades de generar avenidas torrenciales que cuencas alargadas, dado que la escorrentía sigue una trayectoria corta y es más sincrónica en cuencas con forma circular. La circularidad es un indicador morfométrico de cuencas con perímetros aproximadamente circulares. El coeficiente de circularidad de Miller, el cual compara el área de la cuenca con el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca, está definido como (A. González 2004):

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4)$$

Donde A representa el área de la cuenca en km² y P el perímetro de la cuenca en km.

Otro parámetro asociado a la forma de la cuenca es la razón de elongación (E) propuesta por Schumm (1956), la cual compara la longitud del eje mayor de la cuenca con el diámetro de un círculo de igual área, y se expresa de la siguiente manera:

$$E = 2 * \frac{\sqrt{A}}{L_{wshd}\sqrt{\pi}} = 1.129 * \frac{\sqrt{A}}{L_{wshd}} \quad (5)$$

Dónde A es el área de la cuenca en km² y L_{wshd} es la longitud de la cuenca en km, la cual corresponde a la longitud medida en línea recta desde el punto de concentración de la cuenca hasta el punto más distante de la divisoria de aguas. El valor de la razón de elongación toma un valor de 1,275 cuando la forma de la cuenca es circular y toma un valor de 1,129 cuando la forma de cuenca es cuadrada. El valor de este coeficiente decrece con el incremento de la elongación, alcanzando un mínimo de 0,20 aproximadamente.

Otro parámetro relacionado con la elongación de la cuenca es la relación ancho – longitud de la cuenca (LW), el cual toma valores superiores a la unidad cuando la cuenca es

achatada, es decir que la cuenca es más ancha que larga (Zavoianu 1985), que se define de la siguiente manera:

$$LW = \frac{W_{wshd}}{L_{wshd}} \quad (6)$$

Donde W_{wshd} es el ancho de la cuenca y L_{wshd} es la longitud de la cuenca.

El factor de forma (SF) es una medida del área de la cuenca (A) dividida por la longitud del cauce principal (L_{Str}) al cuadrado (C.-Y. Chen and Yu 2011), se define de la siguiente manera:

$$SF = \frac{A}{L_{Str}^2} \quad (7)$$

Donde A representa el área de la cuenca en km^2 y L_{wshd} la longitud de la cuenca en km. Se tendrá un factor de forma menor a uno, si la cuenca es larga y estrecha, y un valor igual a 1 si la cuenca presenta forma cuadrada (Al-Rawas and Valeo 2010).

La densidad de drenaje es un parámetro que representa la morfología de la cuenca, por que relaciona la longitud de los drenajes con el área total, donde los valores altos reflejan una cuenca bien drenada que debería responder relativamente rápido ante una tormenta, se determina por medio de la ecuación número 8, que es la relación entre la longitud de los drenajes y el área de una cuenca. Es un parámetro frecuentemente empleado por su correlación con el flujo base (Baker 1976). Este parámetro depende de las características litológicas y estructurales de los materiales, así como por la cobertura vegetal y la precipitación (Zavoianu 1985). Las regiones propensas a crecientes intensas se caracterizan por altos valores de densidad de drenaje que indican baja capacidad de infiltración y escasa cobertura vegetal, todo lo cual conduciría a la rápida concentración de escorrentía. La densidad de drenaje se calcula de la siguiente manera:

$$DrD = \frac{L_{drenajes}}{A} \quad (8)$$

Donde $L_{drenajes}$ es la longitud total de los drenajes de la cuenca en km y A es el área superficial de la cuenca en km^2 .

2.1.1.3 Componente de la altimetría de la cuenca

El componente de altimetría está basado en las propiedades de la curva hipsométrica de la cuenca y se define de la siguiente manera, al igual que con los coeficientes del componente de forma, la suma de los coeficientes de este componente corresponde a 0.99, explicado nuevamente por el truncamiento de los decimales de la ecuación:

$$P_{hypso} = 0.27Hs + 0.23Hi + 0.23Hk + 0.22DHs + 0.04DHk \quad (9)$$

Donde:

P_{hypso} : Componente asociado a la altimetría de la cuenca

Hs : Coeficiente de asimetría hipsométrico

Hi : Integral hipsométrica

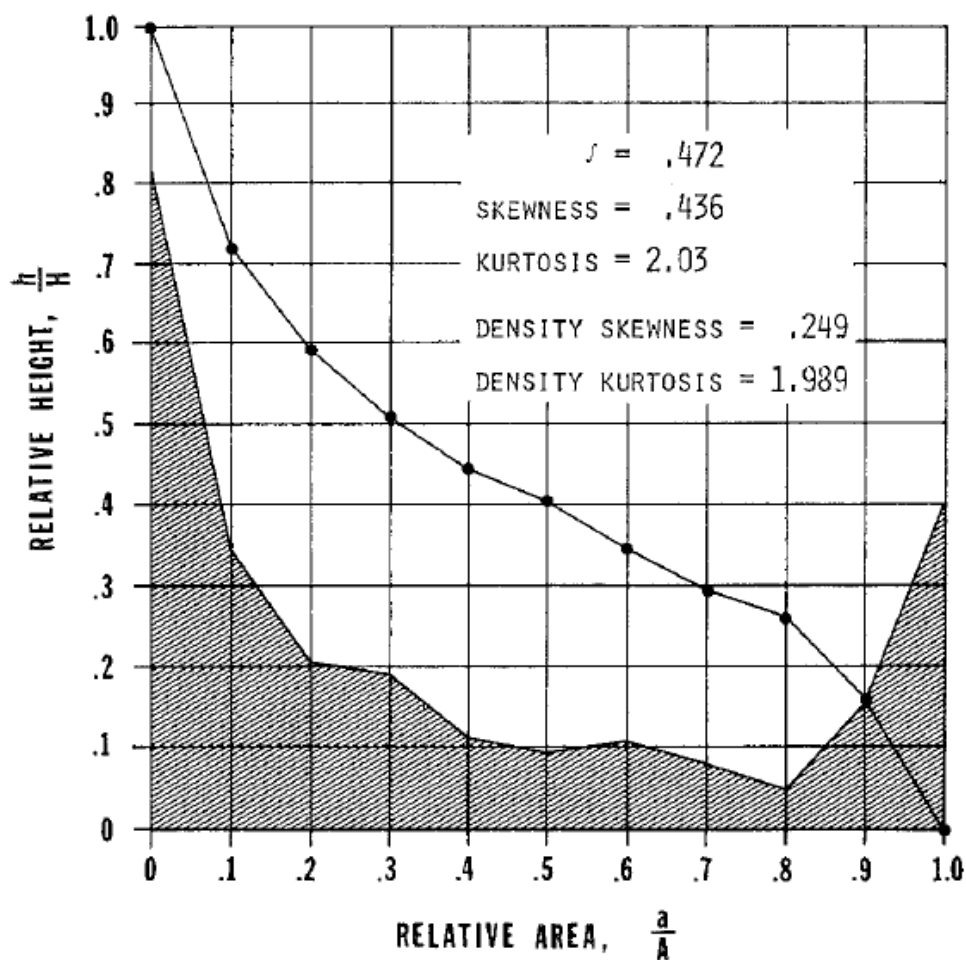
Hk : Curtosis hipsométrica

DHs : Coeficiente de asimetría función de densidad

DHk : Curtosis función densidad

La curva hipsométrica representa el porcentaje del área de la cuenca que existe por encima de cierta cota, suele presentarse en forma adimensional para que curvas de diferentes cuencas sean comparables, se relativiza dividiendo cada altura sobre la altura máxima (H) y cada área sobre el área total de la cuenca (A). Esta curva corresponde la distribución acumulada de elevaciones en una cuenca, en función del porcentaje del área total de la misma. Su forma es similar a una distribución acumulada de una variable aleatoria monótonicamente decreciente. Harlin (1978) encontró que los momentos y los centros de gravedad de la función que representa la curva hipsométrica y su función de densidad, pueden dar un indicio de los procesos erosivos en una cuenca. En la Figura 2.1 se presenta un ejemplo de la curva hipsométrica y su función de densidad. En el anexo 2, se presentan las curvas hipsométricas de las cuencas estudiadas.

Figura 2.1 Curva Hipsométrica y función de densidad



Fuente: (John M. Harlin 1978).

Debido a su forma, la curva hipsométrica puede ser representada por una función polinómica continua y debido a su forma relativamente simple, puede ser ajustada a un polinomio de bajo orden (segundo o tercero), así:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (10)$$

La integral hipsométrica está definida como el área bajo de la curva hipsométrica, por lo tanto, puede ser calculada por la integración exacta de $f(x)$ entre los límites 0 y 1:

$$A = \int_0^1 a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 dx \quad (11)$$

El primer momento de $f(x)$ con respecto al eje x corresponde a la cota relativa media de la cuenca, se expresa de la siguiente manera:

$$\mu'_{01} = \frac{1}{A} \int_0^1 xf(x) dx \quad (12)$$

De la misma manera, el momento i con respecto a la media de x puede definirse como:

$$\mu_i = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu'_{01})^i f(x) dx \quad (13)$$

El segundo momento de $f(x)$ con respecto al valor medio de x , conocido como la varianza, puede ser expresado mediante la solución de la siguiente integral, y la desviación estándar de la función de distribución de la curva hipsométrica (σ) es la raíz cuadrada de la varianza (John M. Harlin 1984). En consecuencia, la varianza será:

$$\mu_2 = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu'_{01})^2 f(x) dx = \frac{1}{A} \left[\frac{a_0x^3}{3} + \frac{a_1x^4}{4} + \frac{a_2x^5}{5} + \frac{a_3x^6}{6} \right]_0^1 - (\mu'_{01})^2 \quad (14)$$

Esta expresión puede ser representada mediante una sumatoria, de la siguiente manera, donde a_i , corresponde a los coeficientes del polinomio grado 3 que representa la función de distribución de la curva hipsométrica y k indica el subíndice del coeficiente dentro de la sumatoria.

$$\mu_2 = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu'_{01})^2 f(x) dx = \left[\frac{1}{A} \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+3} \right] - (\mu'_{01})^2 \quad (15)$$

Y la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\mu_2} \quad (16)$$

Siguiendo la misma lógica para la resolución de las integrales que representa los momentos estadísticos, el tercer y cuarto momentos con respecto al valor medio de x se conocen como el coeficiente de asimetría y la curtosis de la función de distribución, respectivamente, y pueden ser expresadas como:

$$\mu_3 = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu'_{01})^3 f(x) dx = \left[\frac{1}{A} \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+4} \right] - \left[\frac{3\mu'_{01}}{A} \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+3} \right] + 2(\mu'_{01})^2 \quad (17)$$

$$\mu_4 = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu'_{01})^4 f(x) dx = \left[\frac{1}{A} \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+5} \right] - \left[\frac{4\mu'_{01}}{A} \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+4} \right] - \left[\frac{6}{A} (\mu'_{01})^2 \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+4} \right] + 3(\mu'_{01})^4 \quad (18)$$

El coeficiente de asimetría y la curtosis de la función de distribución se utilizan de forma adimensional al normalizarlos con la desviación estándar, así:

$$\mathit{HypSkew} (Hs) = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (19)$$

$$\mathit{HypKurtosis}(Hk) = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad (20)$$

La función de densidad de probabilidad de la función de distribución de la curva hipsométrica puede ser obtenida como su derivada, así:

$$g(x) = f'(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 \quad (21)$$

Siguiendo el mismo razonamiento para obtener los momentos de la función de distribución, se obtienen los momentos de la función de densidad, el coeficiente de asimetría y la curtosis de densidad (John M. Harlin 1978).

$$\mathit{Density skewness} (DHs) = \frac{\mu_{3(g(x))}}{\sigma_{g(x)}^3} \quad (22)$$

$$\mathit{Density Kurtosis} (Hk) = \frac{\mu_{4(g(x))}}{\sigma_{g(x)}^4} \quad (23)$$

Donde $\mu_{3(g(x))}$ representa el tercer momento estadístico de la función de densidad de la curva hipsométrica (ecuación (21)), $\sigma_{g(x)}^3$ representa la desviación estándar de la función de densidad de la curva hipsométrica elevada al cubo, $\mu_{4(g(x))}$ representa el cuarto momento estadístico de la función de densidad de la curva hipsométrica y $\sigma_{g(x)}^4$ representa la desviación estándar de la función de densidad elevada a la cuatro.

Estos atributos estadísticos de la curva hipsométrica y de su función de densidad proporcionan un medio cuantitativo para caracterizar la conformación planimétrica y topográfica de una cuenca hidrográfica, que tienen un efecto pronunciado sobre su hidrología, particularmente en su respuesta de drenaje (Howard 1990).

Harlin (1978) evaluó la habilidad de las características hipsométricas para diferenciar cuencas que poseen forma similar. Analizó diferentes grupos de cuencas experimentales en un amplio rango de características climáticas y geológicas, comprendiendo áreas desde algunas decenas de hectáreas hasta más de 100 km², encontrando correlaciones de los parámetros hipsométricos con la cantidad de erosión en la parte alta de las cuencas, así como la magnitud y localización de los cambios de pendiente en la cuenca. Estas correlaciones fueron encontradas por Harlin a partir de un análisis de varias cuencas en Estados Unidos, de las cuales conocía de manera detallada los procesos erosivos que allí ocurrían, concluyendo que los parámetros de la curva hipsométrica contribuyen a la identificación de procesos hidrogeomorfológicos que ocurren en una cuenca.

Como conclusión de los estudios realizados por Harlin (1984), se obtiene que el coeficiente de asimetría hipsométrico (*HypSkew*) representa una medida de la erosión de la parte alta de la cuenca (cabecera), Valores altos de la curtosis hipsométrica (*HypKurtosis*) pueden representar una cuenca en etapa de vejez, en la cual predominan los procesos de sedimentación. el coeficiente de asimetría de la función de densidad (*DenSkew – DHs*) indica los cambios grandes de pendiente en la cuenca y en donde se producen, dado que la función de densidad de la curva hipsométrica representa la tasa de cambio de la curva

hipsométrica, el coeficiente de asimetría de la función de densidad (*DenSkew – DHS*) indica que tanto y en que parte de la cuenca ocurren los cambios de pendiente más marcados.

Harlin encontró que el coeficiente de asimetría de la curva hipsométrica está directamente relacionado con el grado de desarrollo del cauce principal de la cuenca en su parte alta, es decir que valores altos de este coeficiente pueden ser un indicador de una cuenca en etapa de vejez, donde dominan los procesos de sedimentación. Por otro lado, encontró, que los valores de la integral hipsométrica disminuyen a medida que más sedimento ha sido erosionado de la cuenca, y predominan los procesos de sedimentación (J. M Harlin 1980).

2.1.1.4 Componente del relieve de la cuenca

El componente de relieve de la cuenca se define de la siguiente manera:

$$P_{Energy} = 0.12StrS + 0.24S + 0.23R_{Ra} + 0.16M + 0.25MRIm \quad (24)$$

Donde:

P_{Energy} : Componente asociado a la energía potencial

$StrS$: Pendiente media del cauce principal

S : Pendiente media de la cuenca

R_{Ra} : Relación de relieve

M : Índice de Melton

$MRIm$: Promedio del Índice Multirresolución de fondos de valle

Las características del relieve de la cuenca están relacionadas con la energía potencial de la cuenca. En un sistema de drenaje las diferencias de altura, las laderas y la pendiente del canal, controlan directamente la energía potencial y cinética de los flujos de agua, y de esta manera, la intensidad de los procesos de escorrentía, erosión y transporte (Zavoianu 1985). La pendiente media de la cuenca corresponde a la media ponderada, por el área entre curvas, de las pendientes de las superficies entre curvas de nivel. Proporciona una indicación de la inclinación del área de drenaje (Al-Rawas and Valeo 2010). La pendiente determina la velocidad del flujo superficial resultante de la precipitación. Chen (2010) encontró que cuencas susceptibles a flujos torrenciales presentan una pendiente media de 20 a 35 grados, que corresponde a 36 a 70%.

Otro factor de relieve importante es la pendiente media del cauce principal, la cual depende del estado de la evolución geomorfológica de la región considerada, de la litología y del tamaño de la cuenca; controla el flujo de agua en el canal y, como consecuencia la granulometría de los sedimentos en el lecho del cauce. La pendiente media del cauce se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$StrS = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{StrS}} \quad (25)$$

Dónde H_{max} es la altura máxima de la cuenca en m.s.n.m., H_{min} es la altura mínima de la cuenca en m.s.n.m., y L_{StrS} es la longitud del cauce principal m.

La relación de relieve (RRa) se define como el cociente de la diferencia entre la elevación máxima y mínima de la cuenca, sobre la longitud de la cuenca, este parámetro indica la

caída promedio de la elevación por unidad de longitud de la cuenca y ha sido empleado para describir la distancia de viaje del flujo torrencial y la magnitud del evento (Corominas 1996). Entonces, se determina como:

$$RRa = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{wshd}} \quad (26)$$

Dónde H_{max} es la altura máxima de la cuenca en m.s.n.m., H_{min} es la altura mínima de la cuenca en m.s.n.m., y L_{wshd} es la longitud de la cuenca en m.

Uno de los parámetros más utilizados para diferenciar cuencas propensas a crecientes lentas que pueden llegar a desbordar el cauce principal, de aquellas susceptibles a flujos torrenciales es la relación de Melton, la cual es una medida del relieve de la cuenca, que se determina por el cociente entre el relieve de la cuenca y la raíz cuadrada del área (Welsh and Davies 2011):

$$M = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}} \quad (27)$$

Se ha encontrado que valores por debajo de 0.3 se presentan en cuencas propensas a crecientes lentas que pueden llegar a desbordar el cauce principal, mientras que valores mayores están relacionados a cuencas susceptibles a flujos torrenciales (Welsh and Davies 2011).

Otro de los parámetros asociados al relieve de la cuenca, corresponde al valor promedio del Índice Multirresolución de la Llanura del Fondo de Valles (MRI_m). Este índice es una medida de qué tan plana y profunda es un área; se utiliza para la identificación de zonas de depositación y el fondo de los valles, a partir de un modelo de elevación de terreno (MDE). El índice usa la pendiente y la elevación para clasificar el fondo de los valles como planicies o áreas bajas, a partir de una serie de operaciones de vecindad con resoluciones crecientes para identificar valles pequeños y grandes (Gallant and Dowling 2003), es decir que realiza un análisis por cada celda del DEM y la compara con las celdas adyacentes, de acuerdo con unas funciones definidas.

El índice MRI identifica los fondos de los valles, que representan las zonas más bajas y planas de un área definida, son ambientes donde predominan los procesos de sedimentación debido a sus bajas pendientes, el algoritmo realiza su identificación, considerando las siguientes suposiciones:

- Se asume que los fondos de valle son áreas bajas y planas con respecto a las áreas circundantes
- Grandes fondos de valle son más planos que los pequeños.

Se utilizan dos características derivadas del modelo digital de elevación, la planitud (flatness), que indica que tan plana es un área, y que tan bajo es del valle (lowness). La planitud se establece a partir del inverso de la pendiente del terreno, medida por medio de la diferencia de altura y distancia entre celdas adyacentes del MDE, así como también, que tan bajo es el valle a partir de la comparación con un área circular adyacente, empleando un percentil de elevación. Los diferentes valores del índice corresponden a diferentes resoluciones y diferentes umbrales de pendiente. La identificación se realiza en diferentes escalas espaciales, esto quiere decir que en primer lugar se realiza la identificación de los valles en la escala más fina posible, definida por la resolución espacial de MDE, en cada

paso en escala, el tamaño de la celda del MDE se incrementa por un factor de 3, y el umbral de pendiente se reduce en un factor de 2. El algoritmo es presentado en detalle por Gallant y Dowling (2003).

2.1.1.5 Normalización de los parámetros

Tomando en consideración que algunos de los parámetros morfométricos analizados presentan diferentes unidades de medición, se requiere su normalización para hacer posible su agregación. Existen diferentes técnicas de normalización, en este caso, los autores del método, a los parámetros asociados al tamaño de la cuenca, que corresponden a la longitud del drenaje principal (L_{str}), perímetro (P), área (A), longitud de la cuenca (L_{wshd}) y el ancho de la cuenca (W_{wshd}), les aplican el logaritmo base 10 y adicionalmente, la normalización con base en los valores máximos y mínimos de la siguiente manera:

$$N = 1 - \frac{x - Min}{Max - Min} \quad (28)$$

Donde N corresponde al valor normalizado, x , corresponde al valor de la variable, Min, corresponde al mínimo valor de la variable en todo el conjunto y Max al máximo valor.

Esta transformación de valores máximos y mínimos fue aplicada también a los siguientes parámetros morfométricos, sin aplicar logaritmos:

- Relación de ancho – longitud de la cuenca (LW)
- Densidad de drenaje (DrD)
- Coeficiente de Asimetría de la curva Hipsométrica (Hs)
- Coeficiente de Asimetría de la función de densidad (DHs)
- Curtosis de la curva Hipsométrica (Hk)
- Curtosis de función de densidad (DHk)
- Promedio de índice MRI (MRIm)

2.1.2 Indicador de cobertura

La cobertura vegetal ha sido reconocida como uno de los factores relacionados con la frecuencia de los flujos torrenciales (Jakob 1996). Los bosques reducen los riesgos hidrogeomórficos ya que retienen material orgánico e inorgánico; contienen el material movilizado, reduciendo el grado de erosión; interceptan la precipitación; y los tallos de los árboles reducen las áreas alteradas por avalanchas de nieve, desprendimientos de rocas, avenidas y flujos torrenciales (Sakals et al. 2006). La escorrentía puede aumentar debido a la deforestación, la degradación de las propiedades del suelo y la generación de superficies impermeables (Koscielny, 2008) como resultado de la urbanización. Del mismo modo, las áreas deforestadas pueden favorecer los procesos de erosión y de inestabilidad de ladera (Koscielny, Cojean, and Thévenin 2009). El suelo desnudo representa un área propensa a la erosión y normalmente se consideran fuentes que pueden proporcionar sedimentos.

El cambio en el uso del suelo en una cuenca puede producir cambios en la respuesta de la cuenca a la precipitación; por ejemplo, la impermeabilización de áreas naturales puede provocar el incremento del caudal pico, debido a la disminución de la infiltración y aumento

en la velocidad de la escorrentía superficial, que puede generar aumento en la frecuencia y severidad de las crecientes.

De acuerdo con Rogelis (2014), la de calificación del estado de la cuenca se hace con los umbrales de porcentaje de cobertura de terreno, un umbral del 15% se utiliza para considerar una condición de alto grado de urbanización de la cuenca, lo que representa un alto grado de degradación; con respecto a las tierras desnudas y degradadas, se consideró un umbral del 10% para identificarla como altamente degradada. Es de considerar que las coberturas correspondientes a cultivos agrícolas no son consideradas como coberturas de vegetación e indicar un cierto grado de deterioro, dada la afectación del suelo provocada por los procesos de remoción de coberturas vegetales, y el manejo agrícola.

Sobre este aspecto, la información disponible a nivel nacional corresponde a la capa de coberturas del suelo escala 1:100.000, que contiene información generada por los institutos de investigación del SINA (IDEAM, SINCHI), PNN e IGAC y actualizada en desarrollo del Convenio No. 005/2014 IDEAM-MADS. Componente 4 (IDEAM). Este producto es el resultado del monitoreo interinstitucional de coberturas del suelo en el territorio continental de Colombia, a partir de la interpretación visual de imágenes de satélite con posterior verificación de campo, por parte de profesionales expertos en la materia. Para la generación del mapa, se aplicó la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Las imágenes satelitales utilizadas para la interpretación de las coberturas fueron principalmente Landsat 7, RapidEye y Spot.

La leyenda nacional fue estructurada de manera jerárquica, derivando las unidades de coberturas del terreno con base en criterios fisionómicos de altura y densidad, claramente definidos y aplicables a todas las unidades consideradas (IDEAM, 2010). El nivel 1 representa la categoría más general de clasificación de coberturas, compuesta por:

1. Territorios artificializados
2. Territorios agrícolas
3. Bosques y áreas seminaturales
4. Áreas húmedas
5. Superficies de agua

El nivel 2 corresponde a subdivisiones generales de cada uno de estos grupos, los cuales se presentan en la Tabla 2.2. La leyenda nacional incluye los niveles 3, 4, 5 y 6, los cuales representan niveles subsiguientes más detallados.

Tabla 2.2 Leyenda nacional de coberturas niveles 1 y 2

Nivel 1		Nivel 2	
1	Territorios Artificializados	1.1	Zonas Urbanizadas
		1.2	Zonas Industriales o comerciales y redes de comunicación
		1.3	Zonas de extracción minera y escombreras
		1.4	Zonas verdes artificializadas, no agrícolas
2	Territorios Agrícolas	2.1	Cultivos transitorios
		2.2	Cultivos permanentes
		2.3	Pastos
		2.4	Áreas agrícolas heterogéneas

Nivel 1		Nivel 2	
3	Bosques y Áreas Seminaturales	3.1	Bosques
		3.2	Áreas con Vegetación herbácea y/o arbustiva
		3.3	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
4	Áreas Húmedas	4.1	Áreas húmedas continentales
		4.2	Áreas húmedas costeras
5	Superficies de Agua	5.1	Aguas Continentales
		5.2	Aguas marítimas

Fuente: IDEAM, 2010.

Teniendo en cuenta estas coberturas del terreno, a cada una de las cuencas le es asignado un estado de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente, entre pobre, media y buena.

2.1.3 Indicador compuesto

Una vez obtenidos los indicadores morfométricos y de cobertura, con su clasificación cualitativa, se procede a realizar su combinación por medio de la matriz que se presenta en la Tabla 2.3, dando lugar a un indicador de susceptibilidad compuesto para cada cuenca analizada.

Tabla 2.3 Matriz de clasificación de susceptibilidad

		Indicador de cobertura		
		Pobre	Regular	Buena
Indicador morfométrico	Alto	Alta	Alta	Media
	Medio	Media	Media	Baja
	Bajo	Media	Baja	Baja

Fuente: (Rogelis and Werner 2014)

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe en detalle la metodología empleada para el desarrollo del presente estudio. Está constituida por tres (3) etapas secuenciales: La primera etapa correspondió a la selección de las cuencas objeto de estudio, la segunda etapa consistió en la aplicación de la metodología del Índice de Susceptibilidad Compuesto en las cuencas seleccionadas y la tercera etapa correspondió a la verificación de los resultados obtenidos, con base en la comparación con métodos independientes. Los métodos considerados para esta verificación fueron: Los registros históricos de la ocurrencia de flujos torrenciales, el Mapa de remoción en Masa a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano y el ordenamiento de los cauces principales de las cuencas estudiadas.

3.1 SELECCIÓN ÁREA DE ESTUDIO

Para la selección de las cuencas, se llevó a cabo una búsqueda de información relacionada con la ocurrencia de flujos torrenciales en sitios específicos, por medio de la búsqueda en bases de datos de amenazas naturales, como lo son DESINVETAR (Corporación OSSO 2016) y de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD); así como también en publicaciones académicas (J. L. González, Chavez, and Hermelin 2005) y artículos de diferentes medios de comunicación (Arenas 2006; Leon R. 1993; Semana 2015).

Estos registros se clasificaron por departamentos, posteriormente por municipios (Ver Anexo 1), con el fin de identificar los sitios con mayor número de registros; esto con base en la información disponible, ya que no se registra la localización exacta por medio de coordenadas de los sitios afectados sino a partir de la identificación del nombre del sitio.

Una vez identificados los sitios con mayor número de registros, se procedió a delimitar las cuencas aferentes, tomado como punto de concentración de la cuenca el sitio de afectación reportado, para lo cual se procedió con la recopilación de información pertinente, la cual se describe a continuación. Adicionalmente, se delimitaron subcuencas de las cuencas iniciales, con el fin de contar con un mayor número de cuencas para el análisis.

3.1.1 Información empleada

La delimitación de cada una de las cuencas se realizó con base en la cartografía a escala 1:100.000 del IGAC, la cual está disponible para su descarga libre y presenta cubrimiento a nivel nacional (<ftp://cartografialibre.igac.gov.co/>). Dicha información se presenta en formato GDB, para lo cual es necesario realizar una conexión desde algún Sistema de Información Geográfica (SIG), como lo es QGIS o SAGA-GIS, que permiten visualizarla y manipularla. La información empleada corresponde a las curvas de nivel, cuerpos de agua, límites departamentales, límites municipales, cabeceras municipales y centros poblados.

Las características hipsométricas y de relieve de las cuencas se obtuvieron a partir del modelo digital de elevación (MDE) Alos – Palsar de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, que presenta una resolución espacial de 12.5 m. Este MDE está disponible para su descarga libre en la red (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>) y posee un cubrimiento a nivel global. Este insumo se presenta en formato raster, el cual corresponde a una imagen compuesta de píxeles que almacena un valor numérico, y que en conjunto

componen una banda o matriz de información asociada. Para su manipulación también es necesario el uso de un SIG.

Las coberturas del suelo a escala 1:100.000 del IDEAM, se encuentran disponibles en el catálogo de mapas del IDEAM, y puede ser descargada libremente en <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>. Esta información se encuentra en formato shape. Esta capa está compuesta de polígonos con atributos específicos que representan el tipo de cobertura del suelo que tiene cada área geográfica.

Otro de los insumos del presente estudio corresponde al mapa de Amenaza por Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano a escala 1:100.000, empleado para la validación de la metodología. Este mapa, elaborado en conjunto con el IDEAM, el SGC y diferentes universidades del país, presenta una categorización en niveles de amenaza que varían entre muy alta y baja, acompañados de una descripción en función de las características geológicas, geomorfológicas, de suelos, cobertura del terreno, climáticas y sísmicas, discriminada por regiones y subregiones naturales.

3.1.2 Delimitación de cuencas hidrográficas

Una vez identificados los sitios de interés, con base en los registros históricos de la ocurrencia de flujos torrenciales, con base en el MDE y la cartografía base del IGAC, se realizó la delimitación de las cuencas, asegurando que la divisoria de agua cruzara perpendicularmente las curvas de nivel de mayor nivel topográfico y no interceptara ningún drenaje, excepto en el punto concentración de la cuenca, correspondiente al punto de interés por la ocurrencia de eventos reportados.

En primer lugar, se identificó la red de drenaje y el cauce principal, en algunos casos se realizó el ajuste del trazado, con base en imágenes satelitales de Google Earth. Posteriormente se realizó la delimitación, generando un polígono que representa el área de drenaje de cada una de las cuencas con el apoyo del software QGIS.

3.2 APLICACIÓN DEL INDICADOR DE SUSCEPTIBILIDAD COMPUESTO (ISC)

En la segunda etapa del proceso se determinaron los indicadores Morfométrico y de Cobertura para cada una de las cuencas estudiadas, para concluir con la determinación del Indicador de susceptibilidad Compuesto (ISC) para cada cuenca bajo estudio.

3.2.1 Determinación de los parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos se agrupan de acuerdo con la característica que representan: parámetros asociados al tamaño de la cuenca, asociados a la forma de la cuenca, al relieve de la cuenca y los obtenidos a partir de la curva hipsométrica. Estos parámetros se agruparon gracias al resultado del análisis de componentes principales, realizado por Rogelis (2016), con el fin de reducir el número de variables empleadas, con la menor pérdida de información de los datos, maximizando la varianza, tal como se presentó en el capítulo anterior del presente documento.

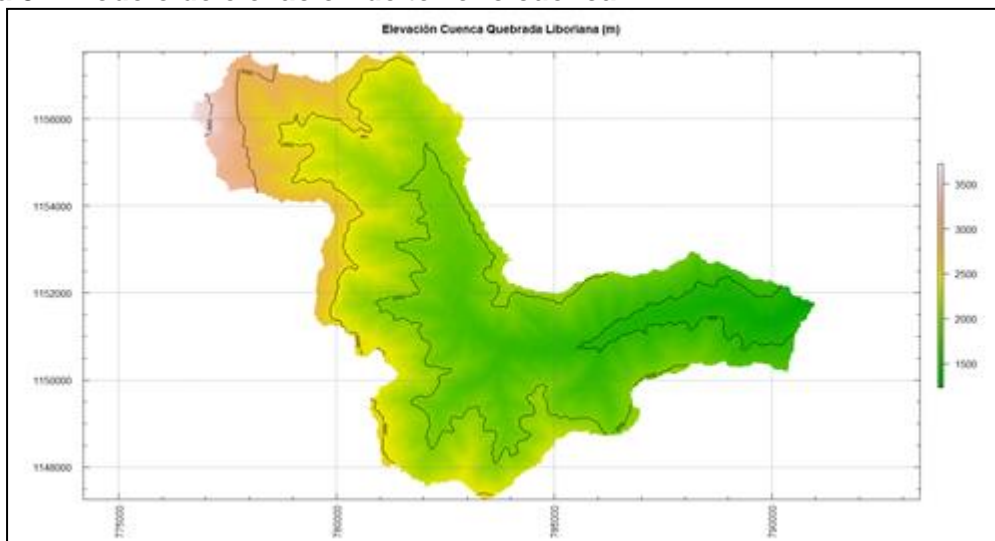
Los parámetros morfométricos de las unidades hidrográficas estudiadas se obtuvieron por medio del uso de sistemas de información geográfica de uso libre, como lo son Q-GIS, Saga-Gis y Grass, a partir de la delimitación de cada una de las cuencas.

Para obtener el área de la cuenca se realiza el cálculo de área superficial a partir del polígono generado siguiendo la línea divisoria de aguas de cada una de las cuencas. Este proceso se realizó con el software Qgis, teniendo en cuenta que el polígono debe estar proyectado en coordenadas planas y no geográficas. De esta manera se realizó la medición del perímetro y la longitud de la cuenca.

Para determinar la densidad de drenaje, se procedió a determinar la longitud total de drenajes en cada una de las cuencas, sumando cada una de las longitudes de los tramos de drenajes, posteriormente se realizó la división por el área correspondiente a la cuenca.

Con respecto a los parámetros asociados al relieve de la cuenca, se realizó un corte del Modelo Digital de Elevación siguiendo el polígono conformado por la divisoria de aguas y se determinaron las estadísticas correspondientes a la altimetría de la cuenca sobre el archivo raster, como la altura media, máxima y mínima. Esto fue realizado por medio de la función de estadísticas zonales de la herramienta QGIS. A modo de ejemplo, en la Figura 3.1 se presenta la delimitación de la cuenca de la quebrada La Liboriana y el modelo digital de elevación.

Figura 3.1 Modelo de elevación de terreno cuenca



Fuente: elaboración propia a partir de ALOS-PALSAR.

A partir del modelo de elevación de terreno de cada cuenca, se obtuvo la curva hipsométrica (Ver Anexo 2. Curvas hipsométricas), por medio de la función Hypsometry del software SAGA GIS, a partir de la cual se determinaron los momentos estadísticos por medio de las ecuaciones (19) y (20) y la función de densidad de probabilidad, ajustando la curva a un polinomio de grado 3.

El promedio del Índice Multirresolución de la Llanura del Fondo de los Valles (MRIm), se determinó por medio del algoritmo disponible en el software SAGA GIS. Este algoritmo permite realizar la identificación de los valles de acuerdo al análisis de planicies y alturas con respecto a las áreas circundantes.

Una vez determinados todos los parámetros morfométricos para cada una de las cuencas, se realiza la normalización de los parámetros tal como se describe en el numeral 2.1.1.5 del capítulo anterior. Posteriormente, estos parámetros son agrupados de acuerdo al

componente al que corresponden, de tamaño, forma, altimetría y relieve, se aplican las ecuaciones (2), (3), (9) y (24) para determinar el valor de cada componente, los cuales finalmente se combinan de acuerdo con la ecuación (1), para determinar el Indicador Morfométrico para cada una de las cuencas, es de aclarar que las ecuaciones acá planteadas corresponden a las ecuaciones derivadas por los autores del método, las cuales fueron generadas a partir de los datos recopilados de las cuencas originalmente analizadas, esto con el fin de evaluar su aplicabilidad en otras zonas hidrográficas y tamaños de cuencas un poco diferentes. Este indicador cuantitativo es transformado en cualitativo de acuerdo con los criterios citados en el numeral 2.1.1 del capítulo anterior, obteniendo de esta manera una clasificación de susceptibilidad a los flujos torrenciales dada por el indicador morfométrico.

3.2.2 Identificación de las coberturas del suelo

Con el fin de evaluar cualitativamente la condición de la cobertura del terreno de cada cuenca, se toma como información de referencia, el mapa de coberturas del terreno a escala 1:100.000 para el periodo 2010-2012, generado por el IDEAM, a través de la Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental – Grupo de suelos y tierras.

A partir de la capa de coberturas de suelo a nivel nacional, se realiza la extracción de las coberturas correspondientes a cada una de las cuencas estudiadas, y así, se determina el porcentaje del área de la cuenca que cubre cada tipo de cobertura según la Tabla 2.2. Esto se llevó a cabo por medio del software Qgis, realizando un clip sobre la capa de coberturas con el polígono conformado por la divisoria de aguas de la cuenca; posteriormente se realiza el cálculo de estas áreas individuales y se obtiene el porcentaje con respecto al área total. Conociendo los porcentajes de cobertura sobre la cuenca, de acuerdo con los criterios definidos en el método, cada una de las cuencas es calificada con un indicador de cobertura, como pobre, regular y buena.

3.2.3 Indicador de Susceptibilidad Compuesto

Una vez determinados los indicadores, tanto morfométrico como de cobertura, se obtiene el indicador de susceptibilidad compuesto de acuerdo con la matriz de clasificación (Ver Tabla 2.3). A partir de este resultado se determina el índice para cada una de las cuencas estudiadas y se califica la susceptibilidad tal como se presenta en el numeral 2.1 del presente documento, por ejemplo una cuenca que resulto en un indicador morfométrico Alto y presenta un indicador de cobertura pobre, corresponderá a un Indicador Compuesto de susceptibilidad alto, por el contrario, una cuenca un indicador morfométrico Bajo y un indicador de cobertura bueno, dará como resultado una cuenca con un Indicador de Susceptibilidad Compuesto bajo.

3.3 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de verificar los resultados obtenidos con el método, se procedió a realizar una comparación del grado de susceptibilidad, empleando diferentes fuentes de información, que son independientes a la información empleada en la determinación del indicador de susceptibilidad compuesto. Adicionalmente se realizo la comparación de los resultados obtenidos en el estudio de generación del método realizado por Rogelis, a continuación, se presentan dichas fuentes de información.

3.3.1 Registros históricos de ocurrencia de flujos torrenciales

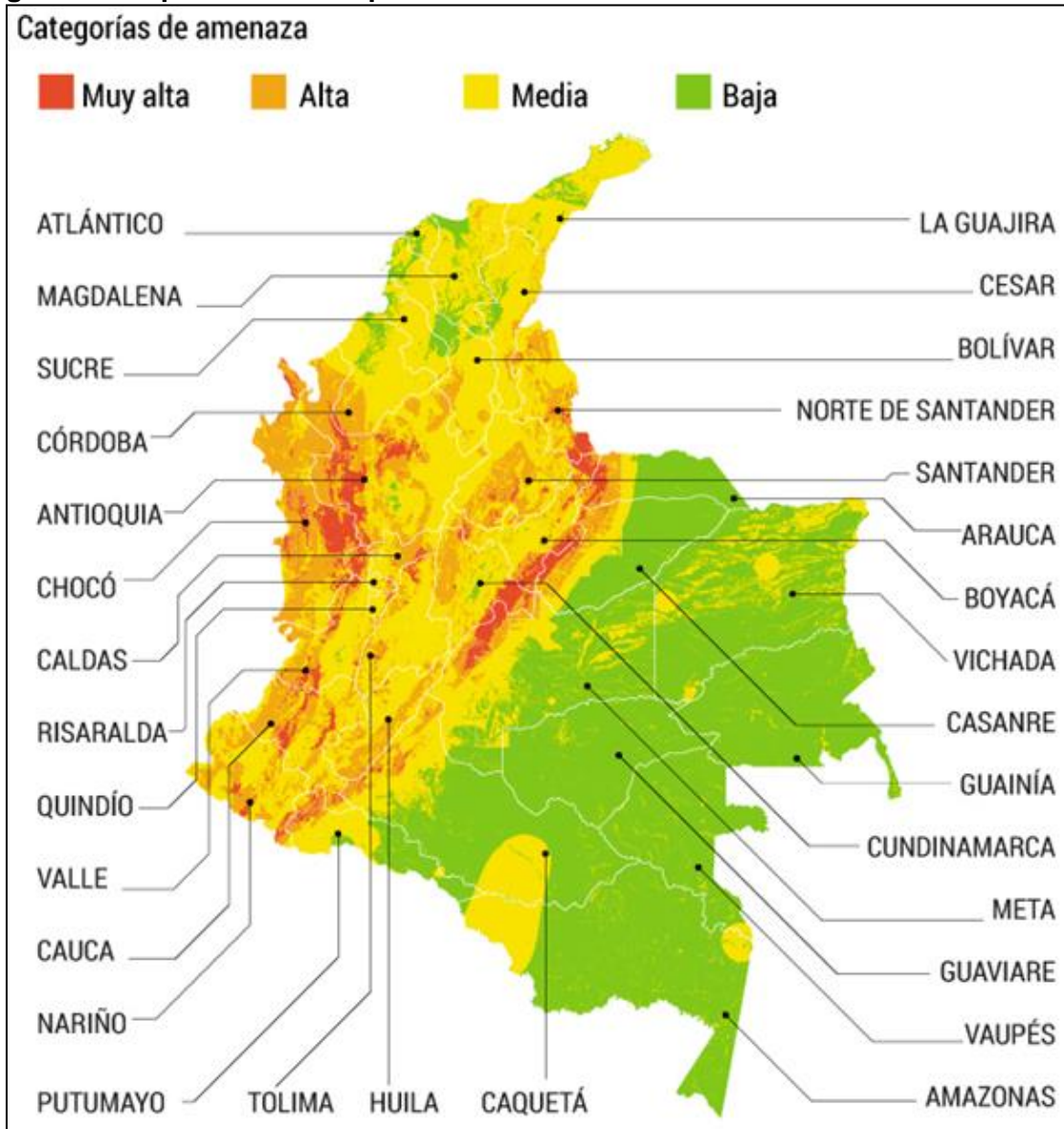
El número de registros históricos de la ocurrencia de flujos torrenciales se empleó como un criterio de verificación, considerando que un mayor registro de eventos ocurridos es el resultado de una susceptibilidad más alta, con respecto a una cuenca con menor cantidad de registros.

La principal fuente de información correspondió a DESINVENTAR, que es una base de datos creada por la corporación OSSO (Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano), una Organización No gubernamental (ONG) científica que sistematiza y pone gratuitamente a disposición del público las estadísticas de ocurrencia de desastres naturales a nivel nacional. Su importancia radica en que ha sistematizado datos de desastres para Colombia desde los años cincuenta y ha clasificado una tipología de desastres útil en la gestión del riesgo (Corporación OSSO 2016). Otras fuentes de información la constituyeron los registros de la Unidad Nacional para la Gestión del riesgo de Desastres (UNGRD) y reportes de diversos medios de comunicación consultados en internet.

Teniendo en cuenta los registros históricos de la ocurrencia de flujos torrenciales de las cuencas analizadas, se determinó el periodo de retorno de cada evento, considerando un lapso de 50 años, periodo en el cual se realizó la consulta de registros, determinando un grado de susceptibilidad de acuerdo con el periodo de retorno asociado. Un evento que presenta un periodo de retorno menor a 15 años se considera como de alta susceptibilidad a la ocurrencia de este evento, si el periodo de retorno se encuentra entre 16 y 25 años, la susceptibilidad se considera media, y si es mayor a 25 años, la susceptibilidad se considera como baja. Teniendo en cuenta esta consideración, con los registros históricos de cada una de las cuencas, se determinó el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales por cada cuenca, y se comparó con los resultados del indicador de susceptibilidad compuesto obtenido para cada cuenca, de esta forma se realizó una primera verificación de los resultados obtenidos con la aplicación del método.

3.3.2 Mapa de amenaza por movimientos en masa 2015

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) describió por medio de un mapa a escala 1:100.000, la amenaza por movimientos en masa a nivel nacional en 2015. En su elaboración estuvieron involucradas siete universidades y dos entidades de orden nacional (SGC y el IDEAM), con la participación de más de 300 profesionales. Este mapa es el resultado de estudios y análisis detallados de la condición de inestabilidad del terreno, por medio del análisis litológico, geomorfológico y edáfico, la cual depende del tipo de suelo o roca, de la historia de formación del paisaje y de la cobertura del suelo, así como de los fenómenos detonantes, tales como sismos o lluvias torrenciales. En la Figura 3.2 se presenta dicho mapa de amenazas por movimientos en masa del SGC. Para la elaboración de este mapa se utilizó un método heurístico de análisis jerárquico propuesto por el Servicio Geológico Colombiano – SGC, para lo cual se adelantaron actividades, tanto en campo como en oficina, integrando aspectos temáticos como la geología, geomorfología, suelos edáficos y coberturas del suelo. Este insumo es relevante para la verificación de los resultados del método, por qué se constituye en una fuente de información muy válida por el detalle y el trabajo realizado para su elaboración, adicionalmente, para la elaboración de este mapa se realizó en primer lugar un análisis de la susceptibilidad intrínseca del terreno a los movimientos en masa, los cuales están directamente relacionados con los flujos torrenciales.

Figura 3.2 Mapa de amenaza por movimientos en Masa - SGC

Fuente: Servicio Geológico Colombiano, 2015.

Cada categoría de amenaza de este mapa representa un cierto grado de amenaza relativa del terreno, a la ocurrencia de movimientos en masa, partiendo de la susceptibilidad, en conjunto con los factores desencadenantes propuestos en la metodología. El análisis de la susceptibilidad hace énfasis en la distribución de movimientos en masa en ladera y procesos de vertientes generadores de desequilibrio morfogenético (Servicio Geológico Colombiano 2012). A continuación, se presentan las categorías de susceptibilidad definidas por el SGC:

Susceptibilidad Baja: Zonas de ladera con pendientes inclinadas con el rango de 7° a 11° , presentes en unidades geomorfológicas de origen denudacional con geoformas de grandes planicies y altiplanos, de composición litológica en rocas ígneas de resistencia dura (Servicio Geológico Colombiano 2012).

Susceptibilidad Media: Zonas con laderas muy inclinadas a abruptas cuyo rango de pendientes es del orden de 11° a 19° , en unidades geomorfológicas de origen denudacional; estas geoformas son generadas en rocas del batolito antioqueño (dioritas, cuarzodioritas, adamelitas) y rocas metamórficas como anfibolitas, esquistos y neis, con resistencia de dura a media y la generación de espesos horizontes de suelos residuales, los cuales producen movimientos en masa tipo rotacional, traslacional y algunas caídas de suelos (Servicio Geológico Colombiano 2012).

Susceptibilidad Alta: Zonas con laderas muy abruptas a escarpadas con rangos de pendientes entre 19° a 40° , en unidades geomorfológicas de origen denudacional y estructural, en roncadas de origen ígneo y metamórfico, con espesos horizontes de suelos residuales. Son zonas propicias para la generación de procesos tipo flujo, caídas de suelos y de rocas (Servicio Geológico Colombiano 2012).

Susceptibilidad Muy Alta: Zonas de laderas muy escarpadas con pendientes superiores a 40° , unidades geomorfológicas de origen estructural, complejos de cerros, sierras estructurales, escarpes; generadas en rocas metamórficas como esquistos y neis de resistencia dura y afectadas por el paso de fallas regionales activas. Son zonas propias para la generación de procesos tipo caída de rocas y suelos, flujos torrenciales y de tierras (Servicio Geológico Colombiano 2012).

La metodología para la determinación de susceptibilidad y amenaza de movimientos en masa del SGC, se basa en un enfoque heurístico que depende en gran medida del conocimiento experto de un grupo interdisciplinario. Consiste en la asignación de ponderaciones a cada una de las variables involucradas en el análisis, las cuales corresponden la geomorfología, la litología, los suelos y las coberturas del terreno. Con el fin de establecer estas ponderaciones, el SGC utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), en el cual un panel de expertos califica las variables con base en una comparación en pares, obteniendo así escalas de prioridad, medidas en términos relativos (Ruiz, Medina, & Trejos, 2012). La susceptibilidad de un terreno a los movimientos en masa se define con base en las características intrínsecas de un terreno, y la amenaza con base en las condiciones externas, las cuales son la precipitación y los sismos. Entre las variables intrínsecas se consideró la información disponible a nivel nacional de unidades litológicas, de suelos de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos y de Sistemas Morfogenéticos, además de las variables obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevación.

Considerando lo anterior, este mapa representa una fuente de información totalmente independiente del ejercicio del Índice de Susceptibilidad Compuesto, y, considerando que los flujos torrenciales se pueden clasificar como un tipo de movimiento en masa rápido asociado a los cauces naturales, representa una herramienta de validación adecuada, considerando que el producto de este mapa es la zonificación de la amenaza del territorio nacional disponible para descargar libre, en formato raster.

Una vez obtenida la información de este mapa a nivel nacional, referente a la clasificación del nivel de amenaza, se procedió a realizar la identificación para cada una de las cuencas estudiadas, esto dando como resultado un mapa por cada cuenca, del cual se puede obtener el porcentaje de área de cada categoría de susceptibilidad de la cuenca. De esta manera se realiza un promedio ponderado por áreas con respecto al área total de la cuenca y se determina una categoría de amenaza por movimientos en masa para la cuenca, la

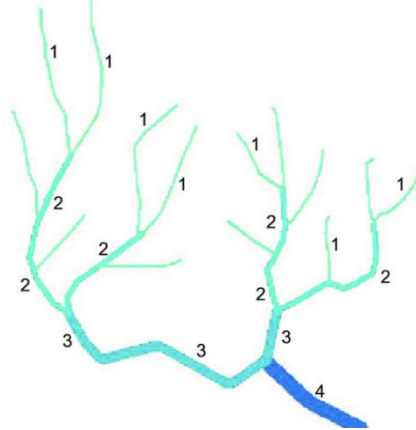
cual se compara con el resultado del ejercicio del indicador de susceptibilidad compuesto (ISC) y de esta manera se contrasta el resultado obtenido con el Índice de Susceptibilidad Compuesto.

3.3.3 Ordenamiento de cauces

El estudio cuantitativo de las redes de drenaje fue iniciado por R. E. Horton (Horton 1945), quien propuso un esquema de ordenamiento para la red de drenaje de una cuenca. Este esquema fue revisado posteriormente por Strahler (Strahler 1957), quien lo modificó resolviendo algunas ambigüedades (Mantilla, Mesa, and Poveda 1998).

El orden de Horton-Strahler es una forma numérica que expresa la complejidad de la red de drenaje de una cuenca. Los cauces en las zonas más altas de la cuenca que no poseen afluentes se denominan de orden uno, un cauce de orden dos corresponde a un tramo de cauce formado por la confluencia de dos cauces de orden uno. Los cauces de tercer orden se crean cuando dos cauces de segundo orden se unen, y así sucesivamente (ver Figura 3.3). Cuando dos cauces de diferente orden se unen, el orden que prevalece es el mayor. El orden de Horton-Strahler se correlaciona muy bien con otros parámetros morfométricos de la cuenca, tales como el área de drenaje y longitud de la red de drenaje, es decir, que el área de la cuenca presenta una relación directa con el orden del cauce principal hasta su punto de concentración de aguas, así como la longitud total de los drenajes de la cuenca.

Figura 3.3. Esquema definición orden de Horton



Fuente: (Wang Zhaoyin, Zhiwei Li, Mengzhen Xu, Xu Mengzhen 2016)

Con base en este ordenamiento, se han revelado algunas regularidades existentes en la red de drenaje, relacionadas con la estructura de bifurcación, y su distribución espacial. Los primeros resultados empíricos sobre estas regularidades se conocen como las Leyes de Horton. La ley de Horton para el número de corrientes se expresa como:

$$\frac{N(\omega)}{N(\omega + 1)} \cong R_B \text{ ó } N_\omega \cong R_B^{\Omega - \omega} \quad \omega = 1, 2, \dots, \Omega \quad (29)$$

Donde $N(\omega)$ es el número de corrientes de orden ω y R_B es conocida como la relación de Bifurcación. La ley de Horton para la longitud de las corrientes se expresa como:

$$\frac{L(\omega)}{L(\omega - 1)} \cong R_L \text{ ó } L_\omega \cong R_L^{\omega-1} \quad \omega = 2, 3, \dots, \Omega \quad (30)$$

Donde $L(\omega)$ es la longitud promedio de las corrientes de orden ω y R_L es conocida como la relación de longitud. Los valores típicos de R_B y R_L son 4 y 2 respectivamente, variando en un rango de 3 a 5 para R_B y de 1.5 a 3.5 para R_L . Horton predijo además que el área de drenaje debía crecer geométricamente de igual manera que las relaciones anteriormente mencionadas. Schumm (1956) propuso esta relación que se expresa así:

$$\frac{C(\omega)}{C(\omega - 1)} \cong R_C \text{ ó } C_\omega \cong R_C^{\omega-1} \quad \omega = 2, 3, \dots, \Omega \quad (31)$$

Dónde $C(\omega)$ es el número de segmentos en una corriente de orden ω . El valor usualmente encontrado en estudios de campo para R_C es de alrededor de 2 (Mantilla, Mesa, and Poveda 1998).

De otra parte, la experiencia sugiere que los drenajes más susceptibles a generar flujos torrenciales corresponden a aquellos cauces de orden menor, dadas sus altas pendientes y su localización en la parte más alta de las cuencas (Zavoianu 1985). Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a determinar el número de orden de los cauces principales de las cuencas analizadas, a partir de la cartografía disponible para comparar posteriormente con los resultados obtenidos del Índice de Susceptibilidad Compuesto. Por lo anterior se considera que es un buen parámetro para comparar el comportamiento observado en las cuencas.

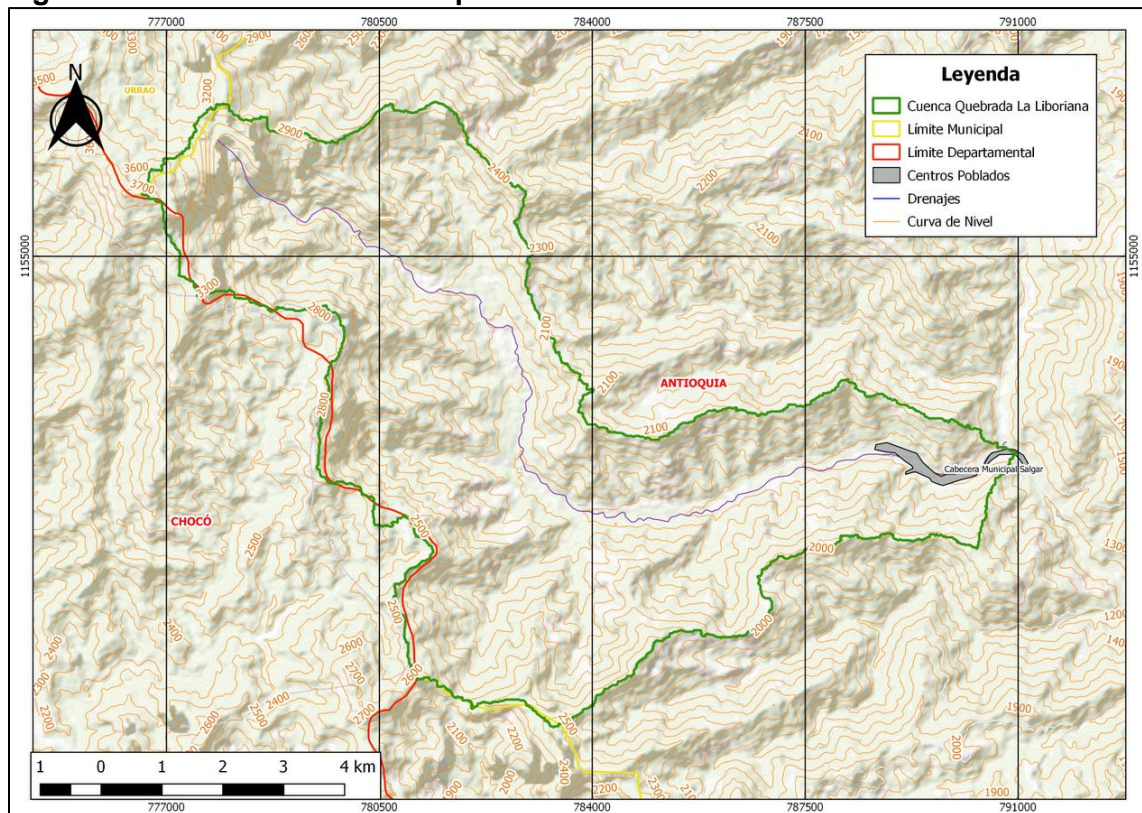
4 DESARROLLO

En este capítulo se presenta el detalle del desarrollo de la aplicación de la metodología desarrollada en este Trabajo Final, desde la selección del área de estudio, la estimación del indicador morfométrico, indicador de cobertura, la determinación del indicador compuesto de susceptibilidad y finalmente las estrategias de verificación empleadas.

4.1 SELECCIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

La selección de las cuencas consideradas obedeció a un análisis y búsqueda de información de eventos torrenciales en bases de datos de desastres, tales como DESINVENTAR y la UNGRD, así como en noticias en medios oficiales. Esto permitió identificar cuencas susceptibles a la ocurrencia de flujos torrenciales, en diferentes regiones del país, como lo son los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Putumayo, Valle del Cauca y el Tolima. Una vez identificados los sitios específicos de afectación, se realizó la delimitación de las cuencas teniendo en cuenta la cartografía base, drenajes, curvas de nivel y el modelo de elevación de terreno; a modo de ejemplo, en la Figura 4.1 se presenta la delimitación de la cuenca de la quebrada Liboriana junto con la red de drenaje y las curvas de nivel. En el anexo 3 se presentan las figuras detalladas de cada una de las cuencas estudiadas. Tal como se mencionó en la metodología, el punto de concentración seleccionado correspondió al sitio de afectación reportado en los registros históricos de la ocurrencia de flujos torrenciales, que corresponde a los centros poblados que se presentan en la Tabla 4.1.

Figura 4.1 Delimitación cuenca quebrada Liboriana



Fuente: Elaboración propia, a partir de cartografía IGAC y MDE Alos Palsar.

En la Tabla 4.1 se presentan las cuencas identificadas con el mayor número de registros de la ocurrencia de flujos torrenciales, teniendo en cuenta la zonificación hidrográfica del IDEAM, la cual consiste en una división del territorio nacional en grandes áreas, denominadas áreas hidrográficas que se asocian a las grandes vertientes separando la cuenca Magdalena – Cauca de la vertiente Caribe por su importancia política y socioeconómica. Éstas a su vez se dividen en unidades de menor tamaño, en zonas y subzonas, que permiten implementar las directrices de gestión y planificación ambiental del territorio (IDEAM 2013).

Tabla 4.1 Cuencas hidrográficas seleccionadas

Área Hidrográfica	Zona Hidrográfica	Subzona Hidrográfica	Cuenca	Punto de concentración	Departamento
Magdalena – Cauca (2)	Cauca (26)	Río San Juan (2619)	Quebrada Liboriana	Salgar	Antioquia
		Río San Juan (2619)	Río Tapartó	Tapartó	
		Río Guachal (2607)	Río Fraile	Florida	Valle del Cauca
	Alto Magdalena (21)	Río Coello (2121)	Río Combeima	Villa Restrepo	Tolima
	Medio Magdalena (23)	Río Negro (2306)	Quebrada La Negra	Útica	Cundinamarca
Amazonas (4)	Caquetá (44)	Alto Caquetá (4401)	Río Mulato	Mocoa	Putumayo
			Río Sangoyaco	Mocoa	

* Código del área Hidrográfica (IDEAM 2013).

** Código de la Zona Hidrográfica (IDEAM 2013).

*** Código de la Subzona Hidrográfica (IDEAM 2013).

Fuente: Elaboración propia, 2019, a partir de (IDEAM 2013).

Adicionalmente a estas cuencas, se delimitaron subcuencas de cada una de ellas, tomando como punto de concentración el punto de cambio de pendiente más evidente del perfil longitudinal del cauce principal. El número total de cuencas analizadas es de 15, que corresponden a las 7 cuencas presentadas en la Tabla 4.1, las cuales cuentan con registros históricos de la ocurrencia de flujos torrenciales en su punto de concentración, 7 subcuencas de cada una de las cuencas iniciales, y por último, la cuenca del río Combeima en su totalidad, es decir hasta su desembocadura en el río Coello, ya que se considero como cuenca de prueba al ser una cuenca que en su punto de concentración ya no presenta este tipo de procesos, teniendo en cuenta que no se reportan registros de la ocurrencia de este tipo de fenómenos, así como su pendiente baja a lo largo de la parte baja de la cuenca.

4.1.1 Quebrada La Liboriana

La cuenca de la quebrada Liboriana se localiza en el departamento de Antioquia, en el municipio de Salgar, cuya cabecera municipal ha sufrido en diferentes ocasiones a lo largo del último siglo, la ocurrencia de flujos torrenciales que han afectado de manera significativa a la población. El último de estos eventos ocurrió el 18 de mayo de 2015, que ocasionó la muerte de más de 92 personas. Las intensas lluvias en la noche del 17 de mayo y primeras horas del 18 de mayo provocaron que la quebrada La Liboriana se desbordara, generando un flujo torrencial con alto contenido de sedimentos, piedras y

árboles que afectó principalmente el corregimiento Las Margaritas y dos barrios del casco urbano del municipio de Salgar (ver Fotografía 4-1). El punto de concentración de la cuenca corresponde a la cabecera municipal del municipio de Salgar, de acuerdo con los registros encontrados representa el sitio de afectación de los diferentes flujos torrenciales, el área de la cuenca es de 58.6 km². Adicionalmente se realizó la delimitación de una subcuenca de la quebrada La Liboriana, tomando como punto de concentración el cambio de pendiente más marcado en el perfil del cauce principal (ver Figura 4.2), con el fin de contar con más cuencas para el análisis, aunque no se cuente con registros históricos en este punto. El área de esta subcuenca es de 43.76 km².

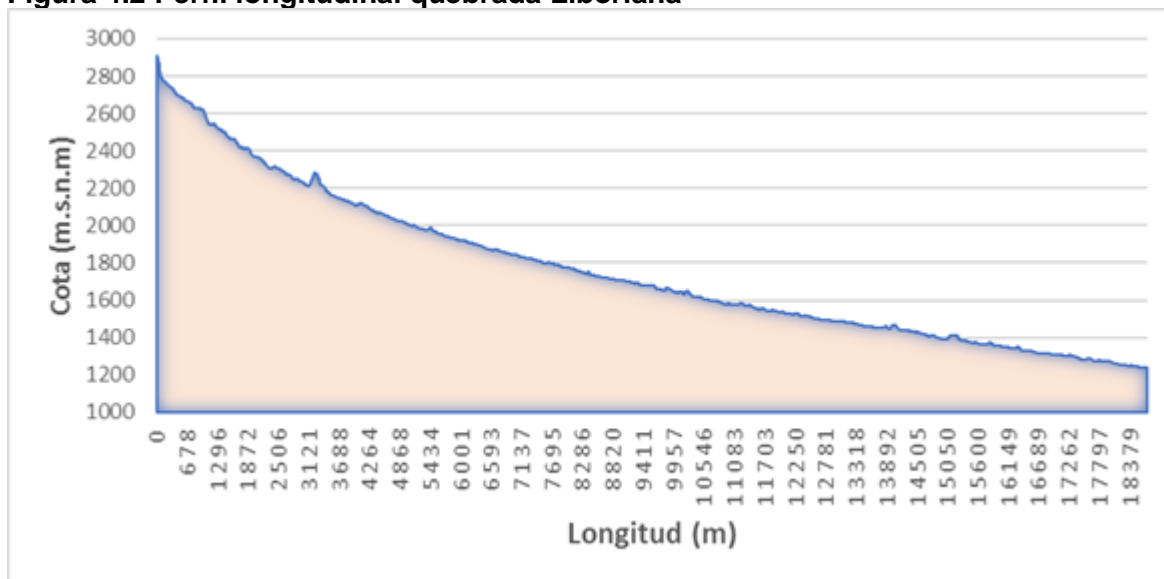
Fotografía 4-1 Municipio de Salgar después de avenida torrencial de 18 de mayo de 2015.



Fuente: (Semana 2015).

En la Figura 4.2 se presenta el perfil longitudinal de la quebrada La Liboriana obtenido a partir del trazado del cauce principal y el modelo digital de elevación por medio del software Qgis, en el cual se aprecian las alturas máxima y mínima al largo de toda su longitud, la pendiente media del cauce principal corresponde a 0.085 m/m.

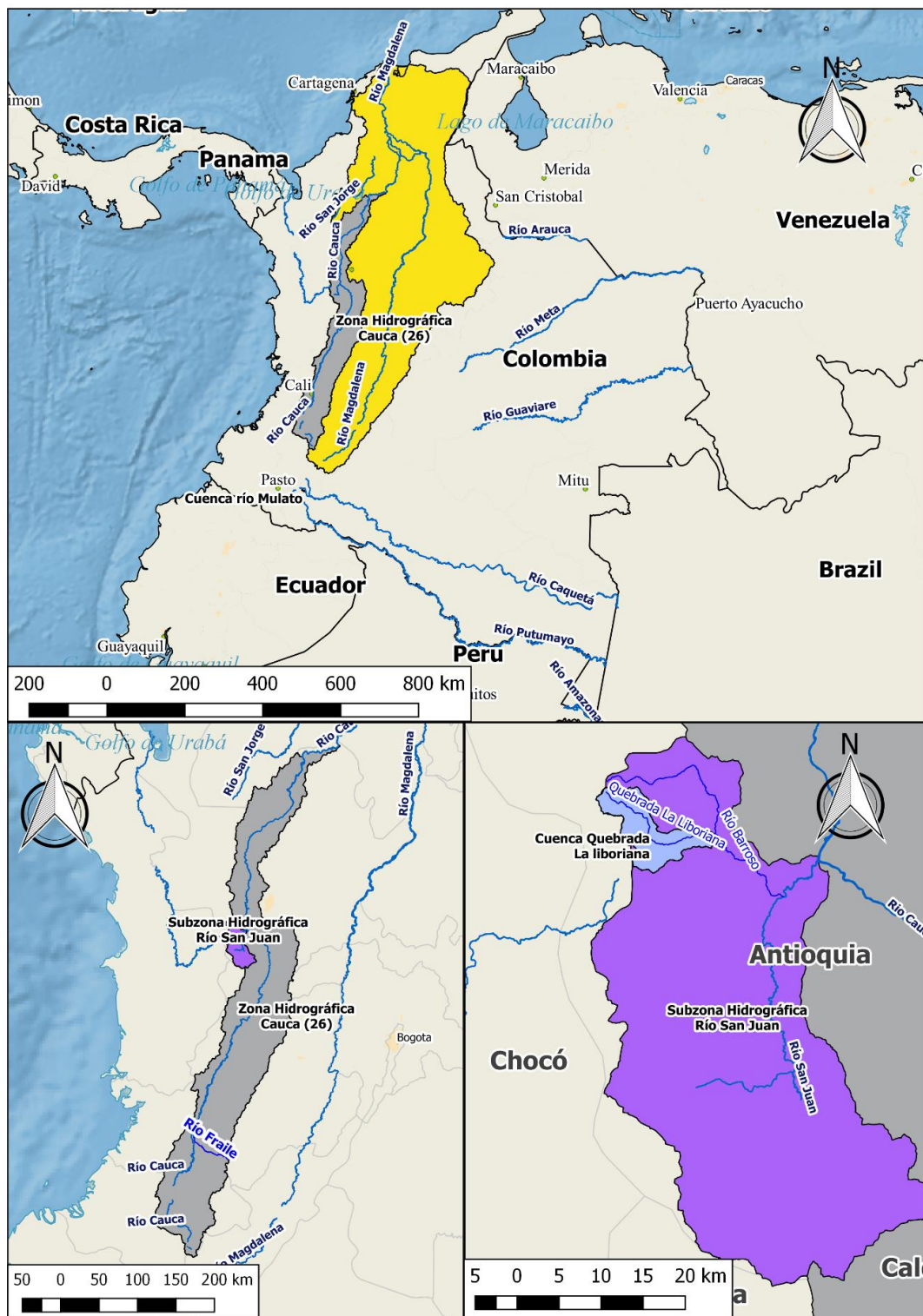
Figura 4.2 Perfil longitudinal quebrada Liboriana



Fuente: Elaboración propia, 2018, a partir de modelo de terreno Alos Palsar.

En la Figura 4.3 se presenta la localización general de la cuenca de la quebrada La Liboriana con respecto a la zonificación hidrográfica del IDEAM 2013, donde se aprecia que la cuenca se localiza en el Área Hidrográfica Magdalena – Cauca (2), en la zona hidrográfica Cauca (26) y en la subzona hidrográfica del río San Juan (2619).

Figura 4.3. Localización general cuenca quebrada La Liboriana

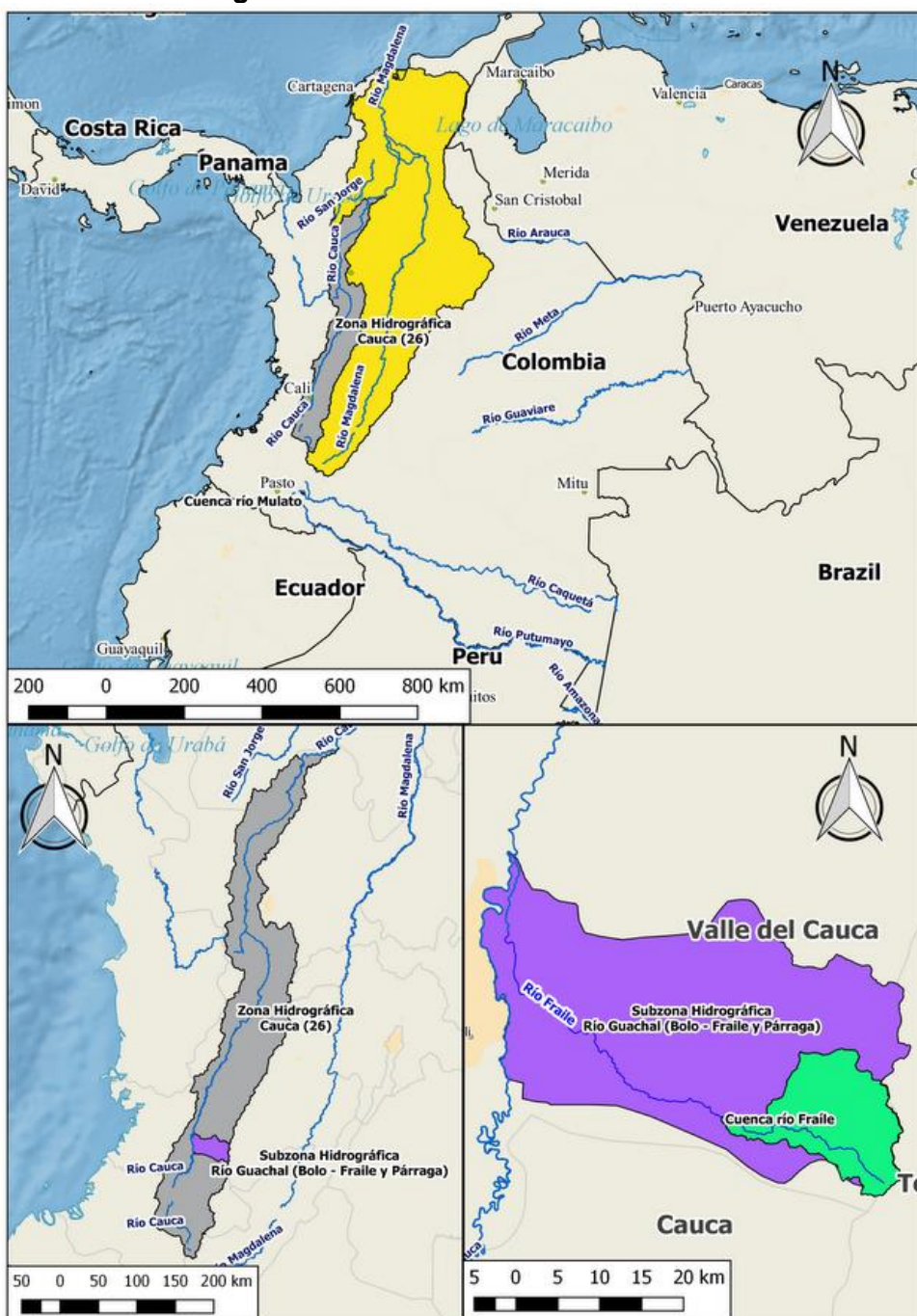


Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Zonificación hidrográfica IDEAM 2013.

4.1.2 Río Fraile

En la Figura 4.4 se presenta la localización general de la cuenca del río Fraile delimitada hasta el casco urbano del municipio de Florida Valle del Cauca. Con respecto a la zonificación hidrográfica, la cuenca del río Fraile se localiza en el área hidrográfica Magdalena – Cauca (2), en la zona hidrográfica Cauca (26) y en la subzona hidrográfica del río Guachal (2607).

Figura 4.4. Localización general cuenca río Fraile

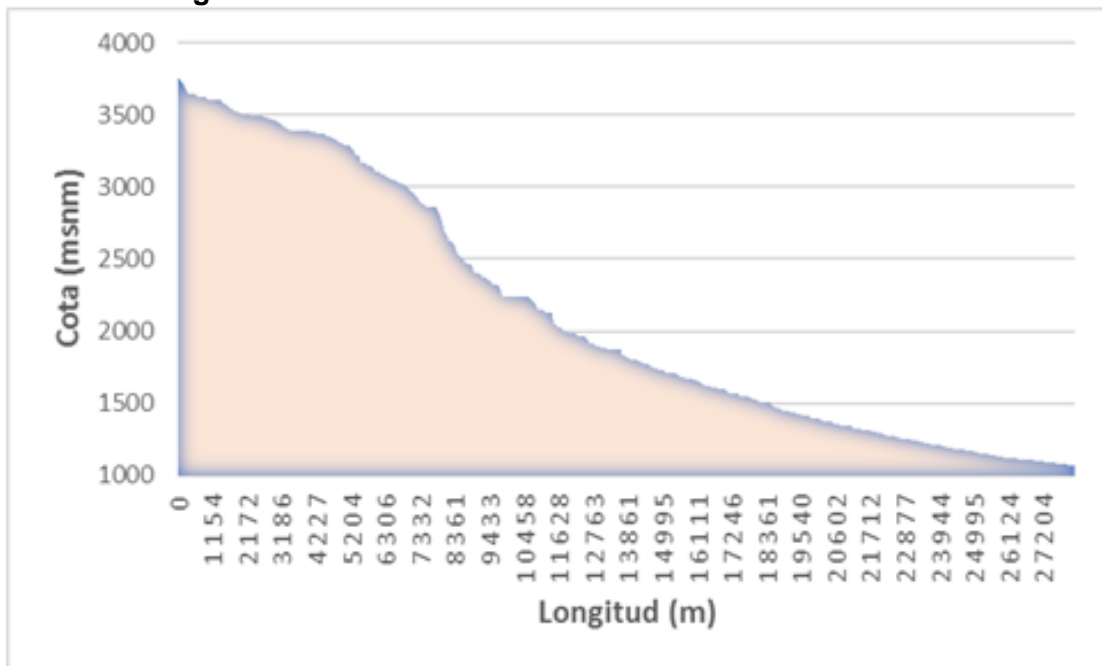


Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Zonificación hidrográfica IDEAM 2013.

El punto de concentración de la cuenca corresponde a la cabecera municipal del municipio de Florida, Valle del Cauca, de acuerdo con los registros encontrados (J. L. González, Chavez, and Hermelin 2005) representa el sitio de afectación de los diferentes flujos torrenciales, el área de la cuenca es de 186.06 km². Tal como se mencionó en la metodología, adicionalmente se realizó la delimitación de una subcuenca del río Fraile, tomando como punto de concentración el cambio de pendiente más marcado en el perfil del cauce principal (ver Figura 4.5), con un área de 55.90 km².

El 31 de enero de 1994, una tormenta ocurrió en la parte alta del Río Fraile, cerca de su nacimiento. Originó una gran escorrentía y numerosos flujos de tierra que se generaron en pendientes abruptas. El alto caudal de agua y sedimentos causó graves daños a la población de Florida y dejó un gran depósito a la entrada del cañón (J. L. González, Chavez, and Hermelin 2005). En la Figura 4.5 se presenta el perfil longitudinal del río Fraile, en la cual se aprecia las grandes pendientes del cauce en la parte alta de la cuenca. la pendiente media del cauce principal corresponde a 0.094 m/m.

Figura 4.5 Perfil longitudinal río Fraile

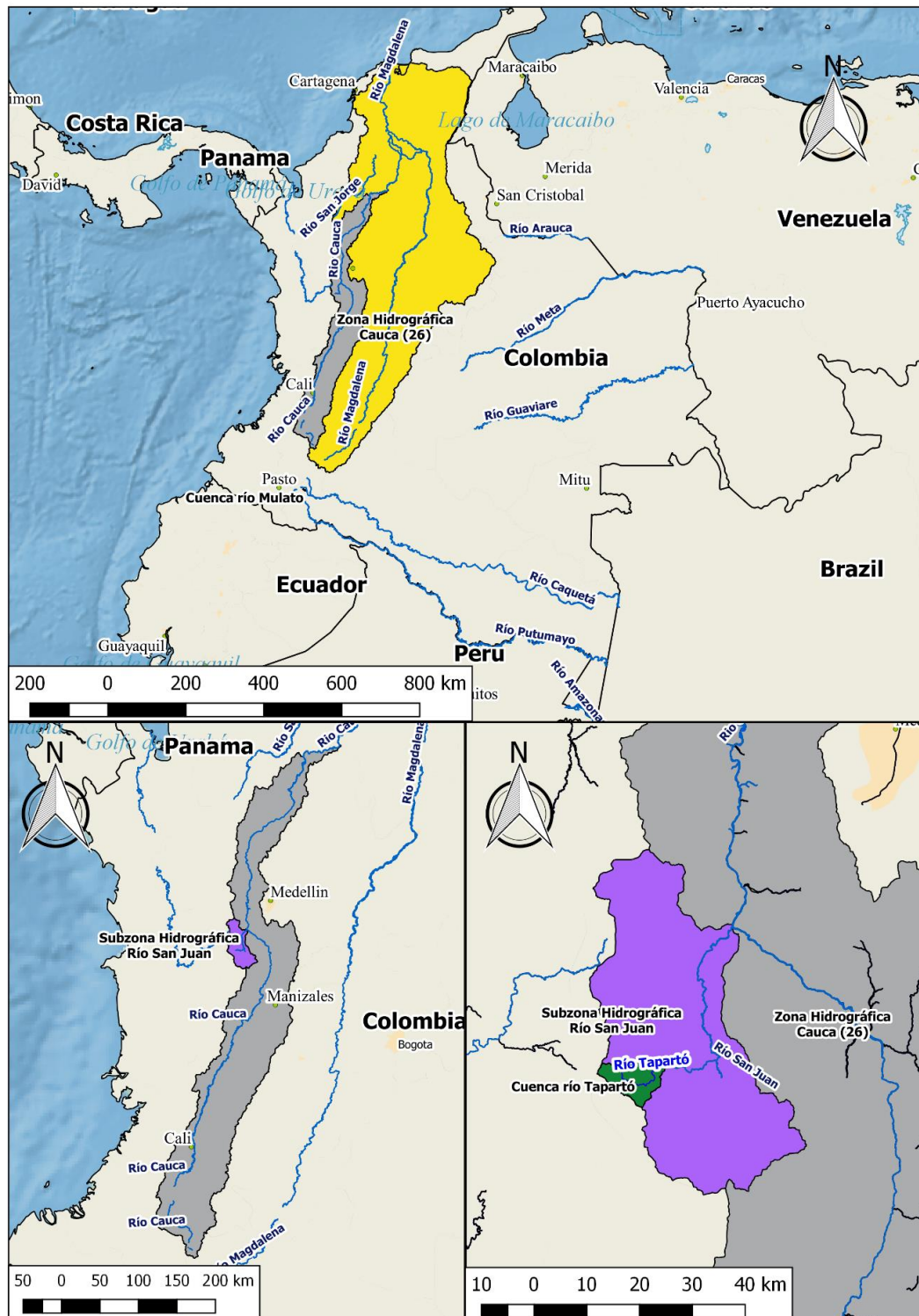


Fuente: Elaboración propia, 2018, a partir de modelo de terreno Alos Palsar.

4.1.3 Río Tapartó

En la Figura 4.6 se presenta la localización general de la cuenca del río Tapartó, ubicada en el departamento de Antioquia. Con respecto a la zonificación hidrográfica del IDEAM, la cuenca del río Tapartó se localiza en el Área Hidrográfica Magdalena – Cauca (2), en la zona hidrográfica Cauca (26) en la subzona hidrográfica del río San Juan (2619). El punto de concentración de la cuenca corresponde a la cabecera municipal del municipio de Tapartó, de acuerdo con los registros encontrados representa el sitio de afectación de los diferentes flujos torrenciales, el área de la cuenca es de 68.36 km². Adicionalmente se realizó la delimitación de una subcuenca del río Tapartó, tomando como punto de concentración el cambio de pendiente más marcado en el perfil del cauce principal; esta subcuenca presenta un área de 40.16 km².

Figura 4.6. Localización general cuenca río Tapartó



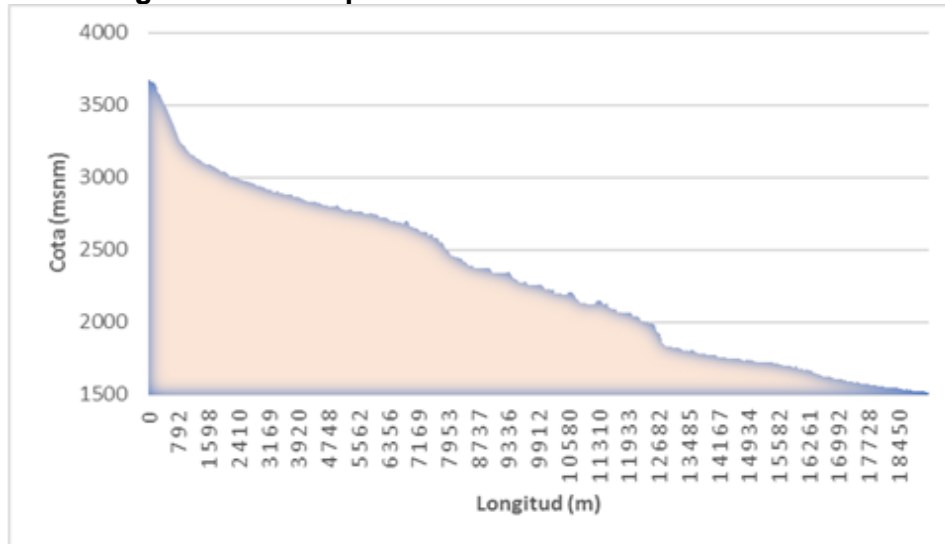
Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Zonificación hidrográfica IDEAM 2013.

El evento más reciente en el río Tapartó tuvo lugar la noche del 25 al 26 de abril de 1993. El impacto directo del flujo causó grandes pérdidas humanas y materiales, el evento dejó

esencialmente dos tipos de evidencias a lo largo de su paso, los depósitos de material sólido que transportaba el flujo torrencial y la socavación del lecho del río.

Los depósitos sepultaron a su vez antiguos depósitos fluviotorrenciales con pendientes similares a las del río (ver Figura 4.7). El paso del flujo sobre los depósitos antiguos no derribó árboles de gran tamaño, aunque arrasó con la cobertura vegetal arbustiva. La pendiente media del cauce principal corresponde a 0.084 m/m.

Figura 4.7 Perfil longitudinal río Tapartó



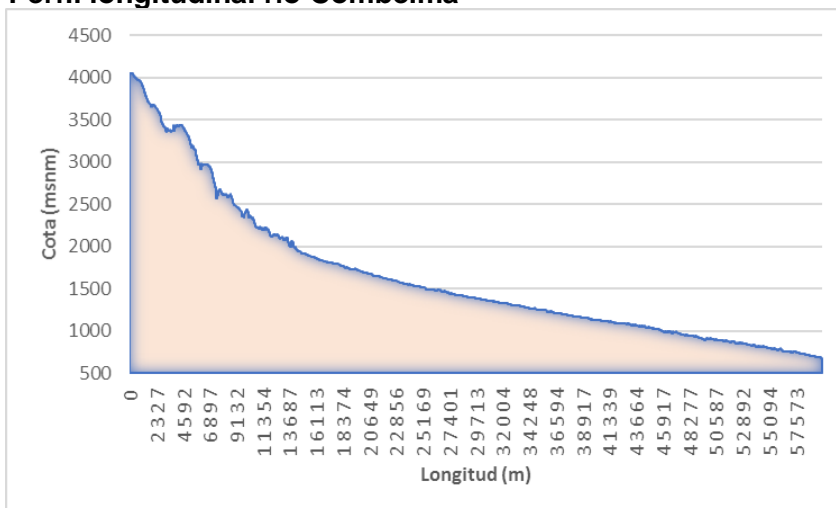
Fuente: Elaboración propia, 2018, a partir de modelo de terreno Alos Palsar.

4.1.4 Río Combeima

En la Figura 4.9 se presenta la localización general de la cuenca del río Combeima hasta su desembocadura en el río Coello, la cual se localiza en el municipio de Ibagué en el departamento del Tolima. Con respecto a la zonificación hidrográfica, la cuenca del río Combeima se localiza en el Área hidrográfica Magdalena – Cauca (2), en la zona hidrográfica Alto Magdalena (21) y en la subzona hidrográfica del río Coello (2121). En la Figura 4.8 se presenta el perfil longitudinal del río Combeima, donde se aprecian las altas pendientes en su parte alta y su disminución hacia la parte baja de la cuenca.

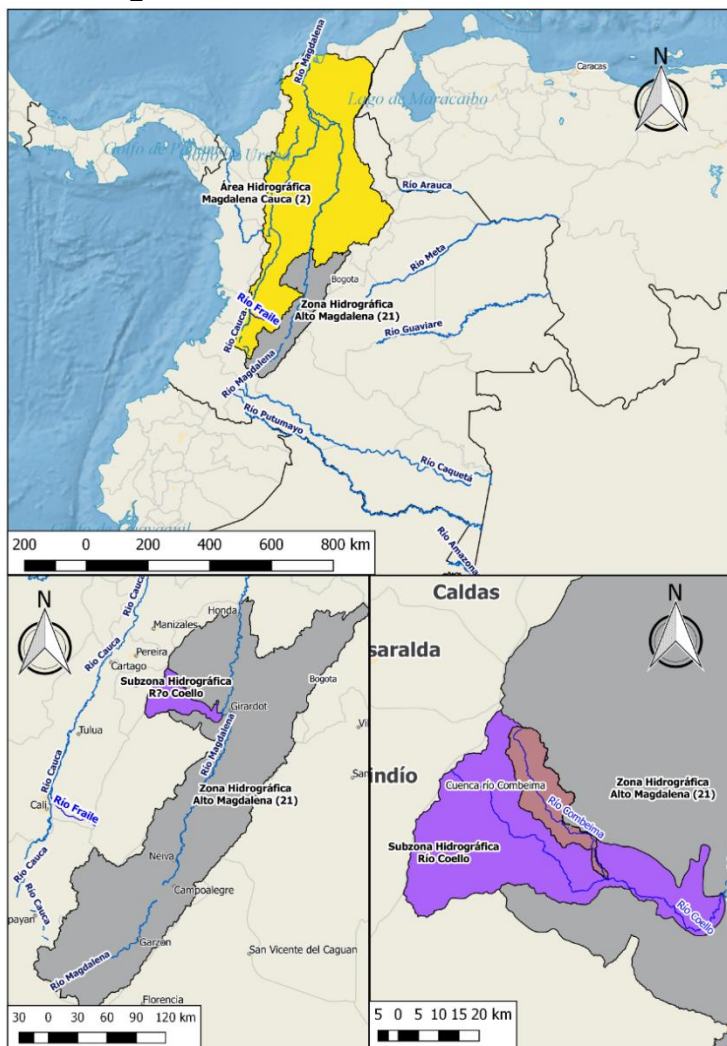
Para esta cuenca se consideraron diferentes puntos de concentración, en su desembocadura, para considerar una cuenca de grandes dimensiones que no presenta registros de la ocurrencia a flujos torrenciales, que presenta un área de 281.69 km², otro punto de concentración corresponde al municipio de Villa Restrepo, el cual cuenta con registros de la ocurrencia de flujos torrenciales, que cuenta con un área de 116.71 km². Adicionalmente se realizó la delimitación de una segunda subcuenca, tomando como punto de concentración el cambio de pendiente más marcado en el perfil del cauce principal, con un área de 44.8 km², la pendiente media del cauce principal para la cuenca delimitada hasta el municipio de Villa Restrepo es de 0.111.

Figura 4.8 Perfil longitudinal río Combeima



Fuente: Elaboración propia, 2018, a partir de modelo de terreno Alos Palsar.

Figura 4.9. Localización general cuenca río Combeima desembocadura

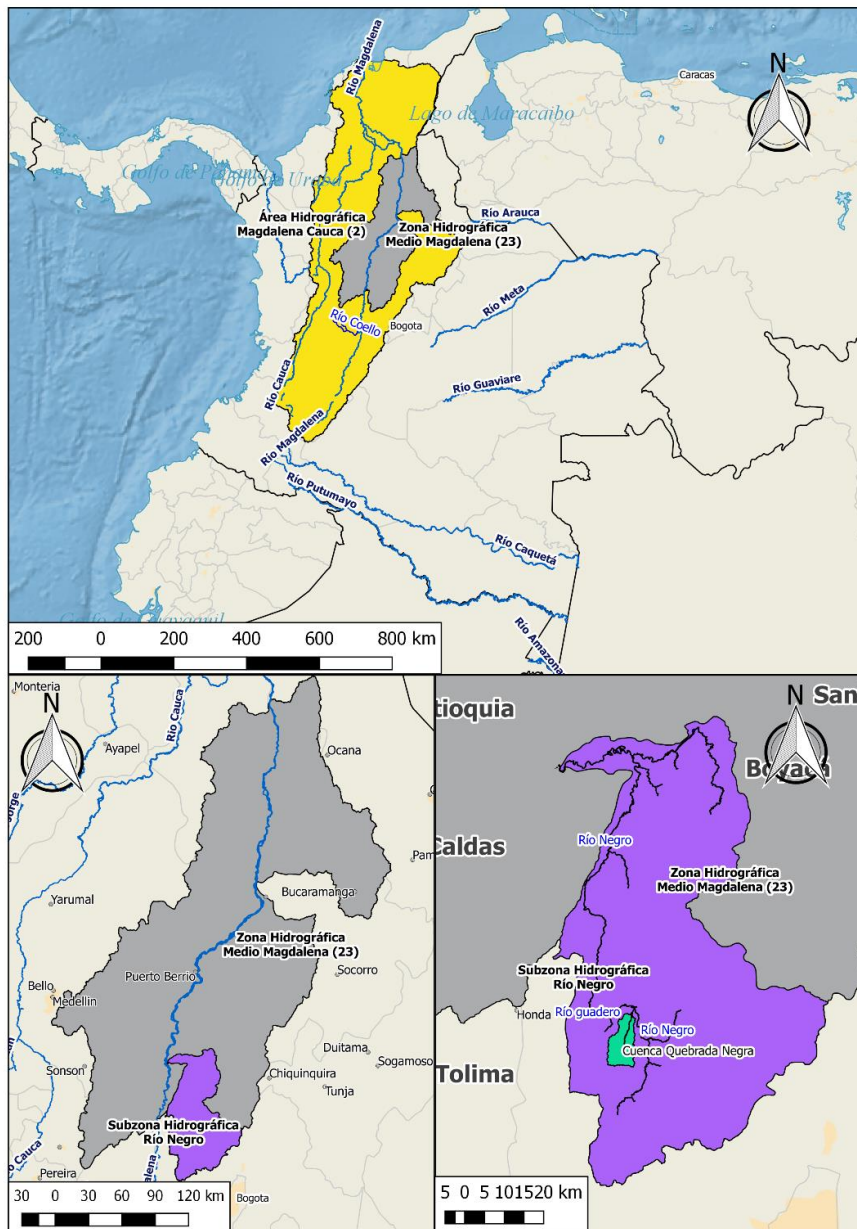


Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Zonificación hidrográfica IDEAM 2013.

4.1.5 Quebrada La Negra

En la Figura 4.10 se presenta la localización general de la cuenca de la Quebrada La Negra delimitada hasta la cabecera municipal de Útica. El área de la cuenca se localiza entre los municipios de Útica y Quebradanegra en el departamento de Cundinamarca. Con respecto a su localización hidrográfica, la cuenca de la quebrada La Negra se localiza en el área hidrográfica Magdalena – Cauca (2), zona hidrográfica Medio Magdalena (23) y en la subzona hidrográfica río Negro (2306). Esta cuenca hizo parte del estudio llevado a cabo por los autores del método, a modo de validación de los resultados, en el presente trabajo final se tiene en cuenta esta cuenca con el fin de realizar una comparación directa de los resultados obtenidos del indicador de susceptibilidad compuesto.

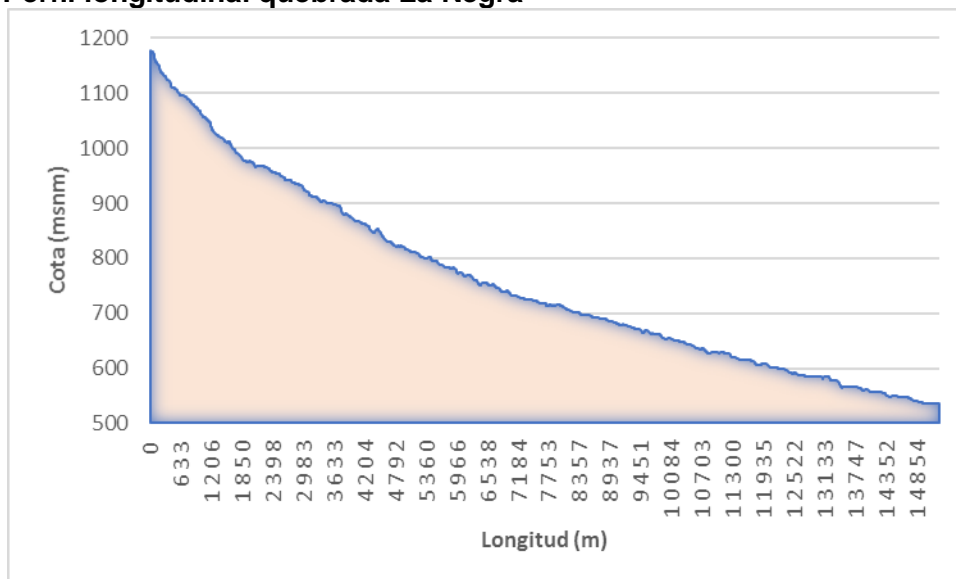
Figura 4.10. Localización general cuenca quebrada La Negra



Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Zonificación hidrográfica IDEAM 2013.

El punto de concentración de la cuenca corresponde a la cabecera municipal del municipio de Útica, de acuerdo con los registros encontrados representa el sitio de afectación de los diferentes flujos torrenciales, el área de la cuenca es de 69.82 km². Adicionalmente se realizó la delimitación de una subcuenca de la quebrada La Negra, tomando como punto de concentración el cambio de pendiente más marcado en el perfil del cauce principal con un área de 42.35 km². En la Figura 4.11 se presenta el perfil longitudinal de la quebrada La Negra, donde se aprecian sus altas pendientes en la parte alta del a cuenca y su disminución gradual hacia la parte baja. La pendiente media del cauce principal corresponde a 0.041 m/m.

Figura 4.11 Perfil longitudinal quebrada La Negra



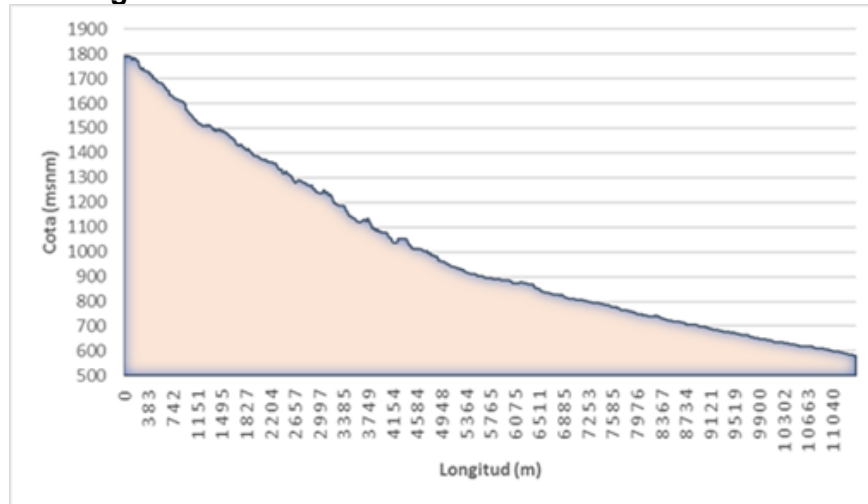
Fuente: Elaboración propia, 2018, a partir de modelo de terreno Alos Palsar.

4.1.6 Ríos Mulato y Sangoyaco

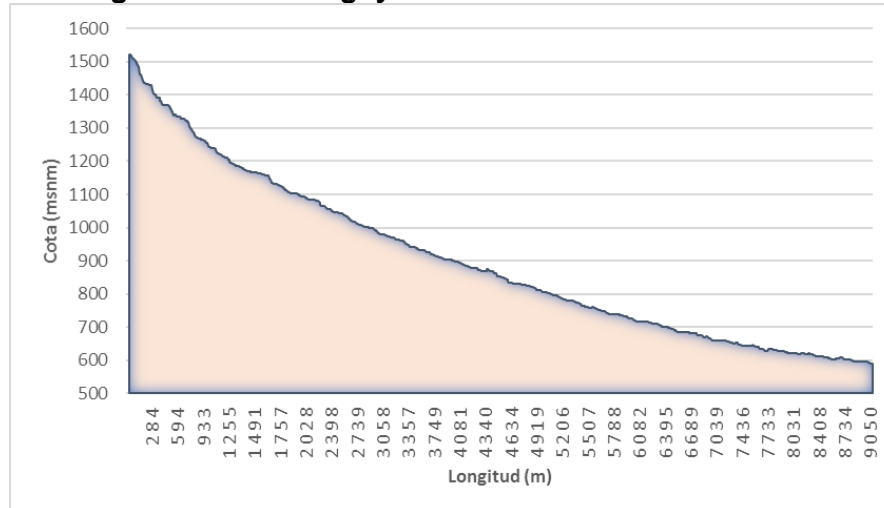
En la Figura 4.14 se presenta la localización general de las cuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco, localizadas en el municipio de Mocoa, departamento de Putumayo. Con respecto a la zonificación hidrográfica, estas cuencas están localizadas en el Área Hidrográfica del Amazonas (4), en la Zona hidrográfica del Caquetá (44) y en la subzona hidrográfica Alto Caquetá (4401).

El punto de concentración de ambas cuencas corresponde a la cabecera municipal del municipio de Mocoa, de acuerdo con los registros encontrados representa el sitio de afectación de los diferentes flujos torrenciales, el área de la cuenca del río Mulato es de 17.65 km² y del río Sangoyaco es de 14.53 km². En la Figura 4.12 se presenta el perfil longitudinal del río Mulato y en la Figura 4.13 el del río Sangoyaco. La pendiente media del cauce del río Mulato es de 0.104 m/m y del río Sangoyaco es de 0.102 m/m.

Adicionalmente se realizó la delimitación de subcuencas de ambas cuencas, tomando como punto de concentración el cambio de pendiente más marcado en el perfil del cauce principal, la subcuenca del río Mulato tiene un área de 9.89 km² y la subcuenca del río Sangoyaco un área de 2.44 km².

Figura 4.12 Perfil longitudinal río Mulato

Fuente: Elaboración propia, 2018, a partir de modelo de terreno Alos Palsar.

Figura 4.13 Perfil longitudinal río Sangoyaco

Fuente: Elaboración propia, 2018, a partir de modelo de terreno Alos Palsar.

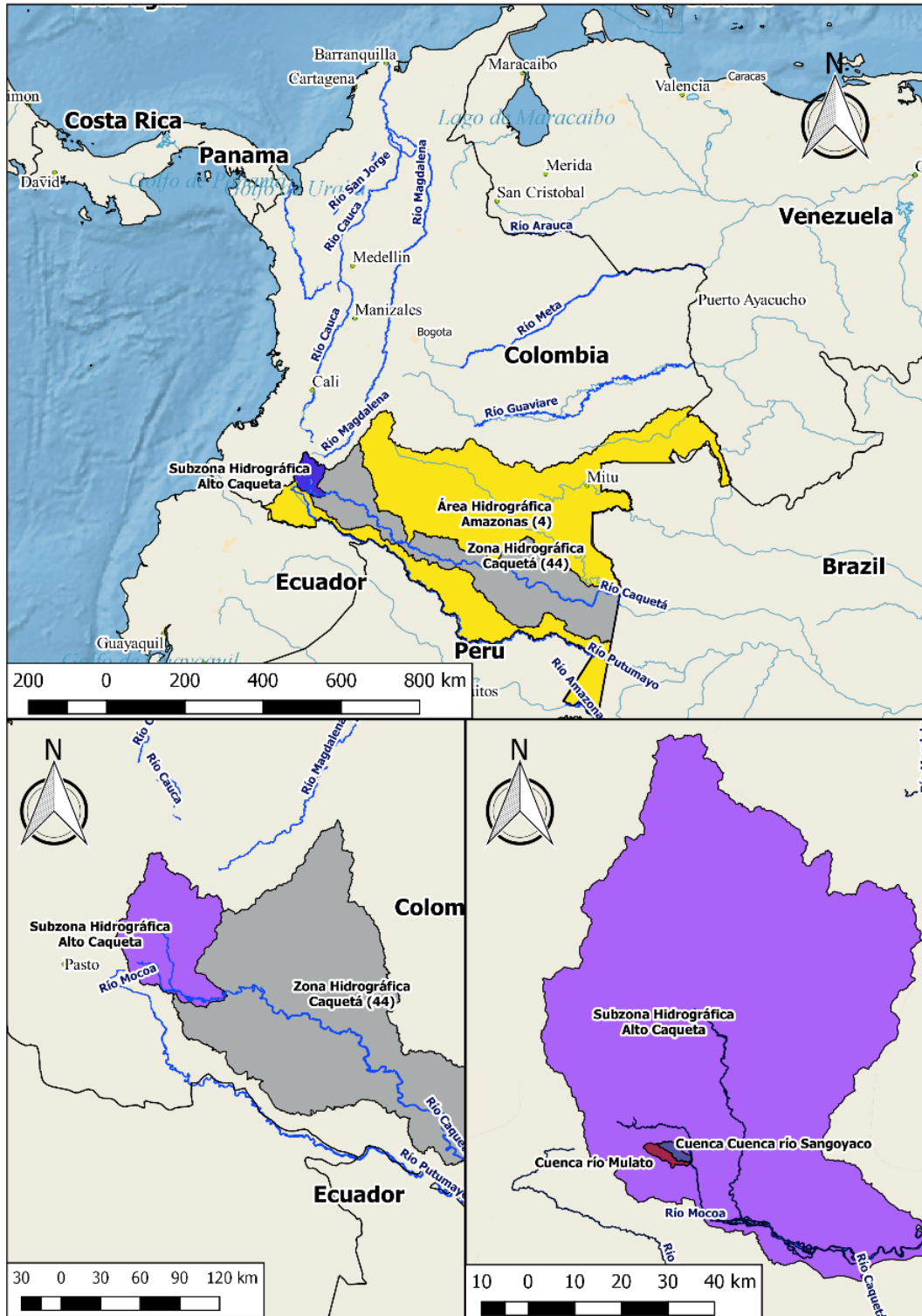
En la Fotografía 4-2 se aprecia la vista aérea del municipio de Mocoa tras avalancha del 1° de abril de 2017, provocada por el flujo torrencial que tránsito por los cauces de los ríos Mulato y Sangoyaco, que desembocan en el río Mocoa, los cuales arrastraron grandes cantidades de sedimentos y material rocoso de gran tamaño proveniente de la parte altas de las cuencas.

Fotografía 4-2 Municipio de Mocoa, flujo torrencial del 1° de abril de 2017



Fuente: El Mundo, 2017. Consultado en: <https://www.elmundo.com/noticia/Mocoael-rastro-que-deja-la-falencia-en-la-prevencion-de-desastres/349980>.

Figura 4.14. Localización general cuenca ríos Mulato y Sangoyaco



Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Zonificación hidrográfica IDEAM 2013.

4.2 APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD COMPUESTO

4.2.1 Parámetros Morfométricos

En la Tabla 4.2 se presentan los parámetros morfométricos relacionados con el tamaño de la cuenca, para cada una de las unidades hidrográficas seleccionadas para el análisis. El cálculo de estos parámetros se realizó mediante uso de herramientas SIG (QGIS y SAGA). Estos parámetros corresponden a mediciones directas de la geometría de las cuencas. Es posible apreciar que la cuenca de mayor tamaño corresponde a la del río Combeima tomando como punto de concentración, su desembocadura en el río Coello, cuenta con la mayor área superficial, mayor longitud y mayor longitud del cauce principal, sin embargo, la cuenca más ancha corresponde a la del río Fraile. De las cuencas que cuentan con registros históricos de ocurrencia de flujos torrenciales, las del río Mulato y Sangoyaco corresponden a las más pequeñas, siendo esta última la de menor tamaño.

Tabla 4.2. Parámetros asociados al tamaño de la cuenca

Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Longitud de la cuenca (km)	Longitud cauce principal (km)	Ancho de la cuenca (km)
	A	P	Lwshd	Lstr	Wwshd
Quebrada La Liboriana	58.63	65.12	16.540	18.71	3.55
Río Combeima desembocadura	281.69	179.47	41.726	59.88	5.77
Río Combeima Villa Restrepo	116.71	71.10	16.249	20.75	6.89
Quebrada La Negra	69.82	58.67	14.081	15.30	5.03
Río Tapartó	68.36	56.85	13.643	19.22	4.04
Río Mulato	17.65	38.77	10.939	11.40	1.62
Río Sangoyaco	14.53	30.37	8.288	9.09	1.76
Río Fraile	186.06	104.88	22.649	28.22	7.70
Sub_Tapartó*	40.16	46.37	11.500	12.89	3.49
Sub_Fraile*	55.90	48.19	10.948	10.52	5.11
Sub_Liboriana*	43.76	50.77	10.777	12.00	4.06
Sub_Sangoyaco*	2.44	10.14	3.121	2.83	0.78
Sub_Mulatos*	9.89	19.08	5.560	5.56	1.78
Sub_Quebrada La Negra*	42.35	40.66	6.449	8.16	6.57
Sub_Comb_Villa_restrepo*	44.80	39.92	8.408	10.06	5.33

*Estas cuencas corresponden a subcuencas de las unidades hidrográficas definidas inicialmente.

Fuente: Elaboración Propia 2018 a partir de IGAC, Alos Palsar, software SAGA y Qgis.

En la Tabla 4.3 se presentan los parámetros morfométricos relacionados con la forma de la cuenca, para cada una de las unidades hidrográficas seleccionadas para el análisis. Estos parámetros se obtuvieron por medio de la aplicación de las ecuaciones presentadas en la metodología, derivadas a partir de los parámetros asociados al tamaño de cuenca.

La relación de elongación se determinó mediante la ecuación (5), el coeficiente de circularidad se determinó mediante la ecuación (4), el coeficiente de forma mediante la ecuación (7), la relación longitud ancho corresponde a la razón entre la longitud y el ancho de la cuenca se calculó mediante la ecuación (6), la densidad de drenajes corresponde a la suma de la longitud de todos los drenajes al interior de la cuenca hidrográfica dividida en el área total de la cuenca, determinada mediante la ecuación (8).

Tabla 4.3. Parámetros asociados a la forma de la cuenca

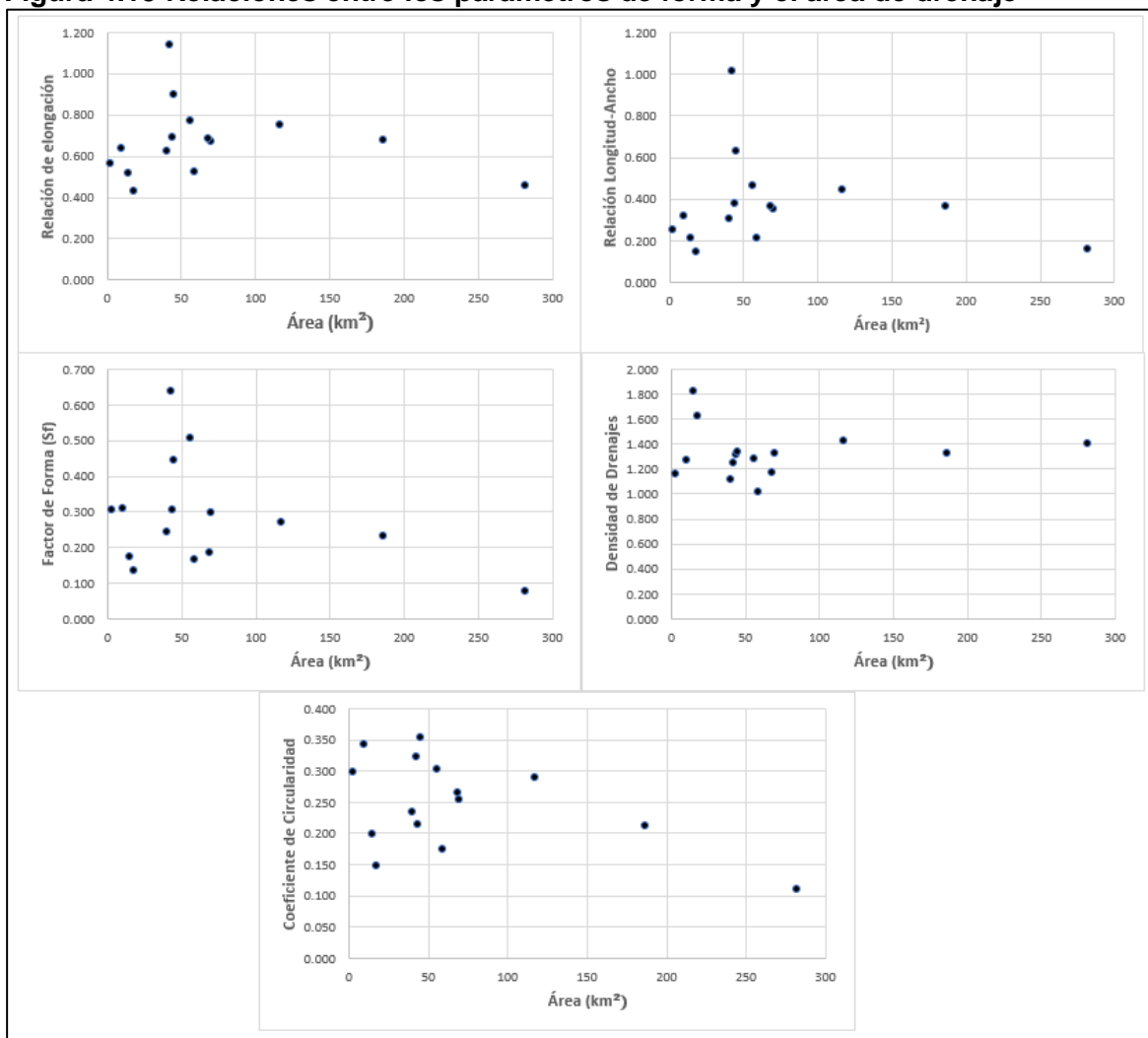
Cuenca	Relación de Elongación	Relación de longitud ancho	Coeficiente de circularidad	Factor de Forma	Densidad de drenajes
	E	LW	C	SF	DrD (km/km ²)
Quebrada La Liboriana	0.52	0.214	0.174	0.167	1.010
Río Combeima desembocadura	0.45	0.162	0.110	0.079	1.389
Río Combeima Villa Restrepo	0.75	0.442	0.290	0.271	1.412
Quebrada La Negra	0.67	0.352	0.255	0.298	1.312
Río Tapartó	0.68	0.367	0.266	0.185	1.175
Río Mulato	0.43	0.147	0.148	0.136	1.636
Río Sangoyaco	0.52	0.211	0.198	0.176	1.898
Río Fraile	0.68	0.363	0.213	0.234	1.306
Sub_Tapartó	0.62	0.304	0.235	0.242	1.120
Sub_Fraile	0.77	0.466	0.302	0.505	1.280
Sub_Liboriana	0.69	0.377	0.213	0.304	1.315
Sub_Sangoyaco	0.57	0.251	0.298	0.305	1.160
Sub_Mulatos	0.64	0.320	0.341	0.309	1.268
Sub_Quebrada La Negra	1.14	1.018	0.322	0.636	1.246
Sub_Comb_Villa_restrepo	0.90	0.634	0.353	0.443	1.333

Fuente: Elaboración Propia 2018 a partir de IGAC, Alos Palsar, software SAGA y Qgis.

La relación de elongación (E) toma valores de 1.275 cuando la forma de la cuenca es circular, y de 1.128 cuando la forma es cuadrada, el valor disminuye a medida que aumenta la elongación de la cuenca, en la Tabla 4.3 se aprecia que la subcuenca de la quebrada La Negra presenta una forma casi cuadrada, la cuenca más alargada corresponde a la del río Combeima hasta su desembocadura en el río Coello.

En la Figura 4.15 se presentan los gráficos de dispersión de los parámetros asociados a la forma de la cuenca con respecto al área de la cuenca, con el fin de identificar el grado de correlación de cada uno de estos parámetros con el tamaño de la cuenca. Es posible apreciar que el parámetro que presenta mayor correlación con el tamaño de la cuenca, expresado con el área superficial, es el coeficiente de circularidad, el coeficiente de correlación lineal obtenido para estas variables es de 0.22. Aunque se presenta una baja correlación, se pueden identificar tendencias en el comportamiento de los valores de los parámetros, por ejemplo, la relación de elongación (E) muestra una tendencia de creciente a medida que aumenta el área superficial de la cuenca, al igual que la relación Longitud – Ancho (LW) y el coeficiente de circularidad (C).

Figura 4.15 Relaciones entre los parámetros de forma y el área de drenaje



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Tabla 4.4 se presentan los parámetros morfométricos relacionados con la hipsometría de la cuenca, para cada una de las unidades hidrográficas seleccionadas para el análisis. La integral hipsométrica se terminó mediante el área bajo la curva hipsométrica de cada una de las cuencas, la asimetría hipsométrica se determinó mediante la ecuación (19) la curtosis hipsométrica mediante la ecuación (20), la asimetría de densidad mediante la ecuación (22) y la curtosis de densidad mediante la ecuación (23). Las cuencas con los valores más altos del coeficiente de asimetría hipsométrico corresponden a las de los ríos Mulato y Sangoyaco, este parámetro indica el estado de desarrollo del drenaje en su parte alta, valores altos indican una cuenca en la cual predominan los procesos de sedimentación. Por otro lado, el coeficiente de asimetría de la función de densidad (*DenSkew – DHs*) indica que tanto y en que parte de la cuenca ocurren los cambios de pendiente más marcados, los valores negativos indican que estos cambios se presentan en la parte alta de la cuenca.

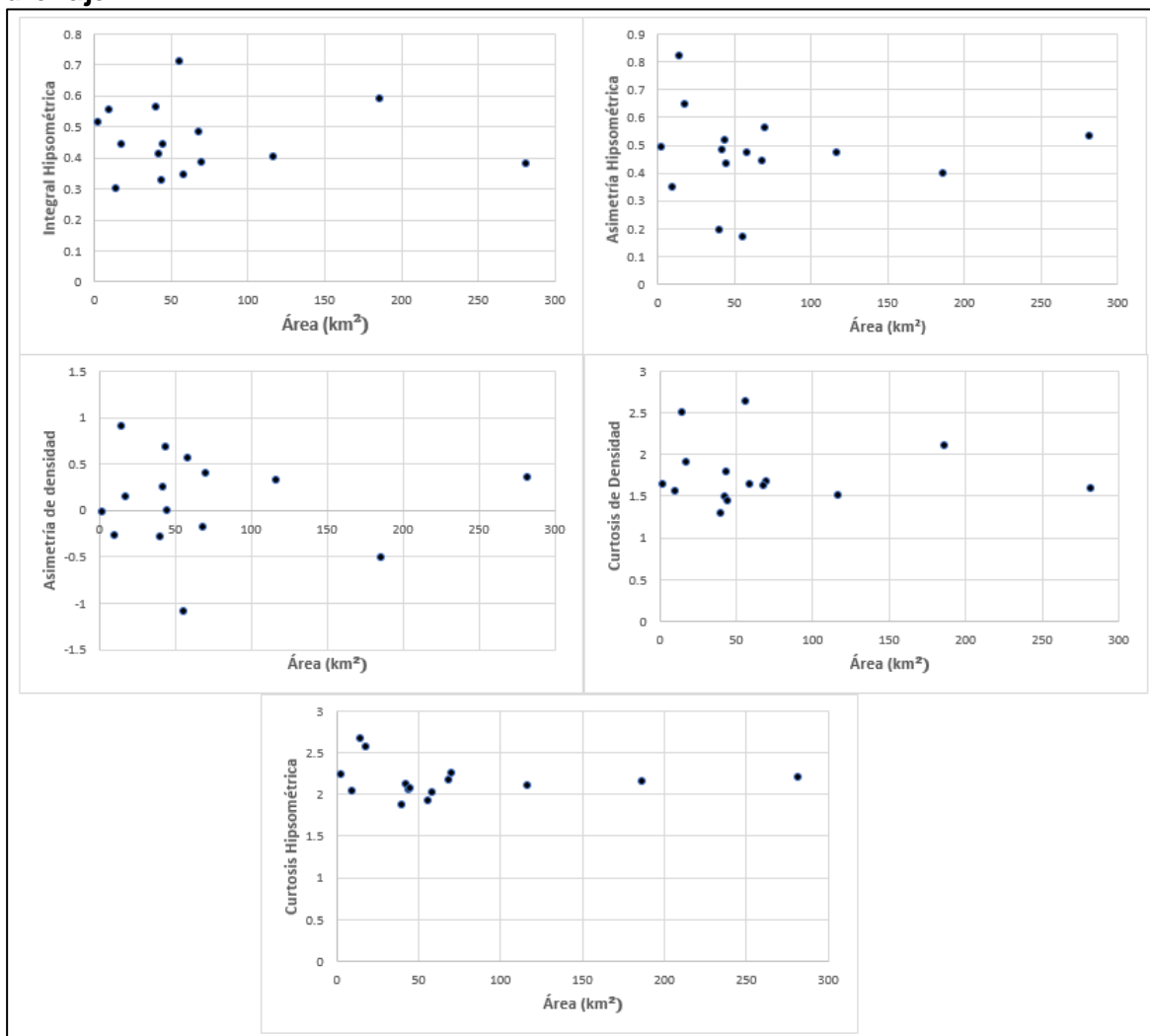
Tabla 4.4. Parámetros asociados a la curva hipsométrica de la cuenca

Cuenca	Integral Hipsométrica	Asimetría Hipsométrica	Curtosis Hipsométrica	Asimetría de densidad	Curtosis de Densidad
	Hi	HS	HK	DHs	DHk
Quebrada La Liboriana	0.345	0.473	2.021	0.567	1.633
Río Combeima desembocadura	0.380	0.535	2.204	0.352	1.594
Río Combeima Villa Restrepo	0.404	0.475	2.104	0.325	1.511
Quebrada La Negra	0.387	0.563	2.254	0.394	1.670
Río Tapartó	0.483	0.444	2.171	-0.181	1.631
Río Mulato	0.445	0.646	2.562	0.147	1.904
Río Sangoyaco	0.300	0.823	2.669	0.911	2.499
Río Fraile	0.588	0.396	2.156	-0.502	2.099
Sub_Tapartó	0.563	0.192	1.874	-0.290	1.287
Sub_Fraile	0.712	0.169	1.928	-1.089	2.643
Sub_Liboriana	0.326	0.516	2.052	0.687	1.796
Sub_Sangoyaco	0.512	0.493	2.233	-0.013	1.633
Sub_Mulatos	0.555	0.349	2.039	-0.278	1.553
Sub_Quebrada La Negra	0.413	0.482	2.128	0.254	1.488
Sub_Comb_Villa restrepo	0.442	0.434	2.072	0.194	1.438

Fuente: Elaboración Propia 2018 a partir de IGAC, Alos Palsar, software SAGA y Qgis.

En la Figura 4.16 se presentan las relaciones de los parámetros asociados a la curva hipsométrica con el área de la cuenca, representado por el área superficial, es posible apreciar una muy baja correlación de estos parámetros, en ninguno de los casos se obtienen coeficientes de correlación lineal superiores a 0.09, no se aprecia claramente ninguna tendencia en los datos, se puede decir que estos parámetros no están correlacionados con el tamaño de la cuenca.

Figura 4.16 Relaciones entre los parámetros de la curva hipsométrica y el área de drenaje



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Tabla 4.5 se presentan los parámetros morfométricos relacionados con la energía potencial de la cuenca para cada una de las unidades hidrográficas seleccionadas para el análisis. La relación de relieve se obtiene por medio de la ecuación (26), la pendiente media del cauce principal por medio de la ecuación (25), la relación de Melton con la ecuación (27), el promedio del índice Multirresolucion se obtiene por medio de la función en Qgis denominada Zonal Statistics, la cual calcula el promedio de los valores del archivo raster generados por el algoritmo desarrollado por Gallant (2003). De acuerdo con la bibliografía consultada cuencas con valores altos de la relación de Melton, es decir valores superiores a 0.3, están relacionados a cuencas susceptibles a la ocurrencia de flujos torrenciales, es posible apreciar que casi todas las cuencas presentan valores más altos, a excepción de la cuenca del río Combeima hasta su desembocadura, la cuenca de la quebrada La Negra y su subcuenca y la subcuenca del río Fraile.

Tabla 4.5. Parámetros asociados a la energía potencial de la cuenca

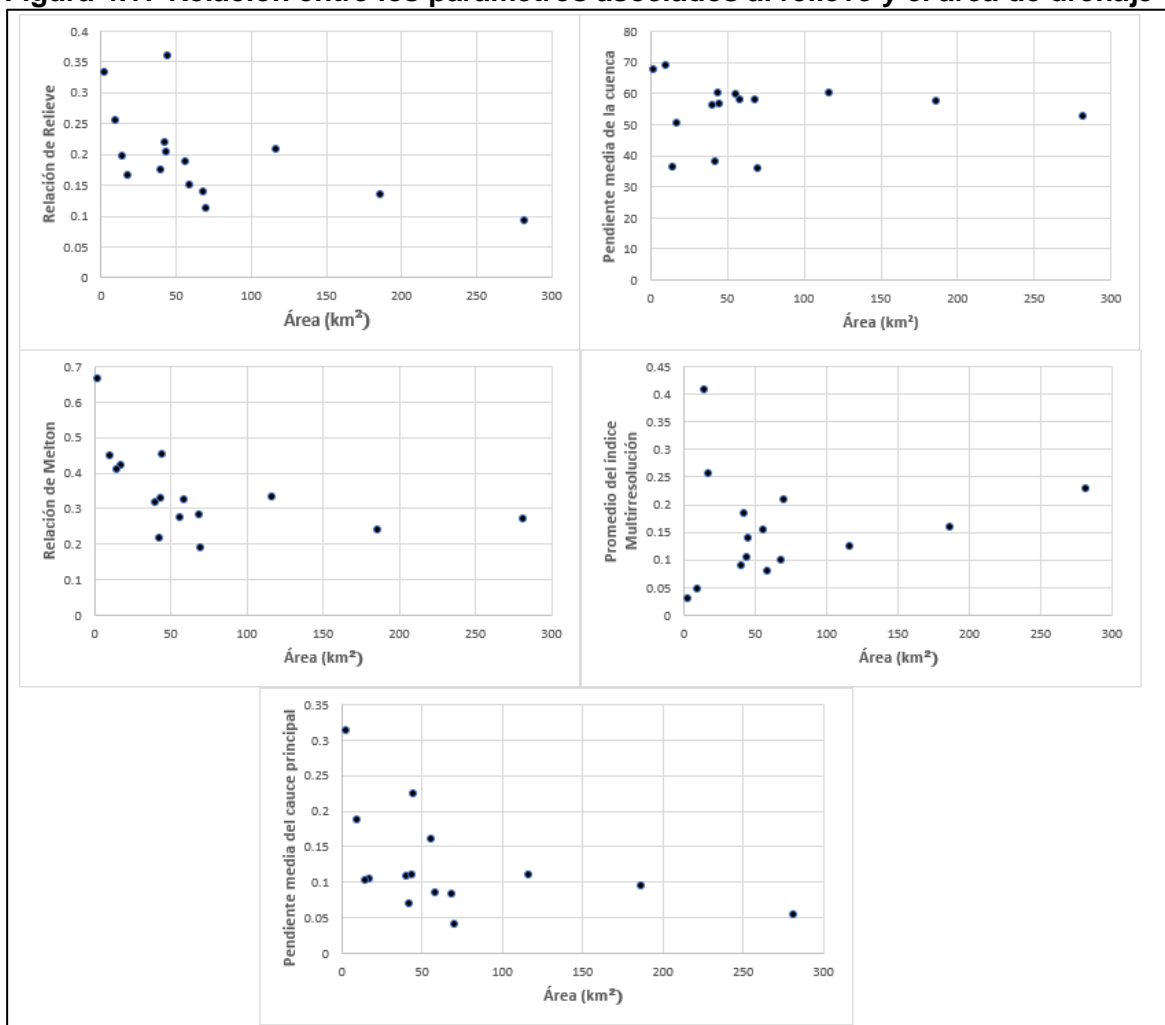
Cuenca	Relación de Relieve	Pendiente media de la cuenca	Pendiente media del cauce principal	Relación de Melton	Promedio del índice Multirresolución
	Rra	S %	StrS (m/m)	M	MRI _m
Quebrada La Liboriana	0.151	57.950	0.085	0.325	0.079
Río Combeima desembocadura	0.092	52.593	0.054	0.272	0.228
Río Combeima Villa Restrepo	0.208	60.354	0.111	0.331	0.123
Quebrada La Negra	0.113	35.909	0.041	0.191	0.209
Río Tapartó	0.138	57.907	0.084	0.282	0.100
Río Mulato	0.165	50.468	0.104	0.423	0.256
Río Sangoyaco	0.198	36.154	0.102	0.410	0.407
Río Fraile	0.134	57.681	0.094	0.241	0.159
Sub_Tapartó	0.175	56.150	0.109	0.317	0.090
Sub_Fraile	0.188	59.690	0.160	0.276	0.154
Sub_Liboriana	0.203	60.316	0.111	0.330	0.105
Sub_Sangoyaco	0.333	67.602	0.313	0.664	0.029
Sub_Mulato	0.254	68.984	0.187	0.450	0.046
Sub_Quebrada La Negra	0.220	37.896	0.070	0.218	0.184
Sub_Comb Villa Restrepo	0.359	56.757	0.224	0.451	0.138

Fuente: Elaboración Propia 2018 a partir de IGAC, Alos Palsar, software SAGA y Qgis.

En la Figura 4.17 se presenta la relación de los parámetros asociados a la energía potencial de la cuenca con el tamaño de ésta, representada por el área superficial. Es posible apreciar cierta correlación del tamaño de la cuenca con la Relación de Relieve, la relación de Melton y en menor grado con la pendiente media del cauce principal, por otra parte, la pendiente media de la cuenca y el promedio del índice multirresolución de Fondos de Valle, no presentan correlación con el tamaño de la cuenca.

Con respecto a la gráfica de la relación de relieve y el área de la cuenca, es posible apreciar una tendencia decreciente, al igual que con la relación de Melton y la pendiente media del cauce principal, esto es coherente pues indica que, a mayor desarrollo del cauce principal, menor será la pendiente de este. Aunque como se aprecia en las gráficas se presentan muy bajas correlaciones.

Figura 4.17 Relación entre los parámetros asociados al relieve y el área de drenaje



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Indicador Morfométrico

De acuerdo con lo presentado en numeral 2.1.1 del presente documento, se realizó la normalización de los parámetros morfométricos, considerando las diferentes unidades de medición de algunos de estos parámetros. La normalización se realizó aplicando lo descrito en el numeral 2.1.1.5 del presente documento.

En la Tabla 4.6 se presentan los valores normalizados aplicando la ecuación número **(28)**, de los parámetros asociados al tamaño de la cuenca y el resultante componente de tamaño del indicador morfométrico, calculado a partir de la combinación lineal de las variables asociadas al tamaño de la cuenca, por medio de los factores de ponderación encontrados por Rogelis (2014), tal como se indica en la metodología del presente trabajo final. El correspondiente valor ponderado de componente principal de tamaño se calculó por medio de la ecuación **(2)**. Se aprecia que los valores más altos corresponden a las subcuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco y el menor valor para la cuenca del río Combeima hasta su desembocadura, lo cual es consistente teniendo en cuenta las áreas de cada cuenca. El valor de la unidad en cada parámetro normalizado, indica el valor más alto presentado, por su parte el valor de 0 representa el valor mínimo.

Tabla 4.6. Componente del tamaño de la cuenca

Ponderación Psize	0.21	0.22	0.20	0.22	0.16	Psize
Cuenca	Lstr	P	A	Lwshd	Wwshd	
Quebrada La Liboriana	0.38	0.35	0.33	0.36	0.36	0.36
Río Combeima desembocadura	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.01
Río Combeima Villa Restrepo	0.35	0.32	0.19	0.36	0.06	0.27
Quebrada La Negra	0.45	0.39	0.29	0.42	0.21	0.36
Río Tapartó	0.37	0.40	0.30	0.43	0.21	0.35
Río Mulato	0.54	0.53	0.58	0.52	0.69	0.57
Río Sangoyaco	0.62	0.62	0.62	0.62	0.66	0.63
Río Fraile	0.25	0.19	0.09	0.24	0.00	0.16
Sub_Tapartó	0.50	0.47	0.41	0.50	0.36	0.46
Sub_Fraile	0.57	0.46	0.34	0.52	0.20	0.43
Sub_Liboriana	0.53	0.44	0.39	0.52	0.30	0.45
Sub_Sangoyaco	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Sub_Mulatos	0.77	0.78	0.71	0.78	0.65	0.75
Sub_Quebrada La Negra	0.65	0.52	0.40	0.72	0.10	0.50
Sub_Comb_Villa_restrepo	0.58	0.52	0.39	0.62	0.18	0.48

Fuente: Elaboración Propia 2018.

En la Tabla 4.7 se presentan los valores normalizados de los parámetros asociados a la forma de la cuenca y el resultante componente de forma del indicador morfométrico, calculado a partir de la ecuación 3. Se aprecia que los valores más altos corresponden a las cuencas del río Combeima hasta Villa Restrepo, el río Fraile y el río Sangoyaco, indicando que, de acuerdo con los factores de forma, estas serían las cuencas más susceptibles a la ocurrencia de flujos torrenciales. El valor de la unidad en los parámetros normalizados de relación Largo – Ancho y densidad de Drenajes, indica el valor más alto presentado, por su parte el valor de 0 representa el valor mínimo, en este caso los parámetros de relación de elongación, coeficiente de circularidad y factor de forma, no fueron normalizados.

Tabla 4.7. Componente de forma de la cuenca

Ponderación Pshape	0.21	0.23	0.22	0.22	0.11	Pshape
Cuenca	SF	C	E	LW	DrD	
Quebrada La Liboriana	0.17	0.17	0.52	0.92	0.00	0.39
Río Combeima desembocadura	0.08	0.11	0.45	0.98	0.49	0.41
Río Combeima Villa Restrepo	0.27	0.29	0.75	0.66	0.52	0.49
Quebrada La Negra	0.30	0.25	0.67	0.76	0.39	0.48
Río Tapartó	0.19	0.27	0.68	0.75	0.20	0.44
Río Mulato	0.14	0.15	0.43	1.00	0.76	0.46
Río Sangoyaco	0.18	0.20	0.52	0.93	1.00	0.51
Río Fraile	0.23	0.21	0.68	0.75	0.38	0.46
Sub_Tapartó	0.24	0.23	0.62	0.82	0.13	0.44
Sub_Fraile	0.51	0.30	0.77	0.63	0.33	0.52
Sub_Liboriana	0.30	0.21	0.69	0.74	0.38	0.47
Sub_Sangoyaco	0.30	0.30	0.57	0.88	0.18	0.47
Sub_Mulatos	0.31	0.34	0.64	0.80	0.32	0.50
Sub_Quebrada La Negra	0.64	0.32	1.14	0.00	0.29	0.49
Sub_Comb_Villa Restrepo	0.44	0.35	0.90	0.44	0.40	0.51

Fuente: Elaboración Propia 2018.

En la Tabla 4.8 se presentan los valores normalizados, tal como se presenta en el numeral 2.1.1 de este documento, de los parámetros asociados a la hipsometría de la cuenca y el resultante componente hipsométrico del indicador morfométrico, calculado a partir de la ecuación 4. Se aprecia que los valores más altos corresponden a la cuenca del río Fraile y el río Tapartó, lo cual representa que, de acuerdo con los parámetros asociados a la curva hipsométrica, estos serían las cuencas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales. El valor de la unidad en cada parámetro normalizado, indica el valor más alto presentado, por su parte el valor de 0 representa el valor mínimo.

Tabla 4.8. Componente hipsométrica de la cuenca

Ponderación Phypso	0.27	0.23	0.23	0.22	0.04	Phypso
Cuenca	Hs	Hi	Hk	DHs	DHk	
Quebrada La Liboriana	0.53	0.35	0.82	0.17	0.74	0.48
Río Combeima desembocadura	0.44	0.38	0.59	0.28	0.77	0.43
Río Combeima Villa Restrepo	0.53	0.40	0.71	0.29	0.83	0.50
Quebrada La Negra	0.40	0.39	0.52	0.26	0.72	0.40
Río Tapartó	0.58	0.48	0.63	0.55	0.75	0.56
Río Mulato	0.27	0.45	0.13	0.38	0.54	0.31
Río Sangoyaco	0.00	0.30	0.00	0.00	0.11	0.07
Río Fraile	0.65	0.59	0.64	0.71	0.40	0.63
Sub Tapartó	0.97	0.56	1.00	0.60	1.00	0.79
Sub Fraile	1.00	0.71	0.93	1.00	0.00	0.87
Sub Liboriana	0.47	0.33	0.78	0.11	0.62	0.43
Sub Sangoyaco	0.51	0.51	0.55	0.46	0.74	0.51
Sub Mulato	0.73	0.56	0.79	0.59	0.80	0.67
Sub Quebrada La Negra	0.52	0.41	0.68	0.33	0.85	0.50
Sub Comb Villa restrepo	0.59	0.44	0.75	0.36	0.89	0.55

Fuente: Elaboración Propia 2018.

En la Tabla 4.9 se presentan los valores normalizados, de acuerdo con lo presentado en el numeral 2.1.1, de los parámetros asociados a la energía potencial de la cuenca y el resultante componente de energía del indicador morfométrico, calculado a partir de la combinación de cada variable utilizando las ponderaciones de la variabilidad explicada por el componente principal cuatro, se aprecia que los valores más altos corresponden a las subcuencas de los ríos Sangoyaco, Mulato y Tapartó. El valor de la unidad en cada parámetro normalizado, indica el valor más alto presentado, por su parte el valor de 0 representa el valor mínimo.

Tabla 4.9. Componente de energía de la cuenca

Ponderación Penergy	0.12	0.24	0.23	0.16	0.25	Penergy
Cuenca	Strs	S	Rra	M	MRIm	
Quebrada La Liboriana	0.08	0.58	0.15	0.33	0.87	0.45
Río Combeima desembocadura	0.05	0.53	0.11	0.27	0.47	0.32
Río Combeima Villa Restrepo	0.11	0.60	0.22	0.33	0.75	0.45
Quebrada La Negra	0.04	0.36	0.11	0.19	0.53	0.28
Río Tapartó	0.08	0.58	0.17	0.28	0.81	0.44
Río Mulato	0.10	0.50	0.16	0.42	0.40	0.34
Río Sangoyaco	0.10	0.36	0.19	0.41	0.00	0.21
Río Fraile	0.09	0.58	0.14	0.24	0.66	0.39

Ponderación Penergy	0.12	0.24	0.23	0.16	0.25	Penergy
Cuenca	Strs	S	Rra	M	MRIm	
Sub_Taparto	0.11	0.56	0.17	0.32	0.84	0.45
Sub_Fraile	0.16	0.60	0.19	0.28	0.67	0.42
Sub_Liboriana	0.11	0.60	0.20	0.33	0.80	0.46
Sub_Sangoyaco	0.31	0.68	0.33	0.66	1.00	0.63
Sub_Mulato	0.19	0.69	0.25	0.45	0.96	0.56
Sub_Quebrada La Negra	0.07	0.38	0.22	0.22	0.59	0.33
Sub_Comb_Villa_restrepo	0.22	0.57	0.36	0.45	0.71	0.50

Fuente: Elaboración Propia 2018.

Una vez determinados los componentes del Indicador Morfométrico para cada cuenca, con los factores de ponderación obtenidos del análisis de componentes principales realizado por Rogelis (2014), los cuales representan la proporción de la varianza unitaria total del indicador que se explica por el componente principal, se determinan las ponderaciones de cada componente del indicador (OECD 2008). En la Tabla 4.10 se presenta el Indicador Morfométrico obtenido para cada cuenca por medio de la ecuación 6, los resultados indican que la cuenca más susceptible a la ocurrencia de flujos torrenciales corresponde a las subcuencas de Los ríos Sangoyaco y Mulato. La cuenca menos susceptible de acuerdo con el indicador morfométrico corresponde al río Combeima hasta su desembocadura. De acuerdo con los resultados obtenidos en su estudio, Rogelis estableció rangos de calificación del indicador morfométrico, siendo de 0 a 0.35 bajo, lo cual corresponde a cuencas incapaces de propagar flujos torrenciales a sus abanicos, valores entre 0.35 y 0.61 a medio, lo cual corresponde a cuencas con moderada capacidad para propagar flujos torrenciales, y el rango de 0.61 a 1, corresponde a cuencas con alta capacidad de propagación de flujos torrenciales.

Tabla 4.10. Indicador morfométrico

Pmorp	0.3	0.28	0.20	0.22	Pmorp	Calificación
Cuenca	Psize	Pshape	Phypso	Penergy		
Quebrada La Liboriana	0.36	0.39	0.48	0.45	0.41	Media
Río Combeima desembocadura	0.01	0.41	0.43	0.32	0.28	Baja
Río Combeima Villa Restrepo	0.27	0.49	0.50	0.45	0.42	Media
Quebrada La Negra	0.36	0.48	0.40	0.28	0.39	Media
Río Taparto	0.35	0.44	0.56	0.44	0.44	Media
Río Mulato	0.57	0.46	0.31	0.34	0.44	Media
Río Sangoyaco	0.63	0.51	0.07	0.21	0.39	Media
Río Fraile	0.16	0.46	0.63	0.39	0.39	Media
Sub_Taparto	0.46	0.44	0.79	0.45	0.52	Media
Sub_Fraile	0.43	0.52	0.87	0.42	0.54	Media
Sub_Liboriana	0.45	0.47	0.43	0.46	0.45	Media
Sub_Sangoyaco	1.01	0.47	0.51	0.63	0.68	Alta
Sub_Mulatos	0.75	0.50	0.67	0.56	0.62	Alta
Sub_Quebrada La Negra	0.50	0.49	0.50	0.33	0.46	Media
Sub_Comb_Villa_restrepo	0.48	0.51	0.55	0.50	0.51	Media

Fuente: Elaboración Propia 2018.

Valores altos del indicador morfométrico compuesto implican cuencas de áreas pequeñas, alta energía que contribuye a la respuesta instantánea de las mismas, además de características hipsométricas que indican procesos erosivos.

4.2.2 Coberturas del suelo

Con el fin de evaluar la condición cualitativa de la cobertura del suelo de cada cuenca, se toma como información de referencia, el mapa de coberturas de la tierra a escala 1:100.000 para el periodo 2010-2012, generado por el IDEAM, a través de la Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental – Grupo de suelos y tierras.

4.2.2.1 Coberturas IDEAM 2010-2012

A continuación se presentan las coberturas para cada cuenca estudiada, correspondientes al mapa de coberturas del IDEAM (Periodo 2010-2012), de acuerdo con la tabla Tabla 2.2, correspondiente a la adaptación de la metodología Europea Corine Land Cover para el territorio colombiano realizada por el IDEAM, Sinchi, IAvH e IGAC (Ideam 2010).

Cobertura de la cuenca de la Quebrada La Negra

En la Tabla 4.11 se presentan las unidades de cobertura presentes en la cuenca de la quebrada La Negra. Se aprecia que el 77.4% del área de la cuenca corresponde a territorios agrícolas conformados por pastos y áreas agrícolas heterogéneas, tan solo el 22.4% corresponde a Bosques y Áreas Seminaturales. A modo de ejemplo, en la Figura 4.18 se presenta la distribución espacial de las coberturas presentes en la cuenca de la quebrada La Negra, en el Anexo 3.2, se presentan las distribuciones espaciales de las coberturas para cada una de las cuencas.

Tabla 4.11. Coberturas (2010-2012) Cuenca quebrada La Negra

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	0.086	0.12%
Total 1. Territorios Artificializados		0.086	0.12%
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	31.971	45.19%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	22.811	32.24%
Total 2. Territorios Agrícolas		54.782	77.43%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	0.672	0.95%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	15.208	21.50%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		15.879	22.45%
Total		70.747	100%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018).

Cobertura de la Subcuenca de la quebrada La Negra

Con respecto a la subcuenca de la quebrada La Negra, en la Tabla 4.12 se presenta la distribución de las coberturas, donde se aprecia que predominan las coberturas de pastos y áreas agrícolas heterogéneas con el 72.02% de cubrimiento del área, seguido de áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva con una cobertura del 26.20%.

Tabla 4.12. Coberturas subcuenca quebrada La Negra (2010-2012)

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	0.09	0.20%
Total 1. Territorios Artificializados		0.09	0.20%
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	22.58	53.31%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	7.92	18.70%
Total 2. Territorios Agrícolas		30.50	72.02%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	0.67	1.59%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	11.09	26.20%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		11.76	27.78%
Total general		42.35	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

Cobertura de la Cuenca del río Fraile

En la Tabla 4.13 se aprecia que la tipología de cobertura que presenta un mayor porcentaje del área superficial, corresponde a áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva (38.9%), clasificación que comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica (Ideam 2010). En segundo lugar, con un 24.3% se presenta Áreas agrícolas heterogéneas, las cuales corresponden a unidades que reúnen dos o más clases de coberturas agrícolas y naturales, dispuestas en un patrón intrincado de mosaicos geométricos que hace difícil su separación en coberturas individuales. Un total de 27.89 km², correspondientes al 14.8% del área total de la cuenca, no posee una clasificación de unidades de cobertura debido a la presencia de nubes.

Tabla 4.13. Coberturas Cuenca Río Fraile (2010-2012)

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
2. Territorios Agrícolas	2.2. Cultivos permanentes	0.77	0.41%
	2.3. Pastos	6.73	3.57%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	45.92	24.36%
Total 2. Territorios Agrícolas		53.42	28.34%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	32.91	17.46%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	73.43	38.96%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		106.35	56.42%
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales	0.85	0.45%
Total 5. Superficies de Agua		0.85	0.45%

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
99. Nubes	99. Sin información	27.89	14.80%
Total 99. Sin Información		27.89	14.80%
Total		188.51	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018).

Cobertura de la Subcuenca del río Fraile

Con respecto a la subcuenca del río Fraile, en la Tabla 4.14 se presenta la distribución de las coberturas, donde se aprecia que predominan las coberturas de bosques y áreas seminaturales con el 83.47% de cubrimiento del área.

Tabla 4.14. Coberturas Subcuenca Río Fraile (2010-2012)

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
2. Territorios Agrícolas	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.36	4.22%
Total 2. Territorios Agrícolas		2.36	4.22%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	8.60	15.39%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	38.06	68.08%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		46.66	83.47%
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales	0.32	0.58%
Total 5. Superficies de Agua		0.32	0.58%
99. Sin Información		6.56	11.73%
Total general		55.90	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

Cobertura de la Cuenca de la quebrada La Liboriana

En la Tabla 4.15 se presentan la proporción de las áreas de cada cobertura de la tierra presente en la cuenca de la quebrada La Liboriana, se aprecia una distribución similar entre los tipos de cobertura de Pastos, Áreas agrícolas heterogéneas, Bosques y Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva

Tabla 4.15. Coberturas (2010-2012) Cuenca quebrada La Liboriana

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	0.33	0.57%
Total 1. Territorios Artificializados		0.33	0.57%
2. Territorios Agrícolas	2.2. Cultivos permanentes	2.04	3.48%
	2.3. Pastos	11.24	19.15%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	15.27	26.03%
Total 2. Territorios Agrícolas		28.55	48.66%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	13.58	23.14%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	16.22	27.64%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		29.80	50.77%
Total		58.68	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

Cobertura de la Subcuenca de la quebrada La Liboriana

Con respecto a la subcuenca de la quebrada La Liboriana, en la Tabla 4.16 se presenta la distribución de las coberturas, donde se aprecia que predominan las coberturas de bosques y áreas seminaturales con el 68.44% de cubrimiento del área, seguido de territorios agrícolas con 31.5%.

Tabla 4.16. Coberturas Subcuenca quebrada Liboriana (2010-2012)

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	9.05	20.68%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	4.76	10.88%
Total 2. Territorios Agrícolas		13.81	31.56%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	13.55	30.96%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	16.40	37.48%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		29.95	68.44%
Total general		43.76	100.0%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

Cobertura de la Cuenca del río Mulato

En la Tabla 4.17 se presentan las unidades de cobertura presentes en la cuenca del río Mulato, el 60.87% del área de la cuenca corresponde a una clasificación de Bosques y Áreas seminaturales, donde predomina la presencia de Bosques.

Tabla 4.17. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Mulato

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	0.810	4.62%
Total 1. Territorios Artificializados		0.810	4.62%
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	1.477	8.43%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	4.567	26.06%
Total 2. Territorios Agrícolas		6.044	34.49%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	10.271	58.62%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	0.394	2.25%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		10.665	60.87%
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales	0.003	0.02%
Total 5. Superficies de Agua		0.003	0.02%
Total		17.522	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018).

Cobertura de la Subcuenca del río Mulato

Con respecto a la subcuenca del río Mulato, en la Tabla 4.18 se presenta la distribución de las coberturas, donde se aprecia que predominan las coberturas de bosques con el 99.08% de cubrimiento del área.

Tabla 4.18. Coberturas subcuenca río Mulato (2010-2012)

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	0.0003	0.00%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	0.0911	0.92%
Total 2. Territorios Agrícolas		0.0914	0.92%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	9.7984	99.08%
	Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales	9.7984	99.08%
Total general		9.89	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

Cobertura de la Cuenca del río Sangoyaco

En la Tabla 4.19 se presentan las unidades de cobertura presentes en la cuenca del río Sangoyaco, donde el 72.6% del área de la cuenca corresponde a Territorios Agrícolas, en donde predominan las áreas agrícolas heterogéneas, solo el 17% del área corresponde a zonas de bosques.

Tabla 4.19. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Sangoyaco

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	1.425	10.23%
	Total 1. Territorios Artificializados	1.425	10.23%
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	1.441	10.34%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	8.670	62.26%
Total 2. Territorios Agrícolas		10.111	72.60%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	2.368	17.00%
	Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales	2.368	17.00%
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales	0.023	0.16%
	Total 5. Superficies de Agua	0.023	0.16%
Total		13.926	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018).

Cobertura de la Subcuenca del río Sangoyaco

Con respecto a la subcuenca del río Sangoyaco, en la Tabla 4.20 se presenta la distribución de las coberturas, donde se aprecia que predominan las coberturas de bosques con el 75.65% de cubrimiento del área, seguido de áreas agrícolas heterogéneas con una cobertura del 24.22%.

Tabla 4.20. Coberturas subcuenca río Sangoyaco (2010-2012)

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	0.003	0.13%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	0.591	24.22%
Total 2. Territorios Agrícolas		0.594	24.35%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	1.846	75.65%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		1.846	75.65%
Total general		2.440	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

Cobertura de la Cuenca del río Combeima – Villa Restrepo

En la Tabla 4.21 se presentan las unidades de cobertura presentes en la cuenca del río Combeima delimitada hasta el corregimiento de Villa Restrepo. El porcentaje más alto corresponde a Bosques y Áreas Seminaturales con predominancia de Bosques y Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, se identifica un área correspondiente al 3.74 % del total del área como Áreas abiertas, sin o con poca vegetación.

Tabla 4.21. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Combeima – Villa Restrepo

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	2.31	1.95%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	24.01	20.31%
Total 2. Territorios Agrícolas		26.32	22.26%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	29.57	25.02%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	24.85	21.02%
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	4.42	3.74%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		58.84	49.78%
99. Nubes	99. Sin información	33.05	27.96%
Total 99. Sin Información		33.05	27.96%
Total		118.21	100.0%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018).

Cobertura de la Subcuenca del río Combeima – Villa Restrepo

Con respecto a la subcuenca del río Combeima – Villa Restrepo, en la Tabla 4.22 se presenta la distribución de las coberturas, donde se aprecia que predominan las coberturas de bosques y áreas seminaturales con el 74.97% de cubrimiento del área.

Tabla 4.22. Coberturas subcuenca río Combeima – Villa Restrepo (2010-2012)

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	0.40	0.89%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.67	5.96%
Total 2. Territorios Agrícolas		3.07	6.85%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	15.83	35.35%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	13.76	30.72%

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.99	8.90%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		33.58	74.97%
99. Sin información		8.15	18.18%
Total general		44.80	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

Cobertura de la Cuenca del río Combeima

En la Tabla 4.23 se presentan las unidades de cobertura presentes en la cuenca del río Combeima delimitada hasta su desembocadura en el río Coello. Los territorios agrícolas representan un porcentaje del 44% del área total de la cuenca, principalmente con las áreas agrícolas heterogéneas, el 34% corresponde a Bosques y áreas Seminaturales principalmente con Bosques y Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva.

Tabla 4.23. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Combeima – Ibagué

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	10.68	3.74%
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	0.41	0.14%
	1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	0.21	0.07%
Total 1. Territorios Artificializados		11.31	3.96%
2. Territorios Agrícolas	2.1. Cultivos transitorios	10.53	3.69%
	2.2. Cultivos permanentes	7.37	2.58%
	2.3. Pastos	15.04	5.27%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	92.99	32.59%
Total 2. Territorios Agrícolas		125.93	44.14%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	56.89	19.94%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	35.71	12.52%
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	4.43	1.55%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		97.04	34.01%
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales	0.00	0.00%
	Total 5. Superficies de Agua	0.00	0.001%
99. Nubes	99. Sin información	51.05	17.89%
Total 99. Sin Información		51.05	17.89%
Total		285.32	100.0%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018).

Cobertura de la Cuenca del río Tapartó

En la Tabla 4.24 se presentan las proporciones de las áreas de cada cobertura de la tierra presente en la cuenca del río Tapartó, donde la cobertura de Bosques es la de mayor proporción con un 57.58%, seguido de Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva con un 17.74%.

Tabla 4.24. Coberturas (2010-2012) Cuenca río Tapartó

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	0.02	0.03%
Total 1. Territorios Artificializados		0.02	0.03%
2. Territorios Agrícolas	2.2. Cultivos permanentes	0.27	0.40%
	2.3. Pastos	7.94	11.77%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	7.10	10.53%
Total 2. Territorios Agrícolas		15.31	22.70%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	38.83	57.58%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	11.96	17.74%
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	0.78	1.16%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		51.57	76.48%
99. Nubes	99. Sin información	0.53	0.79%
Total 99. Sin Información		0.53	0.79%
Total		67.43	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

Cobertura de la Subcuenca del río Taparto

Con respecto a la subcuenca del río Tapartó, en la Tabla 4.25 se presenta la distribución de las coberturas, donde se aprecia que predominan las coberturas de bosques con el 83.61% de cubrimiento del área.

Tabla 4.25. Coberturas subcuenca río Tapartó (2010-2012)

Unidades de Cobertura		Área (km ²)	%
Nivel 1	Nivel 2		
2. Territorios Agrícolas	2.3. Pastos	1.67	4.16%
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	0.32	0.81%
Total 2. Territorios Agrícolas		2.00	4.97%
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	33.58	83.61%
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.91	9.73%
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	0.68	1.69%
Total 3. Bosques y Áreas Seminaturales		38.17	95.03%
Total general		40.16	100.00%

Fuente: Elaboración Propia 2018 modificado de Cobertura de la tierra 2010 – 2012 (IDEAM 2018)

4.2.2.2 Indicador de cobertura

Con base en el análisis de unidades de cobertura de cada cuenca, se utilizaron tres factores para calificar el estado de las cuencas, porcentaje de cobertura de vegetación, porcentaje de áreas urbanas y porcentaje de tierras desnudas y degradadas, de acuerdo con lo presentado en el numeral 2.1.2 de este documento. En la Tabla 4.26 se presentan los porcentajes de cobertura de los factores para la calificación del estado de las cuencas.

Tabla 4.26 Porcentajes de cobertura para indicador

Cuenca	% de cobertura de vegetación forestal, arbustiva	% de áreas urbanas	% tierras desnudas y degradadas	% territorios agrícolas
Quebrada La Liboriana	50.77	0.57	0	48.66
Río Combeima desembocadura	32.46	3.96	1.55	44.14
Río Combeima Villa Restrepo	46.04	0	3.74	22.26
Quebrada La Negra	22.45	0.12	0	77.43
Río Tapartó	75.32	0.03	1.16	22.7
Río Mulato	60.87	4.62	0	34.49
Río Sangoyaco	17	10.23	0	72.6
Río Fraile	56.42	0	0	28.34
Sub_Tapartó	93.34	0	1.69	4.97
Sub_Fraile	83.47	0	0	4.22
Sub_Liboriana	68.44	0	0	31.56
Sub_Sangoyaco	75.65	0	0	24.35
Sub_Mulatos	99.08	0	0	0.92
Sub_Quebrada La Negra	27.78	0.2	0	72.02
Sub_Comb_Villa_restrepo	61.07	0	8.9	6.85

Fuente: Elaboración Propia 2018.

De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 4.27 se presenta la calificación del estado de cada una de las cuencas estudiadas.

Tabla 4.27 Calificación del estado de la cobertura de las cuencas

Cuenca	Calificación por cobertura
Quebrada La Liboriana	Regular
Río Combeima desembocadura	Regular
Río Combeima Villa Restrepo	Mala
Quebrada La Negra	Mala
Río Tapartó	Buena
Río Mulato	Regular
Río Sangoyaco	Mala
Río Fraile	Regular
Sub_Tapartó	Buena
Sub_Fraile	Buena
Sub_Liboriana	Regular
Sub_Sangoyaco	Regular
Sub_Mulatos	Buena
Sub_Quebrada La Negra	Regular
Sub_Comb_Villa_restrepo	Regular

Fuente: Elaboración Propia 2018.

4.2.3 Indicador de Susceptibilidad

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos tanto del indicador morfométrico como del indicador de cobertura, por medio de la matriz de clasificación que se muestra en la Tabla 2.3, se determinó el indicador compuesto de susceptibilidad para cada una de las cuencas.

En la Tabla 4.28 se presenta el resultado del indicador de susceptibilidad compuesto, considerando los resultados obtenidos del indicador de cobertura y el indicador morfométrico. Se aprecia que la única cuenca que presenta una calificación de susceptibilidad Alta, de acuerdo con la metodología del indicador de Susceptibilidad Compuesto, es la subcuenca del río Sangoyaco. La cuenca del río Combeima hasta su desembocadura en el río Coello presenta una susceptibilidad baja al igual que la cuenca y subcuenca del río Tapartó y la subcuenca del río Fraile.

Tabla 4.28 Indicador de susceptibilidad compuesto

Cuenca	Calificación del indicador morfométrico	Calificación por cobertura	Calificación susceptibilidad
Quebrada La Liboriana	Media	Regular	Media
Río Combeima desembocadura	Baja	Regular	Baja
Río Combeima Villa Restrepo	Media	Mala	Media
Quebrada La Negra	Media	Mala	Media
Río Tapartó	Media	Buena	Baja
Río Mulato	Media	Regular	Media
Río Sangoyaco	Media	Mala	Media
Río Fraile	Media	Regular	Media
Sub_Taparto	Media	Buena	Baja
Sub_Fraile	Media	Buena	Baja
Sub_Liboriana	Media	Regular	Media
Sub_Sangoyaco	Alta	Regular	Alta
Sub_Mulatos	Alta	Buena	Media
Sub_Quebrada La Negra	Media	Regular	Media
Sub_Comb_Villa_restrepo	Media	Regular	Media

Fuente: Elaboración Propia 2018.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el desarrollo del presente trabajo se empleó información cartográfica a escala 1:100.000, de donde se extrajo información referente a drenajes y curvas de nivel. Esta información se utilizó para la delimitación de las cuencas y la respectiva determinación de los parámetros morfométricos, junto con el modelo de elevación digital Alos Palsar que cuenta con una resolución espacial de 12,5 m. Las unidades de cobertura del suelo constituyen un insumo fundamental para el análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales. Esta información proviene de una fuente oficial a escala 1:100.000, la cual fue generada a partir de la interpretación de coberturas por medio de sensores remotos y verificación en campo por profesionales del IDEAM, expertos en esta área.

La metodología implementada, determina un Indicador Morfométrico que permite encontrar una expresión global para representar las características morfométricas de la cuenca. Igualmente, por medio de las unidades de cobertura identificadas en cada una de las cuencas hidrográficas se determinó el Indicador de Cobertura, para considerar el efecto de la atenuación de la amenaza de ocurrencia de los flujos torrenciales, así como también el aumento de la amenaza producido por la antropización de la superficie del suelo (urbanización y generación de tierras desnudas y degradadas).

Por medio de la conjunción del indicador morfométrico y el indicador de cobertura, se determinó un Indicador Compuesto de Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales, para categorizar cada una de las cuencas analizadas entre susceptibilidad alta, media y baja, que de acuerdo con Rogelis, se realiza por medio de la combinación de los indicadores morfométrico y de cobertura por medio de la matriz de clasificación presentada en la Tabla 2.3.

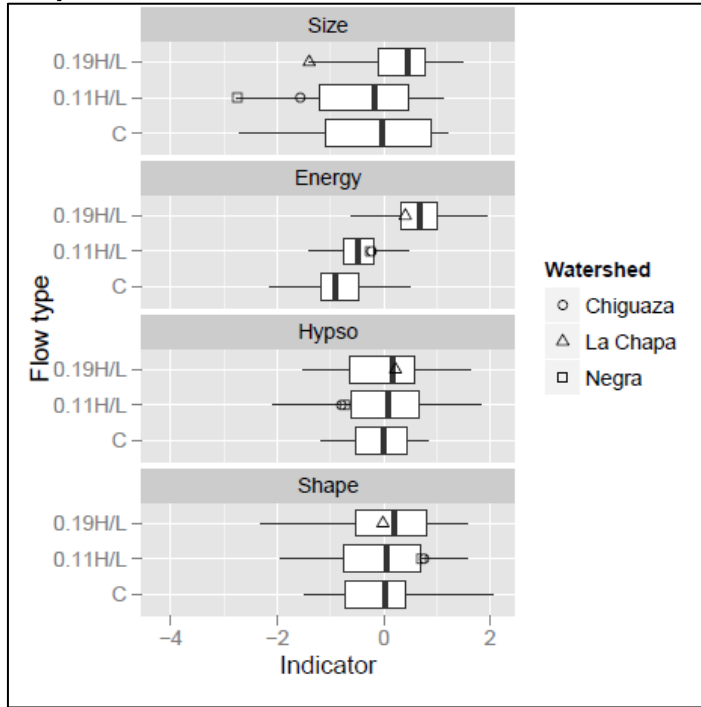
Como resultado del análisis morfométrico de las unidades hidrográficas, se identificó que para las subcuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco, se obtuvo una categoría de susceptibilidad alta. Estas cuencas corresponden a las de menor área, así como las que presentan más alto valor del componente de energía de Indicador Morfométrico, indicando que son cuencas que presentan un relieve de altas pendientes, tanto de ladera como de su cauce principal. A excepción de la cuenca del río Combeima hasta su desembocadura, las demás cuencas presentan una susceptibilidad baja, de acuerdo con el indicador compuesto, estas cuencas presentan características muy variadas, desde áreas superficiales de 13.9 a 118.2 km², siendo la más grande la cuenca del río Combeima hasta Villa Restrepo y la más pequeña la cuenca del río Sangoyaco. Índices de Melton desde 0.19 hasta 0.42, correspondiendo el menor valor a la cuenca de la quebrada La Negra y el mayor valor a la cuenca del río Mulato. Estas cuencas se caracterizan por presentar altas pendientes del cauce principal y de ladera, también presentan grandes diferencias entre la altura máxima y mínima de la cuenca, y, por lo tanto, indican una susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales.

El indicador de cobertura fue obtenido a partir de la calificación del estado de las coberturas del suelo reportadas en el mapa de coberturas generadas por el IDEAM, este mapa corresponde a la información más reciente obtenida para las cuencas analizadas, por lo tanto, en este Trabajo Final no se considero el análisis de la dinámica de las coberturas en el tiempo, sin embargo, considerando la naturaleza cualitativa de este factor en la calificación final de la susceptibilidad, es posible inferir que su impacto en la calificación fina, sería representativo, siempre y cuando el cambio del estado de las coberturas en la cuenca cambie de forma dramática.

La cuenca de la quebrada La Negra, fue empleada por los autores del método en su análisis, en el presente trabajo Final de Maestría se incluyó con el objetivo de verificar y comprar los resultados obtenidos. En el análisis desarrollado por Rogelis, la cuenca de la quebrada La Negra, presenta un valor aproximado de 0.14 del indicador morfométrico, esto es explicado por los autores debido principalmente al componente de tamaño, que en comparación con las otras cuencas, es muy bajo, ya que la cuenca de la quebrada La Negra es la más grande considerada en el análisis (68.4 km²) (Rogelis and Werner 2014). Por otro lado, de acuerdo con los resultados obtenidos en este Trabajo Final el indicador morfométrico de la cuenca de la quebrada La Negra corresponde a 0.39, corresponde a la 4 cuenca de mayor tamaño considerada en el análisis y a la tercera cuenca con menor valor del ISC, con una susceptibilidad media de acuerdo con los rangos establecidos. Estas diferencias son explicables por la relatividad del método, ya que sus resultados dependen de los rangos de los parámetros de las cuencas analizadas, tal como lo indican los autores el Índice de Susceptibilidad Compuesto no es absoluto sino relativo y es útil en aplicaciones de carácter regional para una análisis preliminar de la susceptibilidad (Rogelis and Werner 2014).

En la Figura 5.1 se presentan los diagramas de cajas de los resultados obtenidos de cada uno de los componentes del indicador morfométrico de las cuencas analizadas por los autores del método, los indicadores fueron agrupados de acuerdo con la clasificación de las cuencas, llevada a cabo por los autores por medio del modelo de Dirección de Flujo Único Modificado (MSF), con base en la capacidad de propagación de flujos de detritos, las cuencas agrupadas en 0.19H/L y 0.11H/L, que corresponden a cuencas que pueden propagar flujos de detritos considerando ángulos de alcance de 0.19 y 0.11 (Rogelis and Werner 2014), respectivamente, las cuencas clasificadas en el grupo C, son consideradas como dominadas por inundaciones de agua clara, que no presentan flujos de detritos. Esta agrupación de las cuencas corresponde a uno de los métodos de validación empleado por los autores del método, y no fue llevada a cabo en el presente Trabajo Final, ya que se plantearon otros métodos de verificación, tal como se presenta el numeral 3.3 del capítulo de Metodología. En esta figura se identifican los valores de cada componente obtenidos para la cuenca de la quebrada La Negra, identificada con un cuadrado, se aprecia que para el componente de tamaño presenta el menor valor, debido a que como ya se mencionó corresponde a la cuenca más pequeña, para el componente de energía presenta un valor medio, para el componente hipsométrico un valor bajo y para el componente de forma un valor medio alto.

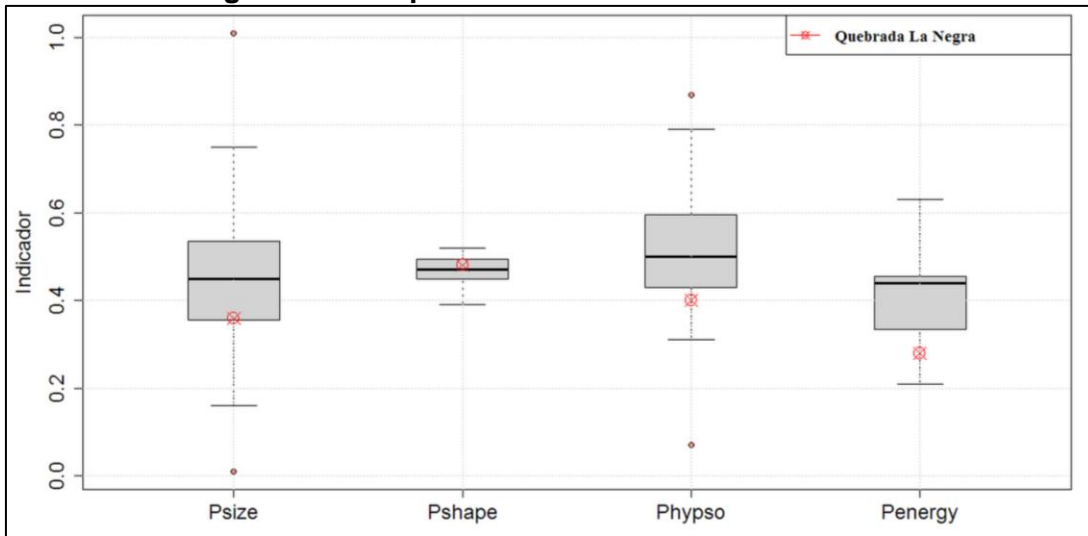
Figura 5.1 Componente del indicador Morfométrico del estudio de Rogelis



Fuente: (Rogelis and Werner 2014).

En la Figura 5.2 se presentan los diagramas de cajas de los resultados obtenidos en el presente Trabajo Final de los componentes del indicador morfométrico, en la cual se resaltan los valores para la quebrada La Negra, en el cual se aprecia que para los componentes de tamaño, hipsometría y energía presenta un valor relativamente bajo, para el componente de forma en un rango alto, mientras que para el componente de forma presenta un valor relativo medio alto, lo cual es congruente con los resultados obtenidos por Rogelis.

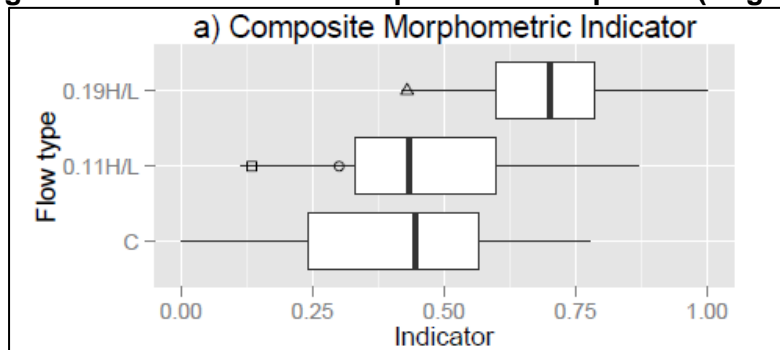
Figura 5.2 Componente del indicador Morfométrico



Fuente: Elaboración propia, 2019.

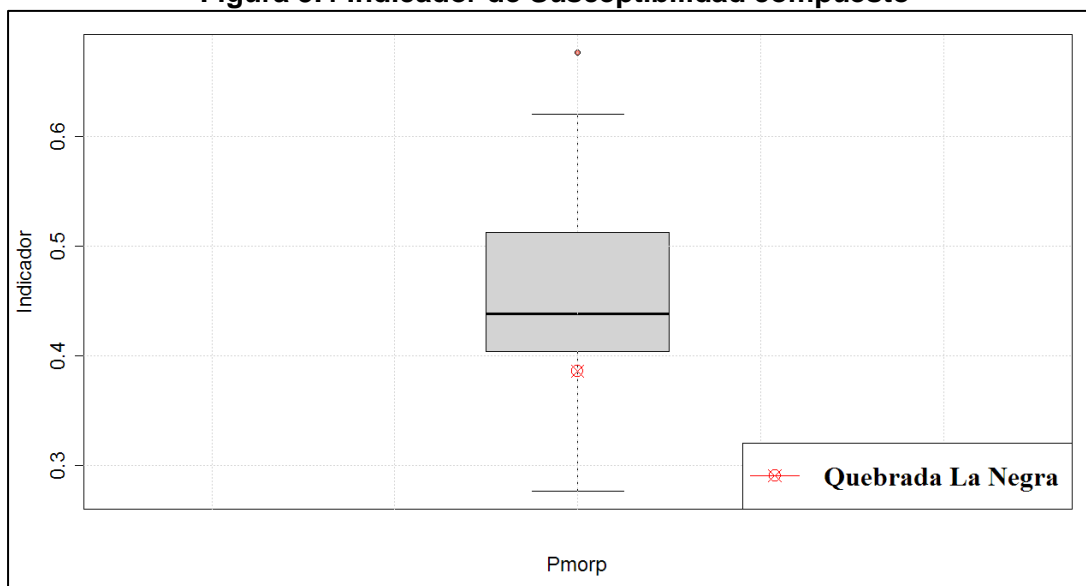
En la Figura 5.3 se presentan los rangos obtenidos por los autores del método del indicador morfométrico, considerando la misma agrupación mencionada anteriormente, se aprecia que la cuenca de la quebrada La Negra (representada con un cuadro), presenta un valor muy bajo del indicador. En la Figura 5.4 se presentan los resultados obtenidos en el presente Trabajo Final, en el cual se aprecia que igualmente presenta un valor relativo bajo del indicador, lo cual es congruente con los resultados obtenidos por Rogelis.

Figura 5.3 Indicador de Susceptibilidad compuesto (Rogelis)



Fuente: (Rogelis and Werner 2014).

Figura 5.4 Indicador de Susceptibilidad compuesto



Fuente: Elaboración propia, 2019.

5.1 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta la verificación de los resultados obtenidos, por medio de la comparación con la información disponible, que se detalla en el numeral 3.3 del presente documento.

5.1.1.1 Comparación con registros históricos

Los resultados de la clasificación de la susceptibilidad obtenidos para cada una de las cuencas, se comparó con una medida basada en el número total de eventos registrados

en la base de datos de desastres DESINVENTAR, adicionalmente con los reportes de otras fuentes, tales como informes detallados de las cuencas estudiadas. Con base en estos registros se determinó el periodo de retorno de la ocurrencia de flujos torrenciales para cada cuenca, con el fin de establecer si el resultado del indicador obtenido es consecuente. A continuación, se presenta la verificación de los resultados obtenidos, por medio de la comparación con la información disponible, que se detalla en el numeral 3.3 del presente documento.

En la Tabla 5.1 se presenta el periodo de retorno promedio de las avenidas torrenciales ocurridas en las cuencas estudiadas, determinado considerando el número de eventos ocurridos durante un periodo de tiempo de 50 años, que corresponde al periodo de registros encontrados. De esta manera se estableció una categoría de susceptibilidad alta para un periodo de retorno de 0 a 15 años, media para periodos entre 15 y 30 años y baja para 30 años o más.

Tabla 5.1 Evaluación de la susceptibilidad a partir del número de eventos registrados en cada cuenca

Departamento	Cuenca	Área km ²	No. de eventos registrados	Pr	Tr	Amenaza
Antioquia	Quebrada La Liboriana	58.77	4	0.08	12	Alta
Tolima	Río Combeima desembocadura	281.69	0	0	0	Nula
	Río Combeima_Villa Restrepo	118.21	3	0.06	16.7	Media
Cundinamarca	Quebrada La Negra	70.75	3	0.06	16.7	Media
Antioquia	Río Tapartó	68.36	1	0.02	50.0	Baja
Putumayo	Río Mulato	17.52	6	0.12	8.3	Alta
	Río Sangoyaco	13.93	5	0.10	10.0	Alta
Valle del Cauca	Río Fraile	188.51	8	0.16	8.3	Alta

Fuente: Adaptado de Base de datos Desinventar.

Tal como se aprecia en la Tabla 5.2, existe una correlación para el caso de la cuenca del río Combeima hasta su desembocadura, donde, de acuerdo con los registros históricos, no se han presentado este tipo de eventos y en el análisis del indicador morfométrico, esta cuenca es la que obtuvo el menor valor. Con respecto a las cuencas del río Combeima hasta Villa Restrepo y la Quebrada La Negra, se presenta la misma categoría de susceptibilidad de acuerdo con los criterios anteriormente citados. Con respecto a la cuenca del río Tapartó, el indicador compuesto indica una susceptibilidad media y de acuerdo con los registros históricos se presenta una susceptibilidad baja. Con respecto a las cuencas de los ríos Mulato, Sangoyaco y Fraile, y la cuenca de la quebrada Liboriana, de acuerdo con el indicador compuesto, la susceptibilidad se clasifica como media, mientras que de acuerdo con los registros la amenaza es alta, ya que el periodo de retorno de eventos torrenciales es inferior a 15 años.

Tabla 5.2 Comparación resultados

Cuenca	Método del Indicador Compuesto	Amenaza según registros
Quebrada La Liboriana	Media	Alta
Río Combeima_desembocadura	Baja	Nula
Río Combeima_Villa_Restrepo	Media	Media

Cuenca	Método del Indicador Compuesto	Amenaza según registros
Quebrada La Negra	Media	Media
Río Tapartó	Media	Baja
Río Mulato	Media	Alta
Río Sangoyaco	Media	Alta
Río Fraile	Media	Alta

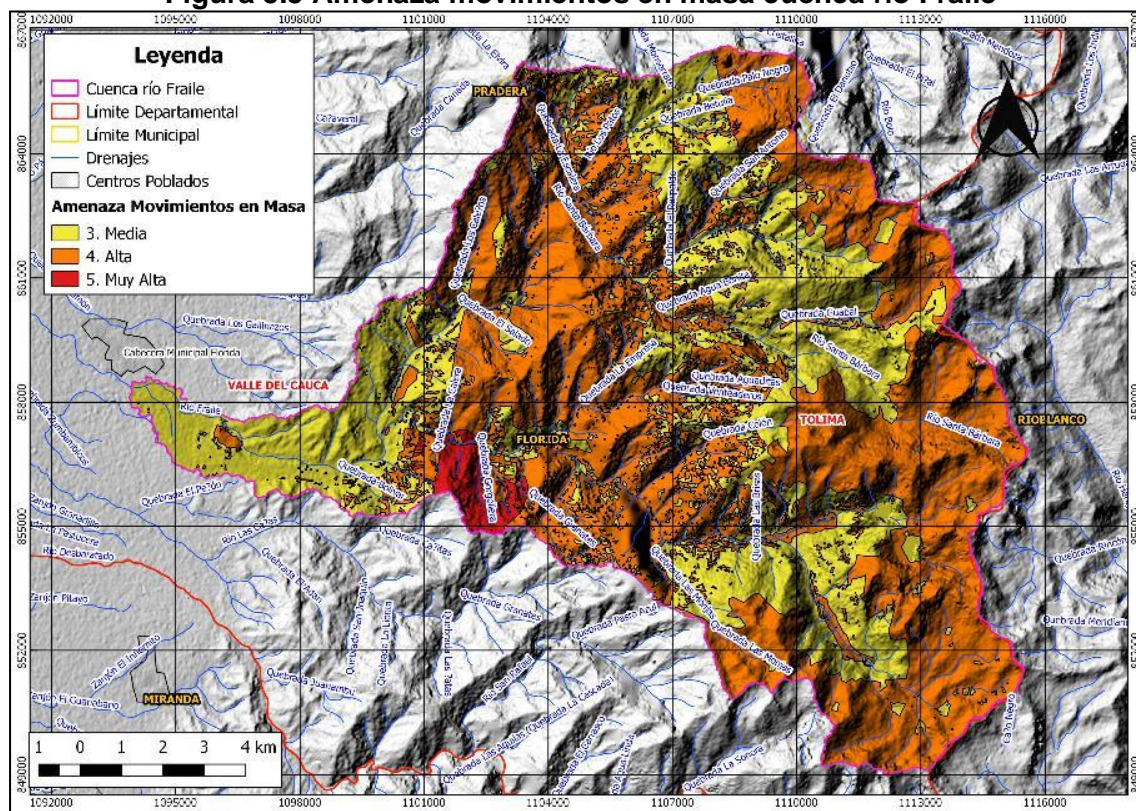
Fuente: Elaboración Propia 2018.

5.1.1.2 Mapa de Amenaza según mapa movimientos en masa 2015

Con la información de categorización de amenazas por movimientos en masa para cada una de las cuencas estudiadas, se procedió a realizar una ponderación por área superficial de cada una de estas categorías para las cuencas. Esto con el fin de determinar un nivel de amenaza integrado por cuenca y comparar de esta manera, los resultados obtenidos del indicador de susceptibilidad compuesto (ISC).

A modo de ejemplo, en la Figura 5.5 se presenta el mapa de amenaza por movimientos en masa de la cuenca del río Fraile, a partir del producto generado por el Servicio Geológico Colombiano en 2015, en la cual se aprecia que tanto en la parte alta como en la parte media de la cuenca prevalecen las áreas con amenaza alta a movimientos en masa, debida las condiciones litológicas, geomorfológicas y de cobertura de la cuenca, así como también una alta probabilidad de ocurrencia de fenómenos detonantes como lo son las lluvias torrenciales. En el anexo 3.3, se presenta la distribución espacial de la amenaza para cada una de las cuencas estudiadas.

Figura 5.5 Amenaza movimientos en masa cuenca río Fraile



Fuente: Adaptado de Servicio Geológico Colombiano 2018.

En la Tabla 5.3 se presentan las áreas y los porcentajes de las categorías de amenaza para cada una de las cuencas estudiadas.

Tabla 5.3 Categorías de Amenaza

Cuenca		Amenaza			
		3. Media	4. Alta	5. Muy Alta	Total
Río Fraile	Área (km ²)	70.7	112.4	3.0	186.1
	%	38.0%	60.4%	1.6%	100.0%
Subcuenca R. Fraile	Área (km ²)	17.5	38.4	-	55.9
	%	31.3%	68.7%	-	100.0%
Quebrada Liboriana	Área (km ²)	1.5	17.9	39.2	58.6
	%	2.6%	30.5%	66.9%	100.0%
Subcuenca Quebrada Liboriana	Área (km ²)	0.3	7.9	35.6	43.8
	%	0.6%	18.0%	81.4%	100.0%
Río Mulato	Área (km ²)	0.5	13.1	4.0	17.7
	%	3.0%	74.4%	22.5%	100.0%
Subcuenca R. Mulato	Área (km ²)	-	7.7	2.2	9.9
	%	-	77.7%	22.3%	100.0%
Río Sangoyaco	Área (km ²)	1.1	8.7	4.8	14.5
	%	7.2%	59.7%	33.1%	100.0%
Quebrada Taruca	Área (km ²)	-	2.1	0.4	2.4
	%	-	84.3%	15.7%	100.0%
Quebrada La Negra	Área (km ²)	0.7	69.2	-	69.8
	%	1.0%	99.1%	-	100.0%
Sub. Q. La Negra	Área (km ²)	0.6	41.8	-	42.3
	%	1.4%	98.6%	-	100.0%
Río Combeima V. Restrepo	Área (km ²)	36.4	80.3	0.0	116.7
	%	31.2%	68.8%	0.0%	100.0%
Sub. Río Combeima V. Restrepo	Área (km ²)	23.04	21.75	0.01	44.8
	%	51.43%	48.55%	0.02%	100.00%
Río Combeima	Área (km ²)	107.6	152.6	21.4	0.2
	%	38.2%	54.2%	7.6%	0.1%
Río Tapartó	Área (km ²)	0.9	50.4	17.1	68.4
	%	1.3%	73.7%	25.0%	100.0%
Sub. Río Tapartó	Área (km ²)	-	32.0	8.2	40.2
	%	-	79.6%	20.4%	100.0%

Fuente: Adaptado de Servicio Geológico Colombiano 2018.

Resultados

De acuerdo con las categorías de amenaza obtenidas para cada una de las cuencas a partir del mapa de amenaza por movimientos en masa del Servicio Geológico colombiano, se determinaron las categorías predominantes en cada cuenca, con lo cual se realizó la comparación con los resultados obtenidos del indicador de susceptibilidad compuesto.

Tal como se aprecia en la Tabla 5.4, existe una subestimación de la susceptibilidad obtenida por el Indicador de Susceptibilidad Compuesto con respecto a la categorización de susceptibilidad de acuerdo con el mapa de amenaza por movimientos en masa del SGC, ya que 9 de las cuencas presentan una susceptibilidad media por él ISC, mientras que de acuerdo con el mapa SGC la categoría es Alta.

Tabla 5.4 Comparación resultados

Cuenca	Indicador Compuesto	Susceptibilidad Mapa SGC
Quebrada La Liboriana	Media	Alta
Río Combeima_desembocadura	Baja	Media
Río Combeima_Villa_Restrepo	Media	Alta
Quebrada La Negra	Media	Alta
Río Tapartó	Media	Alta
Río Mulato	Media	Media
Río Sangoyaco	Media	Media
Río Fraile	Media	Media
Sub_Taparto	Media	Alta
Sub_Fraile	Media	Alta
Sub_Liboriana	Media	Alta
Sub_Sangoyaco	Alta	Alta
Sub_Mulato	Alta	Alta
Sub_Quebrada La Negra	Media	Alta
Sub_Comb_Villa_Restrepo	Media	Alta

Fuente: Elaboración Propia 2018.

5.1.1.3 Orden de Horton-Strahler

Se estableció el número de orden de Horton para cada una de las cuencas estudiadas, a partir de información cartográfica a escala 1:100.000, tal como se aprecia en la Tabla 5.5, las cuencas de orden 1 y 2, de acuerdo con el indicador de susceptibilidad compuesto corresponden a una susceptibilidad alta, esto representa una buena correlación.

Tabla 5.5 Orden de Horton – Strhaler

Cuenca	Orden de Horton	Indicador Compuesto
Quebrada La Liboriana	4	Media
Río Combeima_desembocadura	5	Baja
Río Combeima_Villa_Restrepo	4	Media
Quebrada La Negra	4	Media
Río Tapartó	3	Media
Río Mulato	3	Media
Río Sangoyaco	3	Media
Río Fraile	4	Media
Sub_Tapartó	3	Media
Sub_Fraile	3	Media
Sub_Liboriana	4	Media
Sub_Sangoyaco	1	Alta
Sub_Mulato	2	Alta
Sub_Quebrada La Negra	4	Media
Sub_Comb_Villa_restrepo	4	Media

Fuente: Elaboración Propia 2018.

5.2 ANÁLISIS COMPARATIVO

En la Tabla 5.6 se presenta el resumen de los resultados obtenidos del indicador compuesto y de las estrategias de verificación empleadas. Es posible apreciar que para las cuencas del río Combeima – Villa Restrepo y la quebrada La Negra existe una concordancia de la susceptibilidad de acuerdo con el ISC y los registros históricos. Mientras que, para las cuencas de los ríos Mulato, Sangoyaco y Fraile, la mejor correlación se presenta con la susceptibilidad a partir del mapa del SGC. Por otra parte, de acuerdo con ISC, las subcuencas de los ríos Sangoyaco y Mulato presenta una susceptibilidad Alta, coincidiendo con lo obtenido a partir del mapa del SGC y adicionalmente, son las cuencas que presentan el menor número de Orden de Horton, lo cual indica una buena correlación para la estimación de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales.

Tabla 5.6 Resumen resultados obtenidos.

Cuenca	Indicador Compuesto	Susceptibilidad Mapa SGC	Orden de Horton	Susceptibilidad según registros
Quebrada La Liboriana	Media	Alta	4	Alta
Río Combeima Desembocadura	Baja	Media	5	Nula
Río Combeima_Villa Restrepo	Media	Alta	4	Media
Quebrada La Negra	Media	Alta	4	Media
Río Tapartó	Media	Alta	3	Baja
Río Mulato	Media	Media	3	Alta
Río Sangoyaco	Media	Media	3	Alta
Río Fraile	Media	Media	4	Alta
Sub_Tapartó	Media	Alta	3	-
Sub_Fraile	Media	Alta	3	-
Sub_Liboriana	Media	Muy Alta	4	-
Sub_Sangoyaco	Alta	Alta	1	-
Sub_Mulato	Alta	Alta	2	-
Sub_Quebrada La Negra	Media	Alta	4	-
Sub_Comb_Villa Restrepo	Media	Alta	4	-

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Tabla 5.7 se presenta el resultado numérico del Indicador Morfométrico y el periodo de retorno para cada una de las cuencas que cuentan con registros históricos de la ocurrencia de flujos torrenciales, esto con el fin de identificar alguna coincidencia en el ordenamiento de la susceptibilidad con el ordenamiento dado por los registros de ocurrencia de eventos, encontrándose que no se presenta una correlación óptima entre dichos ordenamientos.

Tabla 5.7 Resultado del Indicador Morfométrico y el Periodo de retorno

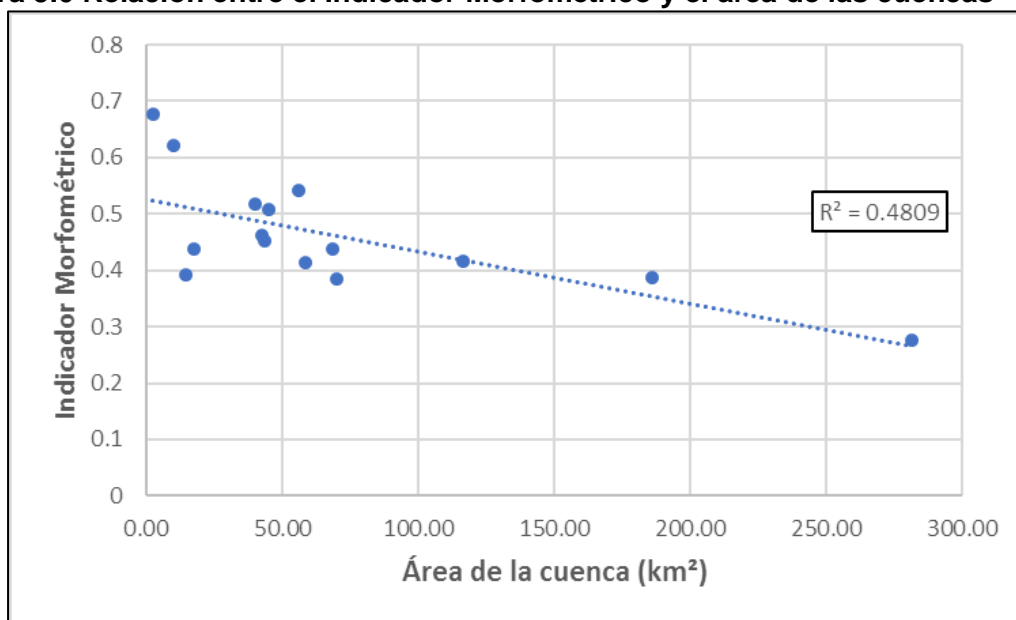
Cuenca	Pmorp	TR
Río Tapartó	0.44	50

Cuenca	Pmorp	TR
Río Mulato	0.44	8.3
Río Combeima Villa Restrepo	0.42	16.7
Quebrada La Liboriana	0.41	12
Río Sangoyaco	0.39	10
Quebrada La Negra	0.39	16.7
Río Fraile	0.39	8.3

Fuente: Elaboración propia, 2019.

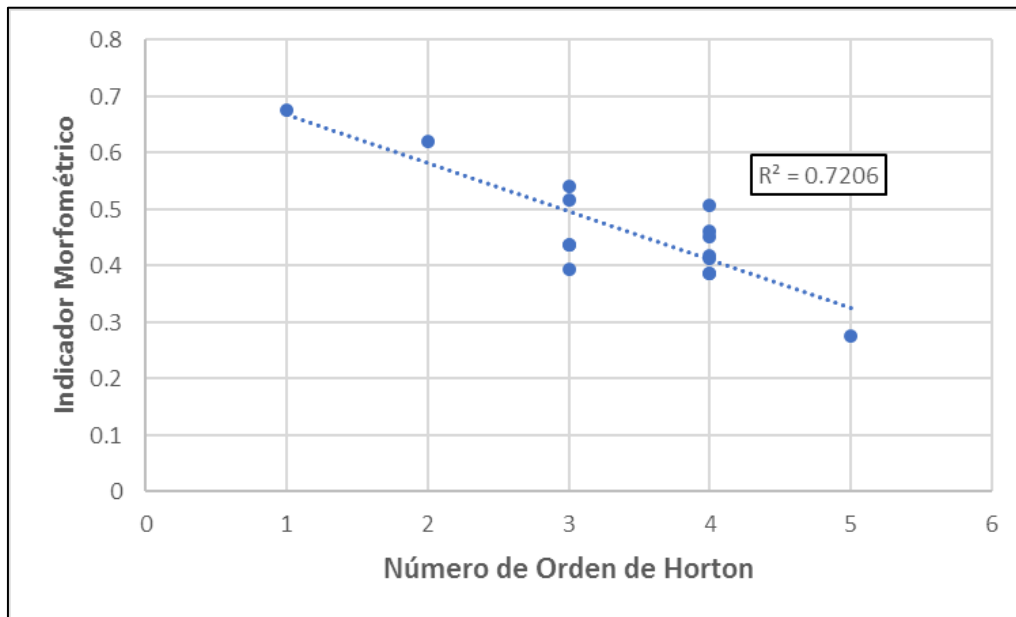
En la Figura 5.6 se presenta la relación entre el resultado del Indicador Morfométrico y el área de la cuenca, en la cual se evidencia una tendencia en el sentido que cuanto más grande es la cuenca, menor es la susceptibilidad establecida a través del Indicador Morfométrico, lo cual es consecuente con la observación de que a menor número de orden de la cuenca mayor es la susceptibilidad (Figura 5.7).

Figura 5.6 Relación entre el Indicador Morfométrico y el área de las cuencas



Fuente: Elaboración propia, 2019.

El orden de Horton de estas corrientes corresponde al más bajo, indicando que los cauces de menor orden presentan la susceptibilidad más alta, como se observa en la Figura 5.7.

Figura 5.7 Relación del Número de Orden de Horton con el Indicador Morfométrico

Fuente: Elaboración propia, 2019.

6 CONCLUSIONES

El primer paso para la evaluación de la aplicabilidad del método del Indicador de Susceptibilidad Compuesto fue definir las cuencas en las cuales se pudiera aplicar la metodología y a su vez evaluar la capacidad del método para determinar la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales, esta tarea presentó una alta complejidad, debido a que era necesario identificar cuencas con evidencias de la ocurrencia de este fenómeno y que adicionalmente contaran con la información disponible para aplicar la metodología. Por tal razón se considera muy necesario contar con bases de datos nacionales de registros de desastres naturales, que permitan identificar adecuadamente los sitios de afectación y en lo posible contar con registros fotográficos, que permitan entender en cierto grado los fenómenos ocurridos. Adicionalmente, a pesar de que existe una disponibilidad del 100% de la cartografía escala 1:100.000 para el territorio colombiano, contar con cartografía a escalas más detalladas, contribuiría en gran medida en el desarrollo de estudios regionales que aporten al conocimiento y evaluación del riesgo de desastres naturales.

La aplicación de la metodología es relativamente sencilla siempre y cuando se cuente con la información necesaria, la determinación de los parámetros que lo componen es de fácil obtención por medio del uso de sistemas de información geográfica. Los parámetros morfométricos de la cuenca dependen en gran medida de la escala de la información cartográfica, por tal razón, la falta de disponibilidad de información a escalas más detalladas para todo el territorio nacional es un factor limitante. En consecuencia, el análisis de cuencas más pequeñas que las analizadas en el presente estudio, presenta un grado de dificultad, ya que no se cuenta con el detalle cartográfico requerido para la delimitación adecuada de cuencas en muchas regiones del país.

La verificación de la aplicabilidad de la metodología es un proceso de gran dificultad, ya que la comparación de los resultados con otras fuentes de información o metodologías conlleva cierto grado de subjetividad. De acuerdo con los resultados de la validación, con respecto a los registros históricos de la ocurrencia de eventos, se aprecia que el Indicador Compuesto tiende a subestimar el grado de susceptibilidad, principalmente para las cuencas de la quebrada La Liboriana y los ríos Mulato, Sangoyaco y Fraile. Con respecto a la validación por el mapa de amenaza del SGC, se aprecia igualmente una subestimación del grado de susceptibilidad, aunque para las subcuencas de los ríos Sangoyaco y Mulato, se obtuvo una correlación de susceptibilidad alta. Por último, con respecto al orden de Horton de las corrientes de unidades hidrográficas analizadas, se aprecia que las cuencas de menor orden son las que presentan, de acuerdo con el Indicador Compuesto, el grado de susceptibilidad más alto.

Una desventaja que presenta el método es que realiza una clasificación relativa de la susceptibilidad, a partir de los valores máximos y mínimos resultantes de la muestra de cuencas tomada, esto puede llegar a sesgar los resultados si se tiene una muestra muy pequeña o no representativa de cuencas de una región determinada. A pesar de esta relatividad, de acuerdo con los resultados obtenidos para la quebrada La Negra, es posible apreciar una consistencia de los resultados obtenidos del indicador morfométrico.

En contraste con las cuencas empleadas por Rogelis en su análisis, que presentaban un rango de áreas entre 0.2 y 57 km², sin incluir la cuenca de la quebrada La negra, cuya área es de 68.4 km², en el presente Trabajo Final se analizaron cuencas en el rango de 2.4 km²

a 281.7 km², con el fin de evaluar la aplicabilidad del método en cuencas de mayor área superficial y ubicadas en otras zonas hidrográficas del país. Considerando que se trata de un método que clasifica cualitativamente el grado de susceptibilidad, su confiabilidad es relativa, lo que se busco en este trabajo final fue también evaluar cualitativamente si el método produce resultados razonables, de acuerdo con evidencias de la ocurrencia de eventos torrenciales, comparación que resulta también cualitativa, a partir de evidencias basadas en fuentes de información secundaria y no directamente obtenida en campo, a diferencia de los autores del método.

Con respecto a las subcuencas analizadas, se aprecia que en general estas presentan mayores valores del indicador morfométrico, por ser más pequeñas, esto principalmente debido al componente de tamaño de las unidades hidrográficas, que, de acuerdo con el resultado de Análisis de Componentes Principales realizado por Rogelis, para identificar cuencas con problemáticas mayores, es el de mayor peso en el indicador. Por tal razón, los factores de mayor aporte al indicador compuesto corresponden a los parámetros de tamaño de las unidades hidrográficas, seguido del índice de Melton, la pendiente de ladera y la pendiente del cauce principal, que presentan los valores más altos para las cuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco, las cuales se clasifican en categoría de susceptibilidad alta, de acuerdo con el Indicador Compuesto

Es posible concluir que el Indicador de Susceptibilidad Compuesto permite evaluar el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales considerando los resultados obtenidos con relación a las estrategias de verificación empleadas. En los casos donde un método muestra que hay mayor susceptibilidad los otros métodos también lo replican, aunque en algunos casos con graduación diferente, esto es explicable considerando que los métodos emplean estrategias de calificación basados en diferentes fuentes de información y, en cierta medida, se trata de métodos de clasificación subjetivos.

7 RECOMENDACIONES

Es necesario trabajar con la escala más detallada posible, con el fin de obtener adecuadamente los parámetros de cobertura del terreno. Para evaluar más rigurosamente la importancia del indicador de cobertura, es necesario realizar el análisis en cuencas que presentan un alto grado de deterioro, es decir mayor porcentaje de tierras desnudas o degradadas. Tratar de incorporar a la metodología un factor que indique la disponibilidad de sedimentos en la cuenca, por medio de la litología o geomorfología regional, permitiría muy posiblemente, mejorar las capacidades del método para la evaluación de la susceptibilidad.

Las expresiones que permiten obtener el indicador morfométrico fueron desarrolladas por los autores a partir del análisis de 66 subcuencas en la cuenca del río Tunjuelo y 40 cuencas en los cerros orientales de Bogotá, que presentan un rango de áreas entre 0.2 y 57 km², adicionalmente, los autores recomiendan que el método se aplique a escala regional, por lo tanto, cuando se pretenda evaluar la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos torrenciales en una región determinada, se debe realizar el análisis de todas las cuencas de esa región, aplicando con cautela las expresiones deducidas por los autores del método, o alternativamente desarrollar ecuaciones propias para cada región.

La relatividad del método puede llegar a ser una limitación en cuanto a la obtención de resultados significativos en la evaluación de la susceptibilidad, llevar a cabo algún tipo de normalización de los parámetros que evite esta dependencia de los rangos de valores de los parámetros de las cuencas analizadas, podría brindar un indicador óptimo absoluto para la estimación de la susceptibilidad.

Con el fin de tener en cuenta la dinámica de las coberturas de la tierra en este tipo de análisis, es necesario realizar la aplicación del método en ventanas de tiempo diferentes, es decir realizando un análisis multitemporal de las coberturas y aplicando el método para cada una, esto con el fin de verificar el cambio en la susceptibilidad a través del tiempo, evaluando así, los impactos de la modificación de las coberturas naturales.

ANEXOS

ANEXO 1. REGISTROS DE EVENTOS BASES DE DATOS

ANEXO 2. CURVAS HIPSOMÉTRICAS

ANEXO 3. ANEXO CARTOGRÁFICO

Bibliografía

- Al-Rawas, Ghazi A., and Caterina Valeo. 2010. "Relationship between Wadi Drainage Characteristics and Peak-Flood Flows in Arid Northern Oman." *Hydrological Sciences Journal* 55(3): 377–93.
- Arenas, Fabio. 2006. "Avalancha En Villa Restrepo Enterró Hasta El Cementerio - Archivo Digital de Noticias de Colombia y El Mundo Desde 1.990 - ElTiempo.Com." *El Tiempo*.
- Baker, Victor R. 1976. "Hydrogeomorphic Methods for the Regional Evaluation of Flood Hazards." *Environmental Geology* 1(5): 261–81.
- Caballero, José. 2011. "Las Avenidas Torrenciales: Una Amenaza Potencial En El Valle De Aburrá." *Revista Gestión y Ambiente* 14(3): 45–50. http://www.bdigital.unal.edu.co/6118/1/Gest._y_Amb._Vol.14,_no._3.pdf.
- Chen, Chien-Yuan, and Fan-Chieh Yu. 2011. "Morphometric Analysis of Debris Flows and Their Source Areas Using GIS." *Geomorphology* 129(3–4): 387–97. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X1100122X>.
- Chen, Tien-chien, Hsiang-yun Wang, and Shue-ming Wang. 2010. "Representative Slope Index of Debris Flow Streams in Taiwan." *Interpraevent 2010*: 91–99.
- Corominas, Jordi. 1996. "The Angle of Reach as a Mobility Index for Small and Large Landslides." *Canadian Geotechnical Journal* 33(2): 260–70.
- Corporación OSSO. 2016. "Desinventar Online Edition 10." <https://online.desinventar.org/> (April 14, 2017).
- Crosta, Giovanni B., and Paolo Frattini. 2004. "Controls on Modern Alluvial Fan Processes in the Central Alps, Northern Italy." *Earth Surface Processes and Landforms* 29(3): 267–93.
- Gallant, John C., and Trevor I. Dowling. 2003. "A Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness for Mapping Depositional Areas." *Water Resources Research* 39(12): n/a–n/a. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002WR001426/abstract%5Cnhttp://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1029/2002WR001426/asset/wrcr9422.pdf?v=1&t=hkqiqi4zw&s=a44083f2c6d7bca3d38f9bc07df018411f884db5>.
- García, Marcelo H. et al. 2008. "Sedimentation Hazards." *Sedimentation Engineering*: 885–936.
- González, A. 2004. "Análisis Morfométrico de La Cuenca y de La Red de Drenaje Del Río Zadorra y Sus Afluentes Aplicado a La Peligrosidad de Crecidas." *Boletín de la A.G.E.N.* 38: 311–29.
- González, Juan Luis, Omar Alberto Chavez, and Hermelín Hermelin. 2005. "Aspectos Geomorfológicos de La Avenida Torrencial Del 31 de Enero de 1994 En La Cuenca Del Río Fraile y Sus Fenómenos Asociados." *Desastres de Origen Natural En Colombia, 1979-2004*: 135.
- Harlin, J. M. 1980. "The Effect of Precipitation Variability on Drainage Basin

- Morphometry.Pdf." *American Journal of Science* 280.
- Harlin, John M. 1978. "Statistical Moments of the Hypsometric Curve and Its Density Function." *Journal of the International Association for Mathematical Geology* 10(1): 59–72.
- . 1984. "Watershed Morphometry and Time to Hydrograph Peak." *Journal of Hydrology* 67(1–4): 141–54.
- Horton, Robert E. 1945. "Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology." *Bulletin of the Geological Society of America* 56(June).
- Howard, Alan D. 1990. "Role of Hypsometry and Planform in Basin Hydrologic Response." *Hydrological Processes* 4(4): 373–85.
- Hutter, K., and B. Svendsen. 1994. "Debris Flow Modeling: A Review." *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 8(March 2017): 1–35. <http://www.springerlink.com/index/j6t836m8215n1652.pdf>.
- Ideam. 2010. "Leyenda Nacional de Coberturas de La Tierra. Metodología CORINE Land Cover Adaptada Para Colombia, Escala 1:100.000." *Area TH-62-04-1(257)*: 16.
- IDEAM. 2013. "Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas." : 46. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>.
- Jakob, Matthias. 1996. "Morphometric and Geotechnical Controls of Debris Flow Frequency and Magnitude in Southwestern British Columbia." *Jakob, Matthais* (October): 1–232.
- Koscielny, M., R. Cojean, and I. Thénevin. 2009. "Debris Flow Hazards Due to Land Use Changes above Source Areas in Torrent Catchments: Case Study of Les Arcs (Savoie, France)." *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 124: 161–70.
- Kostaschuk, R. A., G. M. Macdonald, and P. E. Putnam. 1986. "Depositional Process and Alluvial Fan-drainage Basin Morphometric Relationships near Banff, Alberta, Canada." *Earth Surface Processes and Landforms* 11(5): 471–84.
- Leon R., Orlando. 1993. "AVALANCHA ARRASÓ A TAPARTÓ - Archivo Digital de Noticias de Colombia y El Mundo Desde 1.990 - Eltiempo.Com." *El Tiempo*.
- Mantilla, R.I., O.J. Mesa, and G. Poveda. 1998. "Geometría, Topología y Morfometría de Las Cuencas Magdalena-Cauca y Atrato a Partir de Modelos Digitales de Terreno." *Memorias XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*: 157–71.
- Montoya, Luis, Sandra Silva, and Juan Esteban González. 2009. "Evaluación Se Zonas de Amenaza Por Avenidas Torrenciales Utilizando Metodologías Cualitativas. Caso de Aplicación a La Quebrada Doña María." *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 8(30): 11–29. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v8n15/v8n15a02.pdf>.
- OECD. 2008. 3 Methodology *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. <https://www.oecd.org/std/42495745.pdf>.
- Rogelis, M. C., and M. Werner. 2014. "Regional Debris Flow Susceptibility Analysis in Mountainous Peri-Urban Areas through Morphometric and Land Cover Indicators." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14(11): 3043–64.
- Rogelis Prada, María Carolina. 2016. "OPERATIONAL FLOOD FORECASTING,

- WARNING AND RESPONSE FOR MULTI-SCALE FLOOD RISKS IN DEVELOPING CITIES.” Delft University of Technology.
- Sakals, M E et al. 2006. “The Role of Forests in Reducing Hydrogeomorphic Hazards.” *Forest Snow and Landscape Research* 80(1): 11–22. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33745526449&partnerID=40&md5=bf447dfab7d827221bff3f2446f7b07e>.
- De Scally, Fes A., and Ian F. Owens. 2004. “Morphometric Controls and Geomorphic Responses on Fans in the Southern Alps, New Zealand.” *Earth Surface Processes and Landforms* 29(3): 311–22.
- Schumm, Stanley A. 1956. “Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey.” *Bulletin of The Geological Society of America* 67(5): 597–646.
- Semana. 2015. “Avalancha En Salgar Antioquia.” <https://www.semana.com/nacion/articulo/avalancha-en-salgar-antioquia/428215-3> (June 3, 2019).
- Servicio Geológico Colombiano. 2012. “Documento Metodológico de La Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza Relativa Por Movimientos En Masa. Escala 1:100 000.”
- Strahler, Arthur N. 1957. “Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology, Transactions of the American Geophysical Union.” *Transactions, American Geophysical Union* 38(6): 913–20.
- Takahashi, Tamotsu. 2014. *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures 2nd Edition*. ed. CRC Press/Balkema. Leiden, The Netherlands.
- Wang Zhaoyin, Zhiwei Li, Mengzhen Xu, Xu Mengzhen, Yu Guan. 2016. *River Morphodynamics and Stream Ecology of the Qinghai – Tibet Plateau*. ed. CRC Press.
- Welsh, Andrew, and Tim Davies. 2011. “Identification of Alluvial Fans Susceptible to Debris-Flow Hazards.” *Landslides* 8(2): 183–94.
- Zavoianu, Ion. 1985. 20 Developments in Water Science *Morphometry of Drainage Basins*. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167564808704143>.