

Estudios Básicos de Amenaza por Inundación, Movimiento en Masa y Avenida Torrencial para el municipio de Palmira y Estudios Detallados de Riesgo por Inundación y Socavación Lateral en el Barrio Azul, Corregimiento de Amaime



ESTUDIO 7: ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDA TORRENCIAL ÁREA RURAL DEL MUNICIPIO DE PALMIRA ESCALA 1:25.000



Alcaldía de Palmira



**Universidad
del Valle**

Convenio Interadministrativo MP968 de 2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE; OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSO

ALCALDÍA DE PALMIRA; DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES-DGRD

ALCALDÍA MUNICIPAL DE PALMIRA

ÓSCAR EDUARDO ESCOBAR GARCÍA
Alcalde

FERNANDO JAVIER LEAL LONDOÑO, Ing.
Director de Gestión del Riesgo de
Desastres

CAMILO A. SAAVEDRA ESCOBAR, Adm.
Director 2021 – 2022 DGRD

ADRIANA TERREROS, Ing. Agrónoma
Profesional de Planta DGRD

OMAR A. CHAVES MONCAYO, Ing. Civil
Contratista DGRD

DIANA AREVALO, Ing. Civil
Contratista Oficina de Planeación

OBSERVATORIO SISMOLOGÍCO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO UNIVERSIDAD DEL VALLE

ELKIN DE JESUS SALCEDO HURTADO, Ph.D.
Director de Proyecto Estudios de Amenaza de Palmira - Director OSSO

DIANA M. RIVERA JIMENEZ
Coordinadora Administrativa

JHONATTAN FERNANDEZ C., MSc.
Coordinador Técnico

EQUIPOS TEMÁTICOS

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

JUAN CARLOS FLOREZ LARA, Geól.
Líder Equipo

JULIO CESAR GUERRA OSPINO, Geól.
Profesional de Apoyo

**MARIA ALEJANDRA VELEZ HURTADO,
Geól.**
Profesional de Apoyo

ESTEBAN ALARCON NOREÑA, Geól.
Profesional de Apoyo

SIG Y TOPOGRAFÍA

JHON JAIRÓ BARONA, Ph.D.
Líder Equipo

PAOLA T. GÓMEZ, Geóg.
Profesional de SIG

LINA V. LATORRE, Ing.
Profesional de SIG

JORGE A. DÍAZ, Geóg.
Profesional de SIG

FRANKLIN A. BEDOYA, Ing.
Profesional de Topografía

ALEJANDRO FERNÁNDEZ, Téc.
Apoyo Topografía

AMENAZA INUNDACIÓN Y AVENIDA TORRENCIAL

CARLOS RAMÍREZ C., MSc.
Líder Equipo

CESAR A. VIVAS, Ing.
Profesional Hidrología e Inundación

RAFAEL CLEMENT, Ing.
Profesional Avenida Torrencial

AMENAZA MOVIMIENTO EN MASA Y SOCAVACIÓN LATERAL

JHONALBERTH PALACIOS SÁNCHEZ, Ing.
Líder Equipo

JERSON E. ROSERO, Ing.
Profesional Uso y Cobertura

ENERO DE 2023

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. OBJETIVOS	9
2.1. General.....	9
2.2. Específicos	9
3. ALCANCES DEL ESTUDIO	10
4. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	11
4.1. Área de estudio	11
5. MARCO CONCEPTUAL	15
5.1. Avenida Torrencial.....	15
5.1.1. Tipos de procesos de las avenidas torrenciales	15
5.1.2. Amenaza	16
5.1.3. Amenaza Indicativa por AVT	16
5.1.4. Otras definiciones.....	17
5.1.5. Clasificación de flujos en ríos	18
6. METODOLOGÍA	21
6.1. Evaluación de la torrencialidad de las cuencas presentes en la zona de estudio	22
6.1.1. Índice de Melton	22
6.1.2. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET).....	24
6.2. Análisis de la Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales	29
6.2.1. Susceptibilidad Geomorfológica	29
6.2.2. Análisis HAND	33
6.2.3. Amenaza por Movimientos en Masa	36
6.3. Estimación de la Amenaza indicativa por Avenida Torrencial 1:25000	37
6.3.1. Zonificación de Amenaza indicativa por AVT en zona montañosa	37
6.3.2. Zonificación de Amenaza indicativa por AVT en zona plana	38
6.3.3. Zonificación de Amenaza indicativa consolidada por AVT	42
7. RESULTADOS.....	44
7.1. Inventario de Eventos de Avenidas Torrenciales	44
7.2. Resultados para la torrencialidad de las cuencas en el municipio de Palmira.	46
7.2.1. Resultados de acuerdo con el Índice de Melton (IM)	46
7.2.2. Resultados de acuerdo con el índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT)	49
7.2.3. Resultados Índice de Variabilidad (IV)	54
7.2.4. Resultados Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)	58
7.3. Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales	61
7.3.1. Geoformas Indicativas de Depósito y Aporte de Sedimento.....	61
7.3.2. Clasificación de Susceptibilidad Geomorfológica	65
7.3.3. Mapa de Susceptibilidad Geomorfológica por AVT	66
7.3.4. Resultados del Análisis HAND	69
7.3.5. Movimientos en Masa.....	71

7.4.	Zonificación de la Amenaza Indicativa por Avenidas Torrenciales	73
7.4.1	Zonificación de la Amenaza por AVT en zona montañosa	73
7.4.2	Zonificación de la Amenaza por AVT en Zona Plana	78
7.4.3	Mapa de Amenaza Indicativa por AVT consolidado.	90
8.	CONCLUSIONES.....	94
9.	REFERENCIAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del municipio de Palmira	11
Figura 2. Clasificación de flujo en ríos	20
Figura 3. Resultados y clasificación de procesos hidrogeomórficos según el Índice de Melton y la longitud de la cuenca.	23
Fuente: (Wilford, Sakals, Innes, & Sidle, 2004)	23
Figura 4. Relación para categorización del Índice Morfométrico de Torrencialidad	26
Fuente: IDEAM, 2013.....	26
Figura 5. Pasos metodológicos para la estimación de la susceptibilidad geomorfológica	29
Figura 6. Criterios para la cartografía de avenidas torrenciales mediante fotointerpretación.	32
Figura 7. Perfil geomorfológico ilustrativo de la amenaza relativa por avenidas torrenciales	33
Figura 8. Diagrama de flujo para determinación de modelo HAND	34
Figura 9. Clasificación para resultados de modelo HAND	35
Figura 10. Weighted overlay	38
Figura 11. Patrones de avulsión en diferentes secuencias de volumen de flujo	40
Figura 12. Áreas aproximadas de abanico proximal medio y distal.....	41
Figura 13. Esquema metodológico para la zonificación de la Amenaza indicativa consolidada por AVT.....	43
Figura 14. Distribución del número de crecientes torrenciales por afluente, en el municipio de Palmira, periodo 1970 – 2021.	44
Figura 15. Mapa de frecuencia de eventos históricos de avenidas torrenciales (HIS-1).....	45
Figura 16. Índice de Melton para la zona rural del municipio de Palmira	48
Figura 17 Relación entre la longitud del cauce y el Índice de Melton.....	49
Figura 18. Índice de Morfométrico de Torrencialidad (IMT) para zona rural del municipio de Palmira	54
Figura 19. Curvas de duración de caudales para las subcuencas de la zona de estudio.....	55
Figura 20. Índice de Variabilidad (IV) para la zona rural del municipio de Palmira	56
Figura 21. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) en la zona rural del municipio de Palmira	60
Figura 22. Mapa de Subunidades Geomorfológicas del Municipio de Palmira (GMF-2).....	62
Figura 23. Mapa de Geoformas de Origen Aluvial y Glacial (INS-6)	63
Figura 24. Mapa de Susceptibilidad Geomorfológica por Avenidas Torrenciales (AVT-1).....	68
Figura 25. Modelo de elevación digital de CVC a 12,5 empleado para análisis HAND	69
Figura 26. Mapa del análisis HAND para el municipio de Palmira	70
Figura 27. Mapa de Amenaza por Movimiento en Masa 1:25000 para zona rural del municipio de Palmira (MM-10).....	72

Figura 28. Mapa Escenario Uno (1) de Amenaza Indicativa por AVT en zona montañosa (INS-7).	74
Figura 29. Mapa Escenario Dos (2) de Amenaza Indicativa por AVT en zona montañosa (INS-8)	75
Figura 30. Mapa de Amenaza Indicativa por Avenidas Torrenciales para la zona Montañosa del municipio de Palmira	77
Figura 31. Clasificación básica de los tipos de ríos según el número de canales de corriente y su sinuosidad	80
Figura 32. Perfil ilustrativo en el abanico más reciente.	81
Figura 33. Imágenes de la zona proximal del abanico reciente.....	82
Figura 34. Imagen de clastos Río Nima sobre abanico proximal.	82
Figura 35. Imagen de granos en abanico distal sobre río Palmira	83
Figura 36. Imagen de granos en abanico distal sobre río Nima	84
Figura 37. Imagen de Perfil encontrado sobre la vía del barrio Monteclaro en el área urbana de Palmira	85
Figura 38. Relaciones morfométricas entre el área de la cuenca de recepción y el área y la pendiente del abanico	87
Figura 39. Mapa de Amenaza Indicativa por Avenidas Torrenciales para la zona plana del municipio de Palmira (AVT-3).....	89
Figura 40. Mapa consolidado de Amenaza Indicativa por Avenidas Torrenciales en el municipio de Palmira, escala 1:25000 (AVT-4)	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comunas de la cabecera urbana de Palmira.....	13
Tabla 2. Comunas de la zona rural de Palmira.....	13
Tabla 3. Categorización de variables para el índice morfométrico.....	25
Tabla 4. Categorización del índice de variabilidad.....	28
Tabla 5. Categorización del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET).....	28
Tabla 6. Geoformas indicativas de proceso tipo flujo / avenidas torrenciales.....	31
Tabla 7. Geoformas indicativas de zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales.....	31
Tabla 8. Cuadro de descripción de las clases de resultados del HAND.....	35
Tabla 10. Cuadro de descripción de las clases de resultados del HAND para la zona plana.....	42
Tabla 11. Resultados de Índice de Melton (IM) para las subcuencas de la zona de estudio.....	46
Tabla 12. Variables morfométricas de las subcuencas para el cálculo de Índice Morfométrico de Torrencialidad.....	50
Tabla 13. Resultados de Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) en las subcuencas de la zona de estudio.....	51
Tabla 14. Resultados tabulares del Índice de Variabilidad (IV) para las subcuencas.....	56
Tabla 15. Resultados de la zonificación de la susceptibilidad a avenidas torrenciales en las subcuencas de la zona rural del municipio de Palmira según el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET).....	58
Tabla 16. Geoformas indicativas de zonas de aporte y zonas de depósito en la región montañosa y de piedemonte del municipio de Palmira.....	64
Tabla 17. Categorías de susceptibilidad geomorfológica de las geoformas indicativas dentro del municipio de Palmira.....	65
Tabla 18. Descripción de los niveles de Susceptibilidad Geomorfológica.....	67
Tabla 19. Descripción de los niveles del modelo HAND.....	70
Tabla 20. Interpretación de las categorías de amenaza indicativa por avenidas torrenciales en la zona montañosa del municipio de Palmira.....	90
Tabla 21. Interpretación de las categorías de amenaza indicativa por depositación de avenidas torrenciales en la zona plana del municipio de Palmira.....	91

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe gran evidencia sobre cómo en la dinámica de los municipios se presentan diversas alteraciones desatadas por la ocurrencia de fenómenos de carácter natural y no natural, los cuales, concentran fuertes daños y generan o agudizan crisis sociales que, en la mayoría de las ocasiones y en un corto y mediano plazo, suelen propiciar crisis institucionales. Se ha demostrado, que el constante aumento de la peligrosidad e impactos de los desastres sobre las poblaciones, se encuentran directamente relacionados con formas de organización impropias, modelos insostenibles, pobreza y problemáticas ambientales (García-Tornel, 2001; Lavell, 2005).

Si bien, los eventos físicos son un prerrequisito para que sucedan los desastres, no son suficientes en sí para que se materialicen; debe existir una sociedad que por su forma particular de organización resulte incapacitada para absorber o recuperarse autónomamente de los impactos de estos eventos (Maskrey, 1998; Blaikie et al., 1996). Los riesgos, por lo tanto, representan los problemas no resueltos de las dinámicas sociales que se llevan a cabo sobre un territorio, de su escasa capacidad auto-organizativa y de la poca comprensión de los condicionantes del medio. En este sentido, se entiende como riesgo a la probabilidad de daños o pérdidas de tipo corporal, social, cultural, económico y ambiental, que pueden presentarse dentro de un territorio en un periodo determinado de tiempo, debido a la ocurrencia de fenómenos de carácter natural, socio-natural, tecnológicos o humanos no intencionales y bajo unas condiciones de vulnerabilidad ante dichos fenómenos. Las condiciones de riesgo en un municipio son dinámicas, cambian con el tiempo, tanto en sus características como en su magnitud; siempre aumentando, a no ser que se tenga una estrategia consciente indicada tanto de las condiciones de riesgo actual como de las futuras.

Por lo tanto, el proceso de Gestión del Riesgo surge a partir de la necesidad de orientar los procesos de intervención o acciones de un desarrollo municipal en función de los riesgos. Podemos decir entonces, que la Gestión del Riesgo se puede entender como un conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a conocer e intervenir las Amenazas y/o las Vulnerabilidades con el fin de mitigar los Riesgos, a través de la prevención y la reducción de los posibles efectos sobre los elementos expuestos (estructurales, funcionales y corporales) y los niveles de exposición frente a eventos potencialmente destructivos (Carreño, 2006).

En este sentido, una de las herramientas fundamentales para los procesos de Gestión del Riesgo municipal en Colombia corresponde a los estudios de riesgo que se deben realizar en el marco de lo establecido en los artículos 39 y 40 de Ley 1523 de 2012 respecto a la integración de la gestión del riesgo en la planificación territorial; así como, a partir de las disposiciones establecidas en el Decreto 1807 de 2014 (compilado en el Decreto 1077 de 2015) en cuanto a escalas y tipos de estudio para dicha integración.

Los estudios de Riesgo corresponden a los procesos que permiten la delimitación y zonificación de los factores asociados al Riesgo de desastres (Amenazas y Vulnerabilidades) a partir del análisis y evaluación técnica de los mismos. De esta manera y según lo establecido por el Decreto 1807 de 2014, se deben realizar estudios, a un nivel básico, para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo o en la expedición de nuevos Planes de Ordenamiento Territorial (POT); y a un nivel detallado, durante la ejecución de estos POT y a partir de las zonas priorizadas en los estudios de nivel básico. Por lo tanto, el Decreto 1807 de 2014 brinda las disposiciones mínimas en cuanto a las condiciones y escalas de trabajo para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo de desastres en dichos planes, así como, las condiciones técnicas mínimas para la elaboración de los estudios en torno a fenómenos como Movimientos en Masa, Inundación y Avenida Torrencial dado la recurrencia de éstos.

El municipio de Palmira, con su contexto físico-geográfico, corresponde a uno de los municipios de Colombia con las condiciones propicias para la configuración de escenarios de riesgo asociados a fenómenos de recurrencia como Movimientos en Masa, Inundaciones y Avenidas Torrenciales, entre otros; que, junto a los notorios cambios a nivel climático y la localización incorrecta de elementos estructurales y corporales, pueden agudizar el impacto de dichos fenómenos en el territorio.

A partir de lo anterior, el Departamento Nacional de Planeación, en el marco del programa de POT Modernos, llevó a cabo en el año 2018, por medio del consultor EZQUIAGA, los primeros estudios básicos para la incorporación de la gestión del riesgo en la propuesta de revisión y ajuste del POT del municipio de Palmira del año 2013. Sin embargo, el concepto generado por parte de Planeación Nacional para estos estudios, consideró que la consultoría desarrollada, no entregó a satisfacción los productos del objeto contractual y el municipio no logró, ni recibió el anunciado Plan de Ordenamiento Territorial (POT) moderno, igualmente, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, en su apoyo a la administración municipal en el año 2018, expuso y sustentó ante todos los actores del caso, las observaciones y objeciones que tenía frente al tema de las evaluaciones de amenazas realizado por el Consultor del Departamento de Planeación Nacional (DGRD de Palmira, 2021).

Con el pasivo dejado por el primer intento de estudios de evaluación y zonificación de amenazas y riesgos para la incorporación en la revisión y ajuste del POT, el municipio de Palmira, a través de la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres – DGRD, inicia en el año 2020 un gran esfuerzo de gestión con el objeto de satisfacer la necesidad de contar con estudios básicos de amenaza y riesgos como soporte para el nuevo POT. En este sentido, se logra formalizar el Convenio Interadministrativo MP968 de 2021 entre la Administración Municipal de Palmira y La Universidad del Valle – Laboratorio Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (OSSO), con el cual se comenzaron a aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos de amenaza por Inundación,

Movimiento en Masa y Avenida Torrencial en el municipio de Palmira y estudios a detalle de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inundaciones y Socavación Lateral en el Barrio Azul, corregimiento de Amaime.

En el marco de este Convenio Interadministrativo se realiza el estudio No. 7 correspondiente al estudio de amenaza por fenómeno de Avenida Torrencial a escala 1:25000 en zona rural del municipio de Palmira. Este estudio se lleva a cabo con el propósito de obtener la zonificación de la amenaza a escala básica para el fenómeno mencionado a partir de lo exigido en el Decreto 1807 de 2014, compilado en el Decreto 1077 de 2015. El presente documento técnico, muestra los insumos requeridos, los procesos metodológicos llevados a cabo; así como, los resultados obtenidos para alcanzar dicha zonificación.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Realizar la zonificación de Amenaza indicativa por el fenómeno de Avenida Torrencial (AVT) a escala 1:25000 en suelo rural del municipio de Palmira.

2.2. Específicos

- Evaluar la torrencialidad de las cuencas presentes en la zona rural montañosa del municipio de Palmira.
- Identificar la susceptibilidad por el fenómeno de Avenida Torrencial (AVT) a escala 1:25000 en zona rural del municipio de Palmira.
- Estimar la amenaza indicativa por el fenómeno de Avenida Torrencial (AVT) a escala 1:25000 en zona rural del municipio de Palmira.

3. ALCANCES DEL ESTUDIO

Los alcances del presente estudio son los siguientes:

- La zonificación de la susceptibilidad por el fenómeno de Avenida Torrencial en la zona rural, los corredores o valles aluviales de montaña y los abanicos aluviales del municipio de Palmira a escala 1:25000.
- La zonificación de la amenaza indicativa por el fenómeno de Avenida Torrencial en la zona rural, los corredores o valles aluviales de montaña y los abanicos aluviales del municipio de Palmira; a escala 1:25000.

4. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1. Área de estudio

El municipio de Palmira se encuentra ubicado en la región Suroriente del departamento del Valle del Cauca (Figura 1) y se localiza alrededor de los 03°31'39" de latitud Norte y 76°18'01" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita al Norte con el municipio de El Cerrito, al Sur con los municipios de Pradera y Candelaria, al Este con el departamento del Tolima y al Oeste con los municipios de Cali, Yumbo y Vijes.

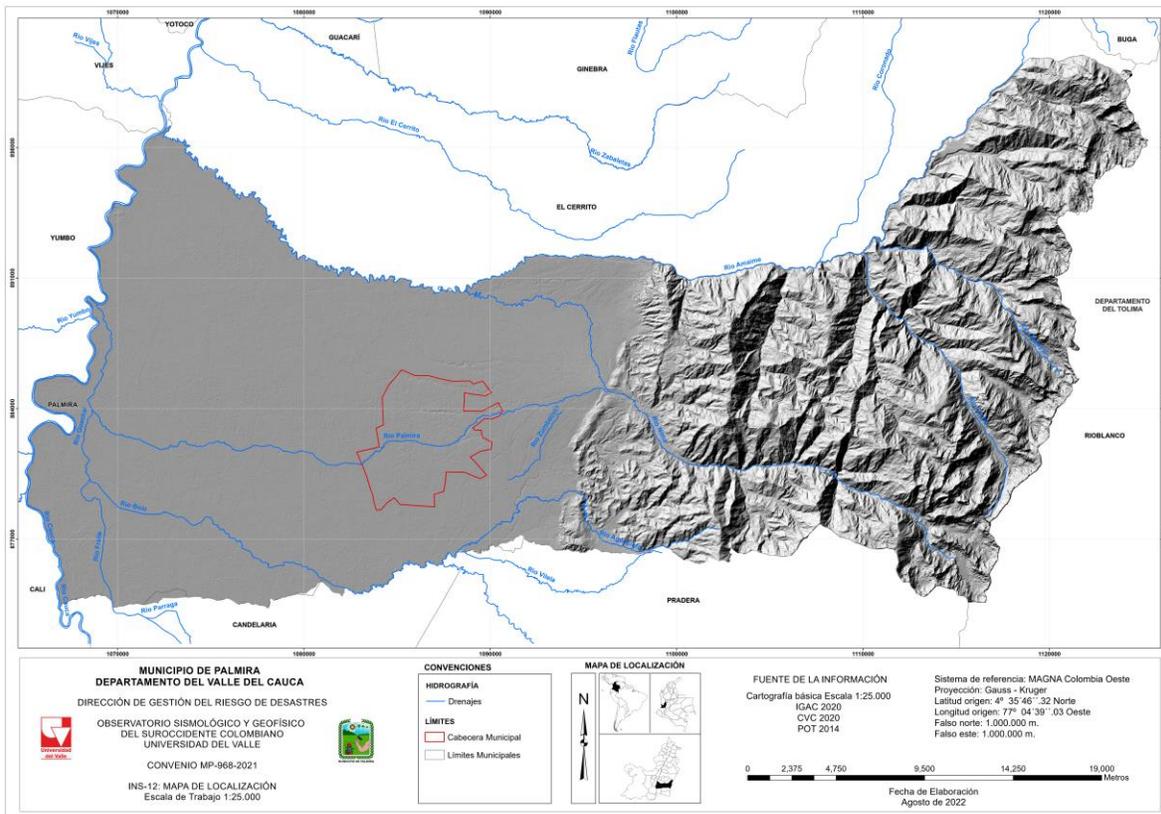


Figura 1. Localización del municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia.

El municipio cuenta con un área aproximada de 100.000 Ha y se divide en dos grandes zonas fisiográficas de Este a Oeste: la zona montañosa y de piedemonte, y la zona plana asociada al valle geográfico del río Cauca sobre la cual se encuentra ubicada la cabecera urbana del municipio. Cuenta con una cantidad aproximada de población, según proyecciones DANE a 2021, de 356.000 habitantes; la gran mayoría concentrados en la cabecera urbana con un aproximado de 281.000 habitantes y unos 74.000 habitantes en los demás centros poblados y rural disperso.

De acuerdo con el POT de 2001, el modelo territorial de Palmira se fundamenta en 6 componentes principales (Art. 8, Acuerdo No. 109 de 2001):

1. Una Estructura Ecológica Principal compuesta por un sistema de áreas protegidas en las que se destacan el Parque Nacional Natural Las Hermosas y la Reserva Forestal Central, los elementos del sistema hídrico: principalmente el Basin del río Cauca y las cuencas de los ríos Cauca, Amaime, Nima, Aguaclara, Palmira, Guachal, Bolo y Frayle; el sistema orográfico, las Reservas y los Parques municipales.
2. Una estructura urbana compuesta por una ciudad central y un sistema de asentamientos rurales jerarquizados y especializados agrupados en forma de corona en torno a la ciudad central.
3. Una aglomeración industrial y de servicios y un núcleo de equipamientos de escala regional en torno al aeropuerto internacional.
4. Una gran zona Agroindustrial plana que cubre los intersticios de las dos anteriores estructuras.
5. Unas zonas agropecuarias en torno a los centros poblados, en la franja del piedemonte y en los valles de la ladera.
6. Una red vial y férrea de equipamientos que integra los componentes anteriores.

Finalmente, estos componentes del modelo territorial se organizan político-administrativamente en un total de 16 comunas: la cabecera municipal abarca desde la comuna 1 hasta la comuna 7 con un total de 129 barrios y la zona rural abarca desde la comuna 8 hasta la comuna 16 con un total de 31 corregimientos (Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1. Comunas de la cabecera urbana de Palmira

Comuna	Barrios	No. Barrios
1	Zamorano, Urb. Los Mangos, La Vega, Camilo Torres, Urb. Brisas del Norte, Urb. Los Caimitos, Urb. Villa del Caimito, Coronado, Urb. 20 de Julio, Urb. Simón Bolívar, Urb. Villa Diana, Urb. La Esperanza, Urb. Monteclaro, Urb. Villa del Rosario, Urb. Harold Eder, Urb. Hugo Varela Mondragón, Santiago Eder, Ciudadela Comfaunión, Urb. Emmanuel, Poblado de Lourdes, Ciudad Belén, Palma Real, El Porvenir.	16
2	Bosques de Morelia, Urb. Villa Claudia, Industrial, Urb. Ignacio Torres Giraldo, Urb. Juan Pablo II, Urb. Santa Teresita, La Benedicta, Estonia, Berlín, Santa Isabel, Versalles, Mirriñao, Urb. Los Samanes, Las Mercedes, Urb. Samanes de la Merced, Urb. Almenares de la Merced, Santa María del Palmar, Urb. Campestre, Portal de las Palmas, Urb. Llanogrande, Urb. Departamental, Urb. Parque de la Merced, Urb. Plazuela de la Merced, Villas de Caña Miel, Poblado de Comfaunión, Altamira, La Orlidia, Betania de Comfandi.	28
3	Fray Luis Amigó, El Prado, Urb. Santa Ana, Emilia, La Concordia, Llanogrande, Acacias, Pomona y Brisas del Bolo, Santa Bárbara, Rivera Escobar, Olímpico, Urb. Villa de las Palmas, Urb. Bosques de Santa Bárbara, Casas de Alicanto.	14
4	Jorge Eliécer Gaitán, Loreto, Alfonso López, Colombia, Santa Rita, Obrero, San Cayetano, Bizerta, Uribe Uribe.	9
5	Prados de Oriente, San Pedro, Primero de Mayo, Providencia, La Libertad, Campestre, San Carlos, Danubio, San Jorge, San José, José Antonio Galán, Palmeras, María Cano, Popular Modelo, Municipal, Los Sauces, Urb. Siete de Agosto, Urb. El Jardín, Urb. El Bosque, Urb. Palmeras del Oriente, Palmeras de Marsella, Urb. Buenos Aires, Urb. Mejor Vivir, La Alameda, Urb. La Estrella.	25
6	Central, Colombina, Libertadores, Fátima, El Triunfo, Caicelandia, Urb. Las Flores, Urb. El Paraíso, Ciudadela Palmira, La Trinidad.	10
7	Luis Carlos Galán, Barrio Nuevo, Las Delicias, El Recreo, Santa Clara, Urb. Petruc, Urb. Las Américas, La Independencia, Chapinero, Urb. Guayacán, Sesquicentenario, Parques de la Italia, Las Victorias, Urb. El Trébol, Urb. Portales del Recreo, Urb. Los Robles, Guayacanes del Ingenio, Urb. La Palmirana, El Sembrador, Los Cochés.	20

Fuente: Alcaldía de Palmira, 2021.

Tabla 2. Comunas de la zona rural de Palmira

Comuna	Corregimiento	No. Corregimientos
8	Rozo, La Torre, La Acequia.	3
9	Matapalo, Obando, La Herradura, Palmaseca, Coronado (rural), Zamorano (rural).	6
10	La Dolores, Guanabanal, Caucaseco, Juanchito.	4
11	Bolo San Isidro, Bolo Italia, Bolo Alizal.	3
12	Amaime, Boyacá, La Pampa.	3
13	Tienda Nueva, Tablones, Guayabal, Barrancas.	4
14	La Zapata, Aguaclara, Ayacucho.	3
15	Combia, Toche.	2
16	Potrerrillo, Caluce, Tenjo.	3

Fuente: Alcaldía de Palmira, 2021.

El estudio de amenaza por el fenómeno de Avenida Torrencial a escala 1:25000 se concentra sobre las zonas asociadas a los corredores o valles aluviales de la zona montañosa del municipio, así como en las zonas de abanicos aluviales localizadas sobre las áreas de piedemonte intramontano y de piedemonte del flanco occidental de la cordillera Central. Los corregimientos donde se pueden encontrar estas zonas fisiográficas son Combia, Toche, Ayacucho, Tenjo, Tablones, Potrerillo, Calucé, La Zapata, Aguaclara, Barrancas, Tienda Nueva y Guayabal.

5. MARCO CONCEPTUAL

5.1. Avenida Torrencial

Una avenida torrencial es un tipo de movimiento en masa caracterizado por el flujo rápido de una mezcla caótica de sólidos y agua que pueden movilizarse a grandes velocidades. Estos flujos se desplazan generalmente por los cauces de las quebradas, llegando a transportar volúmenes importantes de sedimentos y escombros, con velocidades peligrosas para los habitantes e infraestructura ubicados en las zonas de acumulación. Dependiendo de los materiales involucrados y de los tipos de flujo que se dan, es posible definir una amplia variedad de fenómenos, todos con posibilidades de presentarse en cuencas de montaña (Caballero, 2011).

Las avenidas torrenciales son fenómenos naturales que, aunque tienen una ocurrencia relativamente baja, por su gran potencial destructivo son de particular interés para evaluar los riesgos naturales a los que se encuentra sometida una determinada cuenca. Este fenómeno está restringido a cauces relativamente pequeños de ríos de montaña y no se produce en ríos con cuencas grandes, debido a que los agentes naturales que las provocan afectan sólo áreas pequeñas (Montoya y Montoya, 2009). Según Gemma (2007), las avenidas torrenciales se generan por causas hidrometeorológicas (lluvias concentradas), sísmicas, de inestabilidad de vertientes (bloqueo de un cauce por un deslizamiento y posterior ruptura del dique), potencial hidrogravitatorio (pendiente), erupciones volcánicas y deshielo. Las avenidas torrenciales también se pueden presentar por otras causas como son deshielo al final del invierno o lluvias concentradas asociadas a ciclones tropicales.

5.1.1. Tipos de procesos de las avenidas torrenciales

Según INGEOMINAS y CVC (2001), los procesos generadores de daños en las avenidas torrenciales tienen el concepto de “solicitaciones”, el cual pretende representar de una manera objetiva las distintas formas de interacción entre las características del fenómeno y los diferentes elementos expuestos, para facilitar el análisis de la intensidad del evento y sus posibles daños. En el caso de las avenidas torrenciales, se considera, de manera simple pero representativa, los siguientes procesos de daño o “solicitaciones”: impactos, presiones, socavación lateral y acumulaciones.

- **Impactos:** se considera la sollicitación generada por elementos de gran tamaño (bloques y troncos), con altas velocidades, que producen fuerzas puntuales, causando en muchos casos, daños severos a las estructuras y, en general a todo elemento que encuentre a su paso.

- **Presiones:** es la solicitud generada por flujo de gravas y arenas que se desplazan a gran velocidad y que ejercen fuerzas uniformes sobre las superficies de contacto con los elementos, permitiendo así, una mejor respuesta de éstos. En la zona de presión lateral es precisamente en donde la avenida torrencial choca con los elementos expuestos.
- **Socavación lateral:** se entiende como la erosión hídrica intensa de algunas márgenes de cauces y acequias que afectan la base de los taludes, desestabilizando áreas superficiales; el grado de afectación puede variar dependiendo de la magnitud y de los elementos ubicados en el área de influencia.
- **Acumulaciones:** son procesos de deposición de materiales generalmente finos que, más que una solicitud física, se pueden considerar una afectación por obstrucción y taponamiento de ciertas estructuras. Ese grado de afectación dependerá de la magnitud de la acumulación, en donde se tendrá muy en cuenta la posibilidad de recuperación del elemento.

5.1.2. Amenaza

Según la ley 1523 del 2012 la Amenaza se define como “*el peligro latente de que un evento natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdidas de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales*”.

5.1.3 Amenaza Indicativa por AVT

En relación a las condiciones técnicas para la elaboración de los estudios básicos con fines de la incorporación de manera gradual la gestión del riesgo en la planificación territorial en Colombia, se tiene que, en torno a la zonificación de la amenaza por avenida torrencial, el Artículo 10 del Decreto 1807 de 2014 establece las especificaciones mínimas para su determinación; así, de manera específica, el numeral 2 del citado artículo establece la utilización, como mínimo de los siguientes insumos:

- a. *Geomorfología*
- b. *Estudio hidrológico de la cuenca, orientado al flujo torrencial, considerando el ciclo de sedimentos.*
- c. *Análisis hidráulico del área a zonificar, teniendo en cuenta factores detonantes como precipitación o movimientos en masa.*
- d. *La base cartográfica que se emplee en la zonificación corresponderá a una escala 1:2.000.”*

Es preciso señalar que, de estos insumos, los asociados a los Literales c y d implican de entrada una complejidad mayor en cuanto a la disponibilidad de información para la mayoría de los municipios; sobre todo la referente al Literal d, el cual se percibe de manera contradictoria a lo que el mismo Decreto establece como escala de trabajo para un estudio básico en zona rural (1:25.000).

En este sentido, y a partir de los recursos disponibles para la realización de este estudio a escala 1:25.000 en zona rural del municipio de Palmira, la disponibilidad de información es limitada o escasa, por lo cual solo se pudo contar con los insumos exigidos en el Literal a de manera completa, el Literal b de manera parcial y los Literales c y d sin información. Con dicha disponibilidad, se decidió la aplicación de un método de carácter Heurístico que toma como base de partida el análisis geomorfológico y la información histórica disponible de los eventos por AVT en el municipio para realizar una estimación de las zonas de amenaza o zonas propensas a la ocurrencia de este fenómeno en el área rural; esto, por medio de una aproximación metodológica que no considerara un proceso de modelación hidrodinámica y, por lo tanto, que no considerara lo asociado a los ciclos de sedimentos.

De esta manera, se considera que una zonificación de amenaza para un fenómeno tan complejo como el de AVT, no puede ser analizada en términos de probabilidad de ocurrencia si no se cuenta con una modelación de los flujos hiperconectados, que brinde los parámetros asociados mínimamente con las velocidades y las alturas de dichos flujos. Con esta dicotomía entre el carácter teórico del concepto de amenaza y su evaluación, y de los requerimientos mínimos del Decreto y la disponibilidad de los insumos debido a los recursos disponibles, se plantea para el presente estudio un análisis o estimación de una amenaza de carácter indicativo.

Tomado como punto de partida la definición de amenaza según la Ley 1523 de 2012, se establece que la amenaza indicativa se refiere a la identificación de un peligro latente por un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental que, con el propósito del cumplimiento de la normativa y los estándares de la gestión del riesgo, se puede caracterizar mediante la evaluación cualitativa o verificación de la presencia de una lista de factores que hacen propensa la ocurrencia del fenómeno en cualquiera de las etapas de la gestión del riesgo, y cuya severidad sea suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Bajo este criterio y teniendo en cuenta la complejidad del fenómeno de AVT, la estimación de una amenaza indicativa permite generar una herramienta de carácter preventivo en cuanto a los procesos de la toma de decisión sobre el ordenamiento del territorio, ya que le entrega al municipio un primer escenario de amenaza que indica o identifica las zonas sobre las cuales se debe fijar la mirada para la realización de estudios de carácter más específico o a una mayor escala de detalle.

5.1.4 Otras definiciones

a) **Fuente:** Lugar o sitio donde se puede generar un evento.

b) **Inundación:** según el Diccionario de la Real Academia Española (RAE), corresponde a la acción y efecto de inundar, es decir, cubrir con agua los terrenos y a veces las poblaciones. La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en España (MIJ, 1995), define inundación como la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada (IDEAM, 2017). En esencia, es un evento natural que se produce en las corrientes de agua y/o lluvias intensas, que, al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y la capacidad hidráulica de la red de drenaje, las aguas se desbordan e inundan las llanuras de inundación, generalmente, terrenos aledaños a los cursos de agua.

c) **Inundación aluvial:** se produce cuando hay lluvias persistentes y generalizadas dentro de una gran cuenca, generando un incremento paulatino de los caudales de los grandes ríos hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento; se produce entonces el desbordamiento y la inundación de las áreas bajas y planas aledañas al cauce principal. Este tipo de crecientes son inicialmente lentas y tienen una gran duración (CVC-Universidad del Valle, 2010).

d) **Susceptibilidad:** “es el grado de predisposición que tiene una fuente a que en ella se genere un evento (Escobar, 2007). La susceptibilidad en los estudios de análisis y evaluación de amenazas constituye la base inicial y el primer paso para el análisis y zonificación de amenazas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).” (Grupo técnico CORCUENCA – IDEAM, 2019).

e) **Sedimentación:** Deposición de material sólido producido por movimientos de masa en laderas por erosión superficial, en cauces de ríos, por inundaciones, avenidas torrenciales, aludes, marejadas o tsunamis (OSSO, 2009).

5.1.5 Clasificación de flujos en ríos

El tipo de flujo en un cauce natural puede ser clasificado según la concentración o volumen relativo de sedimentos que transporta. Dicho esto, es posible clasificar los flujos en tres clases descritas a continuación:

- **Flujos de baja concentración:** corresponden a flujos que se comportan como fluidos newtonianos, cuyas cantidades de sedimentos son pequeñas y no alcanzan a alterar las propiedades hidrodinámicas del agua. Según Costa (1984), los flujos de baja concentración son aquellos con un valor de C_s (Relación entre volumen sólido y volumen líquido), es inferior al 25% y cuya concentración volumétrica C_v (Relación entre volumen sólido y volumen total de aguas más sedimentos), es inferior al 20%, con una densidad

de mezcla (ρ), inferior o igual a 1.3 g/cm^3 . Meunier (1991) define los flujos de baja concentración como aquellos cuya concentración volumétrica (C_v), no supera el 5.0 % y cuya densidad es menor o igual a 1.3 g/cm^3 .

- **Flujos hiperconcentrados (o superconcentrados):** en esta clase se incluyen las avenidas torrenciales o flujos de lodos, donde la principal característica de esta clase es que la concentración de sedimentos es tal que modifica el comportamiento hidrodinámico del agua, específicamente las características reológicas (viscosidad y esfuerzo cortante) del flujo. Se garantizan por ser monofásicos u homogéneos. Los flujos hiperconcentrados, según Costa (1984), son aquellos que cuentan con una concentración volumétrica (C_v) entre el 20% y el 100%, con una densidad superior a 1.3 g/cm^3 . Por otra parte, Meunier (1991) propone el rango de 5% a 60% de concentración de sedimentos (C_s), para considerarse un flujo como flujo hiperconcentrado.

- **Lavas torrenciales o corrientes de derrubios:** se caracteriza por ser un flujo visco-plástico y tener altas concentraciones de material sólido, según Costa (1994), las lavas torrenciales son aquellas cuya concentración de sedimentos (C_s), es superior al 100% y la densidad de mezcla superior a 1.8 g/cm^3 . Por su parte Meunier (1991), clasifica las lavas torrenciales como aquellos flujos con concentraciones de sedimentos (C_s) entre el 60% y 230%.

La concentración de sedimentos (C_s) y la concentración volumétrica (C_v) se calculan con las siguientes expresiones.

$$C_s = V_s/V_l$$

$$C_v = V_s/(V_s + V_l)$$

$$C_v = C_s/(C_s + 1)$$

Donde:

V_s Volumen sólido

V_l Volumen líquido

Ahora bien, la concentración por peso C_w (relación entre el peso de los sedimentos y volumen líquido), se calcula en función de la concentración volumétrica de sedimentos y la concentración de sedimentos C_s , tal que:

$$C_w = \gamma_s C_s$$
$$C_w = \frac{\gamma_s C_v}{1 - C_v}$$

Donde:

γ Peso específico de los sedimentos (en general se asume $2\ 650\ \text{kg/m}^3$)

Ahora bien, se calcula la concentración de sedimentos por peso, para un valor de $C_s = 5.0\ %$:

$$C_w = 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.05 = 132.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Según lo anterior, para el criterio de Meunier, donde se considera un $C_s = 5\ %$ como límite inferior para clasificar un flujo, como flujo hiperconcentrado, se obtiene una concentración de sedimentos de $132.4\ \text{kg/m}^3$, lo cual se considera lo suficientemente alto, para un río; luego, en el marco del presente estudio, se decide adoptar el criterio de Meunier (1991) para la clasificación de flujos.

Meunier (1991), define los flujos con baja concentración como “fluviales”, los cuales se comporta como fluido newtoniano y tienen válidas dentro de la hidráulica clásica y los flujos hiperconcentrados como “flujos torrenciales”, porque en estos no es posible tratar independientemente la fase sólida y la fase líquida para efectos de cálculo. En ese orden de ideas, los flujos hiperconcentrados (“avenidas torrenciales”, según lo antes mencionado), son flujos que afectan las propiedades reológicas del fluido (entendiéndose flujo como mezcla líquido y sólido). En la Figura 2 se presenta la clasificación de los flujos según Meunier (1991).

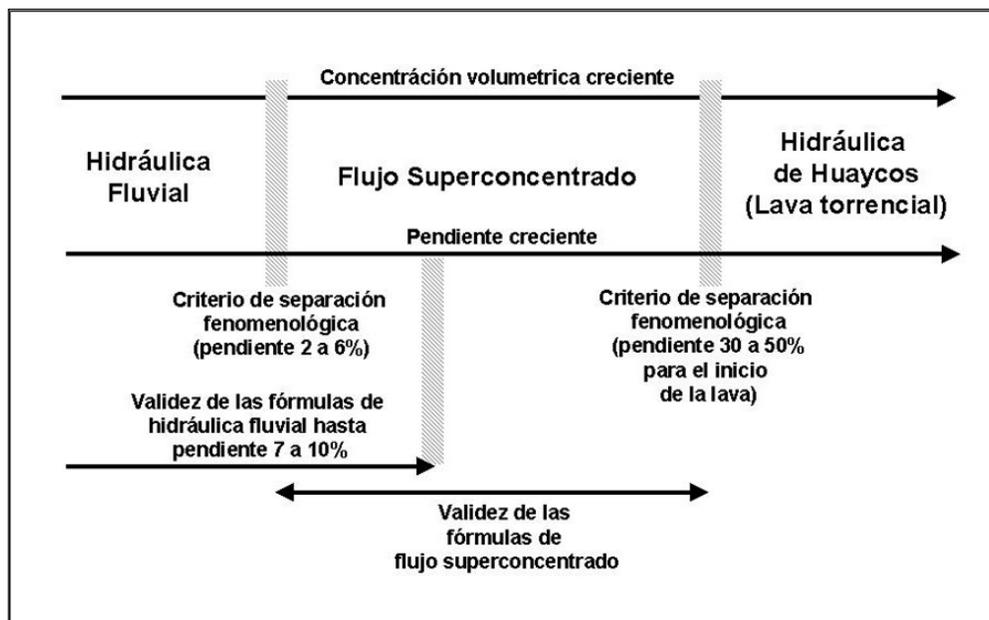


Figura 2. Clasificación de flujo en ríos

Fuente: Meunier, 1991.

6. METODOLOGÍA

En relación a las condiciones técnicas para la elaboración de los estudios básicos con fines de la incorporación de manera gradual la gestión del riesgo en la planificación territorial en Colombia, se tiene que, en torno a la zonificación de la amenaza por avenida torrencial, el Artículo 10 del Decreto 1807 de 2014 establece las especificaciones mínimas para su determinación; así, de manera específica, el numeral 2 del citado artículo establece la utilización, como mínimo de los siguientes insumos:

- a. *Geomorfología*
- b. *Estudio hidrológico de la cuenca, orientado al flujo torrencial, considerando el ciclo de sedimentos.*
- c. *Análisis hidráulico del área a zonificar, teniendo en cuenta factores detonantes como precipitación o movimientos en masa.*
- d. *La base cartográfica que se emplee en la zonificación corresponderá a una escala 1:2.000.”*

Es preciso señalar que, de estos insumos, los asociados a los Literales c y d implican de entrada una complejidad mayor en cuanto a la disponibilidad de información para la mayoría de los municipios; sobre todo la referente al Literal d, el cual se percibe de manera contradictoria a lo que el mismo Decreto establece como escala de trabajo para un estudio básico en zona rural (1:25.000).

En este sentido, y a partir de los recursos disponibles para la realización de este estudio a escala 1:25.000 en zona rural del municipio de Palmira, la disponibilidad de información es limitada o escasa, por lo cual solo se pudo contar con los insumos exigidos en el Literal a de manera completa, el Literal b de manera parcial y los Literales c y d sin información. Con dicha disponibilidad, se decidió la aplicación de un método de carácter Heurístico que toma como base de partida el análisis geomorfológico y la información histórica disponible de los eventos por AVT en el municipio para realizar una estimación de las zonas de amenaza o zonas propensas a la ocurrencia de este fenómeno en el área rural; esto, por medio de una aproximación metodológica que no considerara un proceso de modelación hidrodinámica y, por lo tanto, que no considerara lo asociado a los ciclos de sedimentos.

De esta manera, se considera que una zonificación de amenaza para un fenómeno tan complejo como el de AVT, no puede ser analizada en términos de probabilidad de ocurrencia si no se cuenta con una modelación de los flujos hiperconectados, que brinde los parámetros asociados mínimamente con las velocidades y las alturas de dichos flujos. Con esta dicotomía entre el carácter teórico del concepto de amenaza y su evaluación, y de los requerimientos mínimos que establece el Decreto y la disponibilidad de los recursos necesarios e insumos, se plantea para el presente estudio un análisis o estimación de una amenaza de carácter indicativo.

6.1. Evaluación de la torrencialidad de las cuencas presentes en la zona de estudio

6.1.1 Índice de Melton

Se trata de un índice empleado para identificar avenidas torrenciales, con potencial de flujos de detritos; este parámetro ha sido estudiado por diferentes autores a lo largo de los años. El índice de Melton (IM) se define como el producto entre la diferencia de la altura máxima y la altura mínima y la raíz cuadrada del área de la cuenca (S), como se expresa en la siguiente ecuación:

$$IM = (H_{max} - H_{min}) \times S^{-0.5}$$

Donde:

H_{max} : Elevación máxima (m)

H_{min} : Elevación mínima (m)

S : Área de la superficie de la microcuenca hidrográfica (km²)

El cálculo del Índice de Melton parte de una previa delimitación de las cuencas, de la cual se extrae el área de estas, y de un modelo de elevación digital de terreno que cubra toda el área de la cuenca, para extraer los valores de las elevaciones máxima y mínima.

Los rangos de clasificación de este índice varían según los autores; se indican a continuación los rangos propuestos por (Wilford, Sakals, Innes, & Sidle, 2004):

- Inundación $IM < 0,3$
- Flujo de detritos $0,3 < IM < 0,6$
- Movimiento de masa $IM > 0,6$

En el estudio de estos autores se analizaron diferentes parámetros en los que se logra relacionar los eventos de procesos hidrogeomórficos con el Índice de Melton, tal como se muestra en la Figura 3.

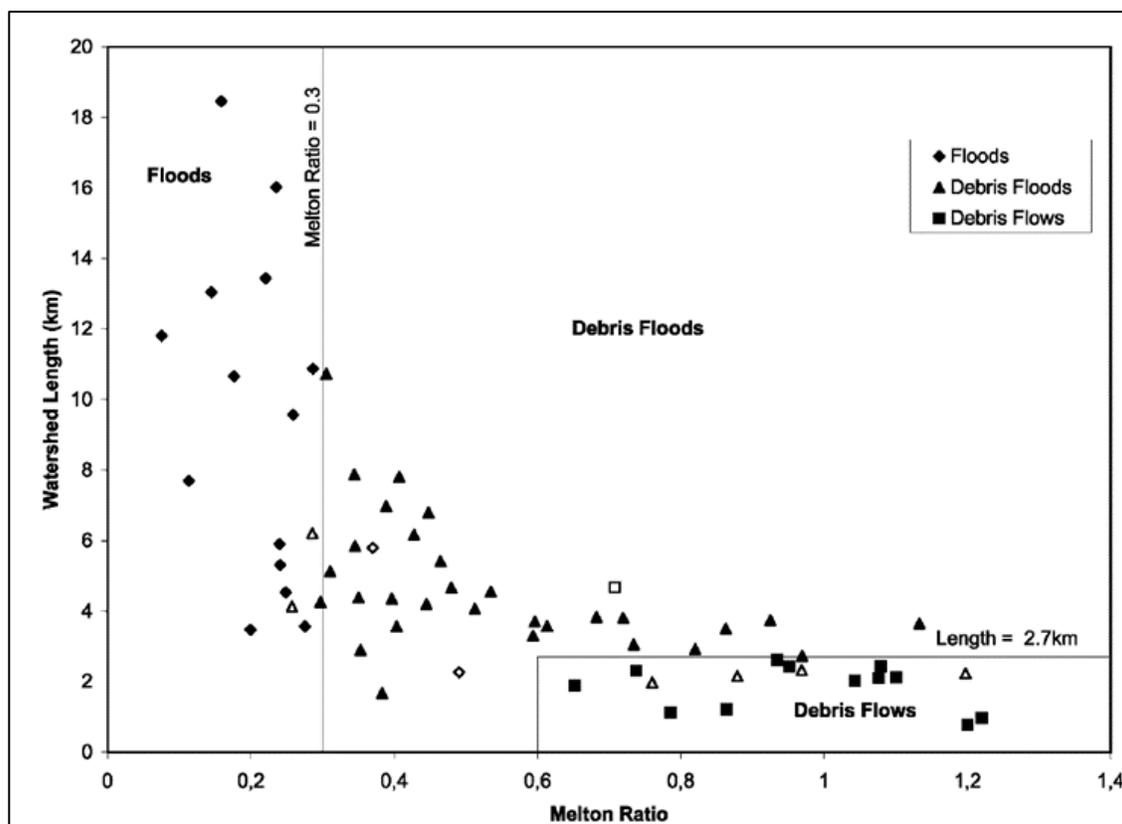


Figura 3. Resultados y clasificación de procesos hidrogeomórficos según el Índice de Melton y la longitud de la cuenca.

Fuente: (Wilford, Sakals, Innes, & Sidle, 2004)

El 95% de los eventos estudiados por Bertrand pueden clasificarse de la siguiente manera (Bertrand, Liébault, & Piégay, 2013):

- Flujo de detritos $0,29 < IM < 1,71$
- Inundación $0,10 < IM < 0,90$

(Lionel E, Kostaschuk, & MacDonald, 1987) establecieron la siguiente clasificación:

- Inundación $IM < 0,25$
- Zona de transición $0,25 < IM < 0,30$
- Flujo de detritos $IM > 0,30$

Existen otros estudios adicionales, pero es posible observar que la mayoría de los estudios convergen a indicar que se puede considerar flujo potencial de detritos y, por ende, avenidas torrenciales, para valores del Índice de Melton (IM) superiores a 0,30. Luego, para efectos de este estudio se considera la clasificación anterior (Lionel E, Kostaschuk, &

MacDonald, 1987), la cual es congruente a su vez con los rangos presentados por otros autores. Luego, la zonificación de la susceptibilidad por avenidas torrenciales a través del índice de Melton se establece así:

- Susceptibilidad baja $IM < 0,25$
- Susceptibilidad media $0,25 < IM < 0,30$
- Susceptibilidad alta $IM > 0,30$

6.1.2 Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)

En los Lineamientos conceptuales y metodología para la Evaluación Regional del Agua – ERA, documento presentado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, se encuentra el índice de Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET), el cual fue desarrollado con el objetivo de identificar aquellas cuencas con una alta susceptibilidad a eventos torrenciales. Este índice corresponde a uno de los indicadores de riesgo, concebidos en el documento antes mencionado.

Para el análisis del IVET se requiere relacionar los índices morfométricos de torrencialidad (IMT) y el Índice de Variabilidad (IV), los cuales se definen a continuación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2013).

“El Índice morfométrico de torrencialidad (IMT) es la relación entre los parámetros morfométricos, tales 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 la capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca y 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).”

“El Índice de variabilidad muestra el comportamiento de los caudales en una determinada cuenca definiendo una cuenca torrencial como aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, donde existen diferencias grandes entre los caudales mínimos que se presentan y los caudales máximos.”

- Índice Morfométrico de torrencialidad (IMT)

El índice morfométrico se compone del resultado de la relación de tres variables morfométricas, como son, el coeficiente de compacidad (K_c), la pendiente media de la cuenca (S_o) y la densidad de drenaje (DD); estas variables determinan el comportamiento de la concentración de la escorrentía, la capacidad de infiltración, la velocidad y la capacidad de arrastre de una cuenca, a partir de elementos de análisis estudiados con Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El coeficiente de compacidad (K_c), también conocido como índice de Glavelius, se calcula según la expresión:

$$K_c = \frac{P_{cuenca}}{2\pi \left(\frac{A_{cuenca}}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

P_{cuenca} Perímetro de la cuenca, expresado en km

A_{cuenca} Área de la cuenca, expresada en km^2

En la Tabla 3 se presenta la categorización de las tres variables morfométricas (coeficiente de compacidad (K_c), la pendiente media de la cuenca (S_o) y densidad de drenaje (DD)).

Tabla 3. Categorización de variables para el índice morfométrico

Índice morfométrico	Escala	Área de la cuenca de drenaje (km^2)	Categorías				
			1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km^2)	1:10.000	<15	<1,50	1,51 – 2,00	2,01 – 2,50	2,51 – 3,00	> 3
	1:25.000	16 a 50	<1,20	1,21 – 1,80	1,81 – 2,00	2,01 – 2,50	> 2,5
	1:100.000	>50	<1,00	1,01 – 1,50	1,51 – 2,00	2,01 – 2,50	> 2,5
			Baja	Moderada	Moderada Alta	Alta	Muy Alta
Pendiente media de la cuenca (%)	1:10.000	<15	<20	21 – 35	36 – 50	51 – 75	>75
	1:100.000	>50	<15	16 – 30	30 – 45	46 – 65	>65
			Accidentado	Fuerte	Muy Fuerte	Escarpado	Muy Escarpado
Coeficiente de compacidad			<1,625	1,376 -1,500	1,251- 1,375	1,126 – 1,250	1,00 – 1,125
			Oval-oblonga a rectangular-oblonga	Oval-redonda a oval-oblonga	Casi redonda a oval-redonda		

Fuente: (IDEAM, 2013)

Una vez se ha categorizado cada una de las 3 variables morfométricas para cada cuenca, se clasifica el nivel de la susceptibilidad asociada al Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) relacionando las diferentes variables, tal como se muestra en la Figura 4.

		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



Figura 4. Relación para categorización del Índice Morfométrico de Torrencialidad
 Fuente: IDEAM, 2013

En el Índice Morfométrico de Torrencialidad una condición o categoría muy alta corresponde a áreas caracterizadas por ser inestables y/o presentar potencial de inestabilidad, que responden rápida y violentamente frente a eventos de precipitación fuertes, favoreciendo las avenidas torrenciales de forma recurrente. Por otra parte, la categoría alta, refleja una respuesta hidrológica alta asociada a una cobertura de suelo que permite procesos torrenciales frecuentes durante periodos de lluvia.

- Índice de variabilidad (IV)

A partir de la curva de duración de caudales de la cuenca se obtiene el índice de variabilidad, el cual muestra el comportamiento de la variabilidad de los caudales en una cuenca determinada. Las cuencas torrenciales, es decir, donde existe mayor probabilidad de presentar eventos torrenciales, se relacionan con una variabilidad alta de la curva de duración de caudales, es decir, cuando se presentan grandes diferencias entre los caudales mínimos y los caudales máximos. Las cuencas con una menor variabilidad suelen corresponder, por su parte, a cuencas con capacidad para transportar los caudales a través de su red de drenaje (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2013).

La curva de duración de caudales, graficada en escala logarítmica, muestra una tendencia lineal, por lo cual puede obtenerse el índice de variabilidad a partir de la expresión siguiente:

$$IV = \frac{\log Q_i - \log Q_f}{\log X_i - \log X_f}$$

Donde:

Q_i y Q_f : Caudales tomados de la curva de duración de caudales

X_i y X_f : Porcentaje de tiempo en los que se exceden los caudales Q_i y Q_f

Por otra parte, la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, define el cálculo de este índice de la siguiente manera:

$$IV = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum (\log Q_i - X)^2}$$

$$X = \log\left(\frac{\sum Q_i}{n}\right)$$

Donde:

Q_i Caudales tomados de la curva de duración de caudales

n Cantidad de total de datos estudiados

Se realiza este cálculo empleando los percentiles 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 95 de las curvas de duración de caudales de cada una de las cuencas, con lo cual se obtiene el índice de variabilidad de cada cuenca. Luego, la susceptibilidad por avenidas torrenciales

de la cuenca se establece según el valor del Índice de variabilidad calculado para la cuenca, como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Categorización del índice de variabilidad

Índice de variabilidad	Susceptibilidad
0,10	Muy baja
0,10 – 0,37	Baja
0,37 – 0,47	Media
0,47 – 0,55	Alta
> 0,55	Muy alta

Fuente: (IDEAM, 2013)

Finalmente, se relacionan el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) y el Índice de Variabilidad (IV) a través de la matriz indicada en la Tabla 5, la cual clasifica los niveles de susceptibilidad frente a eventos torrenciales, es decir, la clasificación del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET).

Tabla 5. Categorización del Índice de Vulnerabilidad 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	Baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	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, 2013)

6.2. Análisis de la Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales

6.2.1 Susceptibilidad Geomorfológica

La susceptibilidad geomorfológica aplicada al estudio de avenidas torrenciales evalúa la posibilidad de que un terreno sea afectado por eventos de avenida torrencial mediante el análisis de las geoformas y depósitos generados durante o tras la ocurrencia de este tipo de eventos. Mediante el análisis geomorfológico se pueden conocer, además, las geoformas que favorecen la generación de este tipo de procesos, las zonas potencialmente afectadas y las geoformas que favorecen el aporte de material durante el evento. Por otra parte, el análisis geológico permite conocer el tipo, la textura y la disposición de los materiales que serían o son incorporados en las avenidas torrenciales y que modifican las condiciones del fluido; el tamaño y la disposición de los materiales permiten conocer la capacidad del flujo para transportar sedimentos.

La susceptibilidad al flujo de escombros está relacionada con la erosión y el potencial de deslizamientos de tierra sobre las laderas de las cuencas de drenaje, así como, con el volumen de sedimento erosionado almacenado en canales de drenaje. La caracterización de los parámetros morfológicos de la cuenca de drenaje, el mapeo de la roca parental, la geología superficial, y la estimación del volumen de sedimento erosionable del canal proporciona información sobre los flujos de escombros futuros (UTAH Geological Survey, 2005).

Los métodos geológico – geomorfológicos analizan las formas del terreno y los depósitos generados durante o tras una avenida torrencial para evaluar la posibilidad de ocurrencia de un evento de avenida torrencial y su potencialidad. Para la determinación de la susceptibilidad por geomorfología se tuvieron en cuenta los criterios considerados en la “*Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Avenida Torrencial*” del SGC para la caracterización de avenidas torrenciales. En este sentido, la metodología utilizada sigue los pasos descritos en la Figura 5.



Figura 5. Pasos metodológicos para la estimación de la susceptibilidad geomorfológica

Fuente. Elaboración Propia

Para evaluar la susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales dentro de las cuencas, se ha tomado como insumos base el mapa geomorfológico y el mapa de unidades geológicas superficiales ajustados a la escala del presente trabajo; el desarrollo de estos

se puede consultar en el respectivo apartado. Así como el inventario de eventos históricos asociados al fenómeno de avenida torrencial y los parámetros e índices morfométricos calculados para cada una de las cuencas identificadas en la zona rural del municipio.

- **Inventario de eventos de avenida torrencial**

Conocer los procesos naturales que han afectado a una región a lo largo de la historia es fundamental para iniciar una evaluación de amenaza. En el caso de las avenidas torrenciales, el reconocimiento del territorio y la identificación de los afluentes que han presentado este tipo de procesos son de vital importancia (Servicio Geológico Colombiano, 2021). Por esta razón, para el presente análisis se tomó como base el inventario de eventos de avenidas torrenciales en el municipio de Palmira elaborado en el Estudio 1 de historicidad desarrollado en el marco del presente convenio, en el cual se realizó una evaluación rigurosa de las fuentes de información disponible con el fin de elaborar un insumo que permitiera tener un conocimiento más acertado del territorio.

- **Identificación de Características Morfométricas y Climáticos Particulares de Cuencas Torrenciales**

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & UNAL (2013) en la “*Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa*” del SGC, los movimientos en masa tipo flujo (de lodos y detritos) que han sido clasificados como avenida torrencial, se presentan en cuencas con características morfométricas y climáticos particulares tales como tamaño de la cuenca, forma de la cuenca, pendiente media de las laderas, pendiente longitudinal del cauce, geomorfología y precipitación. Por lo que se realizó un análisis y comparación de estas características en las cuencas del municipio y se calculó para cada una de ellas el Índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET), así como el índice de Melton, con el fin de conocer las cuencas que presentan los parámetros morfométricos y características que puedan favorecer la generación de flujos dentro de la misma; y en estas se puedan identificar las geoformas que indican posibles zonas de iniciación, transporte y sedimentación.

- **Identificación y Selección de Geoformas Indicativas**

La susceptibilidad geomorfológica utiliza como insumo base el mapeo de unidades y subunidades geomorfológicas. Para el caso particular del municipio de Palmira en su zona rural se elaboró un mapeo de componentes geomorfológicos. El desarrollo de este insumo puede ser consultado en el apartado de geomorfología.

En el análisis de procesos tipo flujo, la “*Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa*” del SGC recomienda considerar las geoformas cuyo origen esté relacionado principalmente con corrientes torrenciales que desembocan en zonas planas (denudacionales y fluviales) y que son indicativas de procesos tipo flujo / avenidas torrenciales (Tabla 6); que son útiles en la delimitación de las zonas afectadas. No obstante,

durante la ocurrencia de flujos clasificados como avenida torrencial pueden existir zonas de aporte de sedimento principalmente relacionadas con depósitos removidos por corrientes (Tabla 7), estas pueden ser tenidas en cuenta para complementar el análisis. Cabe destacar que dentro del municipio de Palmira se identificaron geoformas de origen denudacional, fluvial, estructural, glacial y antropogénico.

Tabla 6. Geoformas indicativas de proceso tipo flujo / avenidas torrenciales

AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	UNIDAD/SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA
DENUACIONAL	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado
	Lóbulo y cono de avalancha de detritos
	Lóbulo y cono de avalancha de rocas
FLUVIAL	Abanico aluvial
	Abanico aluvial antiguo
	Abanico aluvial subreciente
	Abanico aluvial actual
	Abanico aluvial incisado
	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados (bajadas)
Cono de deyección	

Tabla 7. Geoformas indicativas de zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales

AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	UNIDAD/SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA
VOLCÁNICO	Cono lahárico
	Escarpe de flujo lahárico aterrazado
	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado
	Flujo lahárico aterrazado
	Flujo piroclástico aterrazado
	Lóbulo de flujo lahárico
GLACIAR	Lóbulo de flujo piroclástico
	Cono y lóbulo de gelifracción
	Conos glaciofluviales
FLUVIAL	Flujo volcánico glaciado
	Albardones o dique natural
	Complejo de orillales
	Planicie aluvial confinada
	Plano o llanura de inundación
	Terraza de acumulación
	Escarpe de terraza de acumulación
	Terraza de acumulación subreciente
Terraza de acumulación antigua	
Plano anegadizo	

Con el fin de refinar las geoformas indicativas de zonas de depósito y de zonas de aporte mediante fotointerpretación, se tuvieron en cuenta los criterios para la cartografía de avenidas torrenciales disponibles en la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales (Servicio Geológico Colombiano, 2021) (Figura 6).

Morfología	<ul style="list-style-type: none"> • Tramos denudados lineares que siguen las quebradas o corrientes; evidencia de fuerte erosión y vegetación removida; algunas veces marcadas por diques de sedimentos. • La quebrada, torrente o corriente donde se dio lugar el flujo muestra una rugosidad superficial más alta que en las áreas circundantes. • Presencia de geoformas indicativas de depósito como abanicos, fases canalizadas dentro de la cuenca con depósitos de detritos relictos y cicatrices. • Microrrelieves paralelos, adyacentes o sobre las corrientes, asociados a la acumulación de sedimentos.
Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos recientes muestran ausencia completa de vegetación; flujos más antiguos son cubiertos por vegetación secundaria o de transición baja. • Los flujos de detritos suelen dejar una gran área de suelos o roca desnudos que parecen brillar en la región de la longitud de onda visible comparado con las áreas vegetadas circundantes, las cuales son oscuras (esto aplica para imágenes pancromáticas, en el caso de imágenes sentinel la vegetación presenta tonalidades rojizas). • Áreas elongadas de tonalidad clara en la cabecera de las quebradas o solo debajo de los quiebres de la pendiente.
Drenaje	<ul style="list-style-type: none"> • Senda de detritos a lo largo del paso del flujo; evidencia de bifurcación sobre el abanico de detritos; evidencia de bloqueo temporal de la corriente por depósitos en la unión con canales tributarios. • El modelo del drenaje presenta anomalías con cauces rodeando lóbulos de depósitos. • Alteración un cauce por el depósito de un abanico.

Figura 6. Criterios para la cartografía de avenidas torrenciales mediante fotointerpretación.

Fuente. Tomado de SGC, 2021

- **Clasificación de Susceptibilidad a partir de geoformas indicativas**

Las geoformas indicativas de depósito son el criterio principal para realizar la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales, utilizado para evaluar de forma relativa la susceptibilidad por avenidas torrenciales e inundaciones (Lancaster et al., 2012; Rodríguez et al., 2017; Youberg et al., 2008) en (Servicio Geológico Colombiano, 2021).

El (Servicio Geológico Colombiano, 2021) propone la clasificación de estas geoformas indicativas de depósito fluvio-torrencial según su edad relativa en categorías de susceptibilidad geomorfológica reciente/alta, subreciente/media y antigua/baja basado en el concepto de temporalidad o edad relativa; es decir, las geoformas que se encuentran más cerca al cauce actual en términos de distancia transversal y altura se consideran más recientes, y por tanto con mayor potencial a ser nuevamente ocupadas por avenidas torrenciales, contrario a aquellas que se encuentran más distales y/o más elevadas (Figura 7) (Bowman, 2019; Lancaster et al., 2012; Robbins et al., 2008; Youberg et al., 2008) en (Servicio Geológico Colombiano, 2021). Estas a su vez deben tener en cuenta la representación cartográfica del inventario de eventos, cuyas zonas de depósito deben estar contenidas en las geoformas indicativas de depósito más recientes.

La clasificación de susceptibilidad geomorfológica para el presente análisis se realizó teniendo en cuenta lo anterior incluyendo además las geoformas indicativas de aporte de sedimento que por su localización y distancia al cauce pueden considerarse una zona posiblemente afectada por el tránsito y/o depositación de una avenida torrencial. En esta clasificación también se tuvo en cuenta parámetros como la pendiente longitudinal del cauce, la pendiente del terreno y los materiales.

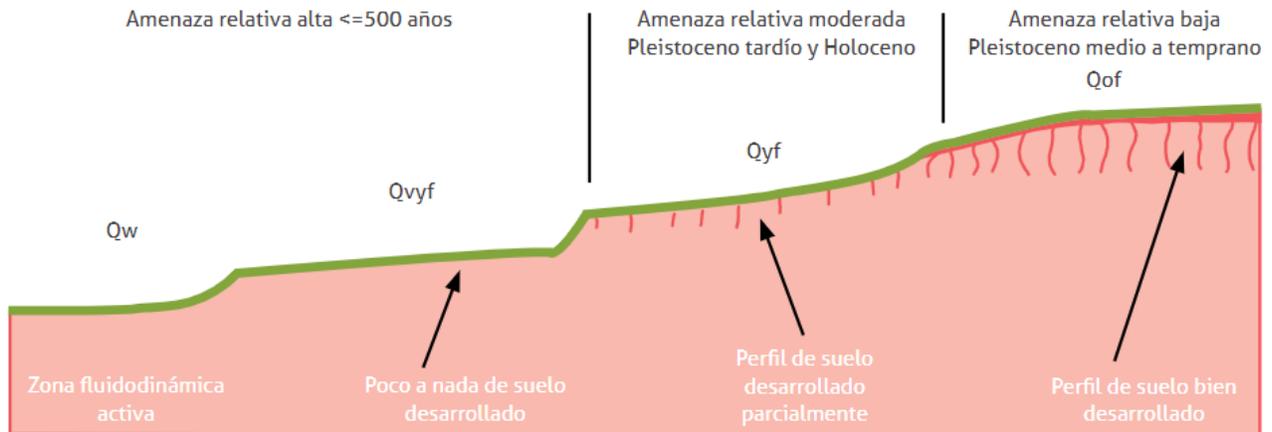


Figura 7. Perfil geomorfológico ilustrativo de la amenaza relativa por avenidas torrenciales
Fuente. Tomado de SGC, 2021

- Elaboración del Mapa de Susceptibilidad Geomorfológica

El mapa de susceptibilidad geomorfológica se construye a partir de la clasificación de las geoformas y representa las zonas potencialmente afectadas por eventos torrenciales y zonas de aporte de sedimentos durante una avenida torrencial. Los resultados presentados no sustituyen los obtenidos mediante modelaciones y metodologías analíticas y numéricas.

6.2.2 Análisis HAND

El análisis cuantitativo de modelos de elevación digital ha conducido a múltiples aplicaciones en estudios de hidrología, análisis de cuencas, drenajes; entre estas herramientas para el análisis cuantitativo, se encuentra el método denominado Altura Sobre el Drenaje más Cercano (HAND – Height Above Nearest Drainage).

El desarrollo de este modelo consiste en normalizar la topografía, en función de la red de drenaje natural, esto se realiza mediante un análisis base de la dirección y acumulación del flujo en un modelo de elevación digital (DEM). La aplicación del modelo HAND (Nobre, y otros, 2011) puede realizarse empleando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), tal como las herramientas del complemento PCRaster (Karssenber, Schmitz, de Jong, & Bierkens, 2009) en el software QGIS 3.22. El procedimiento que se empleó para determinar el modelo HAND es el que se describe en la Figura 8, donde el resultado final, consiste en un mapa con información de distancias verticales desde cada celda, hasta el punto más cercano de la red hídrica principal.

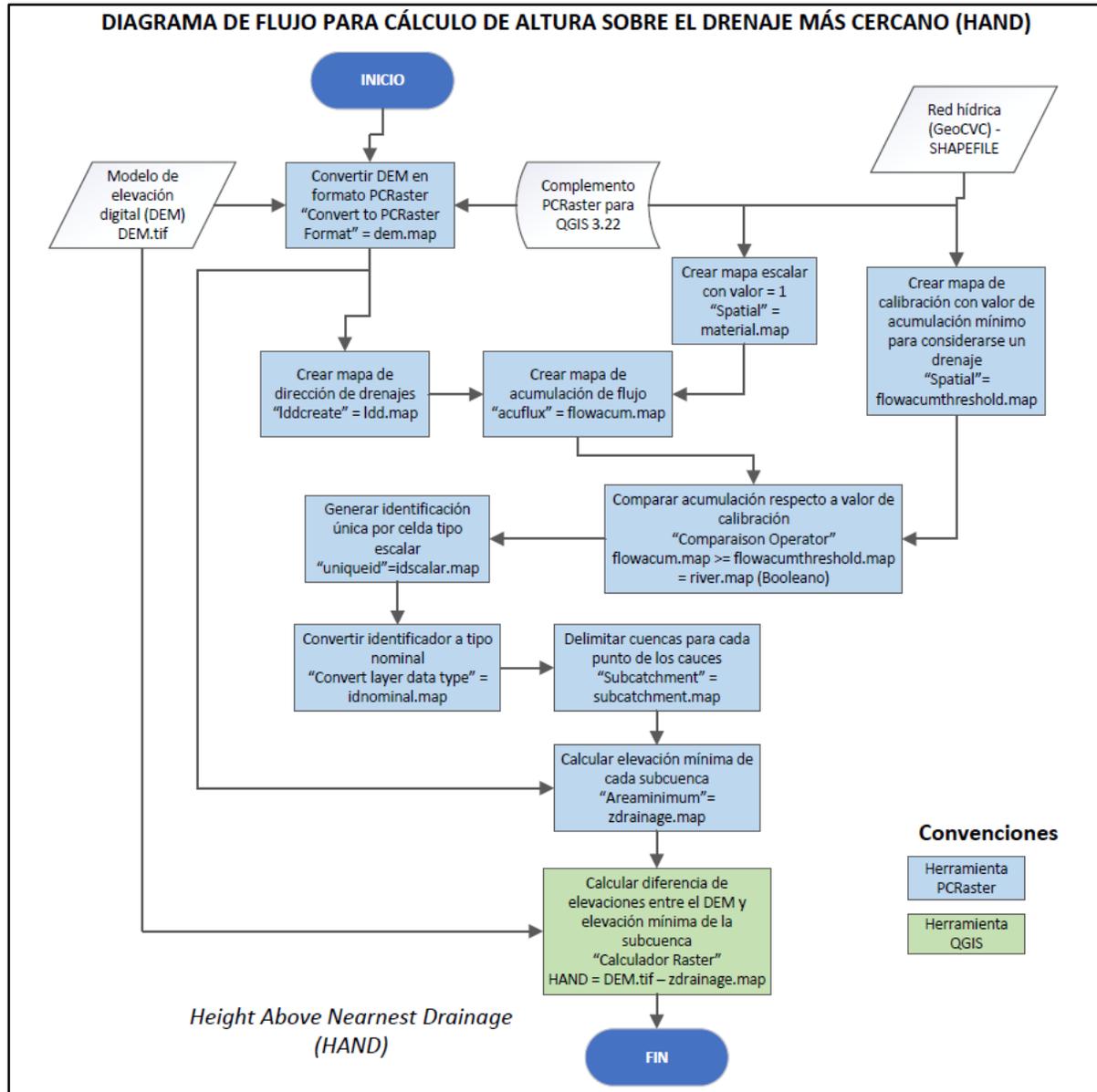


Figura 8. Diagrama de flujo para determinación de modelo HAND

Fuente. Elaboración propia

Una vez calculado el mapa del modelo HAND, se realiza la clasificación del resultado, siguiendo las clases propuestas en el artículo de referencia (Nobre, y otros, 2011), en el cual se presenta la clasificación topológica del resultado que se muestra en la Figura 9.

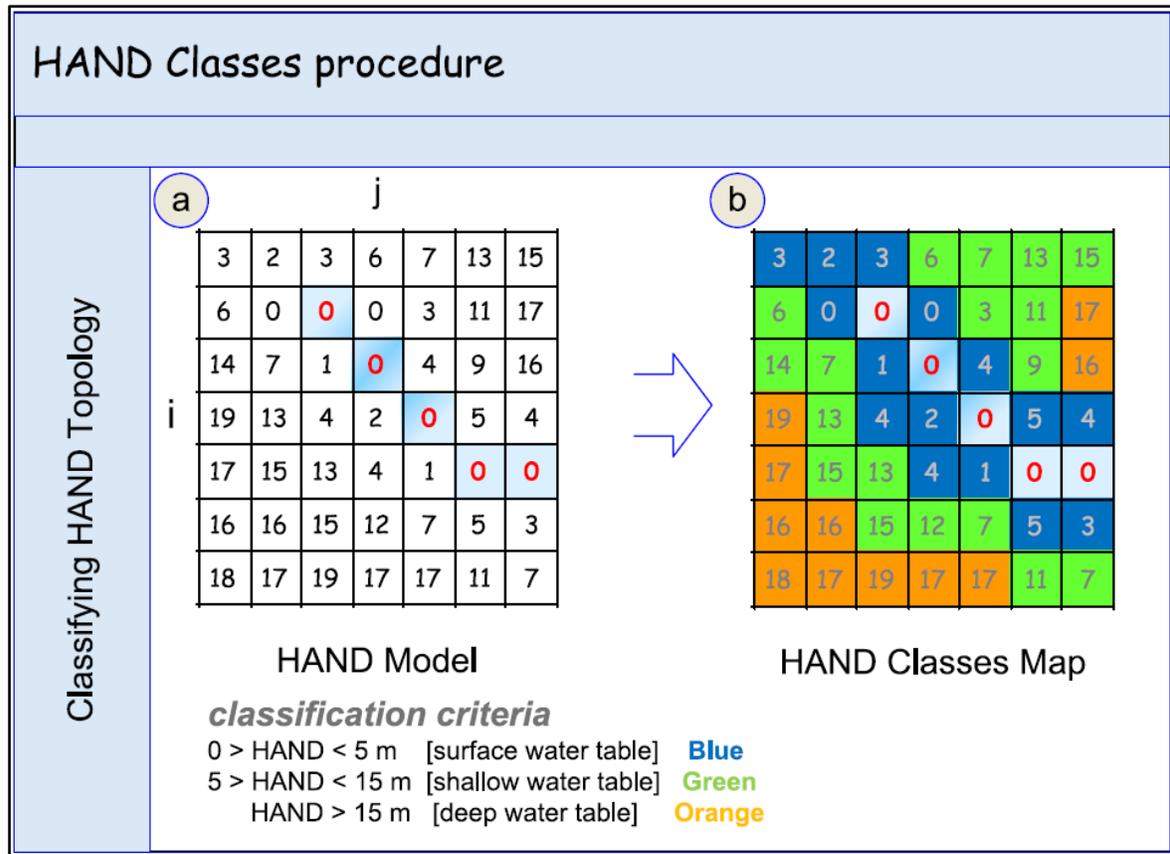


Figura 9. Clasificación para resultados de modelo HAND

Fuente. (Nobre, y otros, 2011)

El criterio de clasificación es el que se muestra en la Tabla 8, recordando que el resultado obtenido en este modelo es una diferencia de elevaciones, es decir una distancia (expresada en metros). La Tabla 8 describe cada una de estas clases, propuestas por el autor (Nobre, y otros, 2011).

Tabla 8. Cuadro de descripción de las clases de resultados del HAND

Susceptibilidad (HAND)	Rango HAND
Alta	$0 < \text{HAND} \leq 5 \text{ m}$
Media	$5 < \text{HAND} \leq 15 \text{ m}$
Baja	$\text{HAND} > 15 \text{ m}$

6.2.3 Amenaza por Movimientos en Masa

Para que se desencadene un evento de Avenida Torrencial se tienen que cumplir algunas características geológicas e hidrológicas, entre ellas lluvias intensas, suficiente disponibilidad y aporte de sedimentos por parte de la cuenca y un relieve escapado (Páez-Pedraza y Cortés-Castillo, 2020). Es claro que una Avenida Torrencial consiste en un flujo hiperconcentrado de detritos, rocas y otros materiales que pueden ser arrastrados a lo largo de una corriente de agua. Sin embargo, es importante aclarar que el mecanismo detonante más frecuente de las avenidas torrenciales es la generación de múltiples deslizamientos debido a lluvias intensas, estos se pueden producir por una única lluvia de gran magnitud o por periodos de lluvia prolongada después de épocas de sequía, lo que provoca la saturación del suelo y el desprendimiento de este, que en conjunto con la creciente súbita de agua genera un flujo con alto contenido de sedimentos (Páez-Pedraza y Cortés-Castillo, 2020).

En este sentido, un insumo de entrada para la estimación de la amenaza por AVT es la zonificación de Movimientos en Masa, realizada y descrita en el Estudio 4 (Amenaza por Movimientos en Masa en Zona Rural, Escala 1:25000) desarrollado en el marco del presente convenio, la cual permite caracterizar las zonas consideradas de aporte de sedimento. Se analizaron los resultados de la caracterización geoambiental realizada en el mapa de Amenaza por Movimientos en Masa desde el punto de vista de su aplicación en la caracterización de Avenidas Torrenciales a escala 1:25.000, identificando los factores condicionantes (geología, geomorfología, cobertura y uso del suelo) involucrados en la generación de procesos morfodinámicos en el territorio municipal bajo la influencia de factores detonantes como las lluvias extremas y los sismos.

Con base en lo anterior, se interpretaron las categorías de amenaza por movimientos en masa desde el punto de vista de zonas potenciales para la iniciación y aporte de sedimento en avenidas torrenciales (Tabla 9).

Tabla 9. Interpretación de las categorías de amenaza por movimientos en masa para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
ALTA	Zonas que presentan condiciones muy favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad que potencialmente pueden ser considerados como zonas de iniciación y aporte de sedimento
MEDIA	Zonas que presentan condiciones moderadamente favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad considerados como zonas de iniciación y aporte de sedimento
BAJA	Zonas que presentan condiciones poco favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad considerados como zonas de aporte de sedimento.

6.3. Estimación de la Amenaza indicativa por Avenida Torrencial 1:25000

De acuerdo con los rasgos encontrados en el mapa geomorfológico elaborado a escala 1:25000, se elaboró el mapa de susceptibilidad geomorfológica por AVT donde se pudieron identificar las zonas potenciales de iniciación o aporte, zona de tránsito y zona de depositación; encontrando que la zona plana es una de las principales áreas de depositación presentes en el municipio debido al fuerte contraste de relieve entre la región montañosa y la zona plana que caracteriza el territorio municipal de Palmira. En este sentido, para el desarrollo de la zonificación de la amenaza indicativa por Avenidas Torrenciales a escala 1:25000 se consideró realizar un análisis diferenciado para cada una de las zonas fisiográficas del municipio (zona montañosa y zona plana) esto con el fin de obtener un producto más acorde con la realidad del territorio a partir de los insumos disponibles para la escala de estudio.

6.3.1 Zonificación de Amenaza indicativa por AVT en zona montañosa

La parte montañosa del municipio de Palmira puede ser considerada, ante un posible escenario de ocurrencia de Avenidas Torrenciales, como la zona de mayor aporte de sedimentos y como la zona con la mayor incidencia en cuanto al transporte de estos debido a las altas pendientes propias del relieve accidentado y el confinamiento de los cauces al interior de esta zona fisiográfica. En contraste, en menor medida se pueden encontrar zonas asociadas a procesos de depositación que están relacionadas con valle aluviales estrechos con presencia de terrazas de acumulación.

En este sentido, la zonificación de la amenaza por AVT en zona de montaña del municipio de Palmira, se obtuvo a partir del cruce de 3 factores o variables descriptivas del comportamiento del fenómeno en esta zona fisiográfica: la primera, la susceptibilidad geomorfológica a AVT (Ver sección 6.2.1), que se considera como una variable a partir de la cual se puede caracterizar las zonas de depositación. La segunda, el análisis HAND (Altura sobre el Drenaje más Cercano) (Ver sección 6.2.2) el cual permite generar, a partir del Modelo Digital de Terreno, una estimación de la altura de la lámina de agua en los cauces respecto a la topografía circundante y con esto, una caracterización descriptiva de las zonas de transporte o tránsito. Tercera, la amenaza por movimiento en masa (ver sección 2.2.3 y Estudio 4: Amenaza por Movimientos en Masa zona Rural, Escala 1:25.000) la cual permite caracterizar las zonas de mayor susceptibilidad a la generación o aporte de material desde las laderas contiguas a los cauces.

Este cruce se llevó a cabo por medio del uso de técnicas y procesamiento de Sistemas de Información Geográfica por medio del software Arcgis 10.5 aplicando la herramienta *Weighted Overlay*. La finalidad de esta herramienta va encaminada en superponer información en formato ráster con una escala de medición común y ponderar cada dato según su importancia definida (Figura 10).

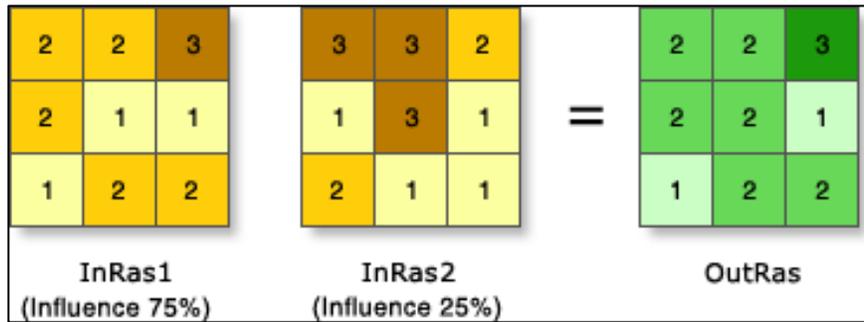


Figura 10. Weighted overlay

Fuente: Arcgis 10.5

Se procedió con la asignación de pesos a cada una de las 3 variables o factores anteriormente mencionados para poder aplicar la herramienta. Estos pesos se definieron a partir de discusiones técnicas con el grupo de trabajo de expertos, tomando como referencia los insumos mínimos establecidos en el artículo 10 Decreto 1807 de 2014 y la disponibilidad de información para la escala de trabajo. En este sentido, el criterio geomorfológico se consideró como el de mayor relevancia para realizar el análisis. En concordancia; se llevó a cabo la superposición de las variables en diferentes pruebas de cruce en las cuales se asignó mayor peso a la variable de Susceptibilidad geomorfológica por AVT. De los cruces realizados en diferentes pruebas con diferentes pesos, se logró obtener dos escenarios de amenaza indicativa en zona de montaña que fueron los más aproximados a la realidad del territorio según lo observado en campo en las zonas con registro de ocurrencia de este fenómeno. Para el primer escenario más aproximado a la realidad, la asignación de pesos fue: Susceptibilidad geomorfológica por AVT (45%), modelo HAND (35%) y Amenaza por Movimiento en Masa (20%). Para el segundo escenario más aproximado a la realidad del territorio la asignación de pesos fue: Susceptibilidad geomorfológica por AVT (50%), modelo HAND (30%) y Amenaza por Movimiento en Masa (20%).

Finalmente, se procedió con el cruce de los dos escenarios para la obtención de la zonificación de Amenaza indicativa por AVT para la zona de montaña. Este cruce, entregó como resultado una zonificación más aproximada a lo observado en el territorio durante los recorridos de campo que se alcanzaron a realizar, sobre todo en los sectores de Combia y el corredor del río Nima en los corregimientos de Tenjo y Calucé.

6.3.2 Zonificación de Amenaza indicativa por AVT en zona plana

Es importante tener en cuenta que las geoformas características que representan las zonas de depositación del fenómeno en las partes planas, corresponden a los abanicos aluviales. Para estas zonas de planicie, el comportamiento del fenómeno pasa a otro escenario debido a los cambios abruptos en la disminución de la pendiente para el recorrido de los cauces, así como, la pérdida de confinamiento de estos. Debido a la ausencia de información y de herramientas detalladas que permitan implementar metodologías de evaluación hidráulica o hidrodinámica en la zona plana, se hizo necesario utilizar

metodologías geológico-geomorfológicas que permitieran identificar las áreas más propensas a ser afectadas por la depositación de estos fenómenos; logrando de esta manera, obtener una amenaza estimativa y/o cualitativa por avenidas torrenciales para dicha zona plana.

De acuerdo con (UTAH Geological survey, 2005) los abanicos aluviales son accidentes geográficos compuestos por un complejo conjunto de depósitos de escombros, hiperconcentrados y de flujo de corriente. La geomorfología, la sedimentología y la estratigrafía de los abanicos aluviales proporcionan una historia deposicional de largo plazo de la frecuencia, del volumen y del comportamiento deposicional de los flujos pasados, y proporcionan una base geológica para estimar los peligros de flujos de escombros. Por tal motivo, se evaluaron las condiciones geológicas y climatológicas que dieron origen a estos abanicos aluviales dentro del municipio a partir de información técnica disponible y se realizó una interpretación de los factores o condiciones que se encuentran activas en la actualidad, que están modelando el relieve actual del municipio y que podrían favorecer la depositación de eventos torrenciales futuros.

El comportamiento de los flujos es impredecible y debe tenerse en cuenta al abordar las áreas de depósitos, las distancias de viaje y el comportamiento del depósito en abanicos aluviales (UTAH Geological survey, 2005). Si bien los abanicos aluviales identificados corresponden a condiciones diferentes a las actuales, existen características propias del terreno que favorecen la generación de abanicos aluviales, y aunque el cauce actual del río Nima fluye en dirección suroriente – noroccidente, algunos flujos de escombros pueden crear sus propios canales produciendo diques en el abanico y transportando sedimentos más abajo bloqueando el canal activo y avulsionando (haciendo un cambio abrupto en el curso) para crear nuevos canales (Figura 11); por lo que se considera importante estimar la amenaza indicativa en la zona plana por depositación de avenidas torrenciales.

El primer paso en la evaluación de un abanico aluvial es determinar el área activa del mismo usando técnicas de mapeo y datación de los materiales que lo componen. El área del abanico activo es donde ha ocurrido deposición, erosión e inundación del abanico aluvial relativamente reciente. En general, los sitios de depósito de sedimentos durante el holoceno se consideran activos. Por medio de fotografías aéreas, mapas topográficos detallados y verificación en campo de la extensión, tipo, carácter y edad de los depósitos de abanicos aluviales, se cartografían los abanicos activos. Los depósitos de flujos de escombros más jóvenes generalmente son indicativos de los flujos de escombros producidos durante el régimen climatológico moderno y son importantes para estimar el volumen probable y la cantidad de flujos futuros. El abanico activo, a menudo se usa como una herramienta de zonificación para identificar áreas de estudio especiales donde se requieren evaluaciones detalladas de peligro de flujo de escombros antes del desarrollo (UTAH Geological survey, 2005).

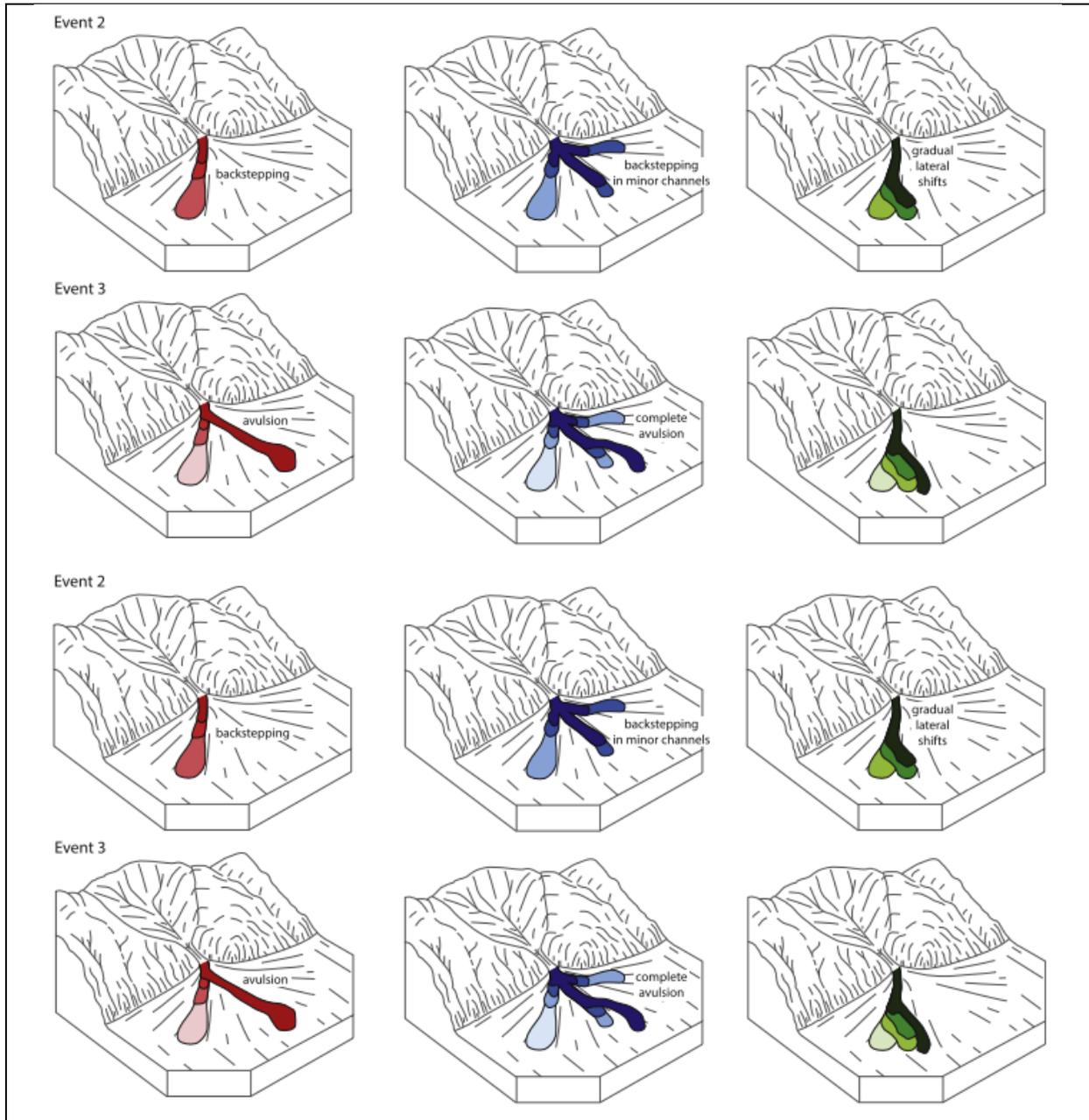


Figura 11. Patrones de avulsión en diferentes secuencias de volumen de flujo

Fuente. (de Haas y otros, 2018)

En las áreas de abanicos proximales, los flujos de detritos generalmente tienen la mayor velocidad, la mayor profundidad del flujo y espesor del depósito y, por lo tanto, son los más destructivos. En las áreas de abanicos distales los flujos de escombros tienen velocidades más bajas y depósitos y profundidades de flujo más superficiales y por lo tanto son menos destructivos, a menudo estas áreas están dominadas por procesos de flujos de corriente. Los depósitos del abanico proximal generalmente se transforman en depósitos más

delgados y de grano más fino a medida que desciende el abanico, lo que resulta en superficies de abanico más suave en áreas de abanico medio y distal (UTAH Geological survey, 2005).

Con base en lo anterior y en aras de estimar la amenaza por depositación de avenidas torrenciales en la zona plana, se tomó el abanico más reciente identificado en el estudio de geomorfología a escala 1:25000 y se evaluó la amenaza por depositación, identificando la zona proximal, media y distal del mismo (Figura 12).

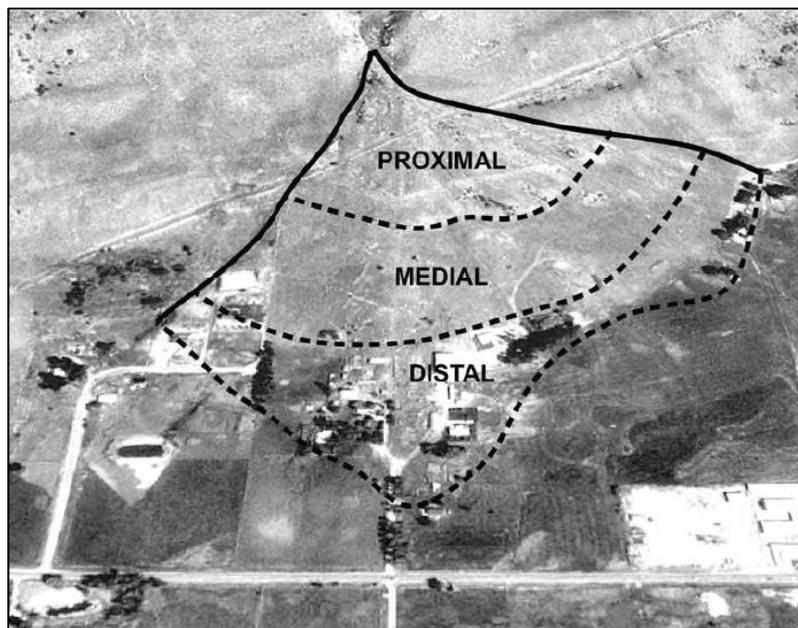
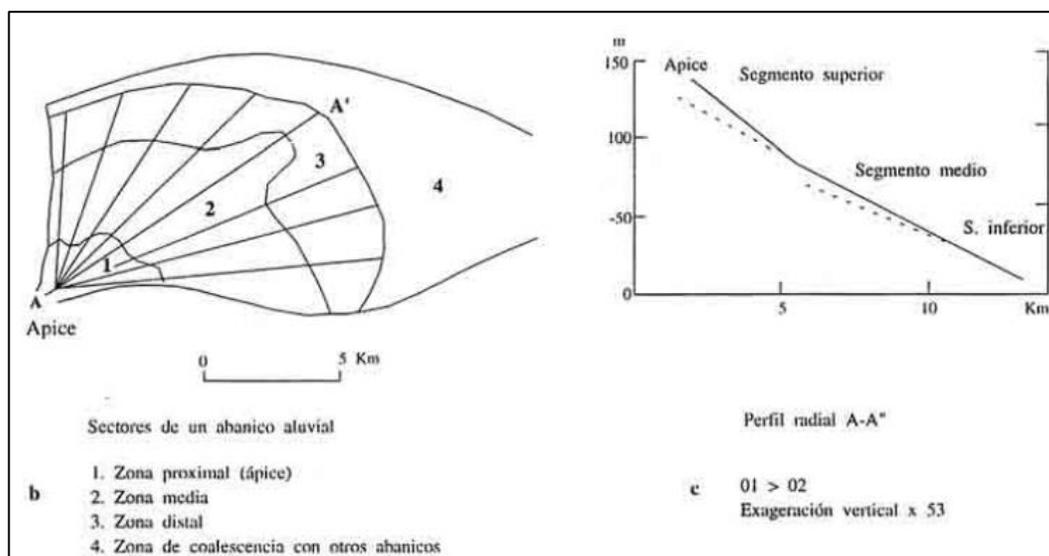


Figura 12. Áreas aproximadas de abanico proximal medio y distal
Fuente. (Villar, 1996) y (UTAH Geological survey, 2005)

La disminución del tamaño de grano a medida que se desciende en el abanico, generalmente se corresponde con una disminución en el ángulo de inclinación del abanico. Los depósitos de grano más grueso generalmente crean pendientes de abanico más empinadas (6-8°), mientras que los depósitos de flujo de corriente más finos forman pendientes de abanico distal suave (2 – 3°) (consejo nacional de investigación, 1996 en (UTAH Geological survey, 2005)). A partir de cambios de pendiente y de litologías encontradas en campañas de campo se realizó la diferenciación de las partes del abanico más reciente.

De acuerdo con la guía metodológica del SGC para la zonificación de Avenidas Torrenciales, evento reciente es considerado como aquel que ha ocurrido en un tiempo ≤ 500 años. Debido a que no se cuenta con estudios que permitan establecer la edad de los depósitos de abanico, se tuvo en cuenta los rasgos morfológicos del último abanico identificado (el cual se considera el más reciente por posición estratigráfica) y se asociaron con los tipos de procesos de las Avenidas Torrenciales (solicitaciones) con el fin de estimar la amenaza por depositación de sedimentos transportados por una avenida torrencial en términos de afectaciones y severidad, a partir de una correlación con la litología encontrada y descrita en las visitas de campo al territorio.

Finalmente, para la estimación de la amenaza asociada a los cauces de la zona plana, se utilizó la susceptibilidad geomorfológica por AVT junto un ajuste de los rangos al modelo HAND (Tabla 10) que permitiera una estimación aproximada o descriptiva de la altura de la lámina de agua en la zona plana.

Tabla 10. Cuadro de descripción de las clases de resultados del HAND para la zona plana

(HAND)	Rango HAND
Alta	$0 < \text{HAND} \leq 5 \text{ m}$
Media	$5 < \text{HAND} \leq 10 \text{ m}$
Baja	$10 < \text{HAND} \leq 15 \text{ m}$
Muy Baja	$\text{HAND} > 15 \text{ m}$

6.3.3 Zonificación de Amenaza indicativa consolidada por AVT

La zonificación de Amenaza indicativa consolidada por AVT consiste en el resultado de la unión de la zonificación de amenaza indicativa por AVT en zona de montaña y la zonificación de amenaza indicativa por AVT en zona plana (Figura 13).

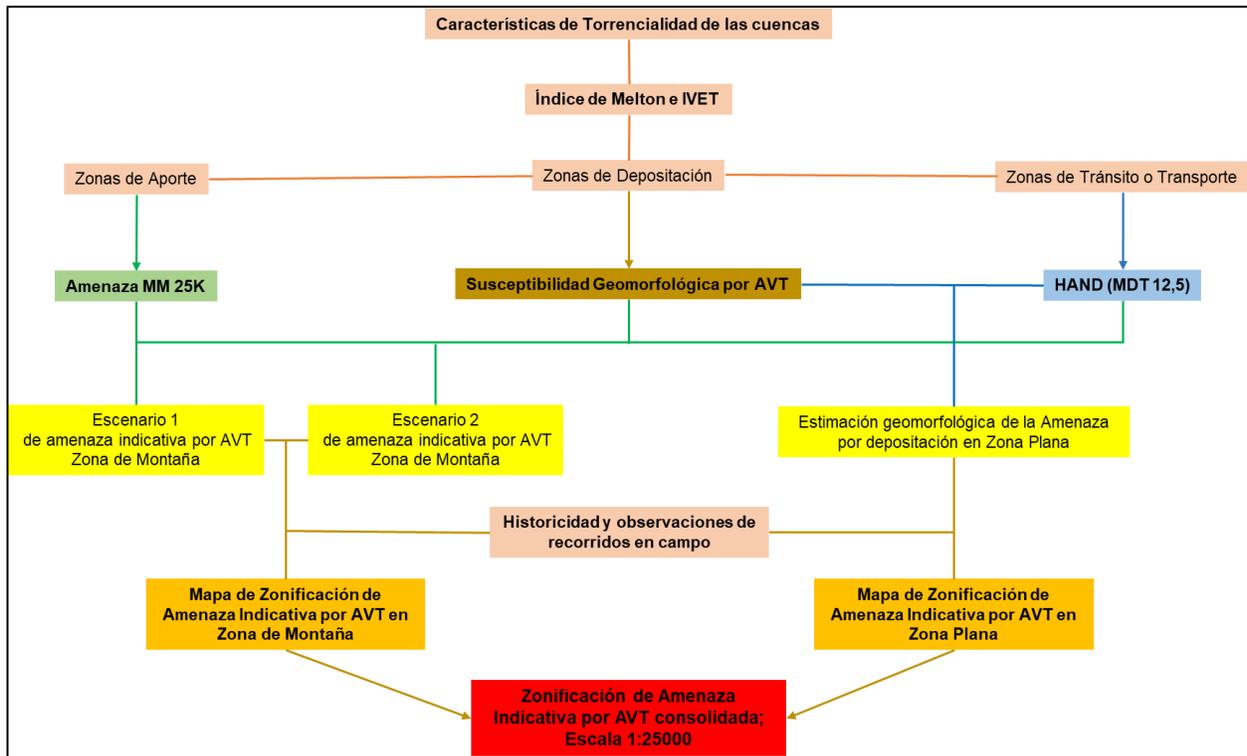


Figura 13. Esquema metodológico para la zonificación de la Amenaza indicativa consolidada por AVT
Fuente. Elaboración propia

7. RESULTADOS

7.1. Inventario de Eventos de Avenidas Torrenciales

A partir del estudio de historicidad llevado a cabo en el marco del presente convenio (Estudio 1: Historicidad) se encontró un total de 15 reportes de avenidas torrenciales en el municipio comprendidos entre 1970 y 2021 los cuales se localizan principalmente en la zona rural alta de piedemonte y de alta montaña del municipio. Dentro de este análisis fue posible identificar las corrientes hídricas con comportamiento torrencial que cuentan con registro histórico de avenidas torrenciales, destacando principalmente el río Nima y Amaime. El río Amaime con seis eventos y el río Nima con tres eventos (Figura 14). Esta información es tomada del Estudio 1: Historicidad, el cual puede ser consultado para mayor detalle.

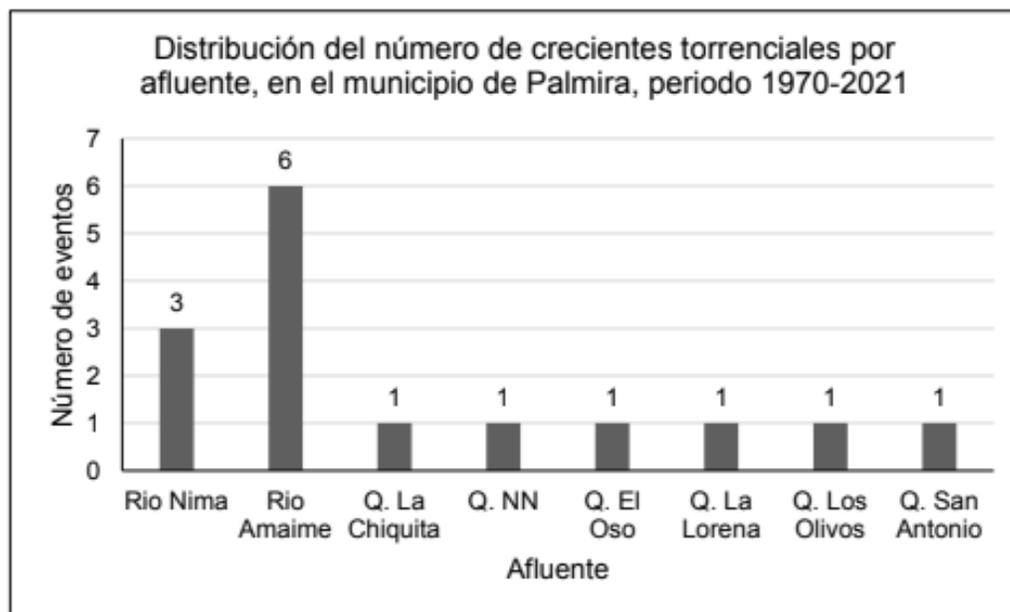


Figura 14. Distribución del número de crecientes torrenciales por afluente, en el municipio de Palmira, periodo 1970 – 2021.

Existe una gran complejidad a la hora de diferenciar los eventos de avenida torrencial de los eventos de inundaciones que ocurren en un lugar, sin embargo, los reportes consignados y el inventario histórico de eventos permitió identificar los corregimientos donde se han presentado fenómenos de avenida torrencial, entre estos se encuentran los corregimientos de Amaime, Combia, Tablones, Toche y Guayabal, los cuales se han visto afectados por el río Amaime; y los corregimientos de Tienda Nueva y Tenjo que se han visto afectados por el río Nima (Figura 15).

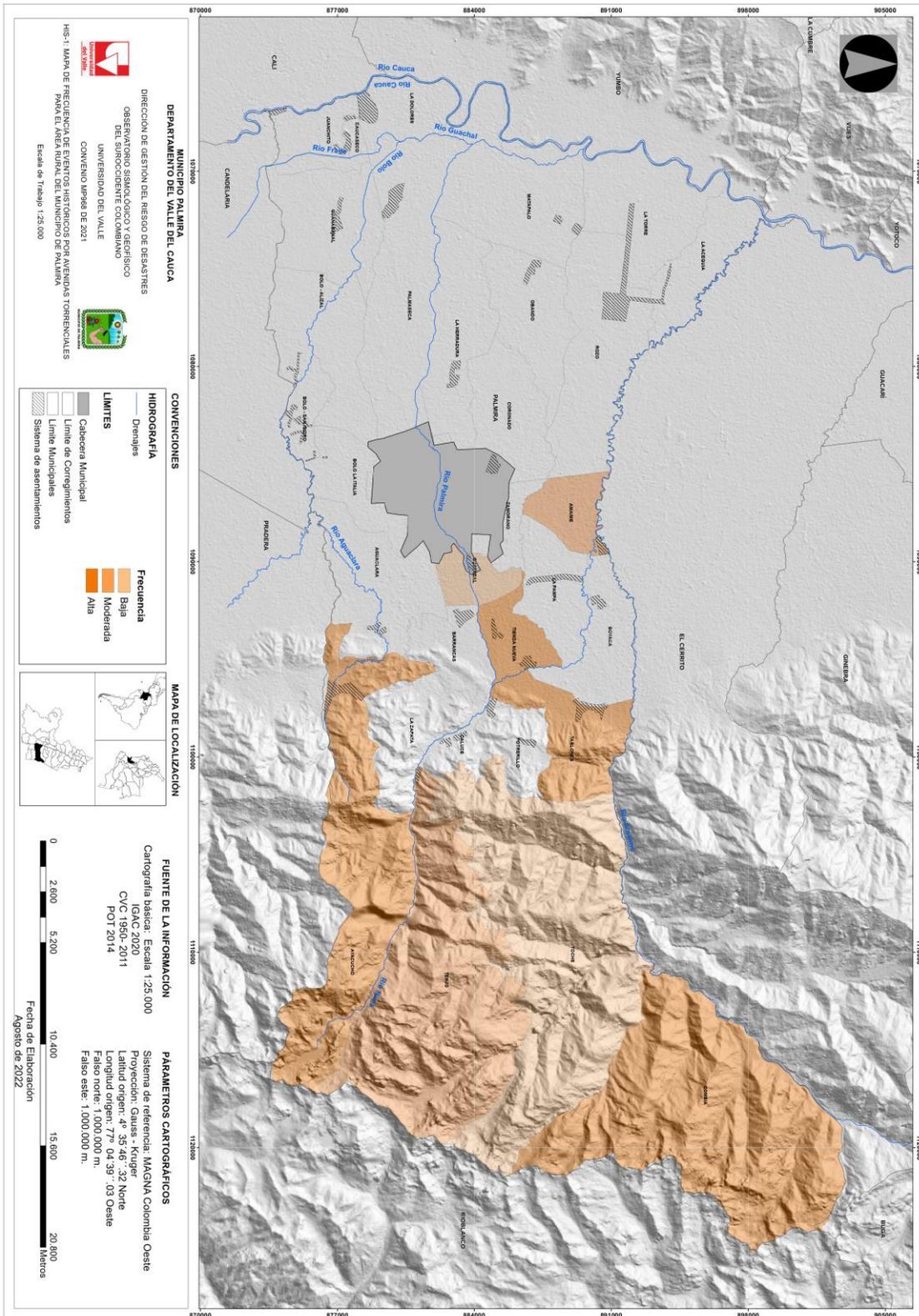


Figura 15. Mapa de frecuencia de eventos históricos de avenidas torrenciales (HIS-1)
Fuente. Elaboración Propia

Este registro histórico de eventos permitió identificar los procesos naturales que han afectado el municipio a lo largo de la historia, así como el reconocimiento del territorio e identificación de los afluentes que han presentado este tipo de procesos como las corrientes tributarias de la margen izquierda del río Amaime, los tributarios en la cuenca alta del río Aguaclara y los tributarios del río Nima.

La comunidad asocia estos eventos a las épocas de fuertes precipitaciones donde la creciente de estas corrientes hídricas favorece el transporte de sedimentos y materiales como residuos vegetales que han llegado a afectar tanto los senderos veredales como infraestructuras importantes como lo son escuelas y el centro de salud. La unidad de gestión del riesgo municipal refiere la existencia de una red de alarma temprana ante la creciente de las fuentes hídricas, ya que dado la configuración topográfica en la zona montañosa del municipio favorece el aporte de materiales a las corrientes hídricas principales como el río Amaime, Nima y Aguaclara que como se dijo anteriormente tienen registro de eventos de avenidas torrenciales.

7.2. Resultados para la torrencialidad de las cuencas en el municipio de Palmira.

7.2.1 Resultados de acuerdo con el Índice de Melton (IM)

A partir del modelo de elevación digital del terreno y la delimitación de las cuencas hidrográficas del estudio de hidrología se realiza el cálculo del área y se extraen los valores de altitud mínima y máxima de cada cuenca, empleando la herramienta de “estadística de zona” del software QGIS 3.14. Con base en los valores de las áreas y las diferencias de alturas en las cuencas se calculó el Índice de Melton cuyos resultados obtenidos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de Índice de Melton (IM) para las subcuencas de la zona de estudio

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Altitud mínima (msnm)	Altitud máxima (msnm)	Índice de Melton (IM)	
Río Amaime	SC-RA-01	27,64	36,27	8,199	2509,0	4214,0	0,32
Río Amaime	SC-RA-02	23,93	26,82	8,177	2402,0	3891,0	0,30
Río Amaime	SC-RA-03	8,53	21,18	7,214	1992,0	3428,0	0,49
Río Amaime	SC-RA-04	20,89	33,00	9,309	2509,0	4174,0	0,36
Río Amaime	SC-RA-05	5,85	16,38	4,893	1776,0	2957,0	0,49
Río Amaime	SC-RA-06	25,15	33,97	10,661	1996,0	4217,0	0,44
Río Amaime	SC-RA-07	3,20	12,10	2,736	1658,0	2406,0	0,42
Río Amaime	SC-RA-08	1,05	6,55	1,569	1599,0	2157,0	0,54
Río Amaime	SC-RA-09	33,48	37,13	8,943	1524,0	3943,0	0,42
Río Amaime	SC-RA-10	1,38	6,90	1,296	1579,0	2224,0	0,55
Río Amaime	SC-RA-11	23,57	35,07	11,275	1776,0	4281,0	0,52
Río Amaime	SC-RA-12	3,36	12,26	3,222	1453,0	2480,0	0,56

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Altitud mínima (msnm)	Altitud máxima (msnm)	Índice de Melton (IM)	
Rio Amaime	SC-RA-13	5,86	15,25	3,221	1521,0	2556,0	0,43
Rio Amaime	SC-RA-14	7,20	15,50	5,626	1258,0	2557,0	0,48
Rio Amaime	SC-RA-15	12,45	25,43	6,465	1707,0	3166,0	0,41
Rio Amaime	SC-RA-16	42,77	47,27	14,504	1656,0	4264,0	0,40
Rio Amaime	SC-RA-17	11,93	18,53	7,160	1845,0	3315,0	0,43
Rio Amaime	SC-RA-18	23,35	37,07	5,956	1861,0	4131,0	0,47
Rio Amaime	SC-RA-19	4,88	12,65	4,649	2481,0	4213,0	0,78
Rio Amaime	SC-RA-20	1,56	8,88	1,652	1685,0	2328,0	0,51
Rio Amaime	SC-RA-21	23,22	28,25	8,946	2922,0	4215,0	0,27
Rio Amaime	SC-RA-22	19,70	28,28	6,828	1863,0	3914,0	0,46
Rio Amaime	SC-RA-23	12,87	19,22	6,667	2922,0	4218,0	0,36
Rio Amaime	SC-RA-24	7,83	15,00	3,202	1847,0	2793,0	0,34
Rio Amaime	SC-RA-25	20,64	24,58	7,022	1443,0	2804,0	0,30
Rio Amaime	SC-RA-26	18,80	23,24	6,858	2118,0	3952,0	0,42
Rio Amaime	SC-RA-27	2,14	8,18	3,661	2484,0	3837,0	0,92
Rio Amaime	SC-RA-28	13,94	21,11	7,889	2405,0	3836,0	0,38
Rio Amaime	SC-RA-29	20,03	28,20	11,437	1159,0	3216,0	0,46
Rio Amaime	SC-RA-30	8,92	21,94	7,199	1540,0	3858,0	0,78
Rio Amaime	SC-RA-31	12,36	22,90	10,094	1162,0	2621,0	0,41
Rio Amaime	SC-RA-32	16,90	25,55	8,292	2000,0	3629,0	0,40
Rio Amaime	SC-RA-33	5,93	12,67	3,811	2115,0	3033,0	0,38
Rio Bolo	SC-RB-08	10,83	20,94	6,570	1285,0	2854,0	0,48
Rio Bolo	SC-RB-09	13,79	23,18	11,556	1113,0	2530,0	0,38
Rio Nima	SC-RN-01	8,68	21,36	5,576	1372,0	2537,0	0,40
Rio Nima	SC-RN-02	6,53	16,40	4,329	1370,0	2475,0	0,43
Rio Nima	SC-RN-03	8,07	17,68	4,818	2418,0	4045,0	0,57
Rio Nima	SC-RN-04	0,84	5,93	1,447	1747,0	2274,0	0,57
Rio Nima	SC-RN-05	6,14	15,70	5,735	1745,0	3302,0	0,63
Rio Nima	SC-RN-06	7,70	17,30	7,120	1475,0	2749,0	0,46
Rio Nima	SC-RN-07	5,67	15,70	4,113	1928,0	3475,0	0,65
Rio Nima	SC-RN-08	12,45	26,37	6,187	2418,0	4199,0	0,50
Rio Nima	SC-RN-09	7,95	18,20	5,628	2422,0	4148,0	0,61
Rio Nima	SC-RN-10	9,20	18,28	3,745	1911,0	3264,0	0,45
Rio Nima	SC-RN-11	6,92	17,42	4,173	3369,0	4215,0	0,32
Rio Nima	SC-RN-12	12,34	22,47	3,118	3371,0	4214,0	0,24
Rio Nima	SC-RN-13	0,51	5,65	1,458	1291,0	1505,0	0,30
Rio Nima	SC-RN-14	3,01	13,43	2,452	1351,0	2162,0	0,47
Rio Nima	SC-RN-15	1,35	8,73	1,486	1424,0	1933,0	0,44
Rio Nima	SC-RN-16	1,55	10,21	3,083	1285,0	1666,0	0,31
Rio Nima	SC-RN-17	13,79	17,62	7,106	1107,0	1833,0	0,20
Rio Nima	SC-RN-18	13,12	23,43	5,962	1759,0	3234,0	0,41
Rio Nima	SC-RN-19	5,43	13,55	4,010	1462,0	2475,0	0,43

De acuerdo con los resultados obtenidos del Índice de Melton, se observa que 50 de las 54 subcuencas estudiadas (es decir, el 92,6% del total de subcuencas) presentan una

susceptibilidad alta a avenidas torrenciales, indicando una alta probabilidad de presentar avenidas de flujos de detritos, y se encuentran principalmente en las zonas media y alta de la montaña. La subcuenca SC-RA-27, del río Toche, es la que presenta el mayor valor del índice de Melton ($IM = 0,92$) y está ubicada en la zona alta de la cuenca del río Amaime.

En la Figura 16 se presenta el mapa de susceptibilidad a avenidas torrenciales elaborado a partir de los valores del Índice de Melton calculado para las diferentes subcuencas de la zona rural del municipio de Palmira. En términos generales, la condición de susceptibilidad es bastante similar, aunque si bien, parece presentar algunas zonas donde inicia la cuenca alta, que no son susceptibles a eventos de avenidas torrenciales; sin embargo, al revisar los valores de manera individual se observa que estas son subcuencas que presentan valores cercanos a los rangos de clasificación de susceptibilidad media.

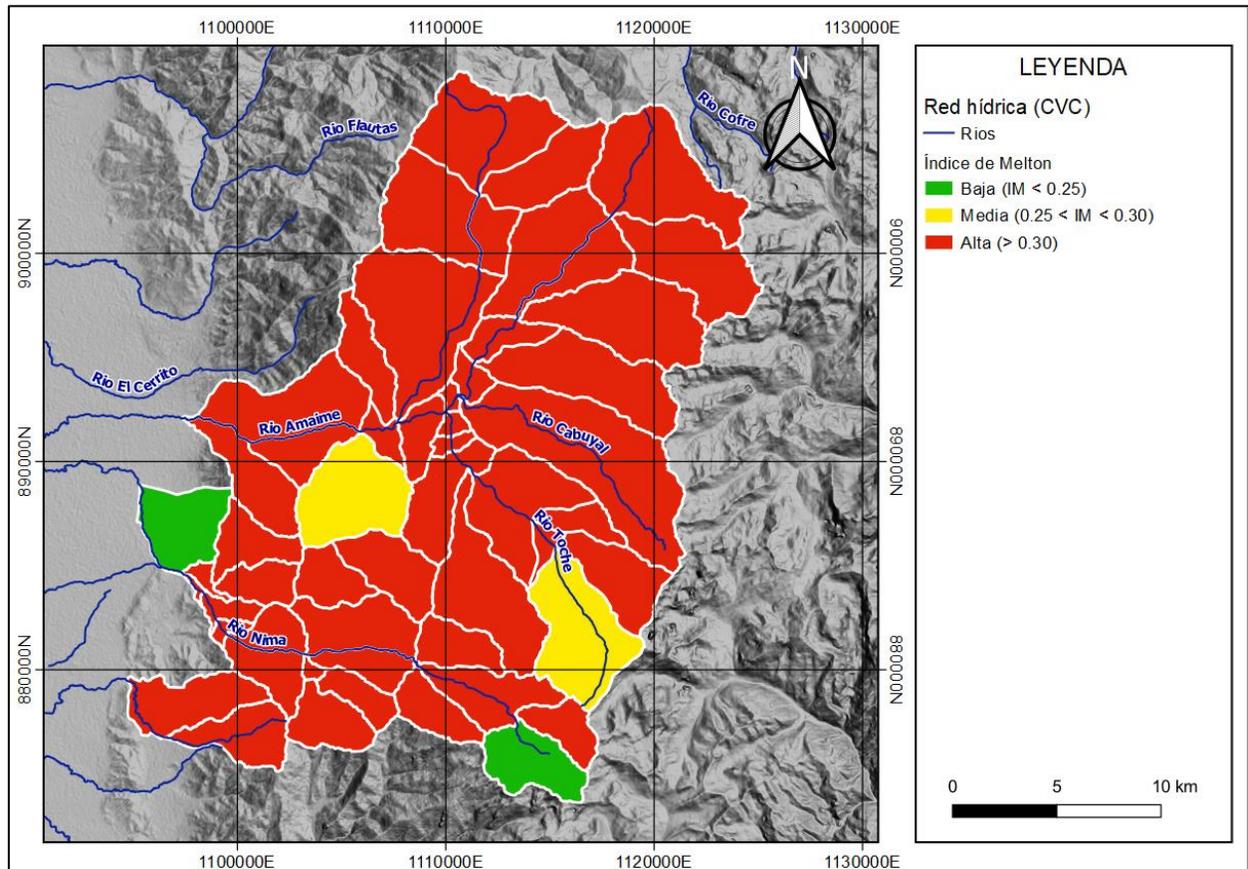


Figura 16. Índice de Melton para la zona rural del municipio de Palmira

Fuente. Elaboración propia

Con base en los resultados del Índice de Melton y la longitud del cauce se construye la Figura 17 donde cada punto representa el valor correspondiente a cada subcuenca. Se presentan como líneas verticales la separación de los rangos de clasificación de la susceptibilidad a las avenidas torrenciales, donde valores del Índice de Melton inferiores a

0,25 indican un nivel de susceptibilidad baja, valores entre 0,25 y 0,30 un nivel de susceptibilidad media y valores superiores a 0,30 un nivel de susceptibilidad alta. Se observa una tendencia a concentrarse en el rango clasificado como zona de flujo asociado a eventos de avenidas torrenciales en la mayoría de las cuencas. Solo se observan tres subcuencas en la zona que se considera correspondiente a eventos de inundación y no de avenidas torrenciales; sin embargo, estas representan solo el 3,7% de las subcuencas estudiadas.

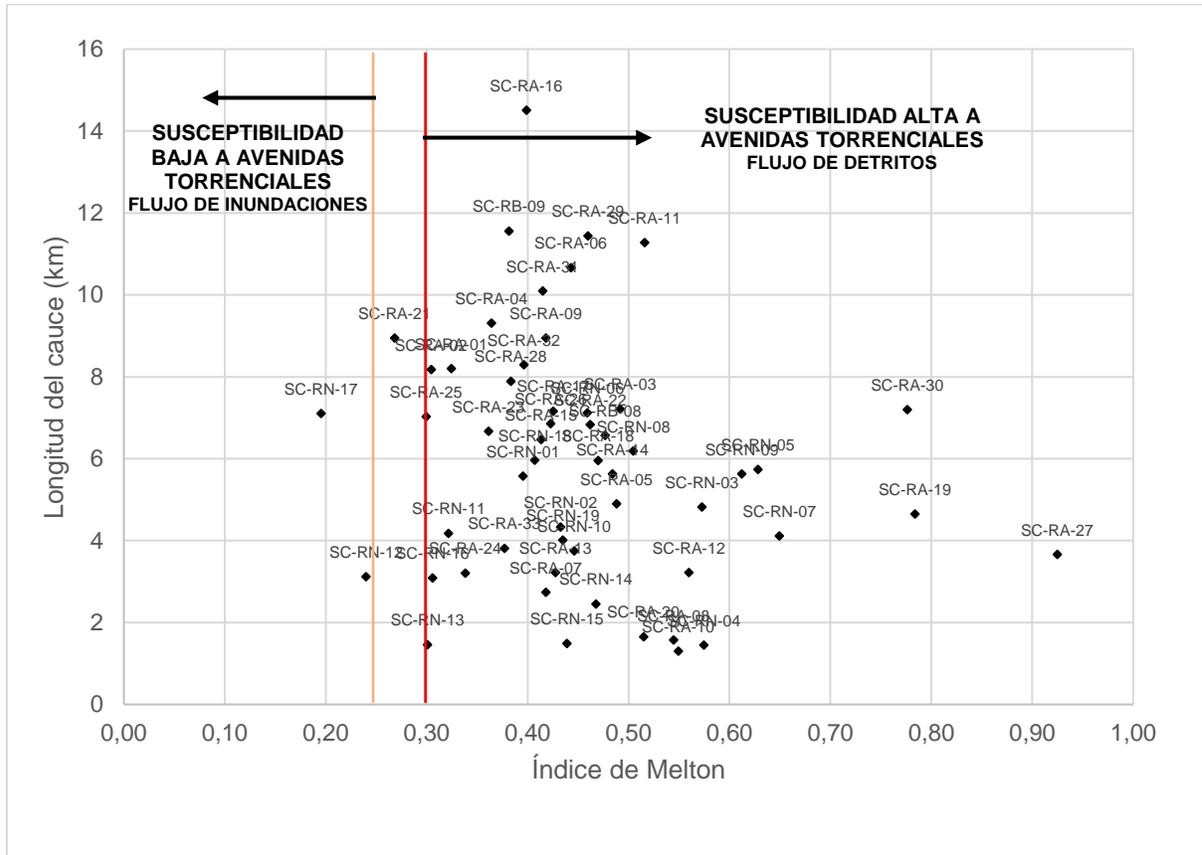


Figura 17 Relación entre la longitud del cauce y el Índice de Melton

7.2.2 Resultados de acuerdo con el índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT)

A partir del modelo de elevación digital de terreno de 12.5 m de resolución y la información de las cuencas hidrográficas, se calcularon los valores de la pendiente, el coeficiente de compacidad (Kc) y la densidad de drenaje (DD) para cada una de las subcuencas (Tabla 12).

La densidad de drenaje se calculó empleando como base la red hídrica del geovisor de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, el cual resulta en una discretización de la densidad de los drenajes adecuada para la escala 1:25000.

Tabla 12. Variables morfométricas de las subcuencas para el cálculo de Índice Morfométrico de Torrencialidad

Variables morfométricas de las subcuencas					
Cuenca	Subcuenca	Pendiente (%)	Kc	Ldrenaje (km)	DD (km/km ²)
Rio Amaime	SC-RA-01	57,0%	1,95	67,73	1,87
Rio Amaime	SC-RA-02	48,3%	1,55	42,14	1,57
Rio Amaime	SC-RA-03	52,9%	2,05	15,89	0,75
Rio Amaime	SC-RA-04	58,5%	2,04	67,53	2,05
Rio Amaime	SC-RA-05	55,8%	1,91	9,65	0,59
Rio Amaime	SC-RA-06	59,7%	1,91	40,12	1,18
Rio Amaime	SC-RA-07	48,3%	1,91	5,94	0,49
Rio Amaime	SC-RA-08	57,1%	1,80	1,88	0,29
Rio Amaime	SC-RA-09	53,8%	1,81	52,29	1,41
Rio Amaime	SC-RA-10	67,0%	1,66	1,32	0,19
Rio Amaime	SC-RA-11	58,6%	2,04	38,28	1,09
Rio Amaime	SC-RA-12	50,8%	1,89	7,73	0,63
Rio Amaime	SC-RA-13	59,7%	1,78	11,74	0,77
Rio Amaime	SC-RA-14	63,4%	1,63	17,51	1,13
Rio Amaime	SC-RA-15	60,5%	2,03	53,21	2,09
Rio Amaime	SC-RA-16	59,7%	2,04	106,44	2,25
Rio Amaime	SC-RA-17	57,7%	1,51	52,24	2,82
Rio Amaime	SC-RA-18	56,4%	2,16	125,17	3,38
Rio Amaime	SC-RA-19	57,1%	1,61	13,93	1,10
Rio Amaime	SC-RA-20	62,9%	2,00	1,63	0,18
Rio Amaime	SC-RA-21	61,9%	1,65	87,92	3,11
Rio Amaime	SC-RA-22	64,4%	1,80	92,06	3,26
Rio Amaime	SC-RA-23	62,5%	1,51	42,08	2,19
Rio Amaime	SC-RA-24	52,7%	1,51	15,77	1,05
Rio Amaime	SC-RA-25	52,8%	1,53	54,88	2,23
Rio Amaime	SC-RA-26	52,8%	1,51	36,80	1,58
Rio Amaime	SC-RA-27	60,0%	1,58	10,33	1,26
Rio Amaime	SC-RA-28	51,1%	1,60	32,46	1,54
Rio Amaime	SC-RA-29	59,0%	1,78	52,34	1,86
Rio Amaime	SC-RA-30	56,8%	2,07	17,41	0,79
Rio Amaime	SC-RA-31	48,5%	1,84	58,41	2,55
Rio Amaime	SC-RA-32	52,6%	1,75	29,61	1,16
Rio Amaime	SC-RA-33	54,4%	1,47	9,29	0,73
Rio Bolo	SC-RB-08	49,0%	1,80	44,75	2,14
Rio Bolo	SC-RB-09	35,0%	1,76	60,13	2,59
Rio Nima	SC-RN-01	37,8%	2,05	33,96	1,59
Rio Nima	SC-RN-02	49,8%	1,81	26,04	1,59
Rio Nima	SC-RN-03	61,5%	1,75	34,86	1,97

Variables morfométricas de las subcuencas					
Cuenca	Subcuenca	Pendiente (%)	Kc	L _{drenaje} (km)	DD (km/km ²)
Rio Nima	SC-RN-04	49,1%	1,82	2,91	0,49
Rio Nima	SC-RN-05	63,6%	1,79	16,26	1,04
Rio Nima	SC-RN-06	58,4%	1,76	34,30	1,98
Rio Nima	SC-RN-07	58,1%	1,86	12,85	0,82
Rio Nima	SC-RN-08	64,4%	2,11	19,12	0,72
Rio Nima	SC-RN-09	64,7%	1,82	8,47	0,47
Rio Nima	SC-RN-10	57,0%	1,70	36,50	2,00
Rio Nima	SC-RN-11	55,6%	1,87	6,20	0,36
Rio Nima	SC-RN-12	59,5%	1,80	6,99	0,31
Rio Nima	SC-RN-13	17,9%	2,24	1,97	0,35
Rio Nima	SC-RN-14	36,3%	2,18	11,61	0,86
Rio Nima	SC-RN-15	29,9%	2,12	6,18	0,71
Rio Nima	SC-RN-16	26,1%	2,31	7,86	0,77
Rio Nima	SC-RN-17	23,1%	1,34	50,23	2,85
Rio Nima	SC-RN-18	57,8%	1,82	38,28	1,63
Rio Nima	SC-RN-19	52,0%	1,64	20,78	1,53

Se aplican las respectivas clasificaciones a cada parámetro y la clasificación de la relación de estas, para así determinar el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) en cada cuenca. Los rangos de clasificación empleados para la densidad de drenaje corresponden a una escala 1:25000. En la Tabla 13 se presentan los resultados de esta clasificación, siguiendo los Lineamientos conceptuales y metodología para la Evaluación Regional del Agua – ERA (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2013). Los valores numéricos a la clasificación del IMT (y que posteriormente se emplea para la clasificación del Índice de Vulnerabilidad a Avenidas Torrenciales), son tal que:

- Muy baja 1
- Baja 2
- Media 3
- Alta 4
- Muy alta 5

Tabla 13. Resultados de Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) en las subcuencas de la zona de estudio

CUENCA		Parámetros de la subcuenca				Índice Morfométrico de Torrencialidad	
Cuenca	Subcuenca	Pendiente	Kc	DD	Código relación	IMT	Clase
Rio Amaime	SC-RA-01	4	1	3	341	3	Moderada
Rio Amaime	SC-RA-02	4	1	2	241	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-03	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-04	4	1	4	441	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-05	4	1	1	141	2	Baja

CUENCA		Parámetros de la subcuenca				Índice Morfométrico de Torrencialidad	
Cuenca	Subcuenca	Pendiente	Kc	DD	Código relación	IMT	Clase
Rio Amaime	SC-RA-06	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-07	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-08	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-09	4	1	2	241	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-10	5	1	1	151	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-11	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-12	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-13	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-14	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-15	4	1	4	441	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-16	4	1	4	441	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-17	4	1	5	541	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-18	4	1	5	541	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-19	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-20	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-21	4	1	5	541	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-22	4	1	5	541	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-23	4	1	4	441	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-24	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-25	4	1	4	441	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-26	4	1	2	241	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-27	4	1	2	241	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-28	4	1	2	241	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-29	4	1	3	341	3	Moderada
Rio Amaime	SC-RA-30	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-31	4	1	5	541	4	Alta
Rio Amaime	SC-RA-32	4	1	1	141	2	Baja
Rio Amaime	SC-RA-33	4	2	1	142	2	Baja
Rio Bolo	SC-RB-08	4	1	4	441	4	Alta
Rio Bolo	SC-RB-09	3	1	5	531	4	Alta
Rio Nima	SC-RN-01	3	1	2	231	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-02	4	1	2	241	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-03	4	1	3	341	3	Moderada
Rio Nima	SC-RN-04	4	1	1	141	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-05	4	1	1	141	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-06	4	1	3	341	3	Moderada
Rio Nima	SC-RN-07	4	1	1	141	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-08	4	1	1	141	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-09	4	1	1	141	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-10	4	1	3	341	3	Moderada
Rio Nima	SC-RN-11	4	1	1	141	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-12	4	1	1	141	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-13	2	1	1	121	1	Muy baja

CUENCA		Parámetros de la subcuenca				Índice Morfométrico de Torrencialidad	
Cuenca	Subcuenca	Pendiente	Kc	DD	Código relación	IMT	Clase
Rio Nima	SC-RN-14	3	1	1	131	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-15	2	1	1	121	1	Muy baja
Rio Nima	SC-RN-16	2	1	1	121	1	Muy baja
Rio Nima	SC-RN-17	2	3	5	523	4	Alta
Rio Nima	SC-RN-18	4	1	2	241	2	Baja
Rio Nima	SC-RN-19	4	1	2	241	2	Baja

Se observa que un número importante de subcuencas (36 de 54) presentan un Índice Morfométrico de Torrencialidad entre bajo y muy bajo, que parecería indicar una muy baja y baja susceptibilidad a avenidas torrenciales, lo cual se explica por las condiciones específicas del terreno y la forma de la cuenca. Sin embargo, debe señalarse que la susceptibilidad a avenidas torrenciales también dependerá de la variabilidad de los caudales en la cuenca (es decir, del valor del Índice de variabilidad).

Igualmente 41 subcuencas presentan una densidad de drenaje entre muy y moderada, es decir, que falta densidad de drenaje; pero esto también obedece a la forma alargada de las mismas, puesto que para todas se obtienen valores que se clasifican en niveles 1 a 5, correspondientes a niveles muy bajo y muy alto, respectivamente. En la Figura 18 se presenta el mapa resultante a partir de los valores del Índice de Morfométrico de Torrencialidad (IMT) calculado para las diferentes subcuencas de la zona rural del municipio de Palmira.

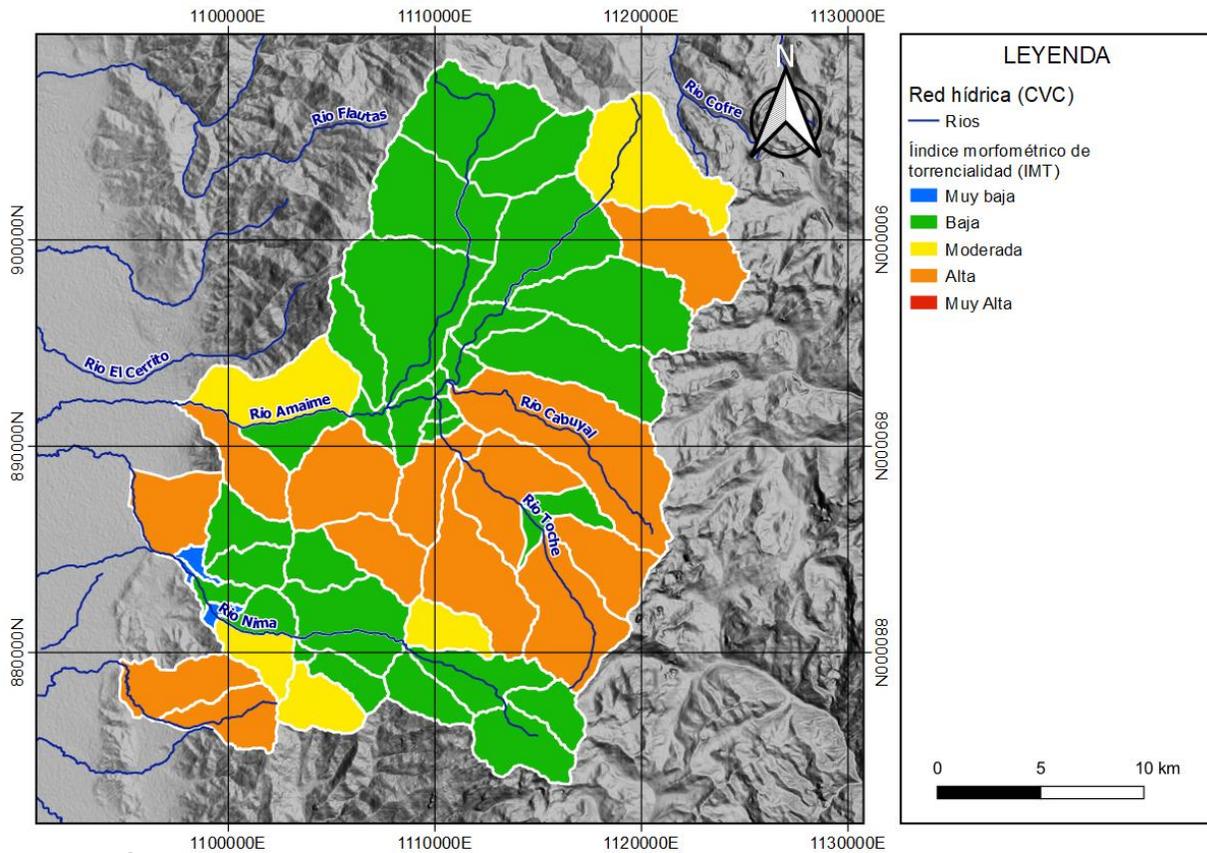


Figura 18. Índice de Morfométrico de Torrencialidad (IMT) para zona rural del municipio de Palmira
 Fuente. Elaboración propia

7.2.3 Resultados Índice de Variabilidad (IV)

Del estudio hidrológico se tienen las curvas de duración de caudales para las diferentes subcuencas de la zona de estudio; las cuales se presentan en la Figura 19.

Con base en la curva de duración de caudales de cada subcuenca se realiza el cálculo del Índice de Variabilidad siguiendo la metodología de la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Para efectos prácticos el cálculo de este índice requiere de los caudales para los diferentes percentiles tomados de la curva de duración de caudales de cada subcuenca (Q_i). El parámetro β corresponde a una parte de la expresión para el cálculo del IV:

$$\beta = (\log Q_i - X)^2$$

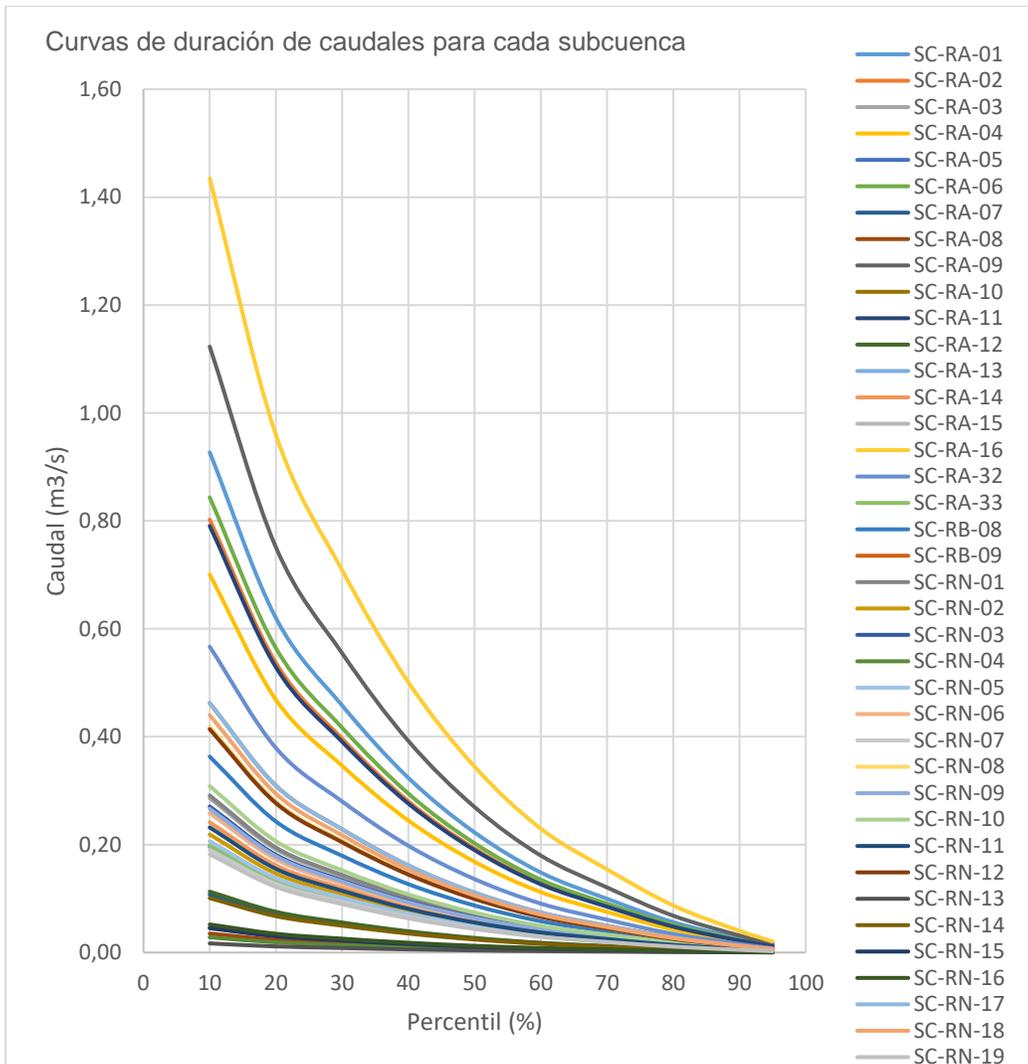


Figura 19. Curvas de duración de caudales para las subcuenas de la zona de estudio

Para todas las curvas de duración de caudales empleadas se consideran 10 percentiles. Se efectúa el cálculo y se clasifican los valores, según las clases de la Tabla 4. Se realiza el mismo procedimiento para cada una de las subcuenas de la zona de estudio; en anexo se incluyen los cálculos del índice de variabilidad para cada una de las cuencas.

Una vez asignada su clase, se relacionan los resultados con las subcuenas en formato SIG y se presenta el mapa de la Figura 20, correspondiente al Índice de Variabilidad (IV) en cada una de las cuencas.

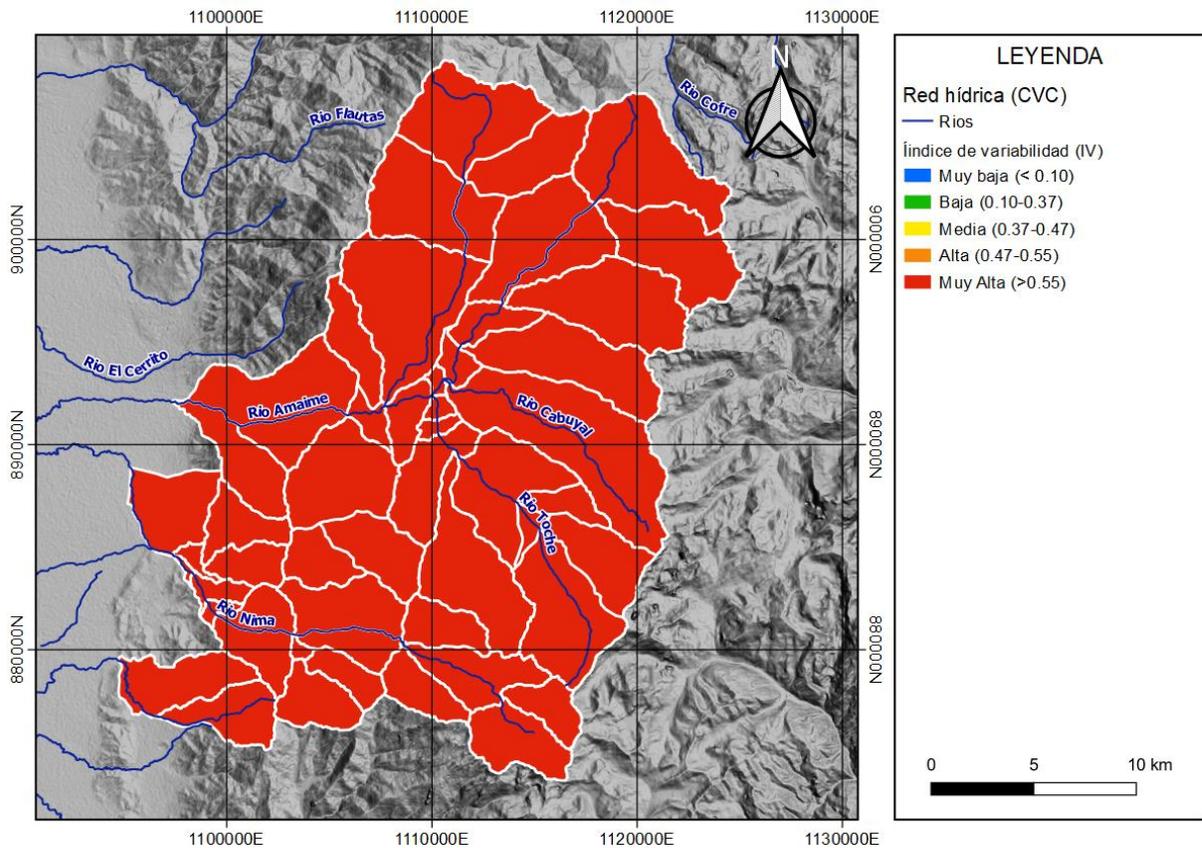


Figura 20. Índice de Variabilidad (IV) para la zona rural del municipio de Palmira

Fuente. Elaboración Propia

Se puede observar que para la totalidad de las subcuencas se tiene una variabilidad muy alta en los caudales, lo cual indica que probablemente ocurran desbordamientos en condiciones de caudales máximos, según las variaciones en la permanencia de los caudales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2013). En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos del cálculo del índice de variabilidad para las diferentes subcuencas de la zona de estudio.

Tabla 14. Resultados tabulares del Índice de Variabilidad (IV) para las subcuencas

Subcuenca		Índice de variabilidad (IV)		
Cuenca	Subcuenca	Valor IV	IV - Clase	
Río Amaime	SC-RA-01	0,68	Muy Alta	4
Río Amaime	SC-RA-02	0,68	Muy Alta	4
Río Amaime	SC-RA-03	0,68	Muy Alta	4
Río Amaime	SC-RA-04	0,68	Muy Alta	4
Río Amaime	SC-RA-05	0,68	Muy Alta	4
Río Amaime	SC-RA-06	0,68	Muy Alta	4
Río Amaime	SC-RA-07	0,68	Muy Alta	4
Río Amaime	SC-RA-08	0,68	Muy Alta	4

Subcuenca		Índice de variabilidad (IV)		
Cuenca	Subcuenca	Valor IV	IV - Clase	
Rio Amaime	SC-RA-09	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-10	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-11	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-12	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-13	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-14	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-15	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-16	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-17	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-18	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-19	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-20	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-21	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-22	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-23	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-24	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-25	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-26	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-27	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-28	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-29	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-30	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-31	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-32	0,68	Muy Alta	4
Rio Amaime	SC-RA-33	0,68	Muy Alta	4
Rio Bolo	SC-RB-08	0,68	Muy Alta	4
Rio Bolo	SC-RB-09	0,68	Muy Alta	4
Rio Nima	SC-RN-01	0,68	Muy Alta	4
Rio Nima	SC-RN-02	0,68	Muy Alta	4
Rio Nima	SC-RN-03	0,68	Muy Alta	4
Rio Nima	SC-RN-04	0,68	Muy Alta	4
Rio Nima	SC-RN-05	0,68	Muy Alta	4
Rio Nima	SC-RN-06	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-07	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-08	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-09	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-10	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-11	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-12	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-13	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-14	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-15	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-16	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-17	0,68	Muy baja	4

Subcuenca		Índice de variabilidad (IV)		
Cuenca	Subcuenca	Valor IV	IV - Clase	
Rio Nima	SC-RN-18	0,68	Muy baja	4
Rio Nima	SC-RN-19	0,68	Muy baja	4

Para la determinación de la curva de duración de caudales se empleó una estación limnigráfica de referencia, localizada en la parte alta de la zona de estudio, la cual si bien presenta una alta variabilidad, puede no representar la totalidad de las subcuencas, en especial aquellas de las zonas bajas, donde en condiciones máximas al haberse desbordado los caudales aguas arriba, puede presentarse una menor variabilidad; sin embargo, en la práctica obtener de manera precisa la curva de duración de caudales para cada subcuenca requeriría disponer de una instrumentación en los cauces en diferentes sitios. Considerando que se trata de un estudio para finalmente evaluar la amenaza este resultado se considera apropiado.

7.2.4 Resultados Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)

Habiendo determinado el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) y el Índice de Variabilidad (IV), con base en la categorización indicada en la Tabla 5 se procede a realizar la clasificación de los niveles de susceptibilidad de las diferentes subcuencas de la zona de estudio frente a eventos torrenciales, es decir, se determina el índice IVET y el nivel de susceptibilidad de cada una de las subcuencas (Tabla 15).

Tabla 15. Resultados de la zonificación de la susceptibilidad a avenidas torrenciales en las subcuencas de la zona rural del municipio de Palmira según el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)

Subcuencas		(IMT)		Índice de Variabilidad (IV)			IVET
Cuenca	Subcuenca	IMT - Clase	Valor IV	IV - Clase			
Rio Amaime	SC-RA-01	3 Moderada	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-02	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-03	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-04	4 Alta	0,68	Muy Alta	4	4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-05	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-06	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-07	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-08	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-09	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-10	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-11	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-12	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-13	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-14	2 Baja	0,68	Muy Alta	4	3	Alta

Subcuencas		(IMT)		Índice de Variabilidad (IV)			IVET
Cuenca	Subcuenca	IMT - Clase		Valor IV	IV - Clase		
Rio Amaime	SC-RA-15	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-16	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-17	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-18	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-19	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-20	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-21	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-22	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-23	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-24	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-25	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-26	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-27	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-28	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-29	3	Moderada	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-30	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-31	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Amaime	SC-RA-32	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Amaime	SC-RA-33	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Bolo	SC-RB-08	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Bolo	SC-RB-09	4	Alta	0,68	Muy Alta	4 4	Muy alta
Rio Nima	SC-RN-01	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-02	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-03	3	Moderada	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-04	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-05	2	Baja	0,68	Muy Alta	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-06	3	Moderada	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-07	2	Baja	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-08	2	Baja	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-09	2	Baja	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-10	3	Moderada	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-11	2	Baja	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-12	2	Baja	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-13	1	Muy baja	0,68	Muy baja	4 2	Media
Rio Nima	SC-RN-14	2	Baja	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-15	1	Muy baja	0,68	Muy baja	4 2	Media
Rio Nima	SC-RN-16	1	Muy baja	0,68	Muy baja	4 2	Media
Rio Nima	SC-RN-17	4	Alta	0,68	Muy baja	4 4	Muy alta
Rio Nima	SC-RN-18	2	Baja	0,68	Muy baja	4 3	Alta
Rio Nima	SC-RN-19	2	Baja	0,68	Muy baja	4 3	Alta

De acuerdo con los valores obtenidos del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales se observa que 51 de las 54 subcuencas de la zona de estudio (es decir el 94,4% del total

de subcuencas) se clasifican en condición de vulnerabilidad entre alta y muy alta frente a eventos torrenciales. En consecuencia, se puede afirmar que para la escala de trabajo de 1:25,000 la mayoría de las subcuencas de la zona rural del municipio de Palmira, se encuentra en condición de vulnerabilidad alta frente a eventos torrenciales. Las cuencas que presentan un Índice IVET muy alto, son las cuencas del río Cabuyal, Río Toche, Quebrada Las Auras, Quebrada Los Chorros, Quebrada La Tigra, Quebrada Tierradentro, Quebrada Honda y río Aguaclara.

Se observa que en 33 subcuencas el Índice Morfométrico de Torrencialidad es bajo, pese a ello las subcuencas se clasifican como de vulnerabilidad alta frente a eventos torrenciales, lo cual se debe a la alta variabilidad de los caudales en todas las subcuencas de la zona de estudio, determinada mediante el índice de variabilidad.

Los resultados obtenidos se relacionan con la información SIG, para su respectiva representación cartográfica, así, se presenta el mapa de la Figura 21.

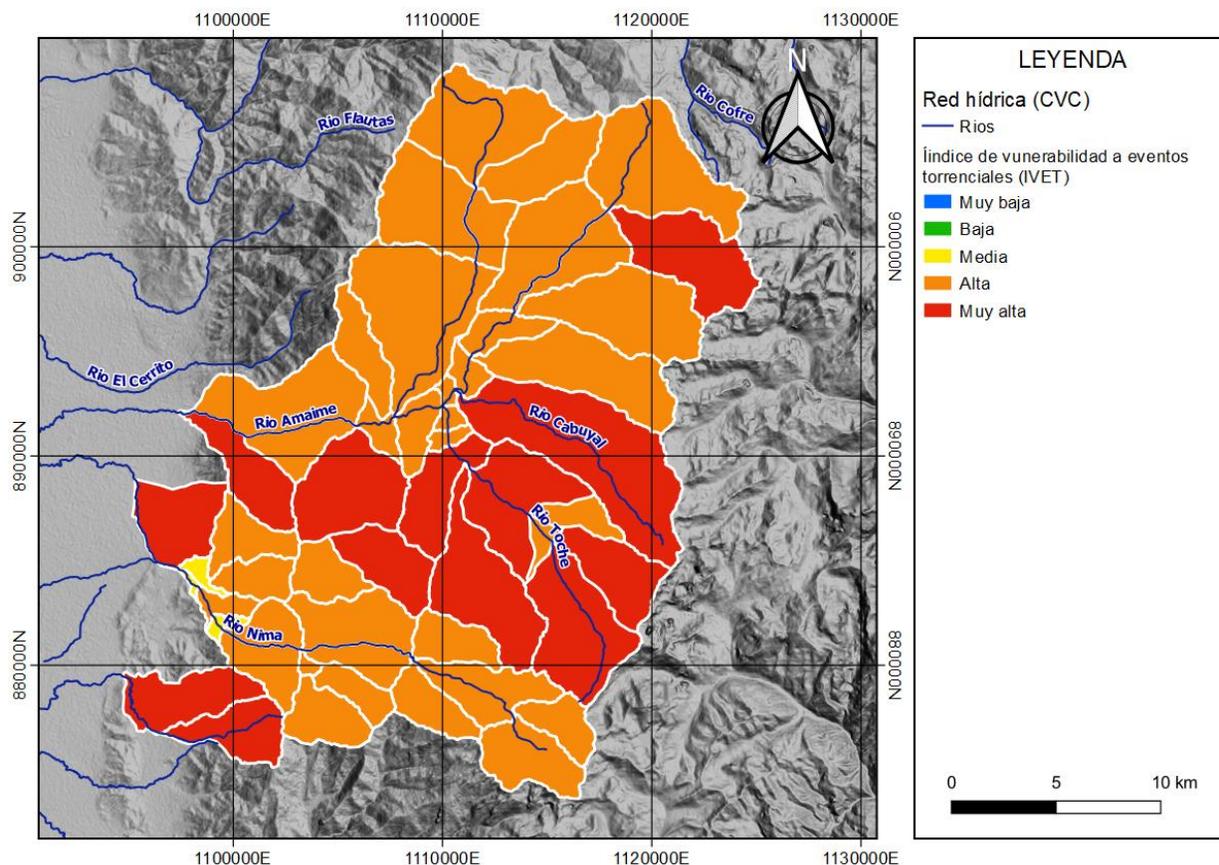


Figura 21. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) en la zona rural del municipio de Palmira

Fuente. Elaboración Propia

7.3. Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales

7.3.1 Geoformas Indicativas de Depósito y Aporte de Sedimento.

Las subcuencas evaluadas que presentan indicadores altos frente a eventos torrenciales e indican una probabilidad de presentar avenidas de flujos de detritos, se encuentran en la zona más montañosa del territorio, los rasgos geomorfológicos más representativos corresponden a valles aluviales estrechos, confinados, limitados por laderas de altas pendientes asociados a morfologías colinadas, lomas, lomeríos disectados, montículos y ondulaciones, sierras, espolones, lomos, artesas glaciares, conos y lóbulos de gelifracción entre otros de ambiente predominantemente denudacional, estructural y glacial que representan la topografía más marcada en la región montañosa del municipio (Figura 22). Para ampliar información respecto los rasgos geomorfológicos y geológicos del territorio de Palmira que sirvieron de insumo para la evaluación de la susceptibilidad geomorfológica por avenidas torrenciales, consultar el estudio de geología y geomorfología escala 1:25000 realizado en el marco del presente convenio.

En estas regiones los rasgos geomorfológicos de ambiente fluvial se encuentran representados por valles en forma de “V” confinados y estrechos que se asocian principalmente a la dinámica fluvial de los drenajes tributarios de corrientes principales como el río Nima, Amaime y Aguaclara cuya confluencia se encuentra representada por geoformas como conos, terrazas de acumulación recientes, subrecientes y antiguas que son más evidentes sobre la margen izquierda del río Amaime y geoformas como abanicos aluviales coalescentes hacia la zona de piedemonte, abanicos aluviales antiguos, subreciente y actuales luego de la zona de piedemonte asociados con la dinámica fluvial del río Nima que modelan una topografía más suave debido a la pérdida de confinamiento del cauce, indicando un predominio de procesos de depositación (Figura 23).

Es posible asociar estos rasgos geomorfológicos con una dinámica torrencial que se evidencia en la presencia de depósitos variados que van desde clastosoportados a matriz soportados muy pobremente seleccionados que se encuentran limitando los drenajes de la región montañosa, con presencia de bloques de gran tamaño. La presencia de geoformas de ambiente estructural permite identificar la influencia tectónica en la zona, lo que sugiere la presencia de macizos rocosos fuertemente fracturados que generan un gran aporte de materiales a las corrientes hídricas.

Inicialmente se realiza una identificación de la geomorfología indicativa como parte del reconocimiento de la historia fluviotorrencial del municipio, además de identificar las geoformas indicativas de depósito que pueden ser de origen fluviotorrencial, o fluvial principalmente, o de otro origen si es necesario y están dentro de la zona de influencia de una avenida torrencial que son validadas mediante el trabajo de campo. Así como las geoformas indicativas de aporte, las cuales son aquellas que se caracterizan por estar en inmediaciones del canal o la zona de tránsito, y por tanto se consideran una fuente directa de sedimentos en una avenida torrencial (SGC, 2021).

De igual manera el (SGC, 2021) define en su guía metodológica para zonificación de amenaza por avenida torrencial que las geoformas indicativas de depósito pueden ser fluviales, fluviotorrenciales o de otro origen, si es el caso, y están asociados al área de influencia del depósito de una avenida torrencial. Sin embargo, algunas geoformas pueden ser indicativas tanto de zonas de aporte como de zonas de depósito. En Tabla 16 se presentan las geoformas indicativas de zonas de aporte y zonas de depósito de sedimentos en avenidas torrenciales identificadas dentro del municipio de Palmira, la localización de la geoforma dentro del área de análisis y su interacción con la dinámica fluviotorrencial.

Tabla 16. Geoformas indicativas de zonas de aporte y zonas de depósito en la región montañosa y de piedemonte del municipio de Palmira

ACRÓNIMO	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN
Faa	Abanico aluvial	Depósito - Aporte
Faaac	Abanico aluvial actual	Depósito
Faaac	Abanico aluvial antiguo	Depósito
Fac	Abanico aluvial coalescente	Depósito - Aporte
Faas	Abanico aluvial subreciente	Depósito
Fea	Escarpe abanico aluvial	Aporte
Ftae	Escarpe de terraza de acumulación	Aporte
Ftaean	Escarpe de terraza de acumulación antigua	Aporte
Ftaes	Escarpe de terraza de acumulación subreciente	Aporte
Dpa	Pedimentos de acumulación	Aporte - Depósito
Fpac	Planicie aluvial confinada	Aporte
Fpi	Planicie de inundación	Aporte - Depósito
Fta	Terraza de acumulación	Depósito
Ftan	Terraza de acumulación antigua	Aporte
Ftas	Terraza de acumulación subreciente	Aporte - Depósito
Gag	Artesa Glaciar	Aporte
Gpcs	Planos y conos de sobrelavado glaciar	Aporte

Partiendo de la información geológico – geomorfológica validada y ajustada en recorridos de campo, se lograron identificar, 2 geoformas de ambiente glaciar indicativas de aporte de sedimentos, 1 geoforma de ambiente denudacional indicativa principalmente de aporte de

sedimentos que por su génesis también puede ser indicativa de depositación de sedimentos; y 14 geoformas de ambiente fluvial dentro de las cuales cuatro son indicativas de depósito de sedimento, seis son indicativas de aporte y las demás por su génesis, localización respecto al cauce y su interacción con la dinámica torrencial indican tanto zonas de depósito como zonas de aporte o viceversa según corresponda.

7.3.2 Clasificación de Susceptibilidad Geomorfológica

La susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales se obtuvo a partir de la cartografía de subunidades geomorfológicas indicativas, las cuales se obtienen directamente del mapa geomorfológico y se categorizan de acuerdo con las características que las definen con el objetivo principal de identificar las zonas posiblemente afectadas por el depósito de estos procesos (SGC, 2017).

Si bien, según el (Servicio Geológico Colombiano, 2021) las geoformas indicativas de depósito son el criterio principal para realizar la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales según su edad relativa, en el presente análisis se consideró importante incluir también las geoformas indicativas de aporte de sedimento que por su localización y distancia al cauce pueden considerarse una zona posiblemente afectada por el tránsito y/o depositación de una avenida torrencial (Tabla 17). Donde fue posible, estas zonas fueron validadas y ajustadas mediante recorridos de campo y entrevistas con la comunidad.

Tabla 17. Categorías de susceptibilidad geomorfológica de las geoformas indicativas dentro del municipio de Palmira

ACRÓNIMO	DESCRIPCIÓN	SUSCEPTIBILIDAD
Faaac	Abanico aluvial actual	Alta
Ftae	Escarpe de terraza de acumulación	Alta
Fpac	Planicie aluvial confinada	Alta
Fpi	Planicie de inundación	Alta
Fta	Terraza de acumulación	Alta
Faa	Abanico aluvial	Media
Fac	Abanico aluvial coalescente	Media
Faas	Abanico aluvial subreciente	Media
Fea	Escarpe abanico aluvial	Media
Ftaean	Escarpe de terraza de acumulación antigua	Media
Ftaes	Escarpe de terraza de acumulación subreciente	Media
Dpa	Pedimentos de acumulación	Media
Ftas	Terraza de acumulación subreciente	Media
Gag	Artesa Glaciar	Media
Gpcs	Planos y conos de sobrelavado glaciar	Media
Faaac	Abanico aluvial antiguo	Baja
Ftan	Terraza de acumulación antigua	Baja

Las geoformas indicativas de depósito fueron categorizadas de acuerdo con la edad relativa y las geoformas indicativas de aporte de sedimento fueron categorizadas de acuerdo a su localización transversal respecto a los cauces lo que permitió identificar que las áreas con mayor potencial de afectación por depositación y/o tránsito de avenidas torrenciales corresponden a las terrazas de acumulación, planicies aluviales confinadas, planicies de inundación y abanicos aluviales actuales. Las geoformas indicativas con susceptibilidad media corresponden a las zonas que por su proximidad al cauce pueden no solo considerarse zonas potencialmente afectadas por el tránsito de avenidas torrenciales si no que son fuentes de aporte directo de sedimento. Las categorías bajas están representadas por geoformas antiguas cuya génesis se asocia con procesos predominantes de sedimentación, pero que morfológicamente se encuentran muy distales y/o más elevados respecto a los cauces. Estas geoformas además contienen el registro de eventos históricos ocurridos en la zona.

En la zona de confluencia de los drenajes tributarios de la margen izquierda del río Amaime se han encontrado geoformas como terrazas de acumulación que se asocian con una dinámica torrencial de estas corrientes hídricas; cuyo comportamiento es validado por personas de la comunidad quienes en repetidas ocasiones reportan las crecientes de los drenajes principalmente en épocas de lluvia. Así mismo, asociado a la dinámica fluvial de los ríos Nima y Aguaclara se tienen las geoformas de abanico aluvial y abanico aluvial coalescente cuyo origen está relacionado con la acumulación torrencial y fluvial en forma radial, donde una corriente desemboca en una zona plana. De igual manera en el sector de la Buitrera y sus alrededores se tienen reportes por creciente de los tributarios del río Aguaclara que afecta las viviendas e infraestructura del sector.

7.3.3 Mapa de Susceptibilidad Geomorfológica por AVT

Finalmente, el mapa de susceptibilidad geomorfológica por AVT del municipio de Palmira refleja las zonas que potencialmente pueden resultar afectadas por el tránsito y/o depósito de avenidas torrenciales, así como permite identificar los elementos geomorfológicos y morfodinámicos que favorecen la ocurrencia de eventos fluviotorrenciales dentro del territorio municipal (Tabla 18 y Figura 24). Entendiéndose la zona plana como un sitio de depositación de sedimentos y la zona montañosa como un área fuente de material predominantemente.

Tabla18. Descripción de los niveles de Susceptibilidad Geomorfológica

SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN
Alta	Corresponden a las zonas de mayor afectación por la ocurrencia de avenidas torrenciales; en esta se incluyen las geoformas que se encuentran más cerca al cauce actual en términos de distancia transversal y altura que se consideran más recientes, y por tanto con mayor potencial a ser nuevamente ocupadas por avenidas torrenciales, y las geoformas próximas al cauce que demarcan la zona de tránsito de las avenidas torrenciales.
Media	Corresponden a zonas de la región montañosa potencialmente afectadas por el tránsito de las avenidas torrenciales que se encuentran próximas al canal que no alcanzan a ser ocupadas por una avenida torrencial, pero puede ser incorporadas a la misma generando así un aporte de sedimentos a la misma. En zona plana corresponde a zonas distales de depositación.
Baja	Corresponden a las zonas de la región montañosa que se encuentran más distales y/o más elevadas que difícilmente pueden ser nuevamente ocupadas por avenidas torrenciales y entran a formar parte de posibles zonas de aporte de sedimentos. En la zona plana corresponde a zonas distales de depositación con una probabilidad de ocurrencia muy baja.

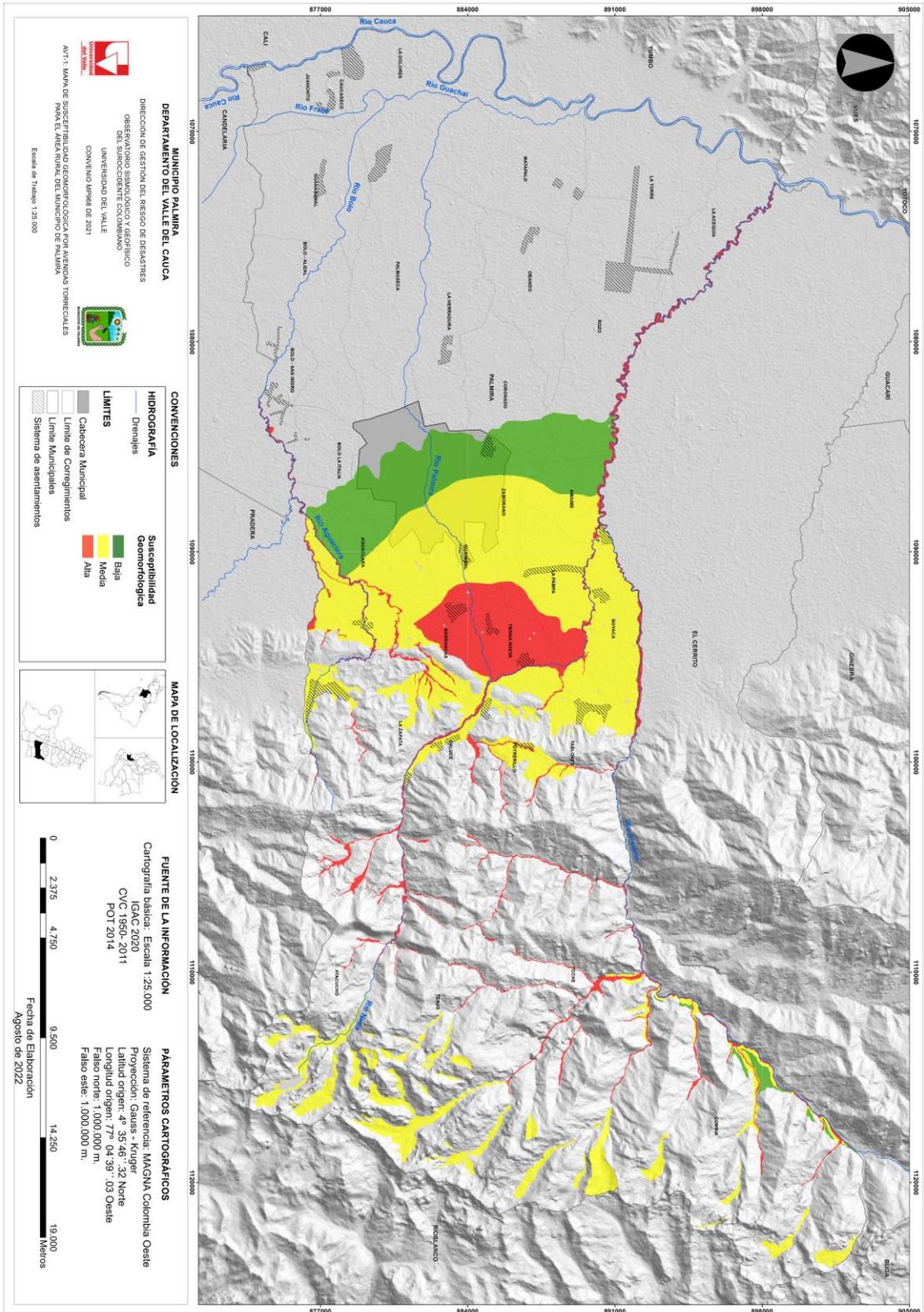


Figura 24. Mapa de Susceptibilidad Geomorfológica por Avenidas Torrenciales (AVT-1)
Fuente: Elaboración Propia

7.3.4 Resultados del Análisis HAND

Se recopiló un modelo de elevación digital de Palmira, con una precisión de 2,5 m pero con una resolución de 12.5 m por pixel, el cual es un tamaño de píxel acorde a los modelos de elevación digital recomendados para caracterización de la amenaza, según la guía (SGC y PUJ, 2021). A partir del modelo de elevación digital que se muestra en la Figura 25, se calcula la altura sobre el drenaje más cercano siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 8.

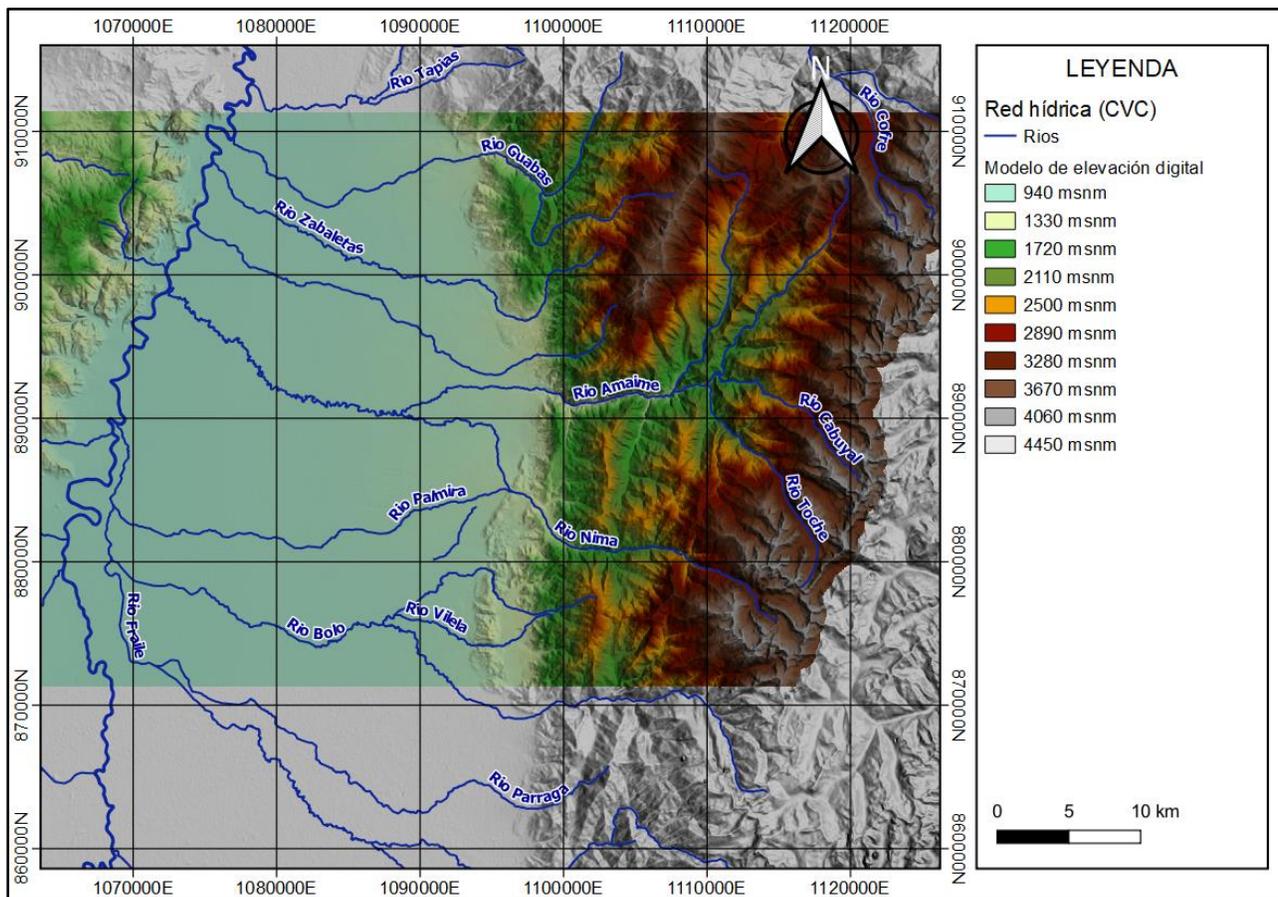


Figura 25. Modelo de elevación digital de CVC a 12,5 empleado para análisis HAND

Fuente. Elaboración Propia

Se observa que en el centro de los cauces es donde efectivamente se concentra principalmente la susceptibilidad alta, algunos de estos presentan una extensión a lo ancho de la susceptibilidad media y alta más larga que para otros cauces.

En principio los drenajes que se marcan claramente en este mapa son: río Amaime, río Cabuyal, río Toche, Río Coronado, Quebrada Las Auras, Quebrada Cucuana, Quebrada Tiatino, Quebrada Los Mensa, Quebrada La Tigra, Quebrada Tierra Adentro, Quebrada Los Chorros y Quebradas Yeguas 1. El área de susceptibilidad HAND clasificada entre alta

y media, sobre el río Amaime tiende a ser más extenso aguas arriba de la confluencia con la Quebrada Tigrera y cerca del punto de cierre final de dicho cauce. En la zona alta del río Toche es donde se observa la zona más extensa (extensa respecto al ancho del cauce) de susceptibilidad HAND media y alta (Tabla 19 y Figura 26).

Tabla 19. Descripción de los niveles del modelo HAND

(HAND)	Rango HAND	Descripción
Alta	$0 < \text{HAND} \leq 5 \text{ m}$	Corresponde a las zonas donde la lámina de agua de los cauces se encuentra a nivel de terreno, facilitando el flujo en el cauce.
Media	$5 < \text{HAND} \leq 15 \text{ m}$	Corresponde a las zonas donde la altura del terreno se encuentra entre 5 y 15 metros respecto a la lámina de agua de los cauces.
Baja	$\text{HAND} > 15 \text{ m}$	Corresponde a las zonas donde la altura del terreno se encuentra a más de 15 metros respecto a la lámina de agua de los cauces

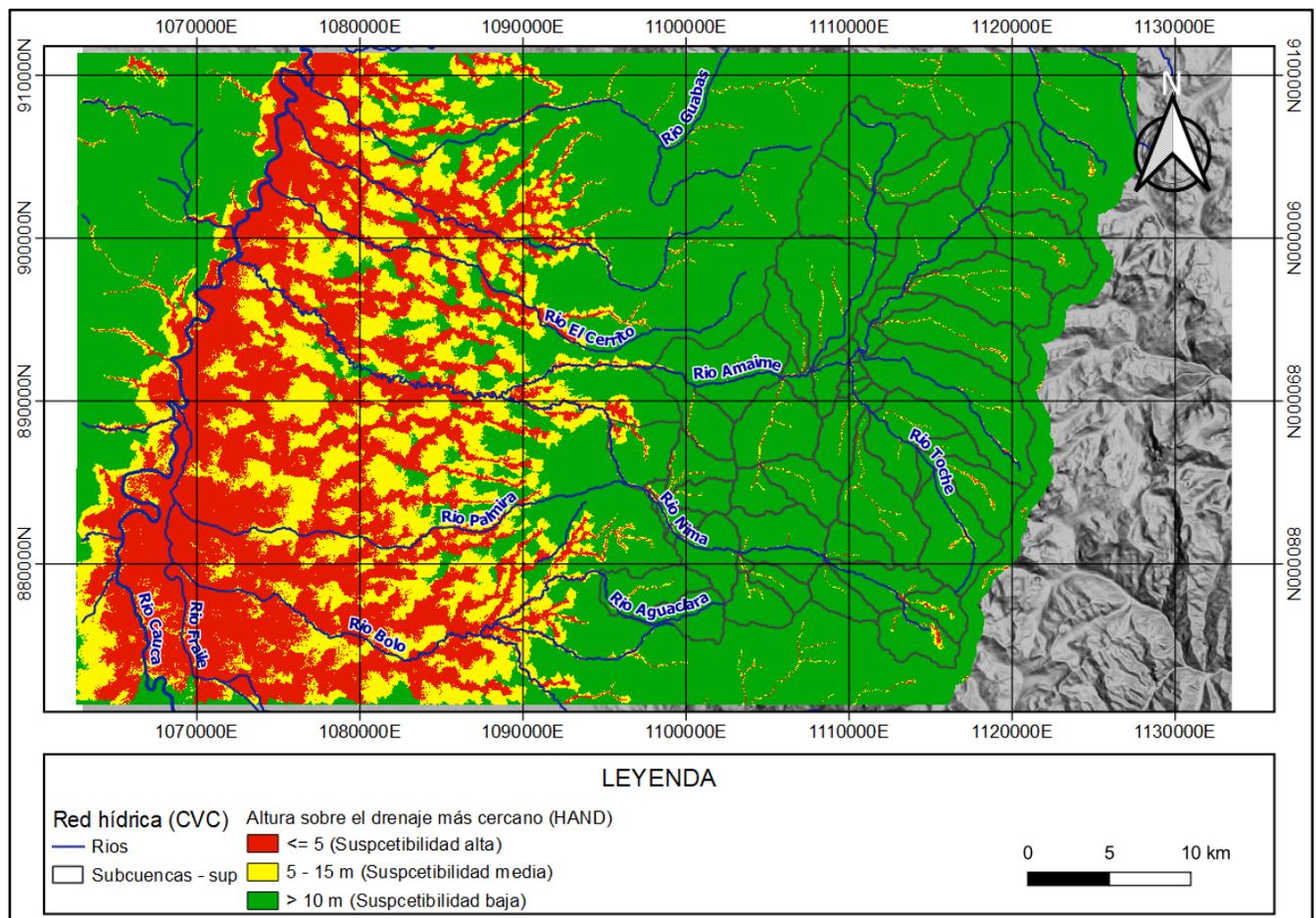


Figura 26. Mapa del análisis HAND para el municipio de Palmira

Fuente. Elaboración propia

7.3.5 Movimientos en Masa

De acuerdo con los resultados obtenidos en el Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:25000 (Figura 27) la amenaza alta corresponde a zonas en las que se detonan deslizamientos y flujos de tierra, debido a la condición débil de los materiales presentes, con pendientes mayores a 20°. Las áreas de los movimientos pueden ser predominantemente menores a 12000 ha y algunos pueden alcanzar hasta los 316 ha. Para condiciones de lluvia similar a mayo de 2011, es decir precipitaciones intensas precedidas de altas precipitaciones que saturan los materiales, cuya coincidencia corresponde a un período de retorno que oscila entre 10 y 100 años, se estima que se pueden presentar densidades hasta de 40 deslizamientos por km². Esta categoría ocupa el 32% del área de estudio, cubriendo un área de 15340 ha, principalmente en el centro, norte, nororiente y sur occidente.

En esta categoría (amenaza media) se presenta en la zona montañosa (Norte, sur y centro). Las pendientes presentadas están entre el 8° y 20°, con un área 26897 ha. En conclusión, esta categoría de amenaza comprende aproximadamente el 56% del área de estudio.

En la amenaza baja hay zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad, en otras palabras, el potencial de ocurrencia de un deslizamiento es bajo. La amenaza baja por movimientos en masa que se presenta es del 12% con un área de 5918 ha, localizadas al sur occidente de la zona montañosa.

De esto se puede concluir que en la región montañosa existe una alta posibilidad de generación de deslizamientos de tipo rotacional y traslacional que podrían causar represamiento de cauces dadas las características del relieve y la presencia de valles confinados, o generarse una serie de deslizamientos como respuesta a agentes externos que aporten gran cantidad de sedimento a las corrientes.

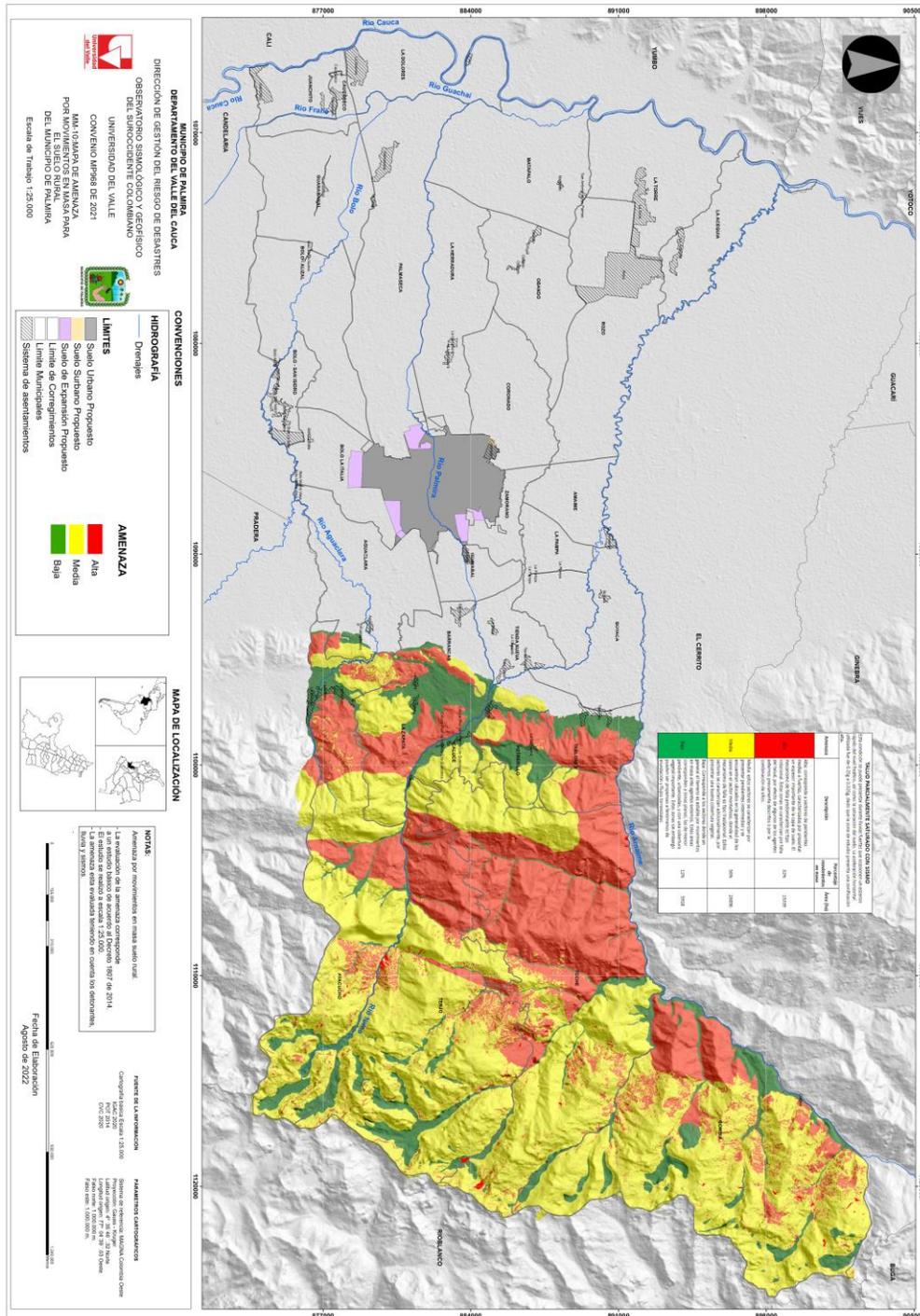


Figura 27. Mapa de Amenaza por Movimiento en Masa 1:25000 para zona rural del municipio de Palmira (MM-10)
Fuente. Elaboración Propia

7.4. Zonificación de la Amenaza Indicativa por Avenidas Torrenciales

7.4.1 Zonificación de la Amenaza por AVT en zona montañosa

A partir de la asignación de pesos sobre los 3 factores o variables descriptivas del comportamiento del fenómeno en la zona montañosa y de realizar los diversos cruces de prueba de dichas variables y que fueron discutidos en el equipo de trabajo (ver sección 6.3.1) se logró obtener dos escenarios preliminares de amenaza indicativa para la zona montañosa:

Escenario Uno (1) de amenaza indicativa, resultado de la superposición con pesos asignados de la siguiente manera: Susceptibilidad geomorfológica (45%), modelo HAND (35%) y Amenaza por Movimiento en Masa (20%) (Figura 28).

Escenario Dos (2) de amenaza; resultado de la superposición con pesos asignados de la siguiente manera: Susceptibilidad geomorfológica (50%), modelo HAND (30%) y Amenaza por Movimiento en Masa (20%) (Figura 29).

Es importante mencionar, que este modelo de asignación de pesos reflejó ser muy sensible al momento de realizar las diversas pruebas con diferentes pesos en cada variable trabajada. Por lo tanto, se decidió tener como criterio de validación de los escenarios resultantes, las observaciones realizadas en campo por parte de los profesionales del equipo de geología sobre las zonas con registro histórico de ocurrencia de este tipo de eventos; así como, de los registros de eventos que se lograron obtener en el análisis de historicidad.

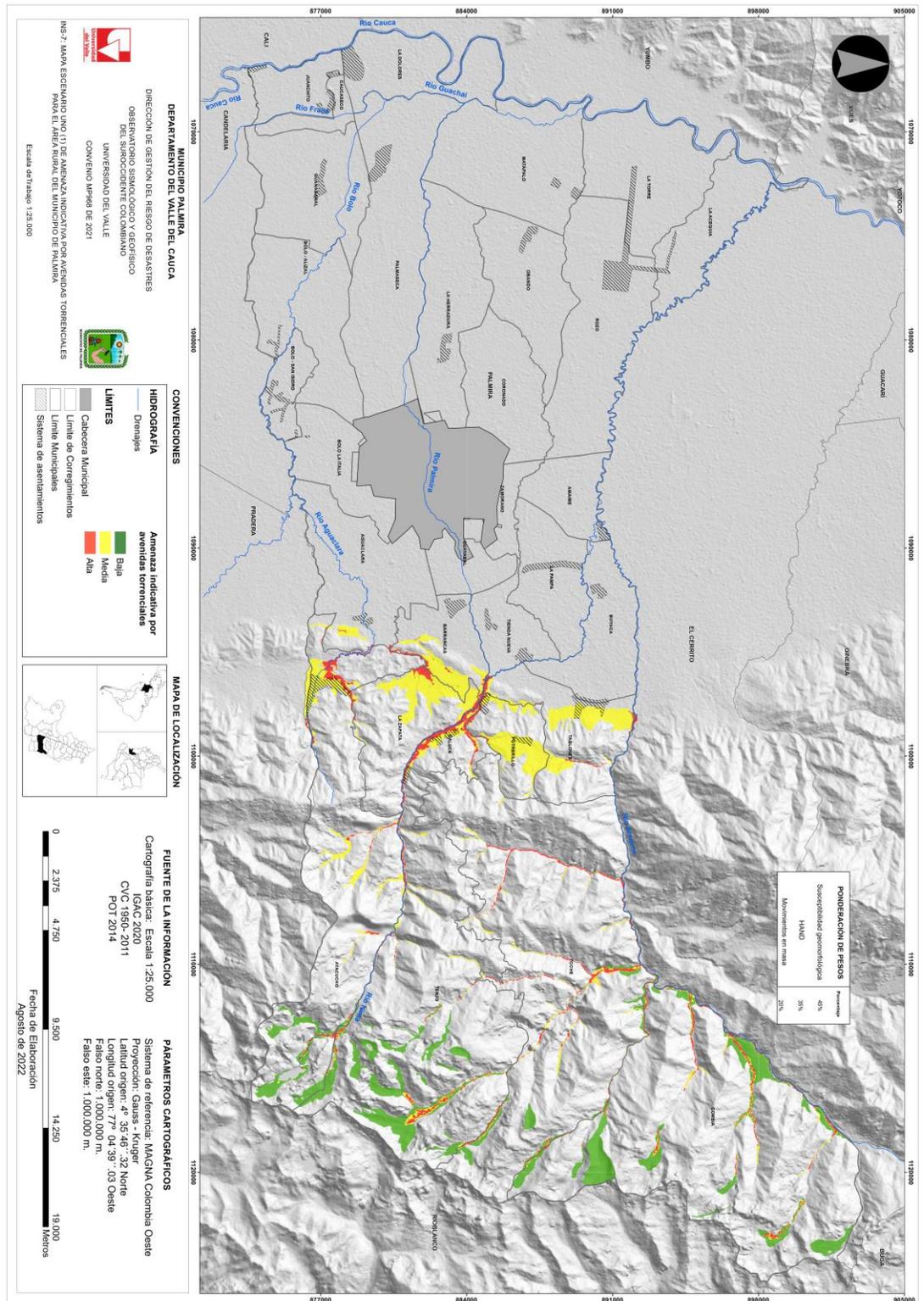


Figura 28. Mapa Escenario Uno (1) de Amenaza Indicativa por AVT en zona montañosa (INS-7)
 Fuente. Elaboración Propia

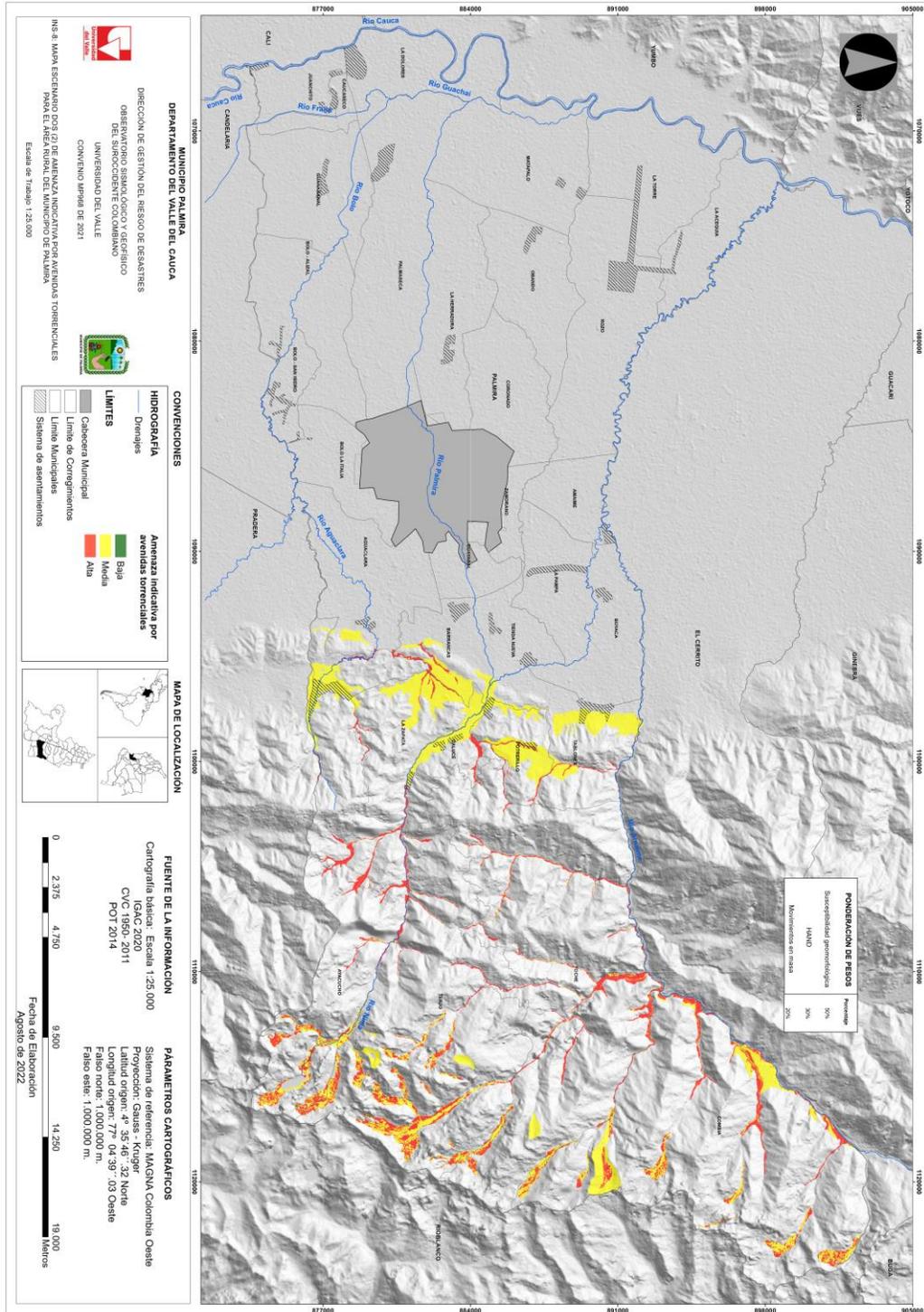


Figura 29. Mapa Escenario Dos (2) de Amenaza Indicativa por AVT en zona montañosa (INS-8)
Fuente. Elaboración Propia

Los resultados obtenidos para los Escenarios Uno (1) y Dos (2), fueron contrastados con el mapa de frecuencia de eventos históricos de avenidas torrenciales registradas a nivel de corregimientos del municipio de Palmira (Figura 15), logrando validar que en el Escenario Uno (1) en la parte baja de la región montañosa, los eventos históricos registrados soportan de manera adecuada las categorías de amenaza en esta zona, pero no en la región de alta montaña. Para la prueba asociada al Escenario Dos (2) se pudo observar que esta zonificación si se ajusta, a diferencia del Escenario Uno (1), de manera adecuada en la región de alta montaña con el registro histórico de eventos ocurridos en los corregimientos del sector, así como a las observaciones que se pudieron realizar en los recorridos de campo. Se tuvo en cuenta los corregimientos con mayor frecuencia de eventos de avenida torrencial tales como Combia, Tablones, Tienda Nueva y Ayacucho.

Por esta razón, con la obtención de las amenazas indicativas preliminares de los Escenarios Uno (1) y Dos (2) se logró, por medio de la superposición de los dos escenarios, generar el mapa de zonificación de la amenaza indicativa por avenidas torrenciales para la zona de montaña (Figura 30) utilizando las herramientas de SIG, por medio de la regla de ponderación del píxel de mayor rango presente en cada uno de los escenarios.

Es importante resaltar, que las ponderaciones asignadas para los dos escenarios de amenaza en zona montañosa surgieron a partir de discusiones técnicas interdisciplinarias con los equipos de trabajo, tomando como referencia criterios geomorfológicos e históricos asociados al inventario de eventos encontrados en el estudio de historicidad y la disponibilidad de insumos para la zona y la escala de trabajo.

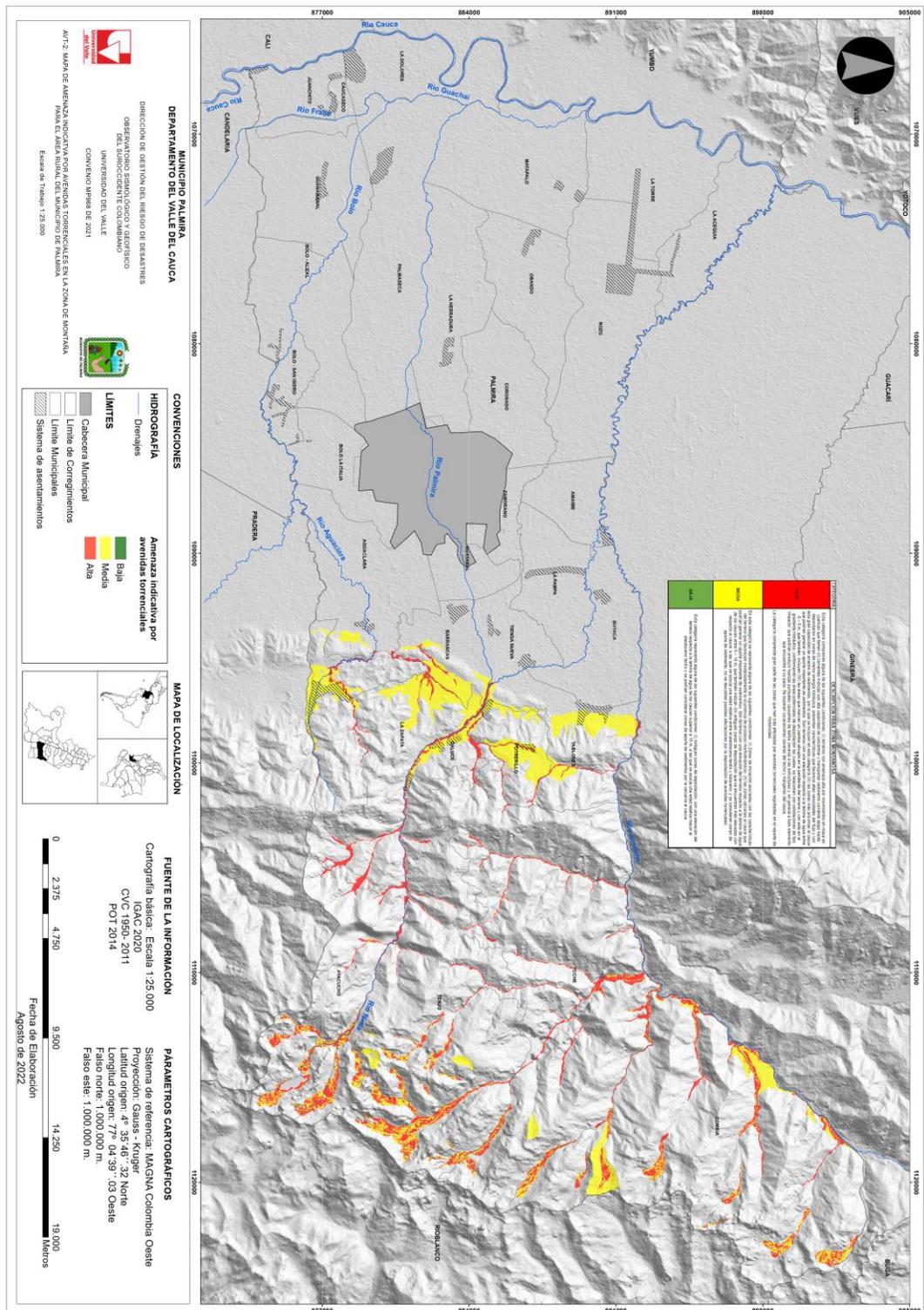


Figura 30. Mapa de Amenaza Indicativa por Avenidas Torrenciales para la zona Montañosa del municipio de Palmira
 Fuente: Elaboración Propia

7.4.2 Zonificación de la Amenaza por AVT en Zona Plana

El municipio de Palmira se localiza en el graben del Cauca, el cual es una depresión tectónica formada por el movimiento de las principales suturas tectónicas cuyas fuerzas distensivas formaron una cuenca de sedimentación, la cual se fue rellenando de sedimentos provenientes de la erosión asociada al levantamiento orogénico de la cordillera central, modelando un relieve plano conformado por sedimentos cuaternarios que recubren el basamento. Dentro de este se destaca la presencia de abanicos aluviales que adquieren gran importancia para el estudio de amenaza por AVT debido a que delimitan las zonas donde ha tenido lugar la depositación de la carga de sedimentos del sistema fluvial.

Teniendo en cuenta que los abanicos son sensitivos a los movimientos corticales y guardan una estrecha relación entre la rata de levantamiento, la incisión de los drenajes y la depositación de los sedimentos, se pudo interpretar que los procesos de levantamiento y erosión del frente montañoso no supera los procesos de incisión de los drenajes sobre los abanicos actuales debido a que las condiciones climatológicas y geológicas que dieron origen a los abanicos aluviales cambiaron, sin embargo, esto permitió reconstruir la historia deposicional en la zona de piedemonte del municipio de Palmira y elaborar la susceptibilidad geomorfológica por depositación de AVT a partir de las evidencias más notables de estas geoformas en la zona asignando una edad relativa asociada a la posición estratigráfica de los depósitos.

Así pues, para la zonificación de amenaza indicativa por AVT se evaluaron las condiciones geológicas – geomorfológicas que favorecen el desarrollo de abanicos aluviales en la zona de piedemonte, basados en la tipología y el gradiente hidráulico de las corrientes hídricas; además se evaluaron las posibles zonas de mayor afectación por la ocurrencia de un evento catastrófico que se pueda depositar en forma de abanico, tomando como punto de partida el mapa de susceptibilidad geomorfológica, reclasificándolo a partir de sus características morfométricas y morfológicas actuales como pendiente media, forma y composición, tratando de realizar una correlación entre los sedimentos encontrados y la severidad del evento, ya que es importante tener en cuenta que en zonas donde se evidencia la presencia de abanicos se pueden dar procesos de avulsión, es decir abandono rápido del cauce de un río y la formación de nuevos canales fuera de los confines del cauce actual.

Los abanicos aluviales se desarrollan normalmente donde una corriente fluvial de gradiente alto abandona un valle estrecho en terrenos montañosos y sale súbitamente a una llanura amplia o llana o a un fondo de valle. Los abanicos aluviales se forman en respuesta a la caída abrupta del gradiente que se combina con un cambio de posición y tamaño del cauce, de un cauce estrecho, de una corriente de montaña, a cauces menos confinados situados a la base de las montañas. La caída súbita de velocidad hace que la corriente libere rápidamente su carga de sedimento en una acumulación que tiene forma clara de cono o abanico (Tarbuck & Lutgens, 2010).

La presencia de abanicos aluviales condiciona sobremanera los patrones de drenaje que se desarrollan en una región, lo que facilita su identificación, por esta razón, la identificación de las condiciones que pueden dar origen a los abanicos aluviales en la zona plana partió del análisis a escala 1:25000 de la tipología de los ríos Amaime, Nima y Aguaclara como un condicionante geológico - geomorfológico que trata de relacionar la disposición de los canales, incluyendo sus formas (llanuras, valles, barras) y sus depósitos asociados con las características de las avenidas, ya que, a cada tipología se le asocia un patrón básico de avenida (Herrero y otros, 2008). Aquí se incorporó de manera indirecta la carga sólida transportada, debido a que el primer criterio para la clasificación de los ríos es considerar las características de los materiales que conforman el lecho de los canales.

Según (Herrero y otros, 2008), se han propuesto innumerables clasificaciones de las corrientes fluviales de lecho aluvial, pero básicamente pueden agruparse en dos conjuntos: Geomorfológicas, que otorgan especial importancia al trazado en planta utilizando parámetros como el índice de sinuosidad, el número de láminas de agua y el parámetro de braided; y Sedimentológicas, que relacionan la morfología de la corriente con su dinámica (carga y estabilidad) y secuencias características de depósito. Aparecen cuatro tipologías básicas, recto, mendriforme, entrelazado (braided) y anostomosado. Otra alternativa es la clasificación de Rosgen, en función de la pendiente del canal, el material del lecho, la relación anchura/profundidad, la sinuosidad y el grado de confinamiento lateral. Otro aspecto importante relacionado con la tipología del canal es la estabilidad del cauce en el tiempo y los tipos de cambios morfológicos que puedan ocurrir (Figura 31).

En lo que respecta a su relación con la tipología y efectos de las avenidas, puede definirse un patrón básico de inundaciones en cada tipo de corriente. Así, mientras que las avenidas en los ríos braided conllevan a la ocupación sucesiva del ámbito de los canales mediante la conjunción de los hilos de corriente contiguos en orden altitudinal, en los ríos meandriformes se produce rápidamente la ocupación de la llanura de inundación y de los surcos intercresta de la barra de meandro.

En la zona de piedemonte, los rasgos más claros y relativamente más recientes de abanico aluvial que se han identificado están asociados con la dinámica fluvial del río Nima, donde se han identificado al menos tres abanicos aluviales en el mapa geomorfológico 1:25000 que fueron categorizados en el mapa de susceptibilidad geomorfológica asignando una edad relativa asociada a la posición estratigráfica de los depósitos en alta, media y baja; tienen morfologías más suavizadas, posiblemente más asociadas con flujos hiperconcentrados que se caracterizan por un mayor contenido de agua, modelando superficies con pendientes suaves a planas, sin embargo, en un evento de avenida torrencial se puede presentar más de un tipo de flujo.

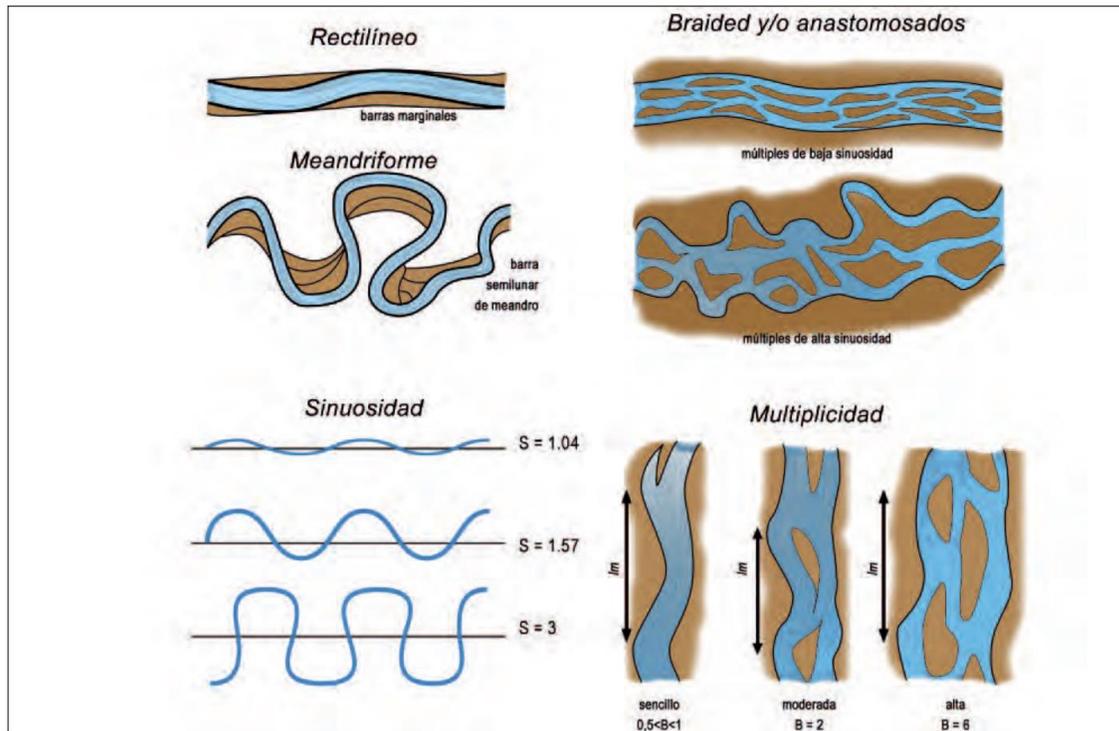


Figura 31. Clasificación básica de los tipos de ríos según el número de canales de corriente y su sinuosidad

Fuente. Herrero y otros, 2008

Evaluando la temporalidad de los abanicos de acuerdo con la evolución geológica geomorfológica del territorio se puede asociar a una edad holocena tardía que según la guía metodológica del servicio geológico colombiano se considera en amenaza media, y aunque la ausencia de registros históricos de eventos torrenciales ocurridos en la zona, la ausencia de abanicos actuales que demuestren procesos torrenciales activos, el desarrollo de suelo sobre los mismos, sean una evidencia geomorfológica de que las condiciones geológicas e hidroclimatológicas que dieron origen a los abanicos han cambiado, en (UTAH Geological survey, 2005) se consideran activos los sitios de depósito de sedimentos durante el holoceno, siendo esta el área del abanico donde ha ocurrido deposición, erosión e inundación del abanico aluvial relativamente reciente.

Así pues, se realizó la diferenciación de las zonas proximal, media y distal del abanico más reciente a partir de cambios sutiles en la pendiente y verificación en campo de la extensión, tipo y carácter de los depósitos de abanicos, encontrando pendientes de 2° en el abanico proximal y pendientes de 1.14° en el abanico medio, así como disminución del tamaño de grano a medida que se aleja del área fuente (ápice) (Figura 32).

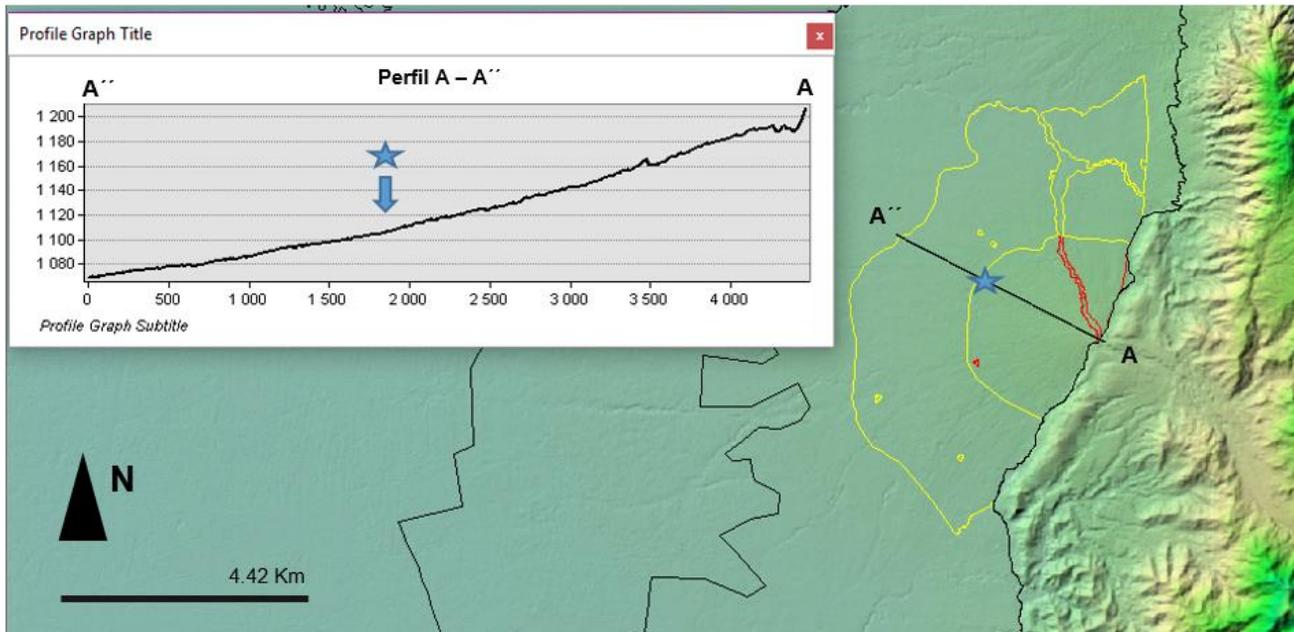


Figura 32. Perfil ilustrativo en el abanico más reciente.

Nótese los cambios sutiles en la pendiente del abanico proximal y el abanico medio, los cuales se asocian con disminución en el tamaño de los sedimentos a medida que se aleja del área fuente.

Fuente: Elaboración propia

En Figura 33 se observan los bloques encontrados en el cauce del río Palmira próximo a la zona de piedemonte, donde además es posible apreciar las suaves pendientes que caracterizan el relieve del abanico en esta parte del territorio; sin embargo, durante las campañas de campo se encontraron depósitos con bloques de hasta 30 cm de diámetro en una matriz de arena media a gruesa. Los clastos son irregulares, angulares a subangulares de variada composición que representa la litología de la región montañosa. La presencia de estos sedimentos de gran tamaño permitió delimitar la zona proximal del abanico. Por otra parte, en Figura 34 se observa sobre las márgenes del río Nima depósitos caóticos con presencia de clastos metamórficos e ígneos hasta tamaño grava gruesa (aprox 10 cm diámetro) en una matriz marrón, húmeda de tamaño arena media a gruesa.



Figura 33. Imágenes de la zona proximal del abanico reciente.

Se observa la proximidad con el piedemonte, la pendiente suave a casi plana y la particular presencia de bloques de hasta 30 cm de diámetro. Fotografía tomada durante las campañas de campo (Estación JAE 022).

Fuente: Elaboración propia

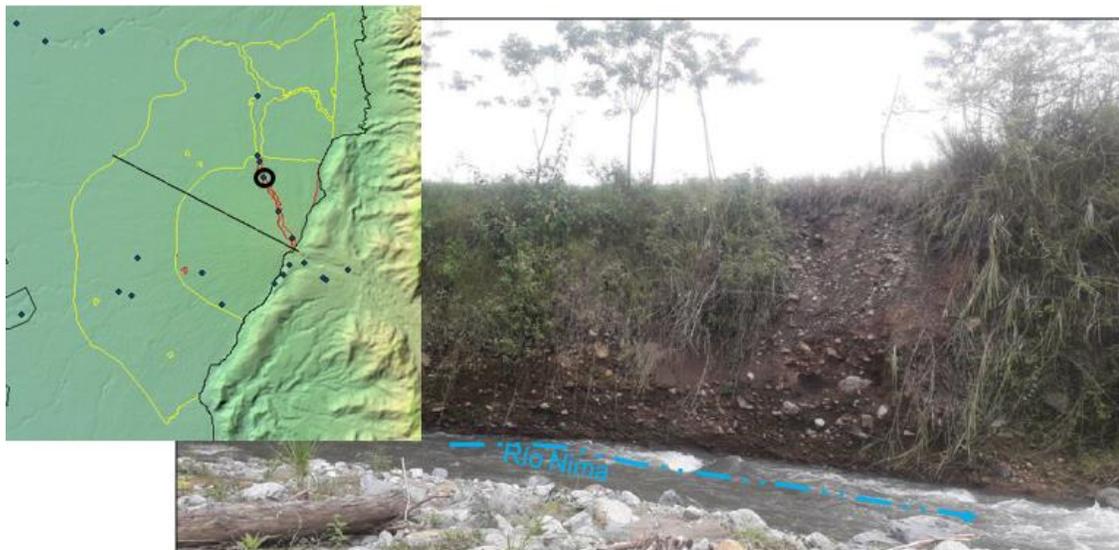


Figura 34. Imagen de clastos Río Nima sobre abanico próximo.

Sobre la margen izquierda del río Nima se identifica un depósito caótico con clastos hasta tamaño grava gruesa en una matriz marrón húmeda de tamaño arena media (Estación JAE 049)

Fuente: Elaboración propia

En Figura 35 se observa una disminución del tamaño de grano, encontrando durante las campañas de campo depósitos dentro del cauce del río Palmira con sedimentos tamaño guijarro con esporádica presencia de bloques de gran tamaño. De igual manera se evidencia una disminución en el tamaño de grano de los sedimentos encontrados dentro del cauce del río Nima evidenciado en la composición de las barras puntuales, las cuales presentan sedimentos tamaño guijarro hasta gravas medias, y presencia de bloques de gran tamaño de forma esporádica (Figura 36).



Figura 35. Imagen de granos en abanico distal sobre río Palmira

Se observa disminución del tamaño de grano de las partículas encontradas en la corriente hídrica con esporádica presencia de bloques de gran tamaño (Estación JAE 024)

Fuente: Elaboración propia



Figura 36. Imagen de granos en abanico distal sobre río Nima

Se observa una disminución del tamaño de grano evidenciado por la presencia de sedimento tamaño guijarro en la barra puntual del río Nima y esporádica presencia de bloques de mayor tamaño sobre la margen contraria (Estación JAE 095).

Fuente: Elaboración propia

En la zona del área urbana se encontraron depósitos bien seleccionados compuestos principalmente por sedimentos tamaño limo hasta arena media (Figura 37), lo que se asocia con una disminución de la energía de las corrientes en una zona muy distal del área fuente, lo que es correlacionable con las interpretaciones realizadas en la zona plana del municipio.



Figura 37. Imagen de Perfil encontrado sobre la vía del barrio Monteclaro en el área urbana de Palmira

Se observan tamaños de grano fino hasta arenas medias. (Estación JAE-ZU-07).

Fuente: Elaboración propia

La corriente del río Nima desemboca en el río Amaime a la altura del centro poblado de Amaime, viéndose afectado por la tectónica que modifica abruptamente la dirección del flujo. A partir del ápice del abanico más reciente se desarrolla un patrón de drenaje dicotómico el cual se ve afectado por la intervención antrópica que derivan el caudal de las corrientes para regadío y se ocupan los lechos de canales abandonados o que actualmente no están alimentados por la corriente principal.

El cauce principal cambia de un canal trenzado confinado con desarrollo de barras laterales no pareadas, de mayor área que el cauce principal, las cuales crecen por acreción lateral aguas abajo brindando una sinuosidad baja al cauce activo, esto se relaciona con pendientes acusadas, caudal variable, sedimentos de grano grueso e importante suministro de sedimentos, que pasa a un canal más amplio, moderadamente sinuoso con presencia de barras laterales y longitudinales que dividen el cauce en al menos dos canales, lo que indica la divagación del cauce aumentando el grado de anastomosamiento del canal asociado a inundaciones frecuentes que pueden desencadenar avulsiones debido a la

inestabilidad del cauce. Es válido aclarar que el cauce del río Amaime corresponde al nivel base local del río Nima, por lo que el río Nima va a erosionar el lecho tanto como su nivel base se lo permita, siendo este un cauce relativamente joven en comparación con el río Amaime, lo que indica un predominio de procesos erosivos.

Por otra parte, en la zona aledaña al río Amaime no se identifica con claridad la presencia de abanicos aluviales relativamente recientes o rasgos geomorfológicos que así lo indiquen, que se encuentren asociados a la dinámica deposicional del río Amaime. Esto se asocia a que el cauce del río Amaime es más viejo, presenta mayor incisión en el terreno, una pendiente media del cauce relativamente más baja, y un gradiente hidráulico relativamente bajo en comparación con el río Nima.

Adicionalmente, teniendo en consideración que la morfología de cada abanico refleja las características del área fuente, y que la cuenca del río Amaime tiene gran extensión, lo que representa el área fuente de los sedimentos en la zona, es posible relacionar esto con la pendiente del abanico que se podría formar, ya que a mayor área fuente menor pendiente (Figura 38), de lo que se deduce la importancia que tiene el mecanismo de sedimentación en la pendiente del abanico (Tarbuck & Lutgens, 2010). La sedimentación en un abanico tiene lugar si el suministro de partículas supera la capacidad de transporte. Esto supone la presencia de un umbral geomórfico, definido por Bull (1979) como umbral de la energía crítica del agua, afectada por diversos factores entre ellos el factor topográfico, que influye muy directamente en el suministro de sedimentos. Así, en las laderas de pendientes acusadas la erosión es más importante. Igualmente, se necesitan inclinaciones elevadas en el cauce para dar origen a los debris Flow. Estos alcanzan un mayor desarrollo en abanicos alimentados por pequeñas cuencas de recepción de pendientes abruptas.

El cauce del río Amaime tiene una pendiente media moderada a baja que permanece relativamente constante desde la cuenca media hasta la zona de piedemonte, por lo que no hay un cambio abrupto al llegar a la zona de piedemonte, en donde la pérdida de confinamiento del cauce se ve reflejada por una ampliación del canal fluvial donde ha tenido lugar la formación de un sistema fluvial trenzado, sinuoso y anastomado, con presencia de barras longitudinales, laterales, así como la formación de islas formadas por la incisión de la corriente que disecta barras de meandro. La composición de estas barras refleja la capacidad de transporte de la corriente, y la relación del área de las barras con el canal actual del río indican alta capacidad de transporte, sedimentos de gran tamaño, alta velocidad del flujo y una alta energía de la corriente, incluso en la zona de piedemonte; sin embargo, la ausencia de un cambio abrupto en el gradiente hidráulico es una condición para que no tengan lugar el desarrollo de abanicos en esta zona, por lo que la agradación o sedimentación en la zona se ve representada más por un cambio en el sistema fluvial a un canal trenzado donde la sedimentación se da por la depositación de la carga de fondo como barras más que en forma de abanico.

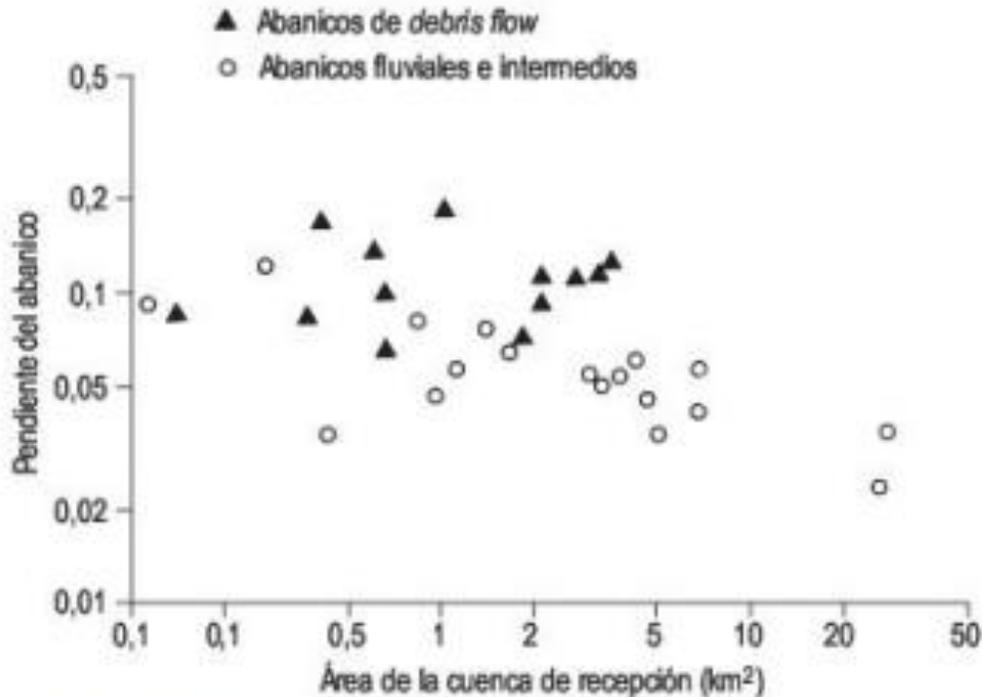


Figura 38. Relaciones morfométricas entre el área de la cuenca de recepción y el área y la pendiente del abanico

Fuente. (Burbank & Anderson, 2001)

Asociado con la dinámica del río Aguaclara, se observa que la cuenca alta presenta una pendiente abrupta relacionada con la morfología de los cauces de menor orden, en la parte cercana al piedemonte el cauce presenta un sistema fluvial meándrico relativamente encajonado, relacionado con el escurrimiento superficial sobre materiales de fácil erodabilidad, por lo que se refleja una mayor divagación del cauce dentro de un valle más amplio.

Al evaluar las condiciones y factores necesarios para el desarrollo de un abanico aluvial dentro del que se encuentra la caída súbita de velocidad dada por pérdida del confinamiento de la corriente fluvial como respuesta a la caída abrupta del gradiente, se evidenció que el cauce del río Aguaclara presenta un gradiente hidráulico relativamente bajo, representado por un canal meándrico donde erosiona la parte externa del meandro y sedimenta en la parte interna; acompañada por un cambio paulatino del gradiente al llegar al valle. La sedimentación en esta zona se ve representada por un cambio en el sistema fluvial a un canal trezado, sinuoso que indican agradación del canal, lo que explica la ausencia de un rasgo claro de abanico aluvial; donde la sedimentación se da por la depositación de la carga de fondo como barras de canal más que en forma de abanico.

Con base en las consideraciones anteriores la zonificación de la amenaza por AVT en la zona plana del municipio de Palmira considera los canales fluviales de los ríos Amaime, Nima y Aguaclara, en categoría de amenaza alta a partir de los condicionantes geomorfológicos como la tipología de los ríos, en la cual se incluyen llanura, barras laterales, barras longitudinales, barras de meandro, islas y sus depósitos asociados ya que indican una divagación e inestabilidad lateral de los cauces. Así mismo, la zonificación de la amenaza indicativa por AVT en la zona plana del municipio de Palmira incorpora la evidencia del abanico aluvial reciente existente en el terreno asociado a la dinámica del río Nima como el abanico activo, usándolo como una herramienta de zonificación para identificar áreas de estudio especiales donde se requieren evaluaciones detalladas de amenaza por avenidas torrenciales antes del desarrollo tal como se considera en (UTAH Geological survey, 2005). De esta manera se categorizó la amenaza indicativa por AVT en la zona plana, la cual se presenta en Figura 39.

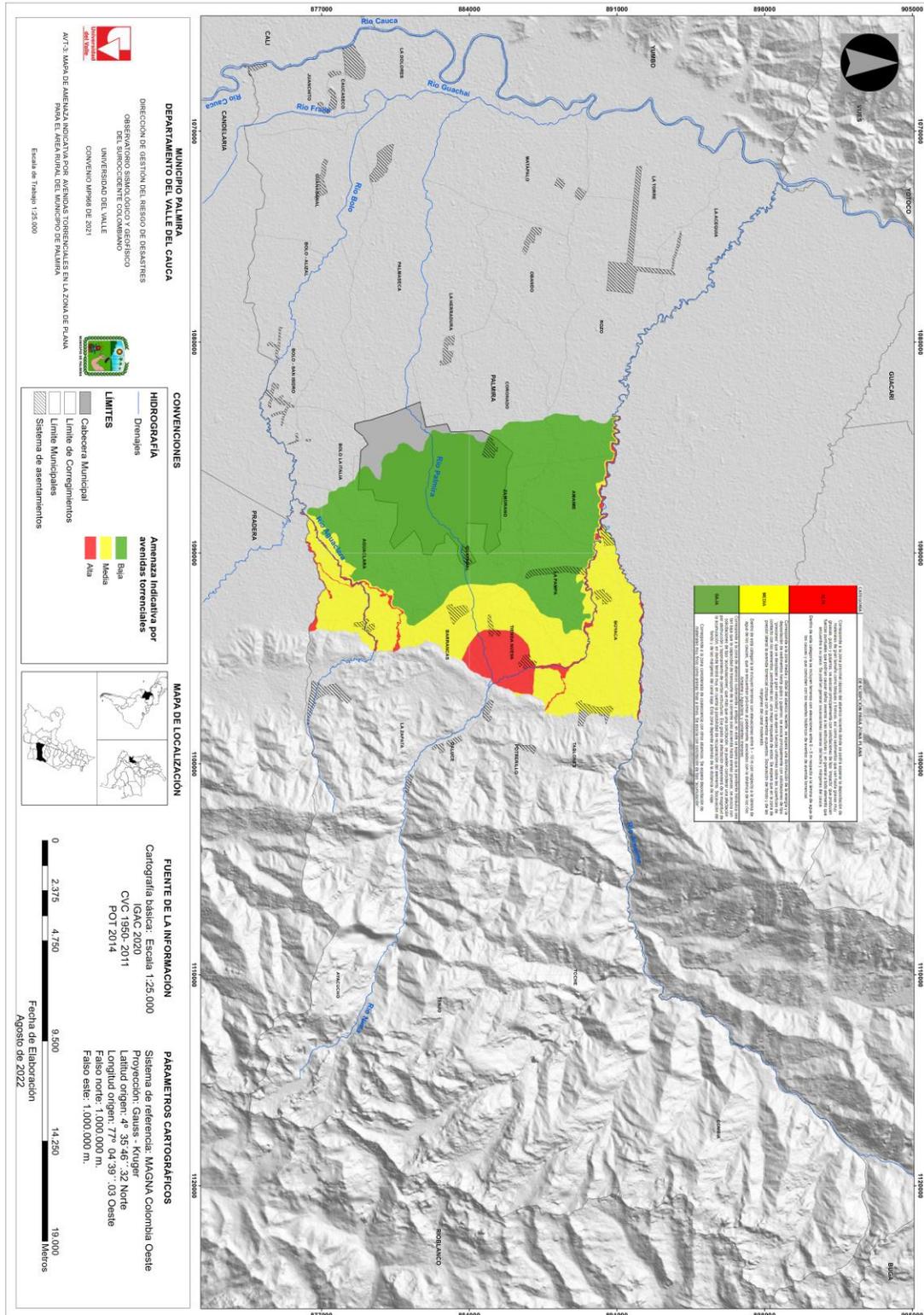


Figura 39. Mapa de Amenaza Indicativa por Avenidas Torrenciales para la zona plana del municipio de Palmira (AVT-3)
Fuente: Elaboración Propia

7.4.3 Mapa de Amenaza Indicativa por AVT consolidado.

A partir de la superposición de la amenaza indicativa por AVT en zona de montaña y la amenaza indicativa por AVT en zona plana, se logra obtener finalmente el mapa consolidado de Amenaza indicativa por Avenida Torrencial a escala 1:25000 (Figura 40). Las Tablas 20 y 21 presentan las interpretaciones de las categorías de amenaza indicativa por avenidas torrenciales en la zona montañosa y en la zona plana del municipio de Palmira respectivamente.

Tabla 20. Interpretación de las categorías de amenaza indicativa por avenidas torrenciales en la zona montañosa del municipio de Palmira.

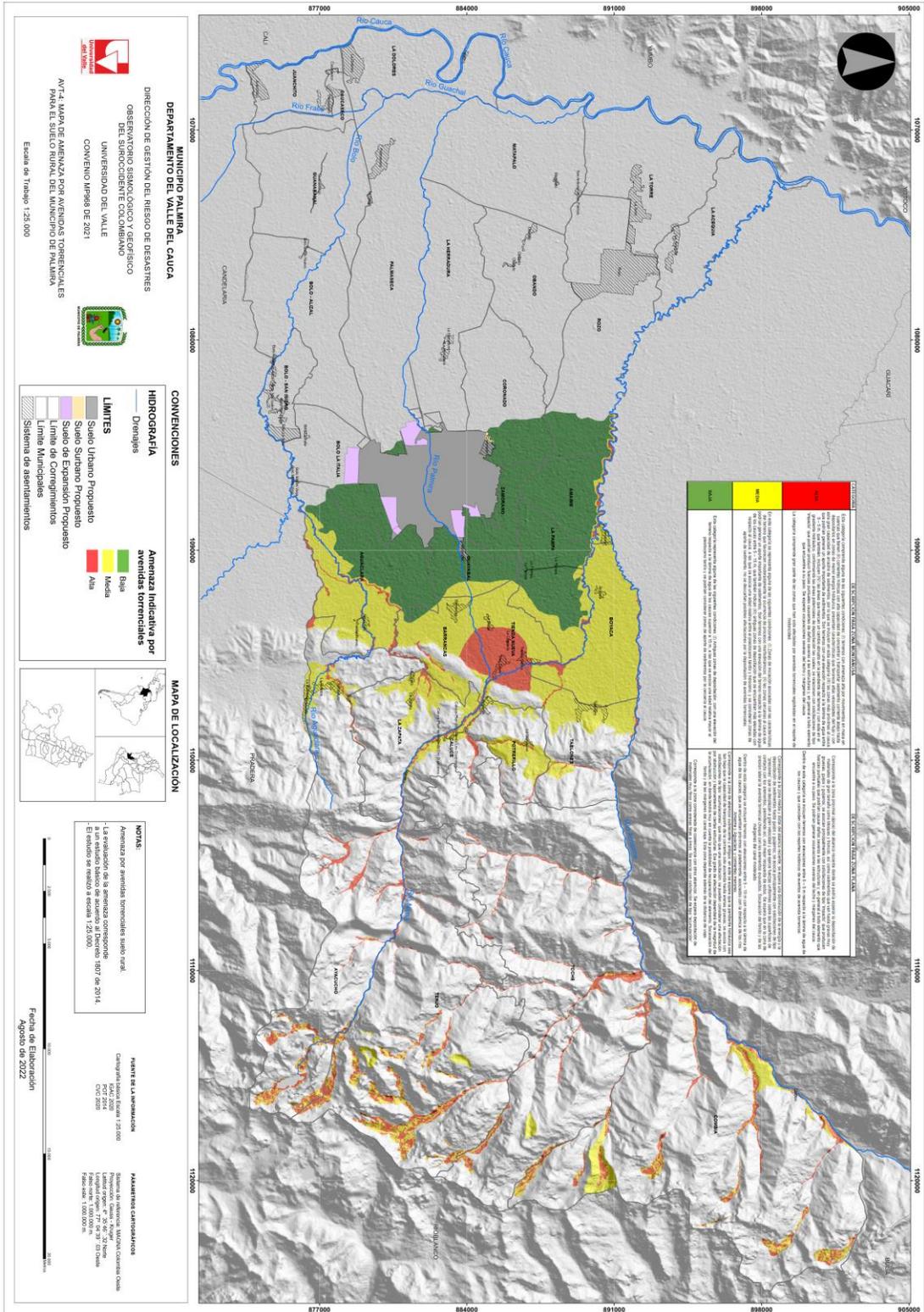
CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN PARA ZONA MONTAÑOSA
ALTA	<p>Esta categoría comprende alguna de las siguientes condiciones: (I) terrenos con amenaza alta por movimientos en masa en cuencas que tienen (II) corrientes hídricas con alta capacidad de concentrar y transportar sedimento corriente abajo hasta depositarlos en zonas de menor energía hidráulica; presentan características que favorece altas velocidades del flujo y con esta gran capacidad de arrastre de sedimentos, por lo que se incluyen en esta categoría (III) las zonas más próximas al cauce que podrían generar un aporte importante de sedimentos. Son terrenos con una elevación respecto a la lámina de agua entre 0 – 5 m, que también, incluyen (IV) las áreas que marcan un cambio abrupto en la pendiente del terreno y con esta en el gradiente hidráulico, conformando las áreas potenciales de depositación las cuales; se relacionan con solicitaciones de tipo “impacto” que podrían producir fuerzas puntuales causantes de daños severos a las estructuras y, en general a todo elemento que encuentre a su paso. Se esperan socavaciones severas del lecho y márgenes del cauce.</p> <p>La categoría comprende gran parte de las zonas que han sido afectadas por avenidas torrenciales registradas en el reporte de historicidad.</p>
MEDIA	<p>En esta categoría se representa alguna de las siguientes condiciones: (I) Zonas de iniciación asociadas con las características del terreno que favorecen moderadamente la ocurrencia de procesos morfodinámicos. (II) las zonas cercanas al cauce que podrían generar un aporte importante de sedimentos. Son terrenos con una elevación del terreno respecto a la lámina de agua de los cauces entre 5 – 15 m, que también indican (III) antiguas zonas de depositación que se encuentran más elevadas con respecto al cauce, a las que se asocia una edad relativa entre el pleistoceno tardío y holoceno, y se consideran zonas de aporte de sedimento, no se descartan posibles afectaciones por la depositación de avenidas torrenciales.</p>
BAJA	<p>Esta categoría representa alguna de las siguientes condiciones: (I) Antiguas zonas de depositación, con una elevación del terreno respecto a la lámina de agua de los cauces superior a 15 m, a las que se asocia una edad relativa mayor al pleistoceno tardío y se podrían considerar zonas de aporte de sedimentos por la cercanía al cauce.</p>

Tabla 21. Interpretación de las categorías de amenaza indicativa por deposición de avenidas torrenciales en la zona plana del municipio de Palmira

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN PARA ZONA PLANA
ALTA	<p>Corresponde a la zona proximal (ápice) del abanico reciente donde se podría esperar la deposición de materiales de gran tamaño como bloques y troncos, así como sedimentos que van hasta gravas muy gruesas, guijos y guijarros; se asocian principalmente con solicitaciones de tipo “impacto” que producen fuerzas puntuales que podrían causar daños severos a las estructuras y, en general a todo elemento que encuentre a su paso. Se podrían generar socavaciones severas del lecho y márgenes del cauce.</p> <p>Dentro de esta categoría se incluyen terrenos con elevaciones entre 0 – 5 m respecto a la lámina de agua de los cauces y que coinciden con los reportes históricos de eventos de avenida torrencial.</p>
MEDIA	<p>Corresponde a la zona media y distal del abanico reciente; se espera una disminución de la energía y la deposición de sedimentos hasta guijos y guijarros; se asocia principalmente con solicitaciones de tipo “presiones” que se desplazan a gran velocidad y que ejerce fuerzas uniformes sobre las superficies de contacto con los elementos, permitiendo así, una mejor respuesta de estos. Se espera que en la zona de presión lateral la avenida torrencial choque con los elementos expuestos. Socavación del fondo y de las márgenes del canal moderado.</p> <p>Dentro de esta categoría se incluyen terrenos con elevaciones entre 5 – 10 m con respecto a la lámina de agua de los cauces, que se encuentran próximos al piedemonte, asociados con la dinámica de los ríos Amaime y Aguaclara, y corrientes menores.</p>
BAJA	<p>Corresponde a la zona de abanicos subreciente y antiguo; en este se espera que la pendiente hidráulica sea tan baja que la capacidad de transporte de la corriente solo ascienda hasta arenas gruesas; se asocia con solicitaciones de tipo “acumulaciones” que más que una solicitación, se pueden considerar una afectación por obstrucción y taponamiento de ciertas estructuras. Ese grado de afectación dependerá de la magnitud de la acumulación, en donde tendrá muy en cuenta la posibilidad de recuperación del elemento. Socavación del fondo y de las márgenes del canal baja. Esta zona depende además de la distancia de viaje.</p> <p>Corresponde a la zona considerada de coalescencia con otros abanicos. Se espera deposición de materiales muy finos como arenas finas a limos. Se asocia con solicitación de tipo “acumulación”.</p>

Figura 40. Mapa consolidado de Amenaza Indicativa por Avenidas Torrenciales en el municipio de Palmira, escala 1:25000 (AVT-4)

Fuente. Elaboración Propia



Según el mapa obtenido, el 21,8 % (21983 ha) del área total municipal se encuentra en amenaza por avenidas torrenciales. De esta área, el 16 % se encuentra en Amenaza Alta (3434 ha), el 41 % en Amenaza Media (9054 ha) y el 43 % en Amenaza Baja (9495 ha).

El área en Amenaza Alta representa el 3,3 % del área total municipal, el área las zonas en Amenaza Media representan el 8,9 % y las zonas en Amenaza Baja el 5,3 %; de igual manera, en la zona plana se encuentra una zona definida como Muy Baja, la cual representa el 4,1 % del total del área del municipio.

8. CONCLUSIONES

- Los reportes consignados en el inventario histórico de eventos permitieron identificar los corregimientos donde se han presentado fenómenos de avenida torrencial, entre estos se encuentran los corregimientos de Amaime, Combia, Tablones, Toche y Guayabal, los cuales se han visto afectados por el río Amaime; y los corregimientos de Tienda Nueva y Tenjo que se han visto afectados por el río Nima. Este registro histórico de eventos permitió el reconocimiento del territorio y la identificación aproximada de los afluentes que han presentado este tipo de procesos como las corrientes tributarias de la margen izquierda del río Amaime, los tributarios en la cuenca alta del río Aguaclara y los tributarios del río Nima.
- De acuerdo con los valores obtenidos del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales se observa que 51 de las 54 subcuencas de la zona de estudio (es decir el 94,4% del total de subcuencas) se clasifican en condición de vulnerabilidad entre alta y muy alta frente a eventos torrenciales. En consecuencia, se puede afirmar que para la escala de trabajo de 1:25,000 la mayoría de las subcuencas de la zona rural del municipio de Palmira se encuentra en condición de vulnerabilidad alta frente a eventos torrenciales. En especial aquellas cuencas que presentan un resultado de IVET clasificado como muy alto, son las cuencas del río Cabuyal, Río Toche, Quebrada Las Auras, Quebrada Los Chorros, Quebrada La Tigra, Quebrada Tierradentro, Quebrada Honda y río Aguaclara.
- Las subcuencas evaluadas que se encuentran en condición de vulnerabilidad alta frente a eventos torrenciales e indican una probabilidad de presentar avenidas de flujos de detritos, se encuentran en la zona más montañosa del territorio, los rasgos geomorfológicos más representativos corresponden a valles aluviales estrechos, confinados, limitados por laderas de altas pendientes asociados a morfologías colinadas, lomas, lomeríos disectados, montículos y ondulaciones, sierras, espolones, lomos, artesas glaciares, conos y lóbulos de gelifracción entre otros de ambiente predominantemente denudacional, estructural y glacial que representan la topografía más marcada en la región montañosa del municipio. En estas regiones los rasgos geomorfológicos de ambiente fluvial se encuentran representados por valles en forma de “V” confinados y estrechos que se asocian principalmente a la dinámica fluvial de los drenajes tributarios de corrientes principales como el río Nima, Amaime y Bolo cuya confluencia se encuentra representada por geoformas como conos, terrazas de acumulación recientes, subrecientes y antiguas que son más evidentes sobre la margen izquierda del río Amaime y geoformas como abanicos aluviales coalescentes hacia la zona de piedemonte, abanicos aluviales antiguos, subreciente y actuales luego de la zona de piedemonte asociados con la dinámica fluvial del río Nima que modelan una topografía más suave debido a la pérdida de confinamiento del cauce, indicando un predominio de procesos de depositación.

- Las geoformas indicativas de depósito fueron categorizadas de acuerdo con la edad relativa y las geoformas indicativas de aporte de sedimento fueron categorizadas de acuerdo con su localización transversal respecto a los cauces; esto permitió identificar que las áreas con mayor potencial de afectación por depositación y/o tránsito de avenidas torrenciales corresponden a las terrazas de acumulación, planicies aluviales confinadas, planicies de inundación y abanicos aluviales actuales. Las geoformas indicativas con susceptibilidad media corresponden a las zonas que por su proximidad al cauce pueden no solo considerarse zonas potencialmente afectadas por el tránsito de avenidas torrenciales si no que son fuentes de aporte directo de sedimento. Las categorías bajas están representadas por geoformas antiguas cuya génesis se asocia con procesos predominantes de sedimentación, pero que morfológicamente se encuentran muy distales y/o más elevados respecto a los cauces. Estas geoformas además contienen el registro de eventos históricos ocurridos en la zona.
- En la región montañosa existe una alta probabilidad de generación de deslizamientos de tipo rotacional y traslacional que podrían causar represamiento de cauces dadas las características del relieve y la presencia de valles confinados, o generarse una serie de deslizamientos como respuesta a agentes externos que aporten gran cantidad de sedimento a las corrientes.
- Los abanicos aluviales se desarrollan normalmente donde una corriente fluvial de gradiente alto abandona un valle estrecho en terrenos montañosos y sale súbitamente a una llanura amplia o llana o a un fondo de valle. Los abanicos aluviales se forman en respuesta a la caída abrupta del gradiente que se combina con un cambio de posición y tamaño del cauce, de un cauce estrecho, de una corriente de montaña, a cauces menos confinados situados a la base de las montañas. La caída súbita de velocidad hace que la corriente libere rápidamente su carga de sedimento en una acumulación que tiene forma clara de cono o abanico. Las corrientes hídricas en el territorio de Palmira presentan estas condiciones, lo que favorece la formación de abanicos aluviales en la zona de piedemonte. Por eso, de manera preventiva es importante evaluar las zonas que podrían resultar afectadas por la ocurrencia de un evento catastrófico que se pueda depositar en forma de abanico, ya que es importante tener en cuenta que se pueden dar procesos de avulsión, es decir abandono rápido del cauce de un río y la formación de nuevos canales fuera de los confines del cauce actual. Los abanicos presentes en el municipio de Palmira tienen morfologías más suavizadas, posiblemente más asociadas con flujos hiperconcentrados que se caracterizan por un mayor contenido de agua, modelando superficies con pendientes suaves a planas, sin embargo, en un evento de avenida torrencial se puede presentar más de un tipo de flujo.
- En la zona del área urbana se pudieron observar depósitos bien seleccionados compuestos principalmente por sedimentos tamaño limo hasta arena media, lo que

se asocia con una disminución de la energía de las corrientes en una zona muy distal del área fuente, lo que es correlacionable con las interpretaciones realizadas para la zona plana del municipio respecto al fenómeno de avenidas torrenciales.

- Según el mapa consolidado obtenido de amenaza indicativa por Avenidas Torrenciales a escala 1:25000; del total del área municipal, el 21,8% (21983 Ha) del territorio se encuentra en amenaza por dicho fenómeno. De esta cantidad, el 16% corresponde a amenaza Alta (3434 Ha), el 41% a amenaza Media (9054 Ha) y el 43% a amenaza Baja (9495). Las zonas de amenaza Alta representan un 3,3% del total del área municipal, las zonas de amenaza Media representan un 8,9% y las zonas de amenaza Baja un 5,3%; de igual manera, en la zona plana se encuentra una zona definida como amenaza Muy Baja que representa un 4,1% del total del área del municipio.
- A modo de recomendación es importante tener en cuenta que los sitios identificados en la zonificación de avenidas torrenciales como zonas de amenaza alta por depositación, particularmente en las áreas aledañas al cauce del río Nima, se hace necesario recomendar que los futuros desarrollos de mayor importancia para el municipio que se vayan a llevar a cabo, deben realizar estudios detallados que incluyan modelos hidrológico hidráulicos involucrando la fase sólida y líquida que permitan estimar descargas, velocidades y distancias de viaje y delimitar las posibles zonas de afectación relacionadas con un periodo de retorno al menos de 100 años.
- Fortalecer el sistema de alerta temprana y los planes de atención de emergencias tanto en los sectores donde se identificó el tránsito de avenidas torrenciales como en los sectores donde se identificó la depositación de sedimentos, con especial interés en las zonas de sedimentación de la región montañosa, como en el corregimiento de Combia.
- Evitar el uso de los terrenos aledaños a los cauces de los ríos Amaime, Nima y Aguaclara, sus formas asociadas como barras meándricas, barras laterales, barras longitudinales, islas debido a las dimensiones que poseen estas formas en el terreno, las cuales pueden causar una falsa impresión como terrenos de gran interés para la implementación de viviendas o usos agropecuarios.
- Debido a la inestabilidad lateral de estos cauces y su alta carga de sedimentos, los efectos directos de las actividades humanas, tales como estructuras en el río o modificaciones del mismo, conducen a variaciones en el canal fluvial, generando un impacto no solo sobre los canales fluviales si no también incrementando el riesgo a la población aledaña, por lo que se recomienda realizar dichas modificaciones soportados en estudios técnicos detallados con el propósito de modificar las características hidrodinámicas del río para reducir el riesgo.

9. REFERENCIAS

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. México D.F.: Editorial LIMUSA.
- Bertrand, M., Liébault, F., & Piégay, H. (2013). Debris-flow susceptibility of upland catchments. *Nat Hazards*. doi:10.1007/s11069-013-0575-4
- Blaikie, P. M., Cannon, T., Davis, I. & Wisner, B. (1996). Vulnerabilidad: el entorno social, político y económico de los desastres. Soluciones Prácticas. LA RED. Bogotá, Colombia: Tercer Mundo Editores. 379 p.
- Burbank, D., & Anderson, R. (2001). *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science.
- Caballero Acosta, J. H. (2011). Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 45-50. Recuperado a partir de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/29734>
- Campos-Aranda, D. F. (2017). Definición de tres épocas de crecientes utilizando estadísticos direccionales. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 155-165.
- Carreño, M. (2006). Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos: Acciones ex ante y ex post. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Centro de Información de Recursos Naturales - CIREN. (2014). Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional. Santiago de Chile.
- Chow, V. T. (2000). *Hidrología aplicada*. (M. E. R., Ed.) Bogotá: McGraw Hill.
- Costa, J. E. (1984). Physical geomorphology of debris flows, In: J. E. Costa and P. J. Fleischer (eds.), *Developments and Applications of Geomorphology*, Springer, Berlin, Germany, pp. 268–317.
- CVC; Universidad del Valle. (2010). Proyecto Midas - Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales, del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, el Cairo y la Unión. Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- de Haas, T., Densmore, A. L., Stoffel, M., Suwa, H., Imaizumi, F., Ballesteros-Cánovas, J. A., & Wasklewicz, T. (2018). Avulsions and the spatio-temporal evolution of debris-flow fans. *Earth-Science Reviews*, 177, 53-75.

- Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres - DGRD de Palmira. (2021). Estudios previos del proyecto implementación de acciones para la prevención y mitigación del riesgo de desastres en el municipio de palmira. Alcaldía de Palmira, 39p.
- García-Tornel, F. C. (2001). Sociedades y territorios en riesgo. Barcelona, España: Ediciones del Serbal.
- Grupo técnico CORCUENCA - IDEAM. (2019). Fórmulación Pomca río La Luisa y otros Directos al Magdalena - Amenazas y Susceptibilidad.
- Herrero, A. D., Huerta, L. L., & Isidro, M. L. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: guía metodológica para su elaboración (No. 1). IGME.
- IDEAM. (2017). GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN. Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS y CVC, (2001). Guía metodológica para la zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa – método univariado - y escenarios de riesgo por avenidas torrenciales. Bogotá: Apoyo Operativo INGEOMINAS.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA. Bogotá D.C, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá, Colombia.
- Karssenberg, D., Schmitz, O., de Jong, K., & Bierkens, M. (2009). A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation. *Environmental Modelling & Software*, 489-502. doi:10.1016/j.envsoft.2009.10.004
- Lavell, A. (2005). Desastres y desarrollo: hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre: el caso del huracán Mitch en Centroamérica. A. Fernández (comp.), *Comarcas vulnerables: riesgos y desastres en Centroamérica y el Caribe*, 11-44.
- Lionel E, J., Kostaschuk, R., & MacDonald, G. (1987). Identification of debris flow hazard on alluvial fans. *Geological Society of America: Reviews in Engineering Geology*, VII.

- Maskrey, A. (ed.) (1998). Navegando entre brumas: la aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgos en América Latina. LA RED. Bogotá, Colombia: Tercer Mundo Editores. 344 p.
- MEUNIER. (1991). Elementos de hidráulica torrencial. Grenoble: Francia
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Bogotá.
- Montoya, Arroyave, & Gonzales. (2009). *Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la Quebrada Doña María*. Revista Ingenierías Universidad de Medellín.
- Montoya, y., Montoya, B. (2009). Caracterización morfométrica de la microcuenca de la Quebrada los Andes, el Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia. *Ingenierías Universidad Medellín*, 8(15), 11 – 29. Para comunicadores. Semarnat. México, D.F., México. 17 p
- Nobre, A., Cuartas, L., Honett, M., Rennó, C., Rodrigues, G., Silveira, A., & Waterloo, M. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 13 - 29. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.051
- OSSO. (2009). DesInventar - Sistema de Inventario de Desastre: Guía Metodológica V8.1.9. Cali. Obtenido de <https://www.desinventar.org/docs/DesInventar-GuiaMetodologica-2.pdf>
- Pedraza, J. P. P., & Castillo, D. V. C. (2020). Fundamentos básicos para la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales. *Libros Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 1-309.
- Rivas, M., Ovalles de Cabezas, Y., Soto, A. C., Ramirez, G., Ripanti, F., & Gonzáles, J. L. (2009). Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*,, 33-41.
- Roa Lobo,, J., & Ulrich, K. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ith) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial,. *Revista Geográfica Venezolana*.
- Servicio Geológico Colombiano - SGC y Pontificia Universidad Javeriana - PUJ. (2021). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales. Bogotá D.C.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2010). *Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física. Volumen II*. Madrid: Pearson Educación S.A.

- Universidad del Valle; CVC; IGEI. (2019). Modelación hidráulica para la evaluación de la amenaza por inundación y avenida torrencial de la quebrada Isabel Pérez, municipio de Santiago de Cali. Santiago de Cali.
- UTAH Geological survey. (2005). *Guidelines for the geologic evaluation of debris-flow hazards on aluvial fans in utah*.
- Villar, A. G. (1996). *Abanicos aluviales: Aportación teórica a sus aspectos más significativos*. León: Cuaternario y Geomorfología, 10 (3-4), pág. 77 - 124
- Wilford, D., Sakals, M., Innes, J., & Sidle, R. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed. *Landslides*. doi:10.1007/s10346-003-0002-0