

**CONSULTORÍA PARA ELABORAR ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO
POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIÓN, AVENIDA TORRENCIAL E INCENDIOS
FORESTALES EN LOS MUNICIPIOS PRIORIZADOS EN LA JURISDICCIÓN DE LA
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA –CAR–
CONTRATO 1185/13**

AVENIDAS TORRENCIALES ESCALA 1:25000

MUNICIPIO ZIPAQUIRÁ

CONTRATANTE:



CONSULTOR:



BOGOTÁ, ABRIL DE 2015

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	GENERALIDADES	2
2.1	Objetivo	2
2.1.1	Objetivos Específicos	2
2.2	Alcance.....	2
2.2.1	Especificaciones, escalas de trabajo y unidades de observación	2
2.3	Descripción de las actividades realizadas	3
2.4	Localización de los trabajos	4
2.5	INSUMOS BÁSICOS.....	5
2.5.1	Geología.....	5
2.5.2	Hidrología	6
3	CARACTERÍSTICAS torrenciales de variabilidad a IVet de subcuencas.....	15
3.1	Aspectos Generales	15
3.2	Cálculo del índice de variabilidad	16
3.2.1	Caudal por microcuenca.....	17
3.3	Cálculo Índice morfométricos	19
3.3.1	Densidad de drenaje	20
3.3.2	Coeficiente de compacidad	23
3.4	Índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales-ivet.....	27
4	EVALUACIÓN DE AMENAZA por avenida torrencial.....	28
4.1	Metodología.....	28
4.2	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD CON EL USO IVET	29
4.3	Resultados de la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales	30
5	ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD	39
5.1	Factores para determinar la vulnerabilidad	39
5.2	Categorías de los elementos a evaluar	39
5.2.1	Aguas continentales	39
5.2.2	Bosques	40
5.2.3	Cultivos anuales o transitorios.....	40
5.2.4	Cultivos permanentes.....	40
5.2.5	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	40
5.2.6	Mosaico de pastos y cultivos.....	40
5.2.7	Pastos	40
5.2.8	Zonas urbanizadas	40
5.2.9	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	40
5.2.10	Áreas agrícolas heterogéneas.....	41
5.2.11	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva.....	41
5.3	Metodología para evaluar la vulnerabilidad por avenidas torrenciales	43
5.4	Resultados de la vulnerabilidad.....	47

6	EVALUACIÓN DE RIESGO	49
6.1	RESULTADO DE LA EVALUACION DEL RIESGO	49
7	CONCLUSIONES.....	52
8	RECOMENDACIONES	54
9	FUENTES DE CONSULTA.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resumen de las características básicas de los estudios.....	3
Tabla 3.1 Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET).....	16
Tabla 3.2 Relaciones entre variables para el Índice Morfométrico de Torrencialidad.....	19
Tabla 3.3 Resumen de categorización y clasificación de la Densidad de Drenaje.....	20
Tabla 3.4 Resumen de Densidad de Drenaje y Categoría por Subcuenca.....	20
Tabla 3.5 categorías del índice de compacidad para el Municipio Zipaquirá.....	23
Tabla 3.6 Índice morfométrico de las microcuencas.....	25
Tabla 4.1 Unidades geomorfológicas municipio de Zipaquirá.....	33
Tabla 4.2 Categorización de la torrencialidad en el Municipio Zipaquirá.....	37
Tabla 5.1 Fragilidad total calculada.....	44
Tabla 5.2 Indicador de la falta de resiliencia económica.....	45
Tabla 5.3 Categorización de resiliencia.....	46
Tabla 5.4 Niveles de vulnerabilidad propuestos.....	46
Tabla 5.5 Descripción de los niveles de vulnerabilidad propuestos.....	47
Tabla 6.1 Matriz de riesgos.....	49
Tabla 6.2 Categorías de índice de riesgos.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Localización Municipio Zipaquirá.....	4
Figura 2.2 Mapa geológico del departamento de Cundinamarca.....	6
Figura 3.1. Esquema conceptual para el cálculo del IVET.....	16
Figura 3.2 Mapa índice de variabilidad municipio Zipaquirá	18
Figura 3.3 Mapa densidad de drenaje.	22
Figura 3.4 Mapa de pendiente media	24
Figura 3.5 Mapa índice morfométrico Municipio Zipaquirá.	26
Figura 3.6 Mapa índice de vulnerabilidad método IVET	27
Figura 4.1 Metodología general para evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales.....	29
Figura 4.2 Indicadores sobre la cronología de flujos densos asociados a procesos torrenciales	31
Figura 4.3. Mapa de Calificación de Geomorfología.	32
Figura 4.4 Amenaza por inundación para el Municipio Zipaquirá	35
Figura 4.5 Mapa de amenaza por torrencialidad para el Municipio Zipaquirá.....	36
Figura 4.6 Distribución amenaza Municipio Zipaquirá	37
Figura 5.1 Mapa uso y cobertura del suelo Municipio Zipaquirá	42
Figura 5.2. Mapa de vulnerabilidad del Municipio Zipaquirá	48
Figura 6.1. Mapa de riesgos del Municipio Zipaquirá.....	50
Figura 6.2 Distribución riesgo Municipio Zipaquirá, por categoría	51

1 INTRODUCCIÓN

El relieve característico del territorio de un Municipio es el producto de la interacción que se presenta entre los procesos dinámicos que se irradian desde el interior de la tierra, fundamentalmente relacionados con epirogenias, orogenias, intrusiones magmáticas, vulcanismo y sismicidad, entre otros, con la acción de los agentes externos que modelan el paisaje, tales como el clima, las lluvias, el viento, los ríos, la meteorización, la gravedad y las acciones antrópicas, para citar solamente algunos de ellos.

De manera natural y en relación directa con los procesos evolutivos, esta interacción alcanzó un equilibrio que confiere al entorno territorial un ambiente estable, dentro del cual los cambios de sus características físicas son relativamente suaves y lentamente transicionales. Sin embargo, por la acción de algunos agentes naturales y/o por la acción de algunas afectaciones antrópicas que no toman en cuenta el equilibrio mencionado, se generan procesos hidrodinámicos de corta duración pero de gran magnitud, que de manera directa o indirecta, terminan causando a los seres humanos, a sus obras de infraestructura o a su entorno ambiental, afectaciones físicas que eventualmente pueden llegar a ser catastróficas, como son las avenidas torrenciales.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR, en convenio con las autoridades administrativas del Municipio de Zipaquirá, el cual hace parte de su jurisdicción, vieron la necesidad de evaluar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo relacionados con la generación de Avenidas Torrenciales en las cuencas hidrográficas que hacen parte de la extensión territorial del municipio en mención.

En este informe se presenta la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por Avenidas Torrenciales en la zona rural del Municipio de Zipaquirá. La metodología aplicada ha resultado de la integración de los planteamientos efectuados por la CAR es sus términos de referencia, con la respectiva propuesta del consultor, Unión Temporal AVR CAR, en la cual se refleja una amplia experiencia sobre el tema. El trabajo realizado tiene como base tanto información secundaria obtenida a partir de diferentes fuentes, como información primaria generada a partir de controles de campo sobre bases topográficas del IGAC a escala 1:25.000.

El informe está conformado por nueve (9) capítulos, de las cuales el **primero** corresponde a la introducción, el **segundo** registra aspectos básicos y generales del trabajo, el **tercero** contiene los aspectos teóricos relacionados con la torrencialidad y en particular, sobre el índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET), el **cuarto** hace alusión a la evaluación de amenazas por avenidas torrenciales, el **quinto** trata el tema del análisis de la vulnerabilidad, el **sexto** se relaciona con la evaluación del riesgo y sus resultados, el **séptimo** plantea las conclusiones, el **octavo** las recomendaciones, y el **noveno**, referencia las fuentes de información consultadas.

2 GENERALIDADES

El presente estudio hace parte de un proyecto de mayor alcance que define el contrato suscrito entre la CAR y la UT AVR-CAR, cuyo objeto incluye la ejecución de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa, inundación, avenidas torrenciales e incendios forestales en 24 municipios.

Con el fin de enmarcar la información contenida en el presente informe, se incluye a continuación una breve reseña de algunos aspectos generales que definen la ejecución del estudio.

2.1 OBJETIVO

Realizar el estudio básico de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por Avenidas Torrenciales en la zona rural del Municipio Zipaquirá a escala 1:25.000 con el objeto de incorporarlo en los procesos de ordenamiento territorial.

2.1.1 Objetivos Específicos

- a) Interpretación, pre-procesamiento y análisis de información secundaria suministrada por la CAR y otras entidades.
- b) Procesamiento y post-procesamiento hidrológico de la información cartográfica a escala 1:25.000 y delimitación de subcuencas de estudio a cauces con N° de Orden no menor a 2.
- c) Cálculo de parámetros morfométricos a cada una de las subcuencas seleccionadas y determinación del índice Morfométrico de Torrencialidad
- d) Cálculo del índice de Variabilidad bajo la Metodología planteada por el IDEAM y descrita en el Tomo I.
- e) Determinación del Índice de Vulnerabilidad frente a Eventos Torrenciales – IVET - de acuerdo con los lineamientos establecidos en Anexo Técnico de la CAR.
- f) Elaborar los mapas que se requieren como insumo (pendientes, precipitación máxima en 24 Horas, Curva Número) para determinar la amenaza por Avenidas Torrenciales para la zona rural del municipio.
- g) Determinación de la amenaza por Avenidas Torrenciales para la zona rural del municipio.
- h) Obtener el riesgo al que se encuentra expuesta el área en estudio ante un evento, por medio de la multiplicación de la amenaza y vulnerabilidad frente a sucesos por Avenidas Torrenciales.

2.2 ALCANCE

El presente estudio contempla todas las actividades necesarias para la evaluación y zonificación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por avenidas torrenciales, para la zona rural del Municipio Zipaquirá, Departamento de Cundinamarca.

2.2.1 Especificaciones, escalas de trabajo y unidades de observación

Las especificaciones de trabajo están contenidas en el Anexo Técnico de la CAR, que define, entre otros aspectos, los estudios a realizar y las escalas de trabajo, denominándolos “Básicos” y “Detallados”. En particular, el Numeral 5.1.8 de dicho documento define los requisitos a los que debe darse cumplimiento en los estudios.

- a) El Anexo Técnico establece que los estudios **básicos** para soportar la revisión de los planes de ordenamiento se efectuarán “para los suelos urbanos, de expansión urbana y rural y tendrán por objeto la identificación de las áreas de amenaza y la determinación de las áreas con condiciones de riesgo en las que se exigirá, para su intervención o desarrollo posterior, la realización de estudios de detalle, ya sea porque dada su ocupación es necesario determinar el nivel de riesgo de los elementos expuestos o porque el municipio o distrito, en función del

modelo de ocupación territorial las destine para el desarrollo de actuaciones de parcelación, urbanización o construcción en las diferentes zonas comprendidas dentro del perímetro urbano, de expansión urbana, rural suburbano, centros poblados rurales o áreas de vivienda campestre.” De igual forma registra que estos estudios permitirán adelantar:

- b) La delimitación y zonificación de las áreas de amenaza por fenómenos de inundación y movimientos en masa.
- c) La identificación y priorización de las áreas con condición de riesgo por fenómenos de inundación y movimientos en masa, en las que se requiere adelantar los estudios de detalle.
- d) La determinación de las medidas de mitigación no estructurales, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante la reglamentación de usos del suelo.”

En la **Tabla 2.1**, se resumen las características básicas del presente estudio.

Tabla 2.1 Resumen de las características básicas de los estudios.

Tipo de estudio	Fenómeno que da origen a la amenaza	Clase de suelo (ley 388/97)	Escala	Unidad de análisis	Referencia del anexo técnico
Básico	Avenidas Torrenciales	Rural	1:25.000	Cuenca	5.1.8.3

Fuente: Elaboración propia con base en el Anexo Técnico de la CAR.

2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

Para la elaboración del estudio se dividió en dos actividades principales las cuales se describen a continuación:

1. Recopilación de información disponible

Esta actividad hace referencia a consultar la información disponible tal como cartografía, mapas geológicos del Servicio Geológico Nacional, mapas de usos del suelo de los Planes de Ordenamiento Territorial, localización de infraestructura existente, fotografías aéreas, bases de datos de registros históricos de eventos y emergencias (Desinventar y UNGRD) y registros climáticos del IDEAM.

La información consultada más relevante es la siguiente:

- Planchas geológicas, Plancha 209, “Zipaquirá” de Ingeominas.
- Plan de Ordenamiento Territorial Municipio Zipaquirá

Se realizó el análisis con el grupo de asesores de la información disponible, con el objeto de tener claridad completa sobre las características geológicas, geotécnicas e hidrológicas del área de estudio.

2. Trabajo de oficina

En esta actividad se realiza la recopilación y verificación de la información secundaria y se procede a la elaboración de los mapas temáticos los cuales se realizan por medio de la herramienta SIG, con base en el modelo de datos de la CAR; la cartografía se maneja en el sistema de coordenadas Magnas Sirgas con origen Bogotá., una vez definidos estos, se realiza la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales, atendiendo los criterios descritos en las bases metodológicas presentadas, con base en información secundaria y empleando la herramienta SIG.

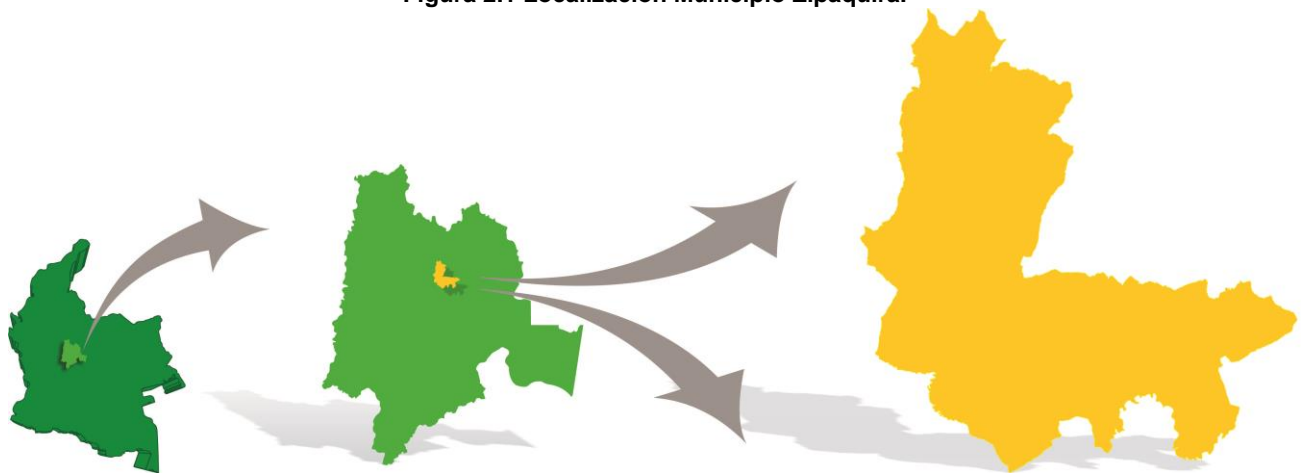
De conformidad con el Anexo Técnico de la CAR, el análisis de amenaza, y por tanto de riesgo, se aplica a aquellas Subcuencas con un IVET de clasificación Media a Muy Alta. No obstante, se considera pertinente, y por tanto se ejecuta tal actividad, la evaluación de la amenaza por Avenidas Torrenciales y cálculo del respectivo riesgo a cada una de las Subcuencas en estudio del municipio, con la finalidad de otorgar, a las respectivas autoridades municipales, una descripción e identificación de aquellas zonas propensas a detonar, transitar y depositar un probable evento torrencial.

2.4 LOCALIZACIÓN DE LOS TRABAJOS

El Municipio Zipaquirá está situado en el centro de la República de Colombia, en el Departamento de Cundinamarca; limita por el norte con el Municipio Cogua, por el sur con los municipios de Tabio, Cajicá y Tocancipá, por el occidente con los municipios de Subachoque y Pacho y por el oriente con los municipios de Tocancipá, Nemocón y Cogua (Ver **Figura 2.1**).

Zipaquirá posee una extensión aproximada de 197 kilómetros cuadrados así: 8 kilómetros cuadrados de la zona urbana y 189 kilómetros cuadrados de la zona rural. La altitud del casco urbano del Municipio Zipaquirá sobre el nivel del mar es de 2.650 metros. Topográficamente esta sección territorial está dividida en dos regiones bien definidas: Región plana situada al oriente, rica en pastos aprovechados para la ganadería y Región montañosa situada al occidente, (rica en minerales) entre la que se destacan entre otras las siguientes alturas: a.- El cerro del Zipa bajo el cual se encuentra la mina y su monumental templo subterráneo de sal, el Páramo de Guerrero rico en yacimientos de carbón, la serranía de Ventalarga con Pantano Redondo y b.- El cerro del Calzón.

Figura 2.1 Localización Municipio Zipaquirá.



Fuente: UT AVR – CAR.

El Río Bogotá bordea al Municipio Zipaquirá en su costado suroriental, en longitud cercana a los 15 km. De esta manera, el Municipio Zipaquirá queda inscrito como parte la cuenca del río, el cual constituye el eje ambiental fundamental y espina dorsal del sistema hídrico de la sabana. A lo largo de su recorrido por la sabana, el Río Bogotá recibe el caudal de una multiplicidad de ríos y quebradas que conforman un complejo sistema de sub-cuencas y microcuencas. El río alimenta a su vez una serie de embalses y represas que surten los acueductos de la sabana (Chingaza, Neusa, Sisga y Tominé). Zipaquirá posee un importante recurso en este aspecto, representado en el Páramo de Guerrero, el cual comparte con municipios vecinos (Pacho, Cogua, Tausa) y da origen al río Frío y a una serie de microcuencas que constituyen parte esencial del recurso hídrico territorial de estos municipios y de la sabana.

Con excepción de muy pocos riachuelos que nacen al suroeste, provienen principalmente de las hoyas de las montañas situadas al norte, asiento del Páramo de Guerrero, Páramo Alto y Pantano Redondo. La ramificación de la cordillera occidental, da nacimiento a importantes quebradas de apacible caudal. Al este, es poco rica la hidrografía por ser esta la parte plana del municipio y la más seca. Principales Ríos de Zipaquirá: Al norte: El Río Neusa, el cual nace en el Páramo de Guerrero y atraviesa la Vereda de Riofrío con dirección nordeste. Al sur: El Río Frío Al oriente: El río Tibitó Al occidente: El Juratena La parte plana del municipio la riegan los ríos Neusa y Tibitó (que después se llama Funza o Bogotá). Entre las quebradas, merecen especial mención: Al norte: Alizal, Versalles, Quiroga, Pescadero, La Calera, Los Cocliés y el Tejar. Al oriente: Quebrada Honda, Del Mortiño, Los Laureles, (La Fuente), Chitagá, La Amarilla, La Toma y Susagua. Al Occidente: Pantano largo, El Carrizal, Rodamontal, la Arteza, El Rionegro o Tosagua, llamado en su nacimiento La Tibia y El Tejar o Uricia. Al sur: El Hornillo, El Gavilán o Chitagua, Aguaclara, Guabal, la Colorada y el Salitre.

Zipaquirá está unida a los municipios vecinos por medio de carreteras y ferrocarril. Por carretera se comunica con Bogotá, Chía, Cajicá, Nemocón, Pacho, Tabio, Tenjo, Gachancipá, Tocancipá, Sopó, Cogua, Tausa y Subachoque. Por ferrocarril se comunica con Nemocón, Cajicá, Chía y Bogotá. Las Veredas poseen carreteras pavimentadas en su gran mayoría y vías destapadas. (POT Zipaquirá).

2.5 INSUMOS BÁSICOS

2.5.1 Geología

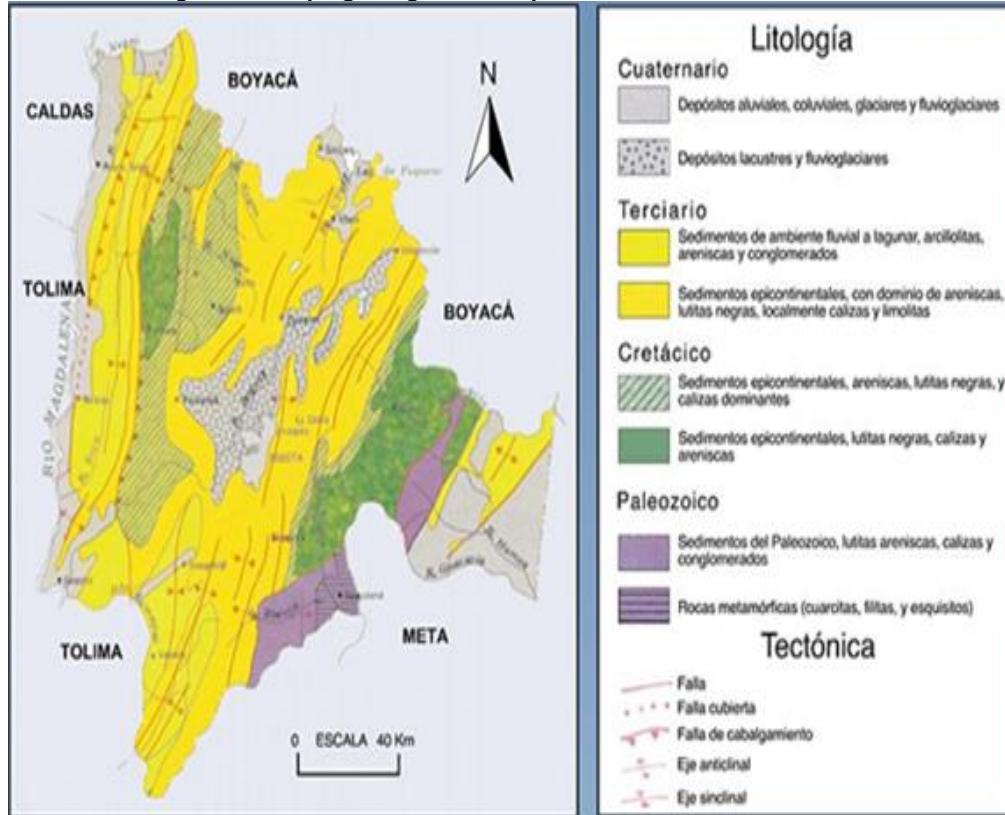
Referido a un marco regional, el sustrato Cundinamarqués ha sido conformado dentro del megaterreno siálico correspondiente al Escudo Guayanés, sobre el cual y hacia su borde occidental se cratonizó a finales del Proterozoico, otro megaterreno de carácter alóctono, controlado en su emplazamiento por la falla de Guicáramo, por el oriente, y la paleosutura de Romeral, por el occidente. Sobre esta última región se generaron varios supraterranos y terrenos geológicos, dentro de los cuales resalta el de la Cordillera Oriental, el cual subyace en un alto porcentaje el Departamento de Cundinamarca.

De una manera uno poco más detallada y en relación con el Departamento que se acaba de mencionar, en el informe AVR-CAR, (2015), se anota: “el contexto regional se relaciona con la cadena montañosa de los Andes que en Colombia está representada por las cordilleras Oriental, Central y Occidental, separadas por los valles: Magdalena y del Valle del Cauca respectivamente (Taboada et al. 2000). La cordillera Oriental se encuentra definida por un basamento cristalino de edad Precámbrica y Paleozoica, caracterizado por exponer múltiples eventos deformativos; este basamento se encuentra cubierto por sucesiones sedimentarias registradas desde el Mesozoico hasta el Cenozoico las cuales han estado sujetas a plegamientos por eventos orogénicos de edad Neógena”.

“En el departamento de Cundinamarca las rocas más antiguas son secuencias metamórficas de edad paleozoica inferior, seguida por una serie de estratos sedimentarios depositados de manera intermitente entre los 160 millones y los 65 millones de años, que se extienden en el altiplano de Bogotá y en el flanco occidental y oriental de la Cordillera Oriental (en Baquero, M., 1991).

“Las rocas de la edad paleozoica temprana afloran en gran parte del sector oriental de la cordillera, sin embargo en el departamento de Cundinamarca solo se registran pequeñas áreas representadas por rocas metamórficas que alcanzaron condiciones de esquistos verdes (De la Espriella 1985); mientras que el paleozoico superior si aflora y está caracterizado por secuencias de facies sedimentarias con altos contenidos de areniscas cuarzosas, conglomerados, arcillas rojizas y moradas, y shales negros. Para el mesozoico las secuencias adquirieron características de ambientes depositacionales tanto marino como continental (Irving 1971)”. Ver **Figura 2.2**

Figura 2.2 Mapa geológico del departamento de Cundinamarca.



Fuente: Mapa geológico Ingeominas 1998

“Durante el cenozoico, la formación de rocas estuvo ligada a procesos de levantamiento-erosión, estos movimientos orogénicos fueron los que levantaron y plegaron el geosinclinal del oriente Andino (Julivert, 1963), generando rocas con características propias de ambientes relacionados, que en el cuaternario adquirieron sus geformas actuales”.

2.5.2 Hidrología

Los criterios de diseño hidrológico son los que permiten determinar las Metodologías más adecuadas según la información disponible, el objeto de estudio y los resultados esperados. Estos criterios se definen de antemano basándose en la experiencia del personal encargado de realizar el estudio.

2.5.2.1 Conceptos básicos

- ✓ Periodo de retorno

En la hidrología aplicada se utiliza indistintamente el concepto de probabilidad $p(x)$ o de período de retorno, entendido como un porcentaje de los años de ocurrencia de un evento extremo. Por lo que si un suceso extraordinario se presenta (por término medio) cada T_r años, su probabilidad es el inverso. Análoga e inversamente, si la probabilidad de que algo suceda es de $x\%$, quiere decir que en promedio, sucederá x veces en 100 años. Estos conceptos se relacionan mediante la expresión:

$$P(x) = 1/T_r$$

En Hidrología se utiliza más el periodo de retorno, que la probabilidad.

El objetivo básico de todo estudio hidrológico es lograr un entendimiento adecuado del comportamiento del ciclo del agua en una determinada región. En el caso del diseño de obras civiles, se quiere analizar el comportamiento de esas obras para condiciones hidrológicas extremas (UNAL, 1997). En general, para lograr su objetivo, un estudio hidrológico utiliza información existente con la cual trata de inferir el comportamiento de los diferentes flujos y almacenamiento en la zona de interés. Normalmente este proceso de inferencia concluye con la selección de un modelo o un conjunto de modelos hidrológicos, que se utilizarán para estimar las condiciones hidrológicas críticas que se requieren para el diseño y reducir la incertidumbre. Los modelos y los valores de caudal estimados serán tan buenos como la calidad de la información utilizada. Posterior a la identificación del tipo y la cantidad de información temporal y espacial disponible, se procesa dicha información y se buscan las metodologías aplicables para los objetivos específicos y de acuerdo con las características de la zona de estudio (UNAL, 1997).

La realización de este estudio requiere del estudio de diferentes metodologías para reducir la incertidumbre asociada a los modelos hidrológicos y a los diferentes parámetros necesarios en cada etapa. Para el estudio de caudales máximos, se procedió a realizar una estimación mediante modelo estocásticos de funciones de distribución extrema previa verificación de la calidad estadística e hidrológica de las series de caudal de las estaciones presentes a lo largo del cauce del Río Magdalena. Estas metodologías son las más extendidas a nivel mundial debido a su simplicidad. A continuación se presentan los principales conceptos y metodologías aplicadas durante el estudio hidrológico.

✓ Concepto integral de cuenca

Según el Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974 (Código Nacional de Recursos Naturales), se entiende por cuenca u hoya hidrográfica “el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, las cuales confluyen en un curso mayor, que a su vez, puede desembocar a un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente al mar”.

También se define la cuenca como el espacio que nos permite organizar las actividades humanas conociendo las estructuras sistémicas que la conforman y comprendiendo las relaciones espacio-temporales, que la determinan. De acuerdo con el Instituto de Promoción para la Gestión del Agua (IPROGA, 1996) los componentes de la cuenca son los elementos naturales y los de generación entrópica. Los naturales se relacionan con los componentes bióticos, como el hombre, la flora y la fauna, y con los componentes abióticos como el agua, el suelo, el aire, los minerales, la energía y el clima.

De acuerdo con la altura, la cuenca se divide en alta, media y baja. La parte alta, denominada páramo o jalca, es el lugar donde se genera y concentra la mayor parte del agua. Es escasamente poblada y en la mayoría de las regiones la habitan predominantemente pequeños productores, comunidades campesinas y pueblos indígenas. La cuenca media es el sector relacionado fundamentalmente con el escurrimiento del agua, siendo frecuente la presencia de pequeñas ciudades y gran actividad económica. La parte baja tiene pendientes mínimas, está constituida por amplios valles, donde se desarrolla una intensa actividad agropecuaria, y por medianas y grandes ciudades. Allí también se ubican los grandes proyectos de irrigación con importantes sistemas de embalse. El potencial de aguas subterráneas de estas zonas es alto.

De acuerdo con el tamaño, se clasifica en cuenca, subcuenca y microcuenca:

- **Cuenca:** Zona terrestre a partir de la cual toda la escorrentía superficial fluye a través de una serie de corrientes, ríos y, en ocasiones, lagos, hasta el mar por una única desembocadura (estuario o delta) y por las aguas subterráneas y costeras asociadas.

- **Subcuenca:** Unidad del área o parte de una cuenca a partir de la cual toda la escorrentía superficial fluye a través de una serie de corrientes, ríos y, en ocasiones, lagos hacia un punto particular de un curso de agua que, por lo general, es un lago o una confluencia de ríos.
- **Microcuenca:** Unidad del área o parte de la Subcuenca que drena a ésta. Es una pequeña cuenca de primer o segundo orden, donde vive un cierto número de familias (comunidad) utilizando y manejando los recursos del área, principalmente el suelo, agua, vegetación – incluyendo cultivos y vegetación nativa– y fauna, incluyendo animales domésticos y silvestres. En la microcuenca ocurren interacciones indivisibles entre los aspectos económicos (relacionados a los bienes y servicios producidos en su área), sociales (relacionados a los patrones de comportamiento de los usuarios directos e indirectos de los recursos de la cuenca) y ambientales (relacionados al comportamiento o reacción de los recursos naturales frente a los dos aspectos anteriores). Por ello, las actividades a desarrollarse en la microcuenca deben considerar todas estas interacciones.

La cuenca delimita en este caso un territorio sobre el cual se desea actuar. Se entiende al territorio como un producto social, constituido por las relaciones dinámicas que se presentan entre las personas y entre éstas con la naturaleza en un espacio geográfico y un tiempo determinado. El territorio es fruto de procesos históricos vividos en un espacio geográfico concreto y refleja el tejido social y cultural que se ha ido formando bajo determinadas estructuras de poder, determinadas reglas de juego y condiciones biofísicas específicas. En él se expresan las interacciones de los actores para definir su identidad, ejecutar inversiones productivas, manejar y controlar el uso de los recursos naturales y establecer las estrategias de comunicación e intercambio con otros territorios.

Las características geomorfológicas más importantes a tener en cuenta en el estudio de una cuenca son: Área, longitud de la cuenca y su perímetro, pendiente promedia de la cuenca, curva hipsométrica, histograma de frecuencias altimétricas, altura y elevación promedia, relación de bifurcación de los canales, densidad de drenaje, perfil y pendiente promedia del cauce principal

- ✓ Área de la cuenca (A)

El área de la cuenca es probablemente la característica geomorfológica más importante para el diseño. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural. El área de las cuencas se relaciona en forma inversa con la relación entre caudales extremos: mínimos/máximos. El área de la cuenca, A, se relaciona con la media de los caudales máximos, Q, así:

$$Q = CA^n$$

C y n son constantes. Al graficar esta relación en papel doblemente logarítmico se obtiene una recta de pendiente n. Según Leopold (1964) n (factor de Leopold) varía entre 0.65 y 0.80 con un valor promedio de 0.75.

Johnston y Cross (en Eagleson 1970) consideran que si dos cuencas hidrográficas son hidráulicamente semejantes en todos sus aspectos se cumple la siguiente relación:

$$(Q_1/Q_2) = (A_1/A_2)^{3/4}$$

Estadísticamente se ha demostrado que el factor "área" es el más importante en las relaciones entre escorrentía y las características de una cuenca. Esto se puede afirmar por el alto valor de los coeficientes de correlación cuando se grafica escorrentía respecto al área. Pero hay otros parámetros que también tienen su influencia en la escorrentía como la pendiente del canal, la pendiente de la cuenca, la vegetación y la densidad de drenaje.

✓ **Perímetro**

Se puede considerar como la línea formada por el parteaguas o divisoria de la cuenca de estudio; éste parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa normalmente en m o km.

✓ **Longitud de la cuenca**

La longitud, L, de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (estación de aforo) y otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

✓ **Ancho**

El ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L) y se designa por la letra W.

✓ **Longitud de la corriente o cauce principal**

Corresponde a la longitud del cuerpo de agua que le da nombre a la cuenca de estudio, en la estimación de este parámetro se tienen en cuenta las irregularidades y curvas del cauce y se expresa generalmente en km.

✓ **Pendiente de la corriente principal**

Como su nombre lo indica, representa el desarrollo del perfil del cauce principal y se expresa en grados y/o en porcentaje. Esta característica contribuye a definir la velocidad de la escorrentía superficial de la corriente de agua, en donde a mayor pendiente, mayor velocidad del agua. La pendiente de la corriente principal, se asocia al régimen hidráulico de la corriente y a su torrencialidad.

✓ **Pendiente media de la cuenca**

Es el índice que representa la pendiente media de las trayectorias que sigue el agua que escurre por las laderas hacia el río. La pendiente media se da en porcentaje o m/m. Esta característica controla en buena parte la velocidad de la escorrentía superficial y afecta el tiempo que tarda el agua de lluvia para concentrarse en los cauces que hacen parte de la red de drenaje de la cuenca.

2.5.2.2 Análisis de calidad y homogeneidad de las series hidrometeorológicas

✓ **Análisis de homogeneidad**

Los análisis de homogeneidad de series hidrológicas son un aspecto fundamental en los análisis hidrológicos y deben realizarse previamente a cualquier otro análisis, con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrológica que se está utilizando. Los análisis hidrológicos serán tan buenos como la información hidrológica que se use. Pocos son los análisis que se hacen a este respecto en Colombia y en muchos casos se basan solo en la curva de doble masa. Existen en hidrología una gran cantidad de herramientas gráficas y estadísticas que pueden usarse para soportar este tipo de análisis. La parte gráfica de estos análisis se ha denominado como análisis exploratorio e intenta que el analista tenga una clara comprensión del comportamiento de la serie antes de cualquier otro análisis.

El análisis y modelado de datos comúnmente encontrados en recursos hidráulicos e ingeniería ambiental a menudo asume que los datos dados son estacionarios en la media y en la covarianza. Sin embargo, si hay cambios o tendencias en los datos, la suposición de estacionariedad no es válida. En estos casos, el cambio o la tendencia en los datos necesitan ser identificada, modelada, estimada y, en algunos casos, removida de la serie original para análisis posteriores.

Estos cambios o tendencias pueden ser el resultado de factores naturales o de intervenciones por parte de humanos. Por ejemplo, eventos naturales tales como incendios forestales, explosiones volcánicas, o deslizamientos pueden inducir cambios y tendencias en series hidrológicas, mientras que los cambios realizados por el hombre ocurren debido a cambios culturales y en el uso de la tierra tales como talas forestales o, en general, destrucción o alteración de la cobertura vegetal, pastoreo de ganado, alteración del suelo (erosión y compactación), modificación de prácticas agrícolas, construcción de caminos, y minería de la superficie, entre otros.

En ocasiones no hay evidencia de cambios o tendencias en el uso de la tierra, pero la serie relacionada muestra que un cambio o tendencia ha ocurrido. En este caso, se está interesado en comprobar estadísticamente si la serie dada tiene un cambio o una tendencia significativa. Es de común aceptación la consideración de dos tipos de análisis secuenciales para detectar cambios y tendencias en una serie hidrológica (McLeod y otros, 1983). El primer análisis, llamado "análisis exploratorio", tiene como objetivo descubrir propiedades importantes de los datos usando análisis gráfico y análisis estadístico básico. El segundo análisis, llamado "análisis confirmatorio", tiene como objetivo confirmar estadísticamente la presencia o ausencia de ciertas propiedades en los datos. En este artículo haremos referencia al análisis exploratorio de los datos.

El análisis exploratorio debe siempre ser usado antes de cualquiera análisis confirmatorio. Una gráfica de los datos puede indicar lo que se espera de las hipótesis en las pruebas estadísticas. Si una gráfica de la serie muestra claramente que hay un cambio en el nivel medio en cierto tiempo o hay una tendencia en la media o que las medias varían en el espacio, se esperaría que la prueba de hipótesis de cambio o tendencia en la serie hidrológica acepte la hipótesis nula de cambio o tendencia. De otra manera, si la gráfica no muestra un cambio o tendencia, la prueba resultante debe reflejar esta situación.

El análisis exploratorio le permite al analista adquirir un conocimiento pleno sobre el comportamiento de la serie hidrológica por medio de un análisis gráfico bastante completo soportando en una gran variedad de gráficos. Varios son los gráficos propuestos para el análisis exploratorio y en ocasiones todos ellos son consistentes en la identificación de cambios y/o tendencias. Sin embargo, existen ocasiones en que algunos de estos gráficos identifican de una manera más clara la presencia de cambios o tendencias en las series, y debido a esta situación es recomendable el uso de todos los gráficos propuestos en el análisis exploratorio de series hidrológicas.

✓ Análisis exploratorio

Generalmente, el primer paso en cualquiera análisis de datos para detectar cambios y tendencias es graficar los datos en la forma de una serie del tiempo. Las gráficas de series de tiempo de los datos observados muestran su variabilidad temporal y usualmente provee una información rápida y valiosa para investigar la existencia de un cambio o una tendencia en la serie del tiempo. También las gráficas de datos espaciales (es decir, datos medidos o estimados en diferentes puntos en el espacio) puede proveer información valiosa sobre la variabilidad de los datos y cambios o tendencias en el espacio. Además de las gráficas de series de tiempo o las gráficas de datos espaciales, existen otras gráficas que se han sugerido en la literatura para el análisis gráfico de datos empíricos (Tukey, 1977; McLeod y otros, 1983; Hirsch, 1992). Específicamente, las gráficas propuestas para detección de cambios y tendencias son:

- Gráficas de serie de tiempo
- Gráficas de masa simple
- Gráficas de doble masa
- Gráficas de masa residual
- Diagramas de puntos

Histograma
Gráfica de tallo y hoja
Gráficas box
Gráficas S-S
Gráficas Q-Q
Gráficas suavizadas

A continuación se explican estas gráficas, como se pueden construir, su significado, y de qué forma indican la presencia de cambios o tendencias en las series hidrológicas. Para la descripción que se presenta se asume que X_t ; $t = 1, 2, \dots, N$ representa la serie de observaciones de la serie hidrológica que se está analizando, en donde N es el número de observaciones.

✓ Gráfica de series de tiempo

Una gráfica de la serie de tiempo es simplemente una gráfica de los valores de la serie contra el tiempo. Es una gráfica de X_t contra el tiempo t , para $t = 1, 2, \dots, N$. Generalmente, las gráficas de serie de tiempo pueden mostrar rápidamente ciertas características tales como periodicidades, estructura de dependencia, grado de variabilidad y aleatoriedad en adición a cambios y tendencias.

✓ Gráfica de masa simple

Las gráficas de masa simple son gráficas de la serie acumulada de la variable original contra el tiempo. Para construir esta gráfica primero se define la serie acumulada S_t como:

$$\sum_{t=1,2,\dots,N}$$

La gráfica de masa simple es una gráfica de S_t contra el tiempo t , $t=1,2,\dots,N$. Una serie sin un cambio en la media tendrá una gráfica de masa simple similar a una línea recta, mientras que una serie con un cambio en la media causará un cambio en la pendiente de la línea recta. Además, una serie con una tendencia tendrá una gráfica de masa simple no lineal o curvilínea.

✓ Gráfica de doble masa

Las gráficas de doble masa han sido ampliamente utilizadas en hidrología como una herramienta para detectar si una serie dada es consistente al compararla con otra serie que se conoce no tiene ningún problema de homogeneidad. Si se tiene una serie estacionaria libre de cambios o tendencias, entonces se puede usar la gráfica de doble masa para probar si la otra serie tiene un cambio. Una gráfica de doble masa es una gráfica de las sumas parciales de la serie a ser analizada contra las sumas parciales de la serie que se sabe que no tiene problemas. En este caso se asume que Y_t , $t = 1, 2, \dots, N$ representa la serie hidrológica libre de problemas de homogeneidad. Se definen entonces las siguientes series:

$$\sum_{t=1,2,\dots,N}$$

La gráfica de doble masa es una gráfica de S_t contra R_t , para $t = 1, 2, \dots, N$.

Si ninguna de las series tiene cambios en la media, la gráfica de doble masa es una línea recta. Un cambio en la media en una de las series causa un cambio en la pendiente. Una tendencia en la media en una de la serie causa un decaimiento monótono (o levantamiento) en la pendiente. Como un caso especial, si ninguna serie tiene un cambio pero una de las series tiene un *outlier* (punto anormal extremo), entonces la pendiente de la gráfica de doble masa antes del *outlier* es la misma pendiente después del *outlier*, pero hay un salto entre las pendientes debido al *outlier*.

✓ Gráfica de masa residual

Las gráficas de masa residual son gráficas de las desviaciones acumuladas de las series promedias contra el tiempo. Para construir esta gráfica primero se calcula la media de la serie X_t como:

$$\mu_x = (1/N) \sum_{t=1}^N (X_t)$$

y la serie de desviaciones acumuladas se define como:

$$D_t = \sum_{i=1}^t (X_i - \mu_x) \quad t=1,2,\dots,N$$

La gráfica de masa residual es una gráfica de D_t contra el tiempo t , $t=1,2,\dots,N$.

Una pendiente positiva (en esta gráfica) indicará que los valores están por encima de la media y una pendiente negativa que los valores están por debajo de la media. La serie sin un cambio tendrá valores residuales variando alrededor del eje horizontal. En cambio, una serie con un cambio o una tendencia en la media mostrará una pendiente positiva o negativa (dependiendo si es un cambio descendente o ascendente) siguiendo una pendiente negativa o positiva.

✓ Diagrama de puntos

Los Diagramas de puntos son gráficos de los valores de los datos a lo largo de una línea horizontal o eje. El eje horizontal representa los valores que puede tomar la serie hidrológica, y en él se dibujan los diferentes valores de los datos ya no asociados a ningún eje de tiempo. Una serie con un cambio en la media mostrará en este diagrama dos concentraciones o grupos de datos a lo largo del eje horizontal. La serie con una tendencia en la media no mostrará ninguna concentración. En cambio, una serie sin cambios o tendencias en la media mostrará puntos concentrados alrededor del valor medio.

✓ Histograma

Los Histogramas son gráficas donde los datos disponibles se agrupan de acuerdo a su magnitud. Para dibujar un histograma primero hay que definir los intervalos de clase. En este caso el rango total de ocurrencias (la diferencia entre los valores máximo y mínimo) se divide en varios intervalos. Se recomienda que el número de intervalos a ser utilizado sea tal que hayan por lo menos 5 observaciones en cada grupo. Una aproximación útil es hacer el número de intervalos n_g igual al entero más cercano al valor $n_g = 1 + 3.3 \log_{10}(N)$ (Kottegoda y Rosso, 1997) en donde N representa el número total de observaciones. Con el número de intervalos definido, los intervalos de clase pueden determinarse usando el rango total de ocurrencias y n_g . Normalmente el ancho de los intervalos de clase es igual para todos.

El número de ocurrencias en cada intervalo de clase puede definirse y se denomina frecuencia absoluta. Cuando las frecuencias absolutas se dividen por el número total de observaciones ellas son llamadas frecuencias relativas. El gráfico de los intervalos de clase sobre el eje horizontal contra las frecuencias absolutas o relativas en el eje vertical es llamado el Histograma. Usualmente éstas gráficas se dibujan como rectángulos en la dirección del eje vertical donde cada rectángulo representa la frecuencia de las observaciones en cada intervalo de clase. La gráfica que junta los puntos medios de las cimas de los rectángulos del histograma extendiendo el diagrama con intervalos de clase a ambos extremos, se denomina polígono de frecuencias relativas.

Cuando una serie o un grupo de datos tiene un cambio en la media el histograma o el polígono de frecuencias mostrará dos picos. Una serie con tendencias en la media mostrará varios picos o un

Histograma casi horizontal. En cambio, una serie sin cambios o tendencias usualmente mostrará un solo pico con una forma relativamente simétrica.

✓ Diagrama de tallo y hojas

Las gráficas de tallos y hojas dan la misma información que los histogramas. No se acostumbra usarlos en el caso de muestras pequeñas. Las gráficas de tallos y hojas se parecen al Histograma, pero en este caso el eje horizontal representa frecuencias y el eje vertical los grupos de datos. La diferencia de estas dos gráficas es que en la gráfica de tallos y hojas los datos se agrupan de tal manera que se la magnitud de todos los valores se muestra en la gráfica. En este caso todos los anchos de los grupos son iguales y se escogen valores convenientes tales como 0.5, 1, 2, 5, 10 o otros valores múltiplos de 10. Los límites del grupo son verticalmente mostrados en orden creciente de magnitud con una línea vertical a su derecha. Los valores de los límites del grupo y la línea vertical representan el tallo. Los dígitos arrastrados a la derecha de la línea vertical representan los datos en el grupo en orden creciente de magnitud cuando se leen junto con el tallo.

La serie con un cambio en la media mostrará una gráfica de tallo y hoja con dos picos en el lado de la hoja de la gráfica. Una serie con una tendencia en la media no mostrará picos dominantes o una gráfica vertical llana en la parte de la hoja alrededor del tallo que contiene la media. En cambio series sin cambios o tendencias en la media usualmente mostrarán un solo pico en el lado de la hoja de la gráfica.

✓ Gráfica de cuantiles

La gráfica de cuantiles es una forma de visualizar gráficamente estadísticos básicos anuales y estacionales. La gráfica de cuantiles usada aquí muestra los estadísticos siguientes: el máximo, el percentil de 75%, el percentil de 50% (el del medio), la media, el percentil del 25% y el mínimo. Para propósitos de detección de cambios o tendencias, la gráfica de cuantiles de la primera porción de la serie de tiempo (es decir, antes del punto de cambio sospechoso) y la gráfica de cuantiles de la segunda porción de la misma serie de tiempo (es decir, después del punto de cambio sospechoso) pueden ser determinadas y comparadas. También para detección de cambios espaciales en la media y en la varianza la gráfica de cuantiles puede ser usada para comparar los estadísticos de un grupo de series localizadas en una región dada. Diferencias en las características estadísticas como la media y la mediana podrían indicar un cambio en la media de la serie. Diferencias en el rango del percentil (tamaño de la caja) y en el rango máximo a mínimo podrían indicar un cambio en la varianza. Si existe una diferencia significativa entre la gráfica de cuantiles de la primera porción de la serie de tiempo y la segunda porción de la serie, entonces el tiempo donde esas dos subseries fueron separadas indica el tiempo en que el punto de cambio ocurrió.

✓ Gráfica S-S

La gráfica S-S es simplemente una gráfica de la serie a ser analizada contra otra serie. Es un gráfica de serie contra serie (S-S). Si las dos series tienen el mismo número de observaciones y si cada valor de una serie corresponde a un valor específico de la otra serie, se dice que son series apareadas. Las gráficas S-S son para series apareadas. Si ambas series tienen la misma media, la gráfica S-S parecerá una gráfica de datos dispersos alrededor de una línea de 45°. Si una serie tiene consistentemente valores más altos que la otra serie, los puntos de la gráfica S-S se concentrarán en la parte superior (o en la inferior) de la gráfica. La gráfica S-S indicará entonces si una serie tiene valores promedios más altos o más bajos que otra serie. Cuando la gráfica S-S se hace usando una sola serie dividida en dos, antes de y después del punto sospechoso de cambio, podría indicar si hay un cambio en la media de la serie.

✓ Gráfica Q-Q

La gráfica Q-Q (Helsel e Hirsch, 1992, p. 43) es una gráfica de los cuantiles de una serie contra los cuantiles de otra serie. La gráfica Q-Q es esencialmente la gráfica de los datos ordenados de la primera serie contra los datos ordenados de la segunda serie. En otras palabras, la gráfica Q-Q es una gráfica S-S usando los datos ordenados. La gráfica Q-Q requiere que las dos series a ser comparadas sean del mismo tamaño. La interpretación de la gráfica Q-Q es similar a la de la gráfica S-S. Si ambas series tienen las mismas medias, la gráfica Q-Q tendrá puntos alrededor de la línea de 45°. Si una de las series tiene consistentemente valores más altos o más bajos que la otra serie, se concentrarán los puntos en la parte superior (o más baja) de la gráfica.

✓ Gráficas suavizadas

A veces, la serie de observaciones muestra tan alta variabilidad que cualquier cambio o tendencia presente en la serie no puede ser fácilmente identificado. Sin embargo, aplicando algunos procedimientos suavizadores a la serie de observaciones original para posteriormente dibujarla, en ocasiones ayuda en la detección de posibles cambios o tendencias en la serie. Una operación común de suavización es cuando una serie anual se calcula a partir de una serie diaria o mensual. Diferentes procedimientos de suavización se han propuesto en la literatura (Tukey, 1977).

3 CARACTERÍSTICAS TORRENCIALES DE VARIABILIDAD A IVET DE SUBCUENCAS

3.1 ASPECTOS GENERALES

Como primer paso para determinar la susceptibilidad de las áreas frente a eventos de tipo torrencial se determinará el “IVET”, definido en el documento “Enfoque conceptual y metodológico para determinar la vulnerabilidad de fuentes abastecedoras de acueductos” (IDEAM, 2011), para las áreas montañosas de los afluentes principales de las subcuencas y a las microcuencas abastecedoras. Posteriormente estos resultados se usarán como insumo inicial para el desarrollo del mapa de amenaza. Posteriormente se describen los pasos seguidos para el cálculo de este índice para el Municipio de Zipaquirá.

El IVET es definido y caracterizado de la siguiente manera, según el IDEAM: La vulnerabilidad se expresa en relación con los índices morfométricos de torrencialidad e índice de variabilidad tal como se definen a continuación:

El *índice morfométrico de torrencialidad* es la relación entre los parámetros morfométricos como el coeficiente de compacidad o de forma, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje, los cuales son indicativos de la forma como se concentra la escorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca, la eficiencia o rapidez de la escorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación y con ello inferir cual podría ser el nivel de susceptibilidad a procesos torrenciales (Rivas y Soto, 2009, en IDEAM, 2011).

Una condición muy alta para el índice morfométrico, corresponde a áreas que se caracterizan por ser inestables y potencialmente inestables que responden rápida y violentamente a lluvias de alta intensidad y corta duración, generando avenidas torrenciales de forma frecuente. La categoría alta muestra áreas con una respuesta hidrológica rápida con una cobertura de suelo que permite procesos torrenciales que se presentan frecuentemente en períodos lluviosos. La condición media, en cambio, presenta una respuesta a procesos hidrológicos de moderada a rápida y los eventos se presentan generalmente en las épocas de las mayores precipitaciones al año.

El *índice de variabilidad* se obtiene de la curva de duración de caudales, muestra como es la variabilidad de los caudales en una determinada cuenca. Una cuenca torrencial es aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, existen diferenciales grandes entre los caudales mínimos y los valores máximos. Cuencas con variabilidades pequeñas muestran que los caudales tienden a mantenerse y los cauces por los que existe flujo, generalmente tienen la capacidad para transportar estos caudales. El comportamiento con variabilidad pequeña es típico de cauces de llanura, los cuales generalmente no presentan procesos torrenciales.

Cuencas de áreas pequeñas con pendientes altas, por lo general presentan caudales de creciente, alternado de caudales medios y bajos con magnitudes muy inferiores a las de los caudales máximos, que hacen que la curva de duración de caudales muestre una gran variabilidad.

El índice de vulnerabilidad (IVET) frente a eventos torrenciales, indica la relación existente entre las características de la forma de una cuenca que son indicativos de la torrencialidad en la misma, en relación con las condiciones hidrológicas en dicha cuenca. La **Tabla 3.1** muestra la clasificación de la vulnerabilidad frente a eventos torrenciales una vez se estima cada uno de los índices mencionados. Este índice se expresa como en relación con los índices morfométricos y de variabilidad para estimar una sola vulnerabilidad frente a eventos torrenciales, teniendo en cuenta los rangos y las clasificaciones de cada uno de ellos.

Tabla 3.1 Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET)

Índice de Variabilidad	Índice Morfométrico de Torrencialidad				
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Muy baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Baja	Muy baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Muy baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy Alta	Muy alta
Muy alta	Media	Alta	Alta	Muy Alta	Muy alta

Fuente: IDEAM 2011

3.2 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VARIABILIDAD

La realización de este estudio requiere del estudio de diferentes metodologías para reducir la incertidumbre asociada a los modelos hidrológicos y a los diferentes parámetros necesarios en cada etapa. En la **Figura 3.1** se presenta el esquema conceptual para el cálculo del IVET.

Figura 3.1. Esquema conceptual para el cálculo del IVET



Fuente: UT UVR CAR, 2014

Para este estudio en especial y considerando que los registros de caudales sobre los cauces de la cuencas en estudio es deficiente o inexistente, se procedió a realizar una estimación mediante isoyetas de precipitación y la aplicación de métodos GIS con la aplicación formula (1), a partir de la información de las 51 estaciones de precipitación de la CAR de las cuales se obtuvieron registros diarios, previa verificación de la calidad estadística e hidrológica de las series de precipitaciones de las estaciones presentes dentro o en la periferia del área de estudio. A continuación se muestran las estaciones utilizadas para el cálculo de precipitación.

A partir de la distribución espacial de las precipitaciones de las estaciones y una vez realizada las comprobaciones estadísticas y calidad de la información de precipitación y con los datos de las curvas IDF se seleccionan las precipitaciones críticas para 12.5 años y 50 años de periodo de retorno, las distribuciones de precipitación sobre el área de estudio se obtuvieron por el método de interpolación Kriggin el cual presenta el mejor ajuste estadístico a los datos de acuerdo a la distribución.

Una vez obtenida la distribución de lluvias sobre el área de estudio, se tiene que el municipio tiene índices de precipitación para un periodo de retorno de 50 de 95 mm a 110 mm de precipitación máxima en 24 horas, luego de obtener estos índices se procede al cálculo de caudales (i) a partir de la precipitación utilizando la siguiente formula, donde se considera que para condiciones de torrencialidad se anula la evaporación, no obstante es importante tener en cuenta que la información de evaporación es inexistente o insuficiente.

3.2.1 Caudal por microcuenca

$$i. \quad Qc = \frac{Ac}{8,64*10^{10}} (P - EVT)$$

Qc: Caudal de la cuenca en (m³/s)

Ac: Área de la celda (m)

P: Precipitación (mm/día)

EVT: Evapotranspiración real (mm/día)

Con los datos de caudal se entra a la formula (ii) establecida en la metodología obteniendo el índice de variabilidad.

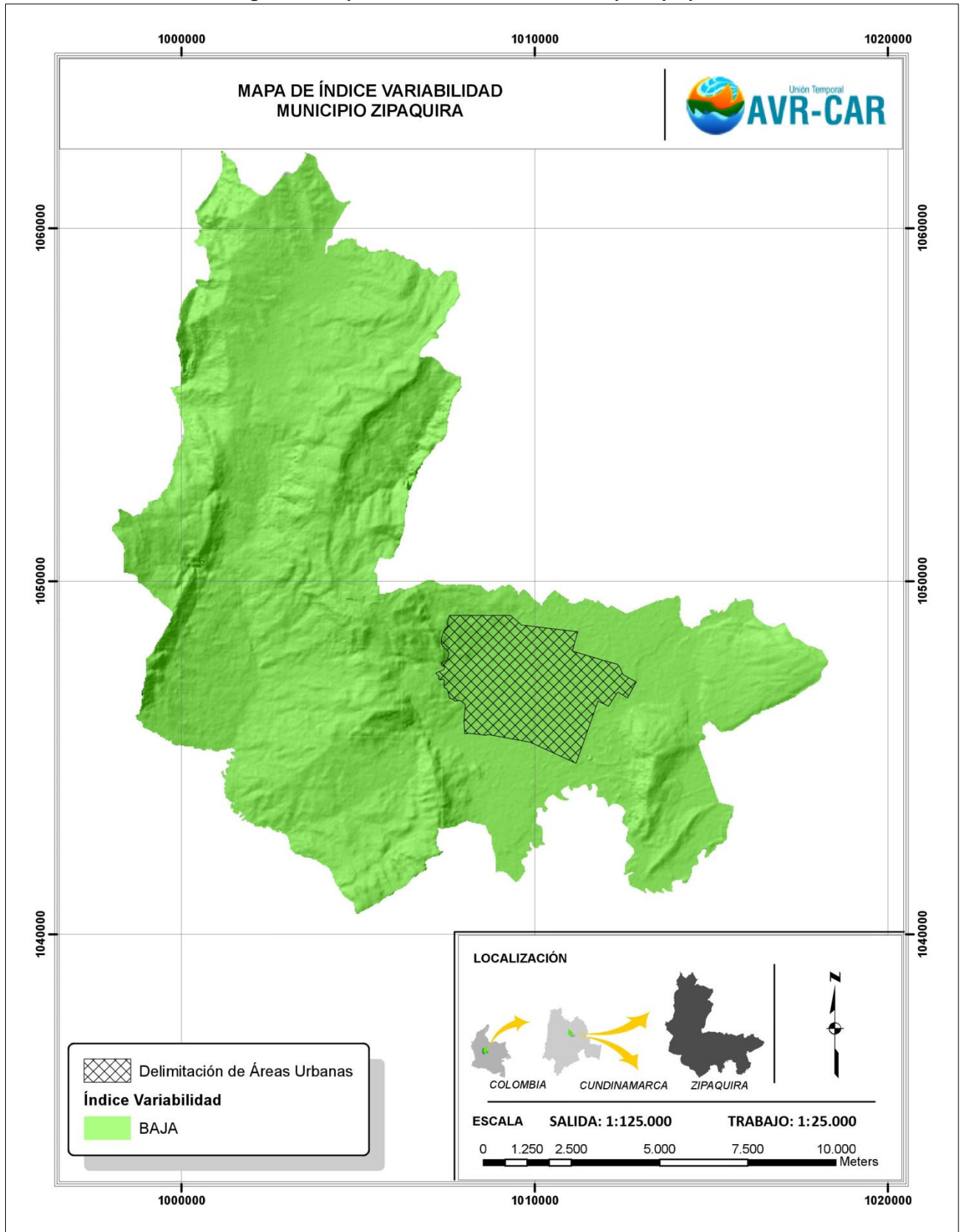
$$i. \quad IV = \frac{\text{Log}(Qi) - \text{Log}(Qf)}{\text{Log}(Xi) - \text{Log}(Xf)}$$

Donde Qi y Qf son los caudales que corresponden a tiempos de excedencia Xi y Xf. En ciertas ocasiones no se logra obtener una linealidad continua de la gráfica en escala logarítmica, por lo que conocer la pendiente de dicho gráfico resulta difícil. Dada la dificultad del desarrollo de la curva de duración de caudales para conocer el índice de variabilidad, y basado en el Tomo I, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM - sugiere el cálculo del Índice de Variabilidad mediante el uso de información pluviométrica mediante la siguiente expresión:

$$IV = \frac{Dvs}{\overline{Pm}}$$

Donde *Dvs* hace referencia a la desviación estándar de los registros anuales de precipitación y \overline{Pm} a la precipitación promedio anual.

Figura 3.2 Mapa índice de variabilidad municipio Zipaquirá



Fuente: UT UVR CAR, 2014

3.3 CÁLCULO ÍNDICE MORFOMÉTRICOS

No existe manera cuantitativa alguna que permita definir con claridad la torrencialidad presente en una hoya de drenaje, por lo que se considera como una evaluación de carácter subjetivo, es decir, una valoración proporcional al conocimiento y experiencia del profesional que se encuentra a cargo del desarrollo del estudio. De acuerdo con textos bibliográficos de énfasis morfométrico, existe una gran diversidad de parámetros lineales, es decir, de cauce, y de área y relieve aferente a las hoyas de drenaje, que pueden otorgar indicio del potencial de torrencialidad presente en una cuenca determinada. Con base en el Anexo Técnico de la CAR del estudio a desarrollar, los parámetros morfométricos tenidos en cuenta son:

- Coeficiente de Compacidad
- Densidad de Drenaje
- Pendiente Media de la Cuenca

Las categorías asignadas a cada una de las variables arriba mostradas, de acuerdo con el anexo anteriormente mencionado, se presentan en la [Tabla 3.2](#). Las categorías asociadas a las diferentes combinaciones posibles entre los parámetros arriba mostrados inician desde Muy Baja a Muy Alta y estos son presentados en la [Tabla 3.2](#).

Tabla 3.2 Relaciones entre variables para el Índice Morfométrico de Torrencialidad

		Pendiente media de la cuenca					
		1	2	3	4	5	
Densidad de drenaje	1	111	121	131	141	151	1
		112	122	132	142	152	2
		113	123	133	143	153	3
		114	124	134	144	154	4
		115	125	135	145	155	5
	2	211	221	231	241	251	1
		212	222	232	242	252	2
		213	223	233	243	253	3
		214	224	234	244	254	4
		215	225	235	245	255	5
	3	311	321	331	341	351	1
		312	322	332	342	352	2
		313	323	333	343	353	3
		314	324	334	344	354	4
		315	325	335	345	355	5
	4	411	421	431	441	451	1
		412	422	432	442	452	2
		413	423	433	443	453	3
		414	424	434	444	454	4
		415	425	435	445	455	5
5	511	521	531	541	551	1	
	512	522	532	542	552	2	
	513	523	533	543	553	3	
	514	524	534	544	554	4	
	515	525	535	545	555	5	

	Muy alta
	Alta
	Moderada
	Baja
	Muy baja

3.3.1 Densidad de drenaje

$$i. \quad Dd = \frac{L}{A}$$

L: Longitud de la red hídrica (Km)

A: Área de la cuenca (Km²)

Según Ruiz (2001), una cuenca bien drenada da poco tiempo a la percolación del flujo superficial en subterráneo, por lo que se considera que en estas regiones, los volúmenes de recarga de los acuíferos son bajos. Contrario a lo dicho anteriormente, bajos coeficientes de densidad de drenaje infieren suelos bien a excesivamente cubiertos por una diversa capa de vegetación, bajas pendientes y, de acuerdo con Linsley (1977), cuencas pobremente drenadas y respuesta hidrológica muy lenta, de tal manera que en regiones húmedas, de presentarse las condiciones ideales y de acuerdo con Chow 1994, no es factible encontrar el flujo superficial Hortoniano. En la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3 Resumen de categorización y clasificación de la Densidad de Drenaje

Categoría				
1	2	3	4	5
Menor a 1.2	1.8 – 1.2	1.8 – 2.0	2.0 – 2.5	Mayor a 2.5
Baja	Moderada	Moderada Alta	Alta	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia con base en el Anexo Técnico de la CAR.

Considerando entonces la categorización dada a la densidad de drenaje, la **Tabla 3.4** presenta los valores de Densidad de Drenaje obtenidos, por Subcuenca, para el municipio de Zipaquirá.

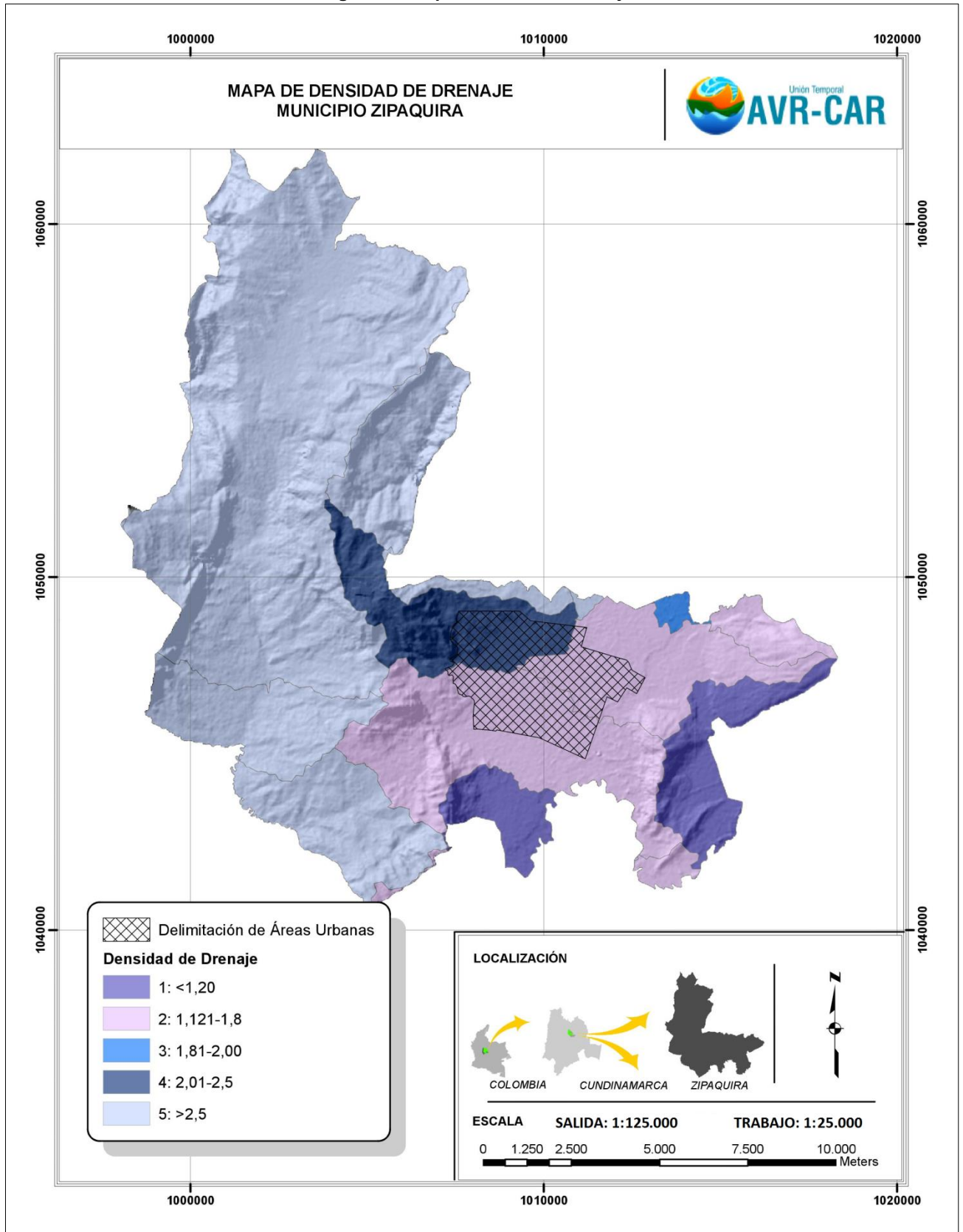
Tabla 3.4 Resumen de Densidad de Drenaje y Categoría por Subcuenca

Micro Cuenca	Densidad Drenaje	Categoría
ZI1	1.66	1
ZI2	1.91	2
ZI3	0.16	1
ZI4	0.01	1
ZI5	0.13	1
ZI9	6.26	5
ZI12	2.77	5
ZI15	3.42	5
ZI23	4.18	5
ZI24	4.49	5
ZI25	3.6	5
ZI26	3.39	5
ZI27	2.79	5
ZI28	4.92	5
ZI29	2.78	5
ZI31	3.2	5
ZI34	3.86	5
ZI35	3	5
ZI36	5.59	5
ZI41	5.05	5

ZI43	2.98	5
ZI45	3.97	5
ZI48	3.11	5
ZI52	3.39	5
ZI7	3.32	5
ZI10	3.48	5
ZI11	4.61	5
ZI13	4.58	5
ZI14	3.8	5
ZI16	1.48	2
ZI17	1.64	2
ZI18	1.48	2
ZI19	1.35	2
ZI20	1.6	2
ZI21	0.71	1
ZI22	1.07	1
ZI32	0.76	1
ZI37	1.6	2
ZI39	0.51	1
ZI40	1.2	2
ZI42	1.18	1
ZI44	0.83	1
ZI46	0.7	1
ZI47	1.23	2
ZI6	0.83	1
ZI8	1.61	2
ZI30	0.77	1
ZI33	1.51	2
ZI38	1.03	1
ZI49	1.84	3
ZI50	2.33	4
ZI51	2.24	4

Fuente: UT UVR CAR, 2014

Figura 3.3 Mapa densidad de drenaje.



Fuente: UT UVR CAR, 2014

3.3.2 Coeficiente de compacidad

Para el cálculo del coeficiente de compacidad se aplicó la siguiente expresión:

$$i. \quad Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

P: Perímetro de la cuenca (Km)

A: Área de la cuenca (Km²)

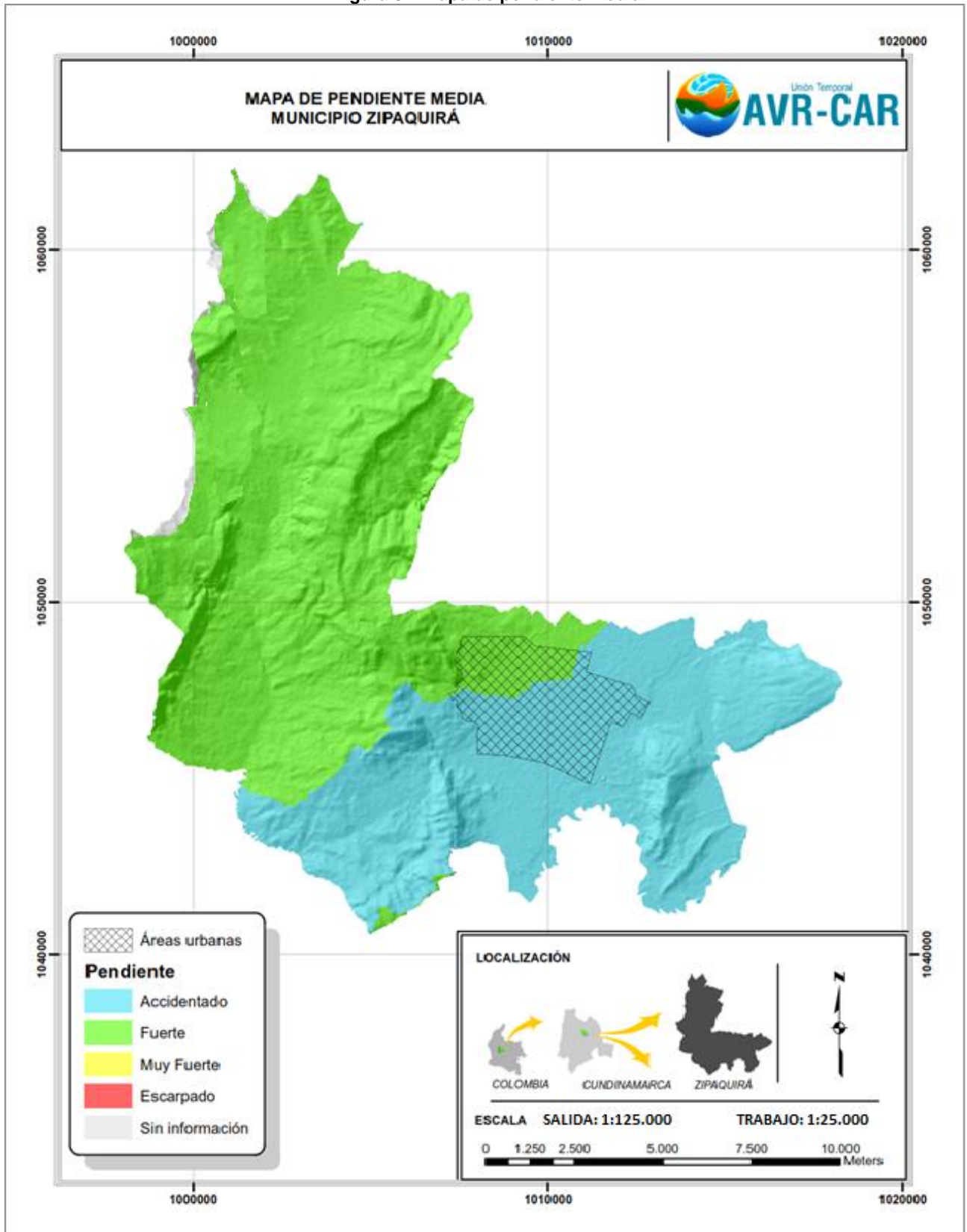
En la **Tabla 3.5**, se presenta la información relacionada con la categorización del índice de compacidad; para el municipio de El Peñón

Tabla 3.5 categorías del índice de compacidad para el Municipio Zipaquirá

Rangos de Kc	Clases de compacidad	Categoría Ind. Morfométrico
1 – 1,125	Casi redonda a oval-redonda	1
1,126 – 1,250	De oval redonda a oval oblonga	2
1,251 – 1,375		3
1,376 – 1,500	De oval oblonga a rectangular oblonga	4
> 1,500		5

Fuente: UT AVR CAR, 2014

Figura 3.4 Mapa de pendiente media



Fuente: UT AVR CAR, 2014

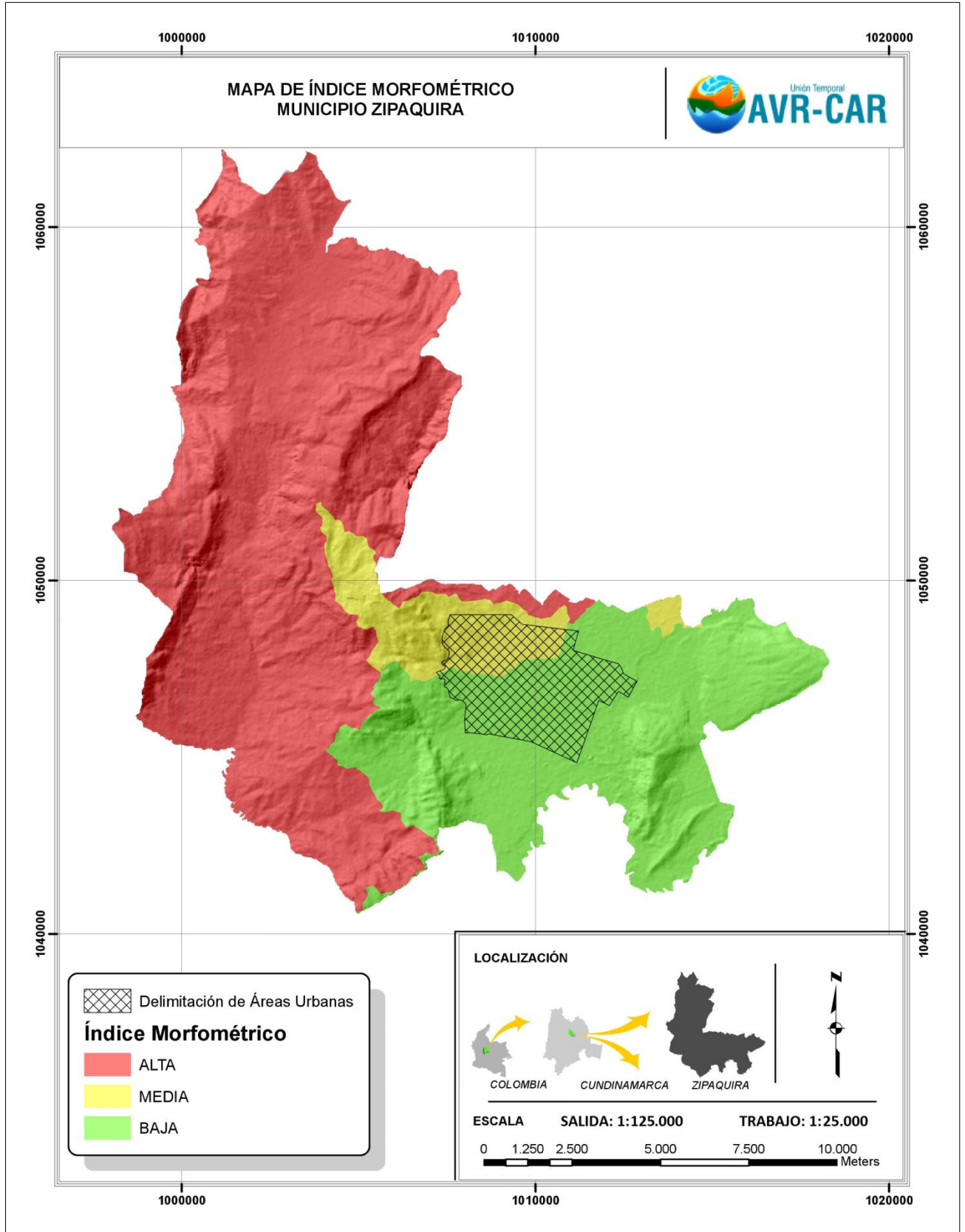
Luego se entra a clasificar las microcuencas en las relaciones para categorizar el índice morfométrico. (Rivas y Soto – 2009. IDEAM, 2011), obteniendo las distintas categorizaciones y su respectivo índice morfométrico, como se observa en la **Tabla 3.6.** y se muestra en la **Figura 3.5**

Tabla 3.6 Índice morfométrico de las microcuencas.

COD_MICRO CUENCA	CAT_DENS	CAT_PEND	CAT_COMP	CAT_L_M	IND_MORF
ZI1	5	1	2	512	ALTA
ZI10	2	1	1	211	BAJA
ZI11	2	1	1	211	BAJA
ZI12	5	2	1	521	ALTA
ZI13	2	1	1	211	BAJA
ZI14	2	1	1	211	BAJA
ZI15	5	1	1	511	ALTA
ZI16	1	1	1	111	MUY BAJA
ZI17	1	1	1	111	MUY BAJA
ZI18	1	1	1	111	MUY BAJA
ZI19	2	2	2	222	BAJA
ZI2	5	2	2	522	ALTA
ZI20	1	1	2	112	MUY BAJA
ZI21	2	1	1	211	BAJA
ZI22	1	1	1	111	MUY BAJA
ZI23	5	2	1	521	ALTA
ZI24	5	2	1	521	ALTA
ZI25	5	2	2	522	ALTA
ZI26	5	2	1	521	ALTA
ZI27	5	1	1	511	ALTA
ZI28	5	2	1	521	ALTA
ZI29	5	1	2	512	ALTA
ZI3	5	2	1	521	ALTA
ZI30	4	1	1	411	MODERADA
ZI31	5	1	1	511	ALTA
ZI32	1	1	1	111	MUY BAJA
ZI33	4	1	1	411	MODERADA
ZI34	5	2	2	522	ALTA
ZI35	5	1	2	512	ALTA
ZI36	5	1	1	511	ALTA
ZI37	1	1	1	111	MUY BAJA
ZI38	4	2	1	421	MODERADA
ZI39	2	1	1	211	BAJA
ZI4	5	2	1	521	ALTA
ZI40	1	1	3	113	MUY BAJA
ZI41	5	2	3	523	ALTA
ZI42	2	1	1	211	BAJA
ZI43	5	1	1	511	ALTA
ZI44	1	1	1	111	MUY BAJA
ZI45	5	2	1	521	ALTA
ZI46	2	1	1	211	BAJA
ZI47	1	1	1	111	MUY BAJA
ZI48	5	2	1	521	ALTA
ZI49	4	2	1	421	MODERADA
ZI5	5	2	2	522	ALTA
ZI50	4	2	1	421	MODERADA
ZI51	4	2	1	421	MODERADA
ZI52	5	1	3	513	ALTA
ZI6	3	1	1	311	MODERADA
ZI7	2	1	1	211	BAJA
ZI8	4	2	1	421	MODERADA
ZI9	5	2	1	521	ALTA

Fuente: UT AVR CAR, 2014

Figura 3.5 Mapa índice morfométrico Municipio Zipaquirá.

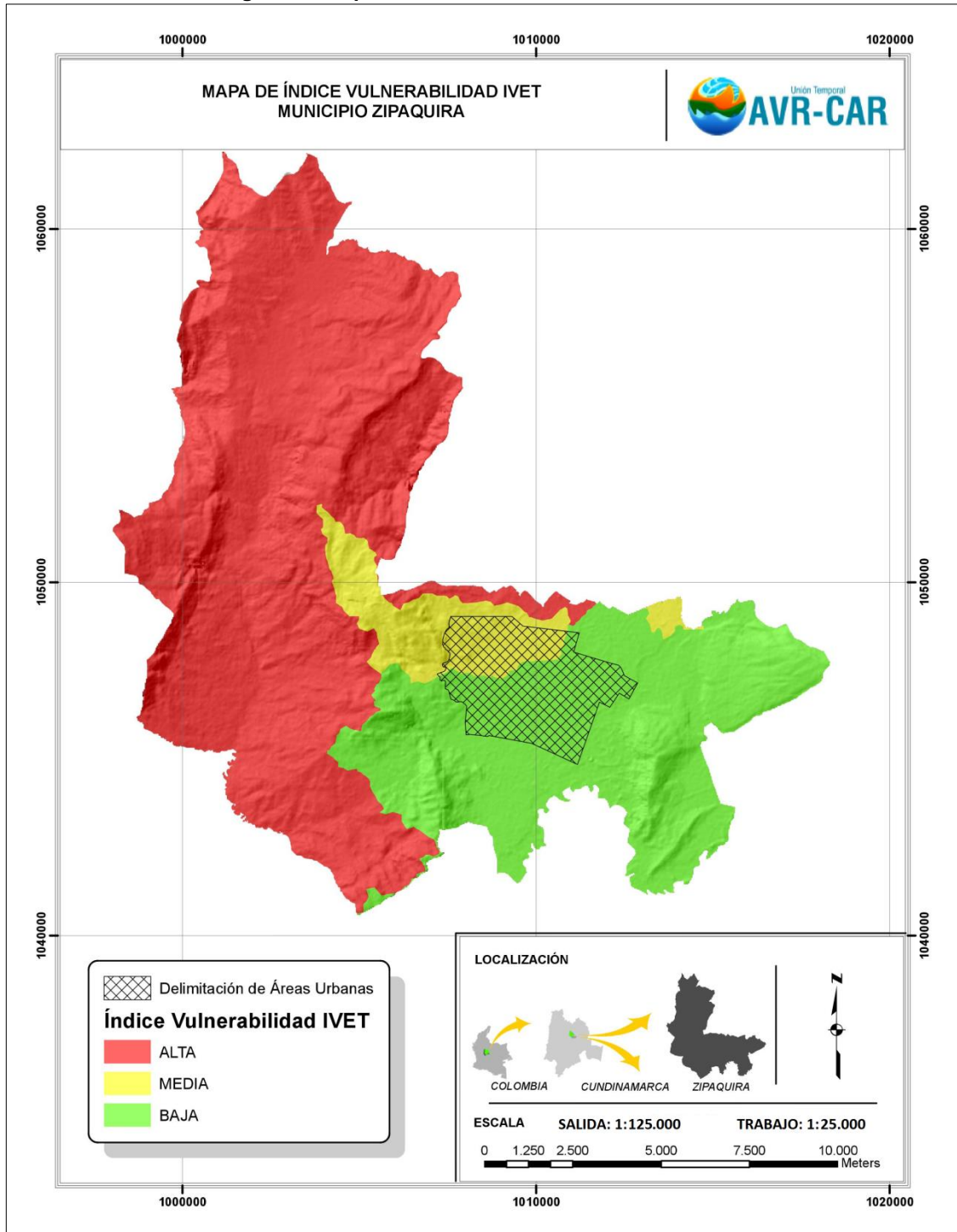


Fuente: UT UVR CAR, 2014

3.4 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD FRENTE A EVENTOS TORRENCIALES-IVET

Una vez conocida la categoría del Índice Morfométrico de Torrencialidad y del Índice de Variabilidad, se determinó el IVET siguiendo los lineamientos establecidos en el Anexo Técnico, obteniendo el mapa de IVET presentado en la **Figura 3.6**.

Figura 3.6 Mapa índice de vulnerabilidad método IVET



Fuente: UT UVR CAR, 2014

4 EVALUACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDA TORRENCIAL

Con base en la metodología IVET (IDEAM, 2011) se pretende aplicar modelos hidrológicos y geomorfológicos que permitan zonificar y evaluar la amenaza por avenidas torrenciales adaptados a la información existente para la realización de este trabajo.

Con este referente se establece la susceptibilidad y la amenaza por avenidas torrenciales para diferentes periodos de retorno y se generara la información temática que permita efectuar el cruce del mapa de susceptibilidad con el geomorfológico para obtener el mapa final de avenidas torrenciales.

4.1 METODOLOGÍA

La generación de los mapas de amenaza por avenidas torrenciales se propone en dos (2) pasos:

1) Determinación de las áreas del municipio susceptibles a avenidas torrenciales; para el logro de este objetivo se utilizó el índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales en fuentes abastecedoras – IVET- definido en el documento “Enfoque conceptual y metodológico para determinar la vulnerabilidad de fuentes abastecedoras de acueductos” (IDEAM, 2011), para las áreas montañosas de los afluentes principales de las subcuencas y a las microcuencas abastecedoras. Las cuencas que arrojen un IVET entre Medio y Muy Alto serán objeto de evaluación de amenaza. El cálculo de este índice se presentó en el capítulo anterior.

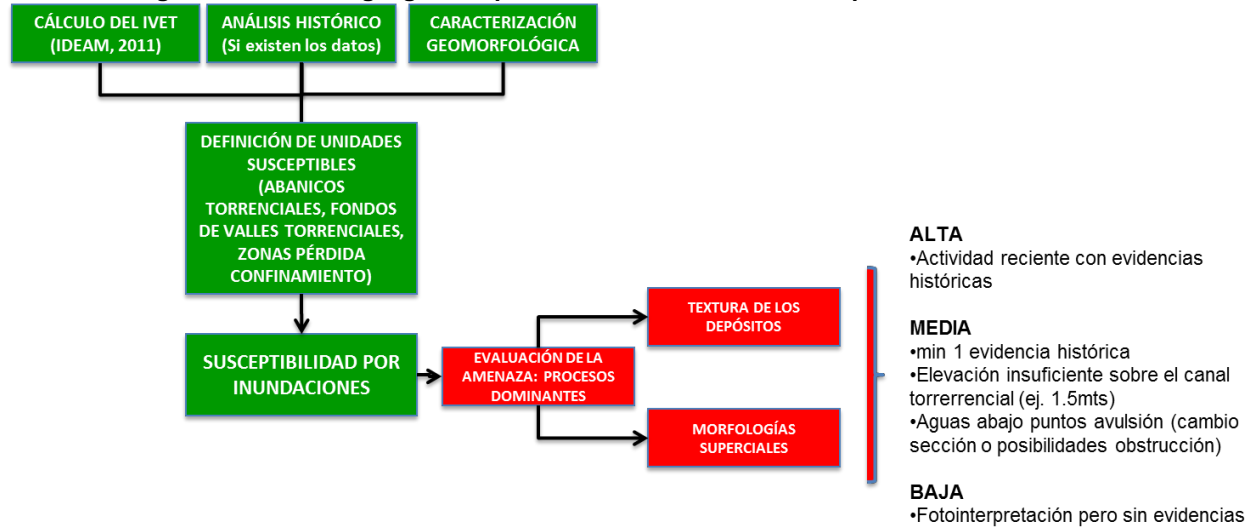
2) Definición de las áreas de amenaza por avenidas torrenciales, las cuales se delimitarán a partir del cruce de la cartografía geomorfológica, el mapa del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET) y los datos de eventos históricos, si ellos existen y se encuentran georreferenciados; a partir de esta información se delimitarán las áreas de tránsito y las contiguas que puedan ser afectadas por procesos de avalanchas al desbordarse el cauce en las zonas de tránsito, producto de la interpretación geomorfológica.

Con base en este método se plantea la clasificación de las áreas de amenaza en la siguiente forma:

- **ALTA:** Actividad reciente con evidencias históricas y caracterización geomorfológica
- **MEDIA:** Mínimo una evidencia histórica producto de interpretación geomorfológica.
- **BAJA:** Fotointerpretación pero sin evidencias

En la **Figura 4.1** se presenta un esquema conceptual del método propuesto.

Figura 4.1 Metodología general para evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales



Fuente: UT AVR CAR, 2014

Indiferente de la clasificación de la tipología de flujos densos, lo importante es la identificación y caracterización de los eventos históricos o las áreas del territorio susceptibles de presentar esta tipología de fenómenos, principalmente geofomas como abanicos torrenciales, fondos de valles, flujo de tierra, flujo de detritos, flujo de lodo, Alud (lava) torrencial, y zonas de avulsión o pérdida de confinamiento, además de canales por donde se puedan transportar flujos de movimientos en masa.

Considerando el esquema conceptual presentado, el proceso de evaluación de la susceptibilidad y amenaza para el municipio se efectúa sobre las cuencas aportantes al área en estudio a escala 1:25.000; este proceso se da considerando los ítems que se describen a continuación:

4.2 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD CON EL USO IVET

- a) Integrar los eventos de avenidas torrenciales identificados en el análisis de eventos históricos generando un mapa de localización de los eventos que hayan sido identificados a nivel del municipio.
- b) Realizar análisis de eventos históricos considerando que los que se puedan utilizar para el análisis de la amenaza se requiere que puedan ser localizados cartográficamente. Por lo tanto la identificación de sitios se efectuó con base en el control de campo.
- c) Realizar el análisis geomorfológico con base en los mapas desarrollados para este trabajo.

Se considera de especial importancia que la caracterización geomorfológica desarrollada ha hecho énfasis en las geofomas y rasgos morfodinámicos que definen e inducen a la ocurrencia en las cuencas y microcuencas del fenómeno de torrencialidad. Las unidades geomorfológicas o formas del terreno están relacionadas con el relieve (fuerzas internas) y/o con el modelado (agentes externos que modifican el relieve); y las subunidades geomorfológicas referencian los tipos de rocas y/o depósitos que soportan los relieves o modelados del paisaje (materiales superficiales asociados con procesos morfodinámicos) Carvajal (2012) Zinck (2012). Para el Municipio Zipaquirá se han identificado las siguientes unidades (formas del terreno) soportadas en rocas sedimentarias y depósitos residuales y transportados: laderas medias en contrapendiente, cimas montañosas, coronas de movimientos en masa, lóbulos coluviales, crestas subhorizontales, movimientos en

masa inactivos, laderas moderadas, laderas empinadas, crestas inclinadas, flujos de detritos, flujos de lodos y planicies o canales de inundación.

d) Estimar el índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET) de acuerdo con los lineamientos definidos por el IDEAM para la escala de trabajo (IDEAM, 2013) el cual tiene como entrada el índice morfométrico de torrencialidad (obtenidos desde el insumo de caracterización geomorfológica) e índice de variabilidad.

A continuación se detalla el procedimiento para el cálculo del índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales.

- ✓ Identificación y delimitación de zonas susceptibles de ser afectadas por avenidas torrenciales o donde han ocurrido dichos eventos, para lo cual se considerarán los siguientes criterios:
- ✓ Áreas donde el IVET tiene la categorías de torrencialidad de media, alta y muy alta.
- ✓ Áreas donde se ha identificado uno o más eventos históricos. En este caso se entiende que los datos históricos indican la localización en algunos barrios del casco urbano.

4.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES

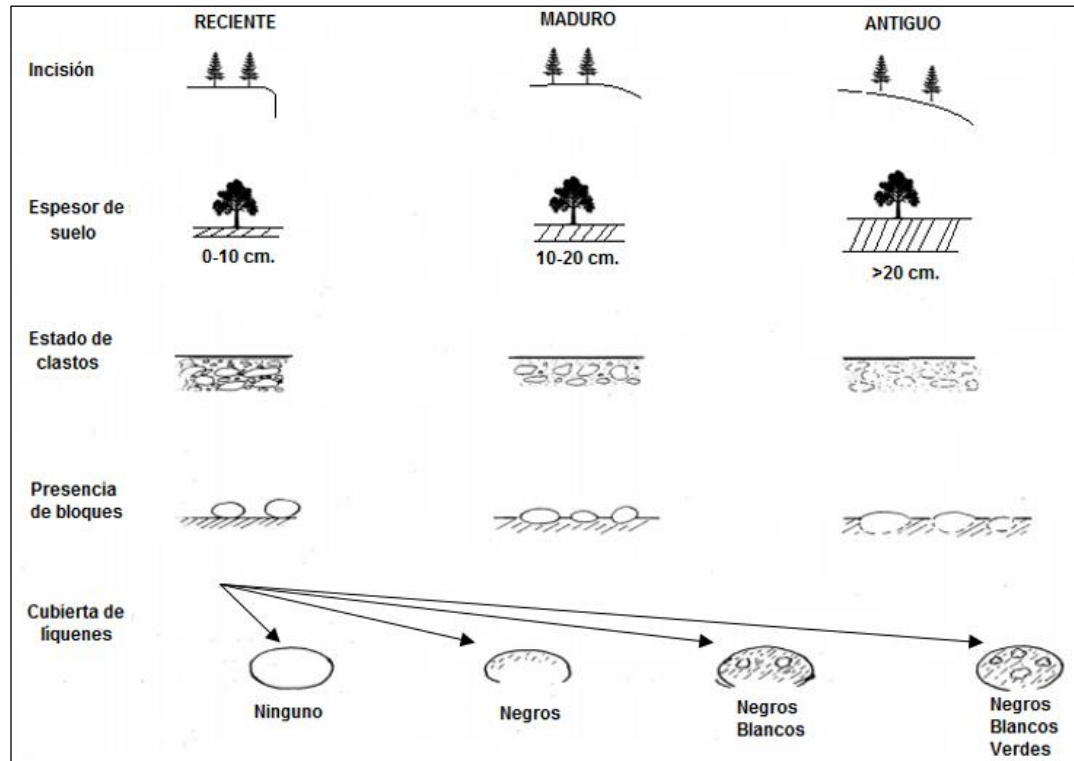
Las zonas críticas para evaluar la amenaza son las identificadas en el anterior paso. La definición de las zonas de amenaza se efectuará con base en los datos geomorfológicos obtenidos en campo y con base en la fotointerpretación, en la siguiente forma:

- Textura de los depósitos torrenciales formados por diferentes mecanismos de transporte (depósitos formados por flujos de detritos, flujos de lodo, flujos de tierra o depósitos de origen fluvio-torrencial).
- Morfologías superficiales: presencia de diques o muros naturales de material de arrastre (“levees”), lóbulos frontales, bloques de más de 1m de diámetro, daños a la vegetación, canal trapezoidal. Este análisis debe tener como soporte la información de la cartografía geomorfológica y geológica del área en evaluación.

Los trabajos de campo de control se han direccionado a considerar algunos aspectos adicionales a partir de una adaptación de la propuesta de Parra (1995) que se resume en la **Figura 4.2** respecto a la cronología de los eventos:

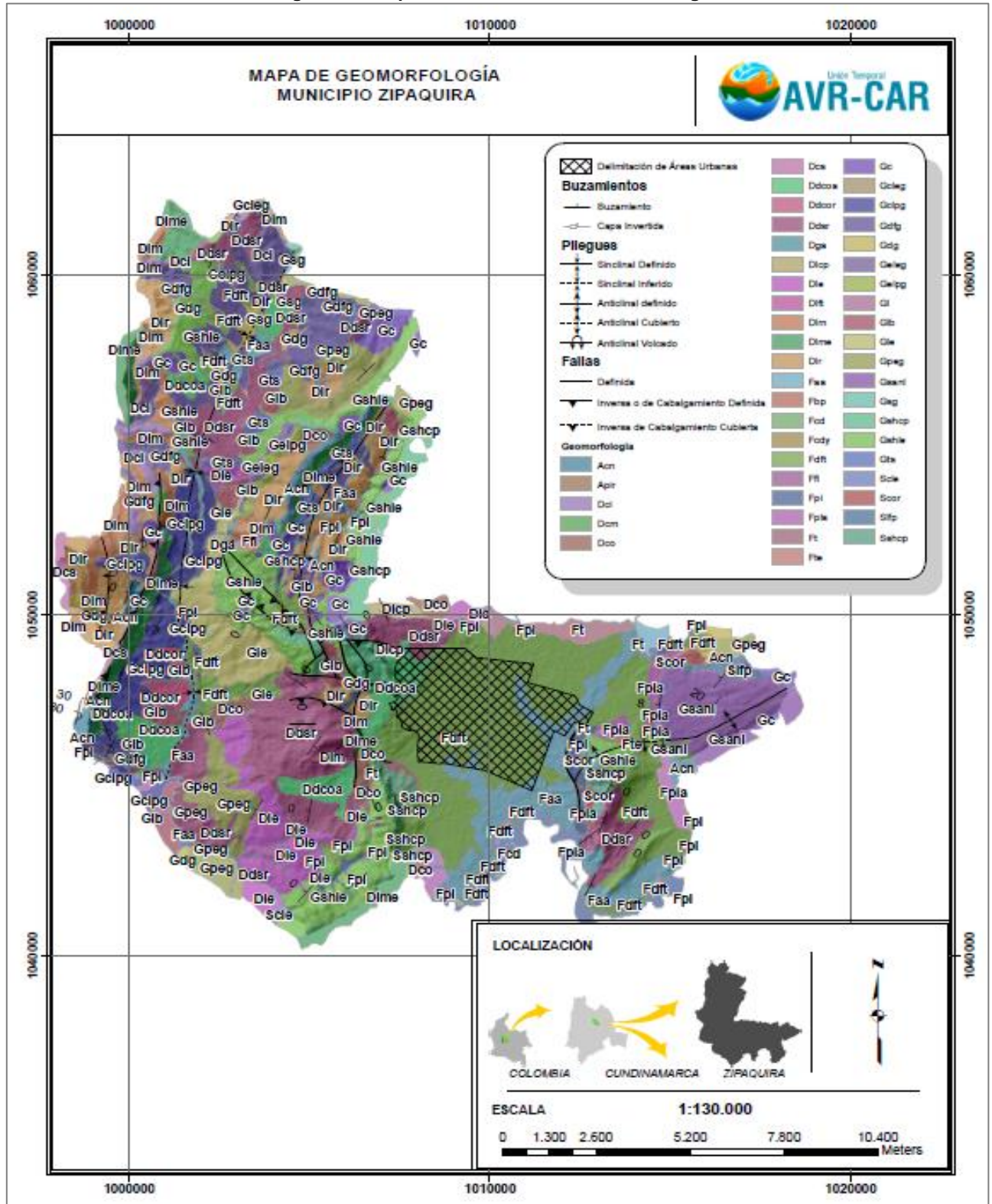
- Años: Huellas en el cauce, sin vegetación o rastrojo bajo en márgenes, depósito y cicatrices de movimientos en masa asociados, afectación de la corteza de árboles mayores, ausencia de líquenes en bloques de roca, ausencia de horizontes A y B de suelo. Coronas de cicatrices agudas.
- Decenas de años: Rastrojo alto o árboles mayores en márgenes, depósito y cicatrices de movimientos en masa asociados, líquenes en bloques, matriz fresca, coronas de cicatrices subredondeadas.

Figura 4.2 Indicadores sobre la cronología de flujos densos asociados a procesos torrenciales



Fuente: Adaptado de Parra, 1995

Figura 4.3. Mapa de Calificación de Geomorfología.



Fuente: UT AVR-CAR, 2014.

Tabla 4.1 Unidades geomorfológicas municipio de Zipaquirá

Símbolo	Unidad	Ambiente	
Dci	Crestas inclinadas	Denudacional	
Dcm	Cimas montañosas		
Dco	Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción		
Dcoa	Depositos coluviales antiguas		
Dcor	Depositos coluviales recientes		
Dcr	Cerros residuales		
Dcs	Cimas sub - horizontales		
Dga	Glacis de acumulación		
Dlc	Ladera coluvial		
Dlcp	Laderas de contrapendiente estructural denudada		
Dle	Ladera erosiva		
Dlft	Flujos terrosos		
Dlm	Laderas moderadas		
Dlme	Laderas moderadas empinadas		
Dlr	Lobulos residuales		
Scle	Cuestas estructurales denudado	Estructural	
Scor	Cornisa estructural		
Sele	Espinazo estructural denudado		
Selp	Espinazo estructural denudado en contrapendiente		
Slfp	Escarpe linea de falla		
Sshcp	Sierras homoclinal en contrapendiente		
Sshle	Ladera estructural de sierra homoclinal		
Acn	Cantera	Antrópico	
Apir	Embalses y humedales		
Arp	Embalses		
Gafg	Abanicos fluvioglaciares	Glacial	
Gc	Circos		
Gcleg	Cuesta estructural glaciada		
Gdfg	Depositos fluvioglaciares		
Geleg	Laderas estructurales		
Gelpg	Las Laderas de contrapendientes		
Gl	Planicies lacustres		
Gle	Cuestas estructurales glaciadas		
Glcp	Laderas de contrapendientes estructurales glaciadas		
Glb	Conos y lobulos de gelifracción		
Gpeg	Planos y espolones estructurales glaciados		
Gsanl	Las laderas anticlinales glaciadas		
Gsg	Planicies glacio-lacustrinas		
Gts	Kames y terrazas de gelifracción		
Faa	Abanicos aluviales y fluviotorrenciales		
Fbp	Barra puntual		
Fcd	Cuencas de decantación o basines		
Fcdy	Cono de deyección		
Ffl	Flujos lodos		
Fpla	Planicies y deltas lacustrinos		
Fpi	Planicies y canales de inundación		
Ft	Terrazas		
Fte	Terrazas fluviales por erosión		

Con base en las anteriores actividades se definen las categorías de amenaza para el municipio de Zipaquirá de la siguiente forma, considerando los criterios de, morfología, pendiente, densidad de drenaje y procesos morfodinámicos. Finalmente en la **Figura 4.5** se presenta el mapa de amenaza por torrencialidad obtenido para la zona de estudio y las características de las zonas de amenaza que se presentan tal como se describen en la **Tabla 4.2**.

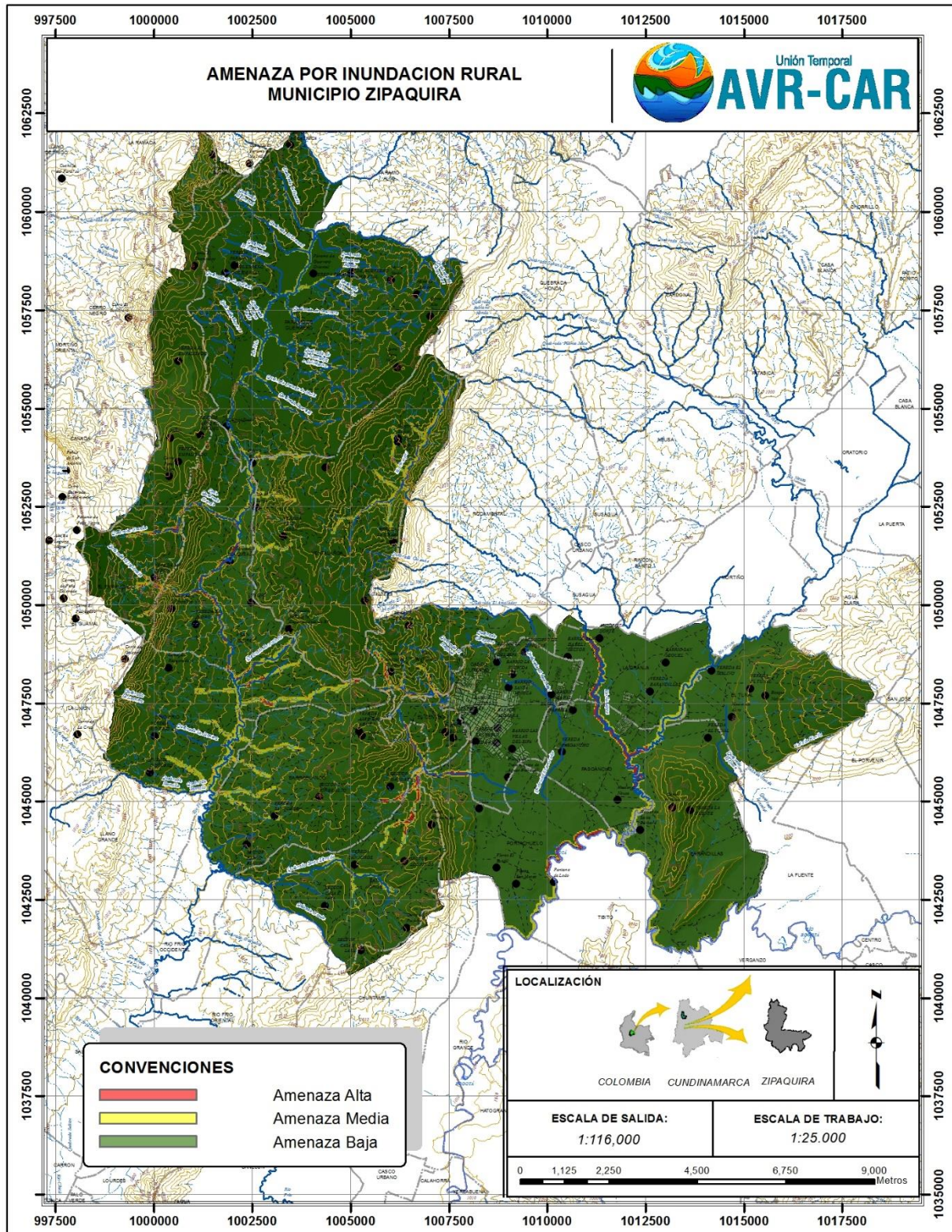
Es importante anotar que estos resultados están controlados por el IVET obtenido para la zona; el cual como se explicó en el capítulo de hidrología se basa en datos de precipitación y no de caudales; igualmente las unidades geomorfológicas que permiten la calibración de estos resultados no permiten mayor detalle, lo cual lleva a la generalización de los resultados en el cálculo de la amenaza.

Teniendo en cuenta lo anterior y los resultados del mapa de amenaza por inundación (ver **Figura 4.4**) se determinaron los principales cauces que de acuerdo a sus características y caudales son capaces de transportar grandes cantidades de materiales.

De esta manera, las causas de las avenidas torrenciales son la combinación de factores geomorfológicos de la cuenca (forma, pendiente, masa o material disponible), usos y cobertura del suelo con factores meteorológicos de lluvias de alta intensidad, que pueden generar un aumento de escorrentía y activar en laderas de la cuenca, movimientos en masa que caen al cauce.

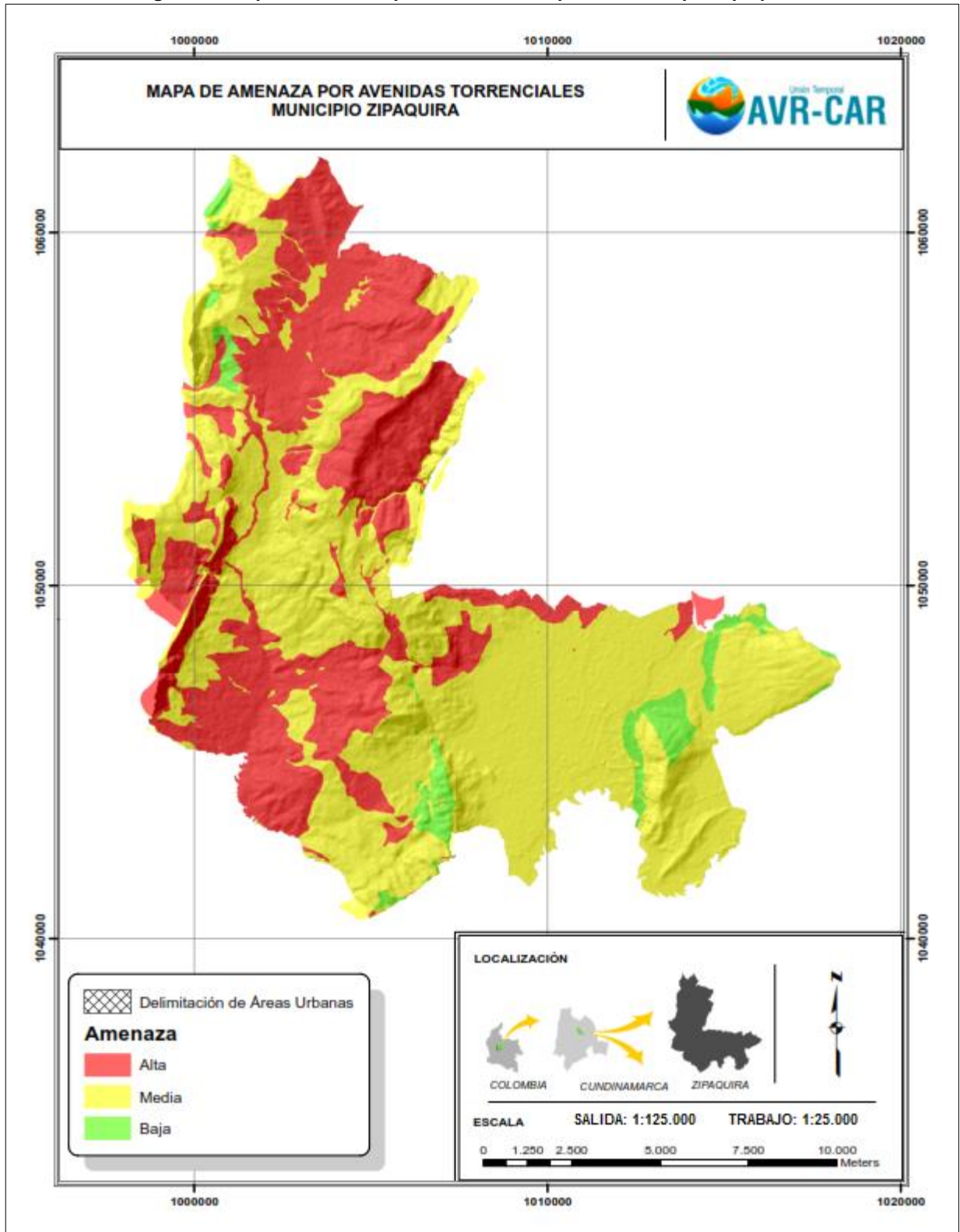
Teniendo en cuenta todos los anteriores factores se generó el mapa de amenaza por avenidas torrenciales para el municipio Zipaquirá.

Figura 4.4 Amenaza por inundación para el Municipio Zipaquirá



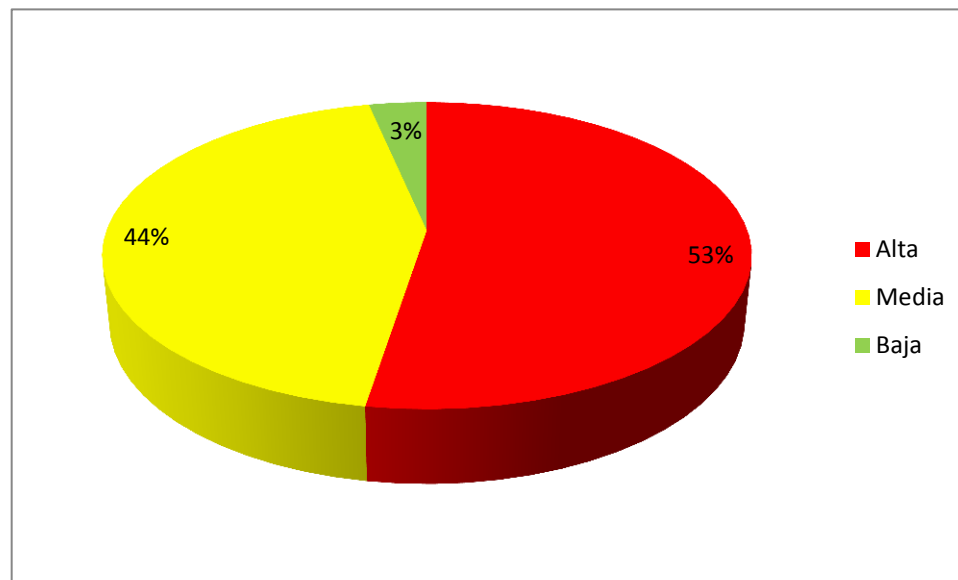
Fuente: UT AVR CAR, 2014

Figura 4.5 Mapa de amenaza por torrencialidad para el Municipio Zipaquirá



Fuente: UT UVR CAR

Figura 4.6 Distribución amenaza Municipio Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR, 2014

Tabla 4.2 Categorización de la torrencialidad en el Municipio Zipaquirá.

Alta	Áreas con potencialidad de torrencialidad alta observadas al norte y occidente del municipio principalmente en las quebradas Grande, el infinito y zonas al río Frio.
Media	Áreas de depósitos cuaternarios con potencialidad media localizadas en la parte norte del casco urbano del municipio.
Baja	Áreas localizadas en cercanías a la quebrada El Gone y el río Frio donde el potencial torrencial es bajo, sobre morfología de pendiente plana a moderada.

Fuente: UT UVR CAR, 2014

Como se puede ver en los resultados obtenidos (**Figura 4.5** y **Figura 4.6**), una de las zonas que se encuentra dentro de una categorización de riesgo alto, es la que se encuentra ubicada en la zona norte, en cercanías a las quebradas El Runcho, de Guerrero, Pantano Largo, Pantano Hondo, la Tomita, Laurelal, Patada de Mula y el Río Frío; ya hacia la parte nororiental se tiene esta misma categorización hacia el Río Susagua.

Hacia la parte occidental, se tiene que hacia las quebradas El Infiernito, Grande y Carrizal se tiene una zona con la misma categorización de amenaza alta, al igual que la zona aledaña a las quebradas La Leonera, La Palma, Hornillo, Santa Librada y Borrachero además de la zona aledaña al Río Frío. Hacia el sector oriental del municipio, se tiene pues que la zona cercana a la quebrada Hospital y El Amolador se encuentra en la misma categoría de riesgo; todas las zonas anteriormente mencionadas, corresponden al 52.4% del territorio que comprende el municipio, de

manera que se tiene que solo el 3.4% se encuentra en una categoría de amenaza baja, y se encuentran ubicadas hacia el sur y el oriente del municipio en cercanías a la Quebrada El Gone y el Río Susagua.

El restante 44,1% se encuentra en una categoría de amenaza media, y se encuentra distribuido de manera homogénea dentro del municipio, considerando que en términos de pendientes estas zonas presentan una topografía plana a media.

En términos de pendiente, se tiene que el sector occidental, es por donde se encuentran las zonas más escarpadas, a pesar de que en general, el Municipio Zipaquirá cuenta con pendientes medias y con algunos puntos de pendientes más fuertes, los cuales en este caso, están relacionados con las zonas de mayor amenaza.

5 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad, es el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada. Es la facilidad como un elemento, pueda sufrir daños humanos y materiales.

La valoración de la vulnerabilidad puede definirse como el nivel potencial de daño o grado de pérdida de un determinado elemento, expuesto en una escala de 0 a 1.

Con el objeto de evaluar la vulnerabilidad de los elementos dentro del área en estudio, se caracterizaron los diferentes parámetros que se consideran como los más relevantes e influyentes en la valoración de la vulnerabilidad bajo la acción de efectos por avenidas torrenciales.

5.1 FACTORES PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad entendida como debilidad frente a las amenazas y como incapacidad de recuperación después de que ha ocurrido un evento, no solo depende de la vecindad física de las poblaciones a las fuentes de las amenazas, sino de otros múltiples factores de distinta índole, todos presentes en las comunidades.

Teniendo en cuenta lo anterior se presenta a continuación los factores que se requieren para definir la vulnerabilidad:

- Exposición: de acuerdo a la condición de susceptibilidad que tiene el asentamiento humano y sus elementos de ser afectados por estar en el área de influencia de los fenómenos amenazantes y por su fragilidad física ante los mismos.
- Resistencia: La capacidad de los elementos a resistir el impacto de los eventos amenazantes.
- Resiliencia: Es la capacidad de un elemento, una comunidad o sociedad expuesta a una amenaza, para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras, cultivos y funciones básicas.
- Importancia: de acuerdo a los sectores que dan a la sociedad o a la población más productividad económica y/o cultural.

Considerando estos factores se puede hablar de la existencia de una vulnerabilidad global, la cual requiere de un proceso complejo, dinámico y cambiante que determina la probabilidad de que una comunidad quede expuesta o no a la ocurrencia e impacto de un desastre, o que tenga más o menos probabilidad de recuperación.

Sin embargo para este estudio se hizo énfasis en la vulnerabilidad de las coberturas y usos del suelo presentes por amenazas de avenidas torrenciales en la zona de estudio.

5.2 CATEGORÍAS DE LOS ELEMENTOS A EVALUAR

La evaluación de los daños y pérdidas por eventos y procesos amenazantes por avenidas torrenciales, se realiza tomando como referencias las unidades de coberturas y uso del suelo de acuerdo con la Memoria Técnica “Levantamiento de la Cobertura Vegetal y Uso del Suelo del Área de Jurisdicción CAR “del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

5.2.1 Aguas continentales

- Ríos: Corriente superficial de agua dulce de caudal importante, que se dirige hacia otro río, a un lago o al mar.

- Lagunas, lagos y ciénagas: cuerpo de agua cuya formación se debe bien a la aparición de una barrera o bien a la formación de una depresión cerrada en el relieve.
- Embalses y cuerpos de agua artificiales: depósitos artificiales en los que se almacenan aguas de un río o arroyo mediante un dique o presa, para utilizarlos en el riego de terrenos, en el abastecimiento de poblaciones, en la producción de energía eléctrica, etc.

5.2.2 Bosques

Áreas naturales o seminaturales con una cobertura de bosque primario o secundario, compuesto de especies nativas o exóticas. Estos bosques pueden ser utilizados para producción de madera u otros productos de leña.

5.2.3 Cultivos anuales o transitorios

Áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo dura un año o menos, llegando incluso a ser de unos pocos meses; tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo.

5.2.4 Cultivos permanentes

Tierras dedicadas a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar, se incluyen en esta categoría los herbáceos: caña de azúcar, caña panelera, plátano y banano; arbustivos: café y cacao; arbóreos: palma de aceite y árboles frutales.

5.2.5 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales

Superficies ocupadas principalmente por cultivos y pastos en combinación de espacios naturales. En esta unidad, el patrón de distribución de las áreas es de menos de 6.25 hectáreas no puede ser representado individualmente. Las áreas de cultivos ocupan entre el 25% y el 75% de la superficie total de la unidad.

5.2.6 Mosaico de pastos y cultivos

Tierras ocupadas por pastos y cultivos en los cuales el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlo individualmente.

5.2.7 Pastos

Tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominada principalmente por gramíneas cultivadas, dedicadas principalmente a potreros permanentes por un periodo de dos o más años. Algunas de las categorías definidas pueden presentar anegamientos temporales o permanentes en zonas bajas o en depresiones.

5.2.8 Zonas urbanizadas

Esta unidad representa aquella zona en la cual se realizan edificaciones con fines específicos, el análisis de fotointerpretación se centra en este punto específicamente con el fin de entender el entorno geológico y geomorfológico en el cual se encuentra.

5.2.9 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación

- Playas de río: son áreas desprovistas de vegetación constituidas básicamente por suelos arenosos que conforman playas, dunas, bancos de arena de los ríos y las superficies conformadas por arenas, limos o guijarros en los medios litoral y continental.
- Afloramientos rocosos: son terrenos conformados por roca expuesta en superficie debido a la acción de los procesos naturales.

- Tierras desnudas o degradadas: corresponde a superficies sin o con poca cobertura vegetal. Vegetación escasa de alta altitud.
- Tierras erosionadas con reforestaciones o vegetación natural dispersa: son superficies sin o con poca cobertura vegetal, donde por las características del terreno se encuentra vegetación arbórea plantada por el hombre con fines de manejo forestal de conservación o de producción; y alguna vegetación natural dispersa (rastros, relictos de bosque natural, etc.).
- Pajonales o rastros con afloramientos rocosos o en tierras eriales: unidad de cobertura natural de carácter marcadamente estacional, con un estrato herbáceo o arbustivo, asociado a terrenos conformados por roca o tierras expuestas producto de la acción de procesos erosivos.

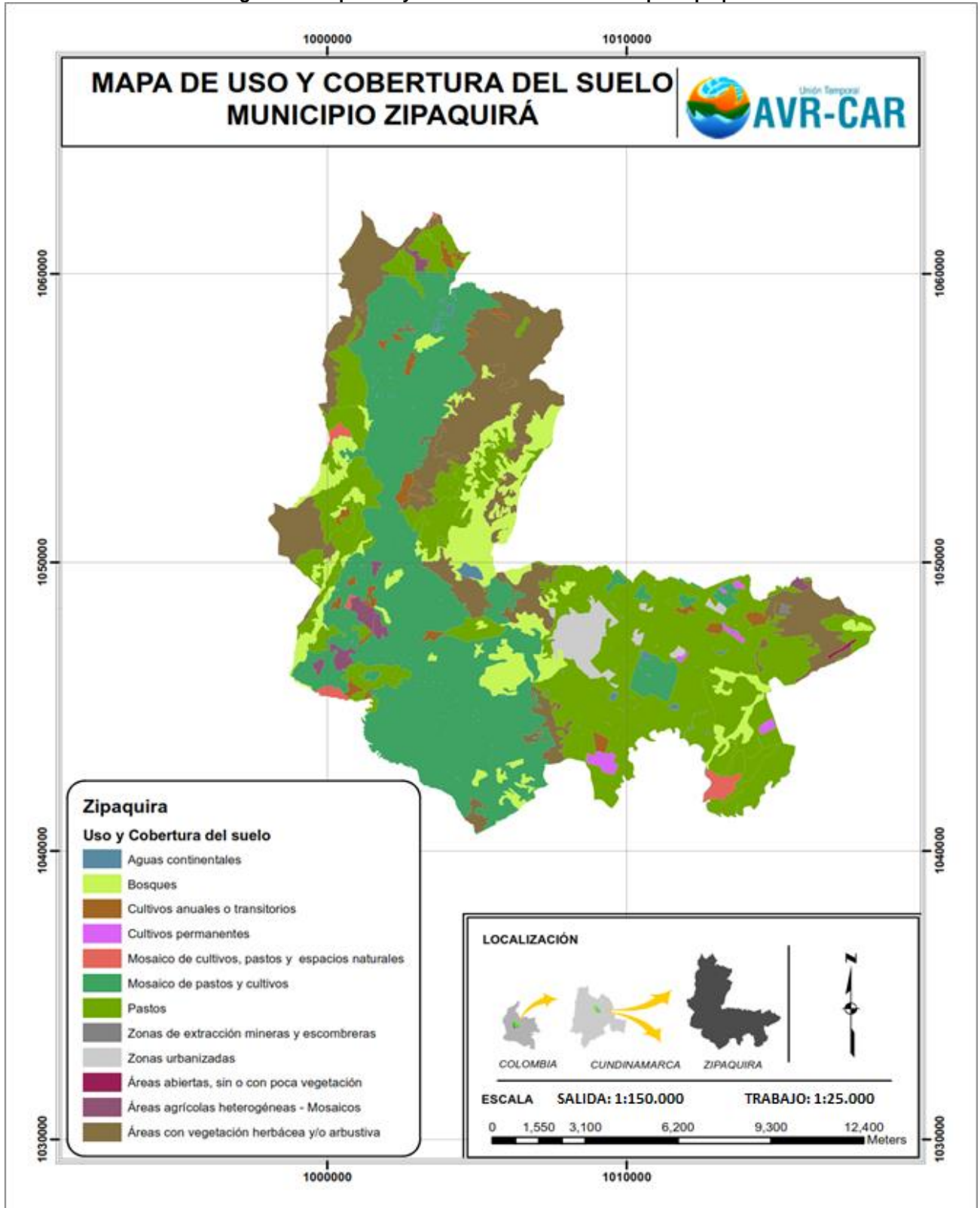
5.2.10 Áreas agrícolas heterogéneas

Son aquellas áreas que presentan heterogeneidad en la cobertura ya sea por el tamaño reducido de los predios (menores a 6.25 h), por condiciones locales de clima o de suelos que hacen difícil la separación de unidades cartográficas homogéneas.

5.2.11 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva

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.

Figura 5.1 Mapa uso y cobertura del suelo Municipio Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR, 2014

5.3 METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD POR AVENIDAS TORRENCIALES

Para implementar la metodología de evaluación de la vulnerabilidad por avenidas torrenciales en el Municipio Zipaquirá, se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica de documentos relacionados con la identificación, caracterización y zonificación de las amenazas y la vulnerabilidad.
- La disponibilidad de la información sobre coberturas y usos del suelo fue de acuerdo a la Memoria Técnica “Levantamiento de la Cobertura Vegetal y Uso del Suelo del Área de Jurisdicción CAR “del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y que fue corroborada con la visita al área de estudio realizada por los profesionales involucrados en el proyecto. Dichas categorías están definidas en el capítulo 5.2.
- Las principales actividades agropecuarias que se desarrollan en el Municipio Zipaquirá, de acuerdo con los resultados, existe un predominio de significativo de área ondulada pues abarcan el 57% del municipio es decir 11.064 ha, allí predominan mosaicos de pastos y cultivos (4.116 ha) los pastos (2.439 ha), áreas con vegetación herbácea y arbustiva (2.729 ha) y bosques (1.318 ha). En segundo lugar las áreas planas ocupan el 36% (7.099 ha) con un uso predominante de pastos (3.446 ha), mosaicos de pastos y cultivos (2.363 ha) y en menor proporción áreas agrícolas, áreas con vegetación herbácea, cultivos permanentes y zonas de extracción minera. Las áreas montañosas por su parte ocupan el 7% (1.305 ha) del territorio y se caracterizan por un predominio de áreas con vegetación herbácea y arbustiva (508,62 ha), bosques (354,6 ha), pastos (349 ha) y en menor proporción mosaico de pastos y cultivos (5.022 ha).
- Se tienen zonas rurales homogéneas (ZHR): La zonificación rural se debe realizar con base en tipos de cultivos, bosques, densidad de vegetación mediante una reclasificación del mapa de cobertura y uso obtenido. Se extraerán de estas zonas todos los centros poblados que entran en la categoría de zonas homogéneas urbanas. La zona homogénea quedará conformada con la siguiente información:
 - Área de la zona (ha).
 - Cobertura y uso principal.
 - Relieve.

Análisis de fragilidad (IF)

Bajo el Modelo de Indicadores de Vulnerabilidad, ésta se plantea como un factor interno de riesgo y se relaciona con la exposición, con la susceptibilidad física de los elementos expuestos a ser afectados por la ocurrencia de un desastre, la fragilidad social y ecosistémica y la resiliencia de las comunidades para responder ante un desastre o absorber su impacto. El índice de fragilidad varía entre 0 y 1 y para efectos de los análisis se consideró solo tener en cuenta la fragilidad social y la fragilidad ecosistémica, dado que la física se aborda desde el punto de vista geomorfológico, por tanto se hace necesario hacer referencia:

1. Fragilidad social.
2. Falta de resiliencia.

En la **Tabla 5.1** se muestran los resultados obtenidos del cruce de información de las capas de fragilidad ecosistémica y fragilidad sociocultural; es evidente que la fragilidad total se caracteriza por presentar valores altos para las coberturas de bosque plantado, bosque secundario, rastrojos y arbustales, y la vegetación de páramo y subpáramo, ubicados sobre las cuencas de los ríos Susagua y Frío al nororiente de la municipio; y en la cuenca de la Quebrada Grande al occidente de la cabecera municipal en límites con Subachoque; la fragilidad total media por su parte corresponde con cultivos de clima frío, cultivos de pastos con espacios naturales y diferentes tipos

de rastrojos (de arbustales, pastos, y bosques), así como coberturas de bosque plantado, y bosque secundario, estos se localizan principalmente sobre la cuenca del Río Susagua y la quebrada Chismes, al oriente del municipio y en áreas aledañas a la cabecera municipal. Finalmente las áreas de fragilidad total baja corresponden con pastos, y cultivos de papa, arveja, habichuela trigo y avena entre otros y los cultivos confinados (viveros) las áreas de esta categoría se distribuyen ampliamente en el municipio.

Tabla 5.1 Fragilidad total calculada

TIPO DE COBERTURA	FRAGILIDAD ECOSISTEMICA	FRAGILIDAD SOCIOCULTURAL	FRAGILIDAD TOTAL	CAT_FRAG TOTAL
Tejido urbano continuo	0,00	0,10	0,05	BAJA
Tejido urbano discontinuo	0,00	0,10	0,05	BAJA
Explotaciones mineras	0,10	0,10	0,10	BAJA
Tierras desnudas y degradadas	0,00	0,35	0,18	BAJA
Rastrojo y arbustales	0,30	0,10	0,20	BAJA
Rastrojo y pastos	0,30	0,10	0,20	BAJA
Arveja	0,30	0,20	0,25	BAJA
Avena	0,30	0,20	0,25	BAJA
Cultivos confinados (viveros, flores)	0,30	0,20	0,25	BAJA
Galpones	0,30	0,20	0,25	BAJA
Habichuela	0,30	0,20	0,25	BAJA
Papa	0,30	0,20	0,25	BAJA
Pastos	0,30	0,20	0,25	BAJA
Trigo	0,30	0,20	0,25	BAJA
Avena	0,30	0,20	0,25	BAJA
Rastrojos y bosques	0,30	0,25	0,28	BAJA
Explotaciones mineras	0,30	0,35	0,33	BAJA
Cultivos de clima frio, pastos y espacios naturales	0,75	0,20	0,48	BAJA
Cultivos de pastos con espacios naturales	0,75	0,20	0,48	BAJA
Cebada	0,75	0,20	0,48	BAJA
Mosaico de pastos	0,75	0,20	0,48	BAJA
Bosque plantado	0,75	0,35	0,55	MEDIA
Bosque secundario	0,75	0,35	0,55	MEDIA
Cultivos de clima frio, pastos y espacios naturales	0,75	0,35	0,55	MEDIA
Cultivos de pastos con espacios naturales	0,75	0,35	0,55	MEDIA
Rastrojo y arbustales	0,75	0,35	0,55	MEDIA
Rastrojo y pastos	0,75	0,35	0,55	MEDIA
Rastrojos y bosques	0,75	0,35	0,55	MEDIA
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,75	0,60	0,68	MEDIA
Ríos (50m)	1,00	0,50	0,75	ALTA
Vegetación de páramo y subpáramo	1,00	0,60	0,80	ALTA
Bosque plantado	1,00	0,60	0,80	ALTA
Bosque secundario	1,00	0,60	0,80	ALTA
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	1,00	0,60	0,80	ALTA
Vegetación de páramo y subpáramo	1,00	0,60	0,80	ALTA

Fuente: UT AVR CAR, 2014

Resiliencia (IR)

En primer lugar, este indicador aborda la afectación de las actividades productivas y de la infraestructura estratégica de transporte, servicios públicos, etc. Y en segundo lugar, ya que la falta de resiliencia mide la incapacidad de absorber los impactos y recuperarse a ellos, también se evalúa la recuperación en el corto, mediano y largo plazo. **Tabla 5.2**

De este modo, la evaluación se realizará con base en los siguientes términos:

Tabla 5.2 Indicador de la falta de resiliencia económica

Valor	Falta de resiliencia económica	Categoría
1,00	Se localizan las más importantes actividades productivas para el desarrollo económico de la región y/o hay presencia de infraestructura estratégica o vital. Hay destrucción total del medio ambiente físico Recuperables en el largo plazo.	Muy alta
0,75	Se desarrollan algunas actividades económicas y se localiza infraestructura estratégica. Daños ambientales muy grandes difíciles de reparar. Recuperable en el mediano plazo.	Alta
0,50	Hay poca actividades productivas o de servicios. Pérdidas ambientales serias pero reparables. La recuperación se puede dar en el corto plazo.	Media
0,25	Hay poca actividades productivas o de servicios locales. Pérdidas ambientales locales. La recuperación se puede dar en el corto plazo.	Baja
0,0	No se desarrollan actividades productivas y no hay infraestructura. Elementos ambientales intactos	Cero

Fuente: adaptado UNAL, 2013, Imiriland, 2007)

De acuerdo con esta descripción, se procedió a realizar la caracterización y categorización de la resiliencia para las diferentes coberturas presentes en el municipio, es de aclarar que las áreas urbanas fueron excluidas debido a que se realizara el análisis de manera detallada..

De acuerdo con los resultados obtenidos (**Tabla 5.3**) se identificó que las áreas de falta de resiliencia muy alta corresponde con la vegetación de páramo y subpáramo, la cual tiene una área significativa en el costado nororiental de la cuenca de Río Frío y el costado sur occidental del municipio sobre la cuenca de la Quebrada Grande, las áreas con falta de resiliencia alta se caracterizan por presentar áreas de bosques secundarios, bosques plantados, lagunas naturales y explotaciones mineras; estos se localizan principalmente en la cuenca del Río Susagua y el costado occidental de la cabecera municipal donde predominan los bosques secundarios, de igual forma se presentan algunas áreas aisladas en diferentes zonas del municipio.

Tabla 5.3 Categorización de resiliencia

TIPO DE COBERTURA	VALOR RESILIENCIA	CATEGORIA RESILIENCIA
Tejido urbano continuo	0,10	MUY BAJO
Tejido urbano discontinuo	0,10	MUY BAJO
Tierras desnudas y degradadas	0,10	MUY BAJO
Arveja	0,25	BAJO
Avena	0,25	BAJO
Cultivos de clima frio, pastos y espacios naturales	0,25	BAJO
Cultivos de pastos con espacios naturales	0,25	BAJO
Pastos	0,25	BAJO
Rastrojo y arbustales	0,25	BAJO
Rastrojo y pastos	0,25	BAJO
Rastrojos y bosques	0,25	BAJO
Avena	0,25	BAJO
Cultivos de clima frio, pastos y espacios naturales	0,25	BAJO
Cultivos de pastos con espacios naturales	0,25	BAJO
Mosaico de pastos	0,25	BAJO
Pastos	0,25	BAJO
Rastrojo y arbustales	0,25	BAJO
Rastrojo y pastos	0,25	BAJO
Rastrojos y bosques	0,25	BAJO
Cultivos confinados (viveres, flores)	0,50	MEDIO
Galpones	0,50	MEDIO
Habichuela	0,50	MEDIO
Papa	0,50	MEDIO
Trigo	0,50	MEDIO
Cebada	0,50	MEDIO
Bosque plantado	0,75	ALTA
Bosque secundario	0,75	ALTA
Explotaciones mineras	0,75	ALTA
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,75	ALTA
Ríos (50m)	0,75	ALTA
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,75	ALTA
Vegetación de páramo y subpáramo	1,00	MUY ALTA

Fuente: UT AVR CAR, 2014

Una vez aplicada la formula los resultados serán clasificados en categorías para determinar los niveles de vulnerabilidad; dicha clasificación se presenta en la **Tabla 5.4**

Tabla 5.4 Niveles de vulnerabilidad propuestos

Valor	Categoría Índice de Vulnerabilidad (IV)	Símbolo
>0.65	Alta	
0.30-0.65	Media	
0 - 0.30	Baja	

Fuente: UT AVR CAR, 2014

5.4 RESULTADOS DE LA VULNERABILIDAD

De acuerdo con los resultados obtenidos del cruce de las capas de índice de fragilidad total y el índice de resiliencia se identificaron cada una de las características predominantes para cada una de las categorías de vulnerabilidad y se presentan en la **Tabla 5.5**

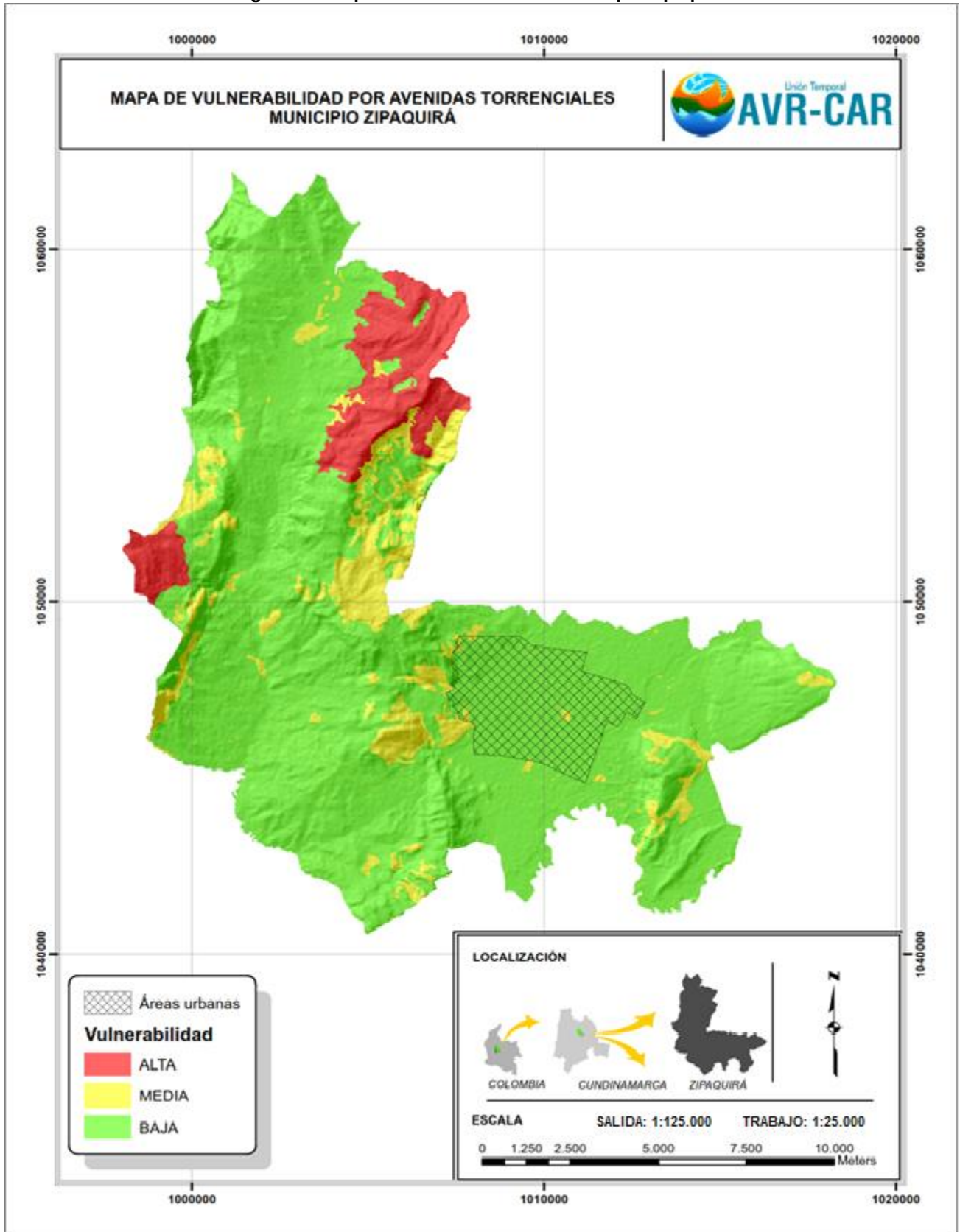
Tabla 5.5 Descripción de los niveles de vulnerabilidad propuestos

Valor	Categoría Índice de Vulnerabilidad (IV)	Símbolo
0.65 -1	Alta: áreas de alta fragilidad ecosistémica con presencia de bosques naturales densos, bosques plantados, vegetación de páramo y subpáramo; en el área se tienen ríos, quebradas, lagos y lagunas importantes para la satisfacción de necesidades básicas y equilibrio natural. En general presentan un índice de calidad de vida (ICV) medio, generando una leve fragilidad social, así como zonas de importancia natural y cultural en la región en las cuales se ubican (DMI), áreas forestales protectora (RFP) y forestales protectoras – productoras (RFPP). La recuperación ambiental del área se puede dar en largo plazo. Las pérdidas se asocian principalmente a ecosistemas estratégicos y en algunos sectores en áreas productivas.	
0.30-0.65	Media: áreas que presentan fragilidad ecosistémica predominantemente media y en algunos sectores baja con presencia de bosque natural fragmentado, bosques secundarios y bosques plantados; se tienen también algunos cultivos de habichuela. En general presentan un índice de calidad de vida (ICV) medio, con una fragilidad social media y una fragilidad cultural entre media y alta asociada a ecosistemas estratégicos, en los cuales se ubican (DMI), áreas forestales protectora (RFP) y forestales protectoras – productoras (RFPP). La recuperación ambiental del área se puede dar en mediano a plazo, teniendo falta de resiliencia media. Las pérdidas se asocian a ecosistemas estratégicos y a la presencia de cultivos y pastos para ganadería.	
0 - 0.30	Baja: áreas que presentan fragilidad ecosistémica entre media y baja con presencia de pastos, rastrojos, cultivos de maíz, papa, habichuela, y arveja. En general presentan un índice de calidad de vida (ICV) medio, con una fragilidad social entre media y alta y una fragilidad cultural baja. La recuperación ambiental del área se puede dar en corto a mediano a plazo, teniendo falta de resiliencia baja. Las pérdidas se asocian principalmente a cultivos y pastos.	

Fuente: UT AVR CAR, 2014

De acuerdo con el mapa de vulnerabilidad obtenido hay un predominio de la vulnerabilidad baja en todo el municipio, debido principalmente a la presencia importantes extensiones de pastos y cultivos; el área de vulnerabilidad media por su parte se localiza principalmente en la cuenca del río Susagua y el bordo occidental del casco urbano, allí predominan los bosques plantados y secundarios, en otros sectores aislados en proximidades al Río Frío. La vulnerabilidad alta por su parte presenta una tendencia marcada en el sector norte del municipio entre las cuencas de los ríos Frío y Susagua, ya que allí se encuentra el Distrito de Manejo Integrado DMI del Páramo de Guargua y la Reserva Forestal Protectora RFP Pantano Redondo y Nacimiento del Río Susagua, las cuales se constituyen en elementos de gran importancia ecológica y ecosistémica de igual forma ocurre al occidente del municipio en inmediaciones con Subachoque, donde se encuentra el Distrito de Manejo Integrado de Guargua y Laguna Verde. (**Figura 5.2**)

Figura 5.2. Mapa de vulnerabilidad del Municipio Zipaquirá



Fuente: UT UVR CAR, 2014

6 EVALUACIÓN DE RIESGO

Para el cálculo del riesgo se emplearon herramientas SIG, dado los niveles de información existente y los desarrollos propuestos, se plantea que el riesgo se calcule a partir del cruce de las capas de niveles de vulnerabilidad (IV) descrito anteriormente y la capa de amenaza. El proceso de clasificación del riesgo se realizó a partir de la **Tabla 6.1**

Tabla 6.1 Matriz de riesgos

Niveles de amenaza	Niveles de vulnerabilidad (IV)		
	Alta	Media	Baja
Alta			
Media			
Baja			

Fuente: UT AVR CAR, 2014

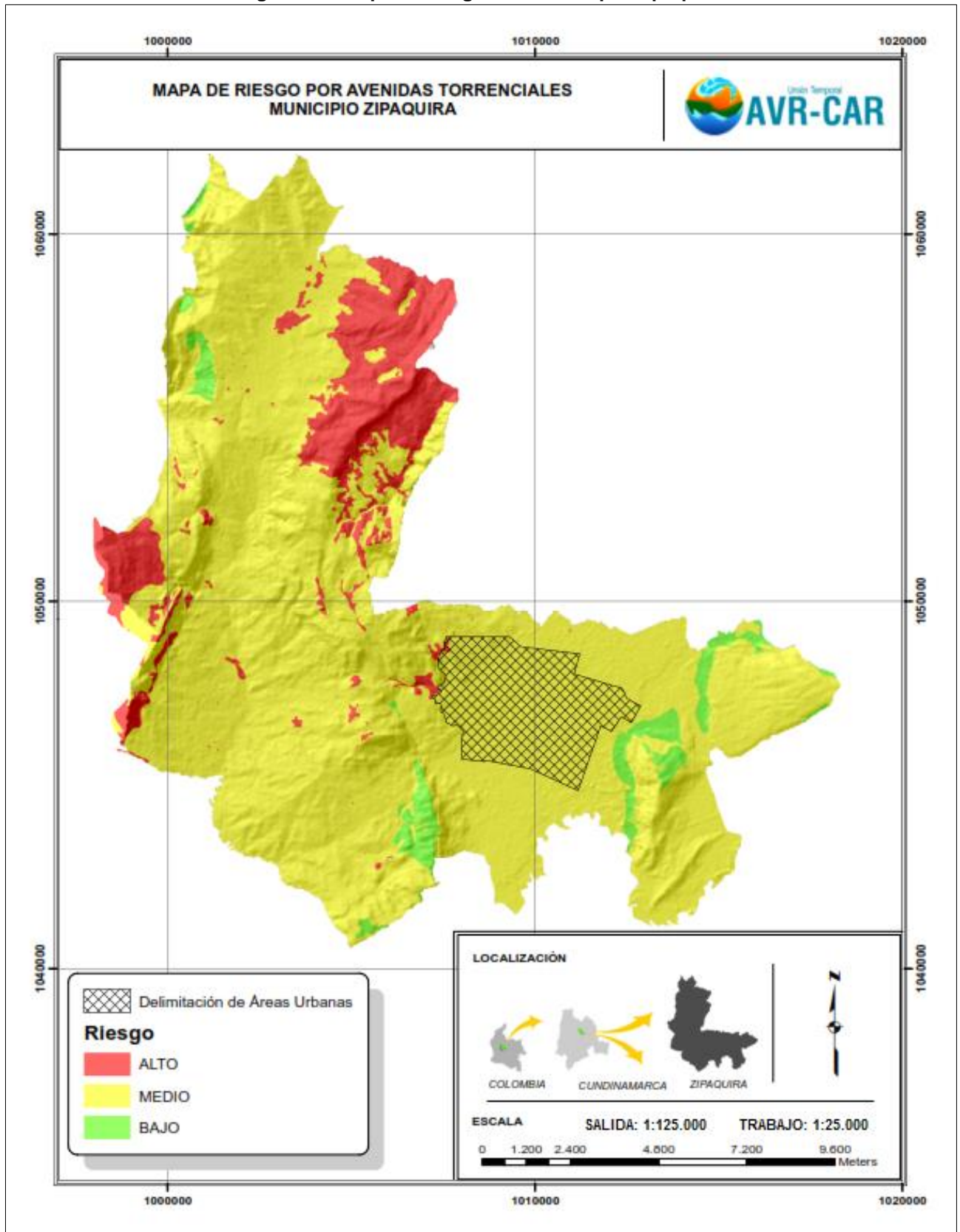
6.1 RESULTADO DE LA EVALUACION DEL RIESGO

Como se puede ver en las **Figura 6.1** y **Figura 6.2** para el municipio de Zipaquirá, se tiene que las zonas de riesgo alto se encuentran hacia el nororiente y occidente del mismo. Hacia la zona norte, se tiene que estas áreas se encuentran en cercanías a las quebradas El Chupadero, Pantano Hondo, El Runcho, de Guerrero, del Muerto, Laurelal, Chismes y los ríos Frío y Susagua.

Ya hacia el sector occidental, se tiene que hacia las quebradas Grande, El Infiernito, Azul, La Mina, Carrizal es donde se presenta esta misma categorización de riesgo alto. Esta, junto con la zona en el sector norte y algunos puntos en la zona centro, corresponden al 23,7% del área que comprende el municipio, donde en general se tiene pendientes medias a bajas con alguna excepciones hacia el sector nororiental donde se presentan algunas pendientes más fuertes.

Adicional a esto, se tiene que solo el 1,6% del área total del municipio se encuentra en una categoría de riesgo bajo, especialmente hacia el sector occidental, mientras que el restante 74,7% se encuentra en una categoría de riesgo medio, distribuido de manera homogénea dentro del área correspondiente al Municipio Zipaquirá, donde adicionalmente se tiene ubicado al casco urbano.

Figura 6.1. Mapa de riesgos del Municipio Zipaquirá



Fuente: UT UVR CAR

Tabla 6.2 Categorías de índice de riesgos

Valor	Categoría Índice de Riesgo (IR)	Símbolo
0.65 -1	Alta: áreas que presentan amenaza por torrencialidad entre media y alta y vulnerabilidad alta. La recuperación ambiental del área se puede dar a largo plazo. Las pérdidas se asocian a ecosistemas estratégicos y áreas de preservación y conservación, así como algunos sectores productivos. Sin embargo la zona urbana y de expansión urbana se encuentran en esta zona y requieren una evaluación a escala de detalle, para identificar áreas de uso restringido y/o de protección.	
0.30-0.65	Media: áreas que presentan amenaza por torrencialidad y vulnerabilidad entre media y baja. La recuperación ambiental del área se puede dar en mediano plazo, debido especialmente a una resiliencia media de la zona. Las pérdidas más importantes se asocian a ecosistemas estratégicos y a la existencia de cultivos permanentes y transitorios, así como de pastos y ganadería, una de las principales actividades económicas del municipio.	
0 - 0.30	Baja: áreas que presentan amenaza por torrencialidad y vulnerabilidad bajas. La recuperación se puede dar en corto plazo, pero las área pueden ser afectadas por procesos de inundación y depositación de lodos que afectan el tiempo de recuperación de las mismas. Las pérdidas se asocian a principalmente a cultivos y pastos.	

Fuente: UT AVR CAR, 2014

Figura 6.2 Distribución riesgo Municipio Zipaquirá, por categoría



Fuente: UT AVR CAR, 2014

7 CONCLUSIONES

- ✓ La metodología básica aplicada para los estudios de amenaza por torrencialidad plantea un componente básico geomorfológico y de carácter semi-cuantitativo, basado en el método IVET (IDEAM, 2011). Sin embargo, debe resaltarse que, en la práctica, la misma requirió de la aplicación de otras técnicas como el análisis de experto para reducir la incertidumbre asociada a los modelos hidrológicos y a los diferentes insumos o parámetros necesarios para aplicar en cada etapa.
- ✓ Es importante aclarar que dada la gran extensión del Municipio Zipaquirá y su excelente distribución de vías de penetración, se evidencia que el carácter torrencial no es un fenómeno determinante que limite el uso actual del territorio municipal a diferencia de las inundaciones de la parte baja de los valles de los ríos Bogotá, Susagua y Frío.
- ✓ El dominio geológico del **Municipio de Zipaquirá** es de rocas sedimentarias de Edad Cretácea y Paleogena, pertenecientes a la Fm. Conejo, el Grupo Guadalupe, y las formaciones Guaduas, Cacho, y Bogotá afectadas por estructuras anticlinales y sinclinales amplias y replegamientos locales y un fallamiento regional inverso de tendencia NE y transversal NW de movimiento Sinestral; cubiertos parcialmente por depósitos Cuaternarios aluviales, fluvio-glaciares, aluviotorrenciales, coluviales y residuales que permiten definir Unidades geológicas con fines ingenieriles (UGS) como rocas Duras, intermedias y blandas, suelos insitu y transportados; agrupados geomorfológicamente en ambientes morfogenéticos estructurales, denudacionales, deposicionales y antrópicos.
- ✓ Dadas la heterogeneidad morfológica que presenta el Municipio y las limitantes de información secundaria disponible apropiada para los objetivos del estudio, se evidencia que la interpretación de la imagen de satélite, es una de las herramientas ágiles y apropiadas para identificar buena parte de los parámetros requeridos para evaluar la potencialidad de torrencialidad en el Municipio, aunado con el control de campo requerido para identificar los depósitos torrenciales, las fuentes generadoras y su edad relativa. Esta técnica permite evidenciar lo ocurrido en el pasado geológico y proyectar la probabilidad de ocurrencia en el corto, mediano y largo plazo, para ser utilizado con prudencia en la planificación del territorio.
- ✓ En el Municipio de Zipaquirá el 52,4% del territorio presenta características potenciales de amenaza alta en áreas ubicadas en la zona norte, en cercanías a las quebradas El Runcho, de Guerrero, Pantano Largo, Pantano Hondo, La Tomita, Laurela, Patada de Mula y el río Frío; igualmente hacia la parte occidental, hacia las quebradas El Infiernito, Grande y Carrizal; el 44% presentan una categorización de amenaza media y solo el 3,4% se encuentra en una categoría de amenaza baja, localizada hacia el sur y el oriente del municipio en cercanías a la quebrada El Gone y el Río Susaguase.
- ✓ En el control de campo, se evidenció que de los 15 sitios seleccionados mediante fotointerpretación con potencialidad torrencial, solamente uno presenta características aluviotorrenciales, localizado por la vía central Zipaquirá-Bogotá, en los límites municipales Zipaquirá-Cajica, frente a la fábrica de papel higiénico Familia, categorizada como de amenaza baja.
- ✓ El índice de vulnerabilidad está regido por las condiciones morfométricas, a pesar de no tener información climatológica suficiente, se puede concluir que el índice morfométrico coadyuvado por las condiciones antrópicas pueden estar controlando en gran medida las condiciones de torrencialidad en las microcuencas del municipio de Zipaquirá, de tal forma que 24 de las microcuencas que tienen influencia en el municipio presentan un índice de vulnerabilidad alto, 8 medio y 20 en baja para un total de 52 microcuencas.
- ✓ Las principales actividades agropecuarias que se desarrollan en el municipio y que generarían las mayores pérdidas ante la eventualidad de un evento torrencial, corresponden a la ganadería con un 33%, mientras que las demás coberturas valoradas presentan unos índices muy bajos que no superan siquiera el 1% de pérdidas.

- ✓ Finalmente respecto de la vulnerabilidad se puede concluir que hay un predominio de la vulnerabilidad baja en todo el municipio, debido principalmente a la presencia de importantes extensiones de pastos y cultivos; el área de vulnerabilidad media se localiza principalmente en la cuenca del río Susagua y hacia el borde occidental del casco urbano, donde predominan los bosques plantados y secundarios, así como en otros sectores aislados en proximidades al Río Frío. La vulnerabilidad alta se presenta en el sector norte del municipio entre las cuencas de los ríos Frío y Susagua, n donde se localiza el Distrito de Manejo Integrado DMI del Páramo de Guargua y la Reserva Forestal Protectora RFP Pantano Redondo y Nacimiento del Río Susagua, las cuales se constituyen en elementos de gran importancia ecológica y ecosistémica, de igual forma ocurre al occidente del municipio en inmediaciones con Subachoque, donde se encuentra el Distrito de Manejo Integrado de Guargua y Laguna Verde.
- ✓ En el Municipio Zipaquirá Las zonas de riesgo alto ocupan un 33,7% de la cabecera municipal y están localizadas nororiente y Occidente en las cercanías a las quebradas El Chupadero, Pantano Hondo, El Runcho, de Guerrero, del Muerto, Laurelal, Chismes y los ríos Frío y Susagua; el 74.7% se encuentra en una categoría de riesgo medio y solo el 1,6% del área total del municipio se encuentra en una categoría de riesgo bajo, localizado especialmente hacia el sector occidental.

8 RECOMENDACIONES

- ✓ El análisis de riesgo por torrencialidad presentado para el Municipio de Zipaquirá debe verse como una plataforma inicial que permite la calificación del riesgo en la zona a nivel semi cuantitativo (según información disponible) y puede servir de base para que sea complementado y mejorado para que se convierta en el corto plazo en una evaluación integral de riesgo para efectos de toma de decisiones.
- ✓ Finalmente se recomienda a las autoridades del municipio la necesidad de adquirir cartográfica e inventarios pertinentes a los fenómenos de amenazas torrenciales que eventualmente pudieran afectar al municipio, georreferenciando los registros históricos e incorporando las actualizaciones del caso, con el fin de complementar la información ofrecida en este estudio, de manera que hacia el futuro los funcionarios calificados para el efecto, puedan precisar la evaluación integral del riesgo, y orientar una toma de decisiones efectivas, funcionales y proyectadas, en relación con el eventual desarrollo de este tipo de amenazas
- ✓ Concientizar y capacitar a la población a través de programas radiales y de folletos ilustrados, acerca de las características básicas que generan los procesos torrenciales y las eventuales acciones preventivas (conservación de bosques, limpieza de los cauces, minimizar procesos erosivos, etc.), y de protección (construcciones alejadas de los cauces, procedimientos de alarma y evacuación, etc.), con las que puedan hacer frente a un eventual desarrollo de un fenómeno de este tipo en su entorno cercano.
- ✓ Establecer estrategias de priorización de estudios detallados en los casos que lo ameriten, que permitan la toma de información batimétrica y topográfica en los sitios identificados como de amenaza alta. Con estos resultados se podrían realizar diseños de obras estructurales y no estructurales en los casos que así se requiera.
- ✓

9 FUENTES DE CONSULTA

Alcaldía Municipal de Zipaquirá. (s.f.). *Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT)*.

Cardona, Omar. (2003). *Memorias Curso Virtual de Gestión de Riesgos*. Structuralia y Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. (2013). *Anexo Técnico*. Bogotá, Colombia.

Corporación Autónoma de Cundinamarca, CAR. (2014). *Matriz de incorporación puntos de ocurrencia por amenaza*. Colombia.

DesInventar. (2014). Obtenido de http://online.DesInventar.org/DesInventar/#COL-1250694506-colombia_inventario_historico_de_desastres.

Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá, FOPAE. (2000). *Resolución 364 de 2000*. Bogotá, Colombia.

González, J., Zamudio, E. & Castellanos, R. (1999). *Relación de Precipitación – Duración de Lluvias que Disparan Movimientos en Masa en Santafé de Bogotá, Colombia*.

Rodríguez, Carlos. (2001). *Hazard Assessment of Earthquakes induce Landslides on Natural Slopes*. Ph. D. Tesis, Imperial College. London, U. K.

Servicio Geológico Colombiano. (2014). Obtenido de <http://zafiro.sgc.gov.co/simma/Default.aspx>

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (UNGRD). (2014). Obtenido de <http://www.sigpad.gov.co/sigpad/emergencias.aspx>

Universidad del Rosario. 2011. Planes de competitividad y desarrollo Económico incluyente en cinco provincias de Cundinamarca: Bajo Magdalena, Magdalena Centro, Gualiva, Rionegro y Medina. Bogotá - Colombia

Wilches, G. (1993). *La Vulnerabilidad Global, incluido en “Los Desastres no son Naturales”, compilación de Andrew Maskrey, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*. Bogotá, Colombia.