



# **Evaluación de Amenaza por Inundación y Avenidas Torrenciales en los Sectores Priorizados de la Comuna 10 y 11 del municipio de Bucaramanga**

**Nathalia Andrea Carvajal Giraldo**

Universidad Santo Tomás

Bucaramanga, Colombia

2024

# **Evaluación de Amenaza por Inundación y Avenidas Torrenciales en los Sectores Priorizados de la Comuna 10 y 11 del municipio de Bucaramanga**

**Nathalia Andrea Carvajal Giraldo**

Trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Especialista en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas.**

Director (a): Olga Lucía Vanegas Alfonso

Universidad Santo Tomás

Bucaramanga, Colombia

2024

## ***Dedicatoria***

A mis padres y hermanos.

## ***Agradecimientos***

A mi padre, por ser ejemplo de perseverancia y de constancia inquebrantable su guía que me han convertido en la persona que soy hoy. A mi madre, por ser ese apoyo en cada uno de mis sueños. A mis hermanos, por ser mi polo a tierra y motivación constante.

# **Evaluación de Amenaza por Inundación y Avenidas Torrenciales en los Sectores Priorizados de la Comuna 10 y 11 del municipio de Bucaramanga**

## **Resumen**

El estudio abordó el objetivo de zonificar las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales mediante un enfoque multidisciplinario que integró criterios hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, urbanísticos y sociales. La metodología de desarrollo incluyó el uso de modelos hidrológicos para simular caudales máximos y evaluar periodos de retorno, complementados con sistemas de información geográfica (SIG) para analizar la topografía, morfometría de cuencas y usos del suelo. Además, se realizaron estudios geotécnicos para determinar la estabilidad del suelo y fichas de evaluación que identificaron vulnerabilidades socioeconómicas y estructurales en las viviendas del área de estudio.

Los resultados evidenciaron que la parte alta de la quebrada Chiquita presenta un bajo riesgo de inundación debido a su topografía y la capacidad del canal existente; sin embargo, en el análisis de torrencialidad se evidenciaron características asociadas a su densidad de drenaje y forma de cuenca. Las recomendaciones incluyeron la reubicación de elementos expuestos, canalización de drenajes, recolección de aguas negras y la construcción de obras de mitigación, así como consideraciones sociales de manejo de urbanización y control.

Este enfoque permitió delimitar áreas de amenaza con precisión, priorizar medidas de mitigación y fortalecer la planificación territorial para reducir riesgos futuros.

**Palabras clave:** Amenaza, Inundación, Avenidas Torrenciales, Gestión del riesgo.

## **Abstract**

The study addressed the objective of zoning flood and torrential flood hazards using a multidisciplinary approach that integrated hydrological, hydraulic, geotechnical, urban planning and social criteria. The development methodology included the use of hydrological

models to simulate peak flows and evaluate return periods, complemented with geographic information systems (GIS) to analyze topography, watershed morphometry and land use. In addition, geotechnical studies were carried out to determine soil stability and evaluation sheets that identified socioeconomic and structural vulnerabilities in the dwellings in the study area.

The results showed that the upper part of the Chiquita stream presents a low risk of flooding due to its topography and the capacity of the existing channel; however, the torrentiality analysis revealed characteristics associated with its drainage density and basin shape. Recommendations included the relocation of exposed elements, drainage channeling, sewage collection and the construction of mitigation works, as well as social considerations for urbanization management and control.

This approach made it possible to accurately delimit hazard areas, prioritize mitigation measures and strengthen territorial planning to reduce future risks.

**Key Word:** Hazard, Flood, Torrential floods, Risk management.

## Tabla de contenido

1.	Introducción .....	13
2.	Planteamiento del problema .....	14
3.	Justificación .....	15
4.	Objetivos.....	16
2.1.	Objetivos General .....	16
2.2.	Objetivos específicos .....	17
5.	Marco referencial.....	17
5.1.	Marco Teórico .....	17
5.2.	Amenaza por inundación.....	18
5.2.1.	Características Básicas.....	18
5.2.2.	Noción Del Impacto.....	21
5.2.3.	Categorización De La Amenaza Y Niveles De Inundación .....	23
5.2.4.	Análisis De Inundación Por Desbordamiento Del Río .....	24
5.3.	Avenidas Torrenciales.....	25
5.3.1.	Caracterización de las avenidas torrenciales .....	27
5.4.	Marco legal .....	31
	Artículo 3. Estudios básicos para la revisión o expedición de planes de ordenamiento territorial.....	32
	Artículo 4. Estudios detallados .....	32
5.5.	Marco Geográfico .....	33
5.6.	Delimitación área de desarrollo del estudio .....	34

6.	Metodología.....	35
6.1.	Recopilación de información existente .....	35
6.2.	Recopilación de información campo.....	36
6.3.	Cartografía básica y topografía detallada.....	39
6.4.	Análisis climatológico e hidrológico .....	41
6.4.1.	Espacialización De Estaciones Meteorológicas .....	41
6.4.2.	Estimación de Caudales Líquidos .....	45
6.4.3.	Estimación de caudales aportantes a la Quebrada La Chiquita por las redes Sanitarias y redes combinadas existentes.....	54
6.5.	Caracterización y modelación de Inundación .....	56
6.6.	Caracterización y modelación de Avenidas Torrenciales.....	58
6.6.1.	Información secundaria de entidades públicas y medios de comunicación	58
6.6.2.	Fotografías aéreas y sensores remotos .....	59
6.6.3.	Procedimiento general de la aplicación.....	59
6.6.4.	Productos de la caracterización de avenidas torrenciales .....	61
6.7.	Análisis de consideraciones sociales .....	62
7.	Resultados.....	64
7.1.	Inundación .....	64
7.2.	Avenidas torrenciales.....	66
7.3.	Socialización de resultados.....	68
8.	Aplicación de análisis en planes de políticas públicas .....	70
9.	Análisis de resultados.....	71

10.	Conclusiones .....	75
11.	Recomendaciones .....	75
12.	Referencias bibliográficas .....	77
13.	Anexos.....	78

## Lista de figuras

Figura 1. Diagrama Metodológico para el estudio de inundación.....	24
Figura 2. Esquema metodológico para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales. ....	26
Figura 3. Partes básicas de un flujo torrencial .....	27
Figura 4. Perfil esquemático que define H y L del transporte de la avenida torrencial. H y L están definidos por las líneas que conectan la zona de inicio y el depósito. ....	29
Figura 5. Pendientes de las zonas de canales de flujo de detritos en grados y porcentaje.....	30
Figura 6. Representación idealizada de una secuencia de facies que puede ser producto de un evento flujo de detritos-inundación de flujos hiperconcentrados - creciente súbita.....	31
Figura 7. Localización Regional del municipio de Bucaramanga-Santander .....	34
Figura 8. Barrios enfoque de estudio, pertenecientes a la comuna 10 y 11 del municipio de Bucaramanga.....	34
Figura 9. Actividades detalladas en la fase de recolección de información .....	37
Figura 10. Modelo de malla con triangulación, visualización en alambre y texturizado. .....	40
Figura 11. Polígonos de Thiessen con incidencia dentro del área d estudio considerando de las estaciones meteorológicas presentadas.....	44
Figura 12. Localización de las estaciones meteorológicas analizadas .....	45
Figura 13. Insumos para la estimación de caudales ante escenarios de cobertura actual .....	46
Figura 14. Representación de la unida hidrográfica de la Quebrada La Chiquita para un $Tr = 50$ años.....	47
Figura 15. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 2.33 años .....	48
Figura 16. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 5 años.....	48
Figura 17. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 10 años.....	48

Figura 18. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 25 años .....	49
Figura 19. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 50 años .....	50
Figura 20. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 100 años .....	50
Figura 21. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 300 años .....	51
Figura 22. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 500 años .....	51
Figura 23. Hidrogramas para distintos periodos de retorno bajo condiciones de cobertura actual .....	53
Figura 24. Discretización de áreas aportantes de caudal según las Redes sanitarias y combinadas existentes del EMPAS .....	54
Figura 25. Identificación de áreas aferentes que aportan caudal a la Quebrada La Chiquita de aguas servidas .....	55
Figura 26. Ubicación de puntos de modelación hidráulica en el municipio de Bucaramanga Comuna 10 y 11 .....	57
Figura 28. Formato para caracterización de avenidas torrenciales. ....	60
Figura 29. Caracterización del Encuestado. ....	63
Figura 30. Categorización de la amenaza por inundación .....	66
Figura 31. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales de los sectores estudiados. .....	67
Figura 32. Validación del modelamiento realizado para el sector 1 .....	68

### **Lista de tablas**

Tabla 1. Clasificación de la Amenaza .....	20
Tabla 2. Escalas de trabajo para estudios básicos y detallados. ....	32
Tabla 3. Características de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM cercanas al área de interés .....	42
Tabla 4. Características de las estaciones meteorológicas de la CDMB cercanas al área de interés .....	43

Tabla 5. Registro de caudales ESC 1 cada 15 minutos para cada periodo de retorno de análisis.....	52
Tabla 6. Valores máximos de caudal registrados ESC1 .....	53
Tabla 7. Estimación de caudales aportantes de aguas servidas .....	55
Tabla 8. Valores del Coeficiente de n para la zona de estudio.....	65

### **Lista de ecuaciones**

Ecuación 1.....	67
-----------------	----

### **Lista de fotografías**

Fotografía 1. Fotografías de reconocimiento del área de estudio.....	38
Fotografía 2. Ortomosaico final de fotografías aéreas .....	41
Fotografía 3. evento de flujo de detritos ocurrido el 18 de febrero de 2022 en el asentamiento Luz de Salvación 2.....	62
Fotografía 4. Registro de socializaciones a la comunidad.....	69

## 1. Introducción

En el departamento de Santander, municipio de Bucaramanga la alcaldía mediante el contrato de Consultoría 135 del 2022, desarrolló el proyecto de zonificación de amenaza según decreto 1807/2014, considerando el fenómeno de amenaza por inundación y avenidas torrenciales de los Sectores Priorizados de la Comuna 10 y 11 (*Luz De Salvación 1 Y 2, Brisas De Provenza, Balcones Del Sur, Brisas Del Palmar, Granjas Reagan, Villas Del Nogal, Villa Real*).

El análisis de la aplicación de las metodologías para la zonificación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales a escala detallada cobra especial relevancia cuando se aplica a asentamientos humanos. Estas áreas densamente pobladas suelen enfrentar mayores riesgos y vulnerabilidades ante eventos hidrológicos extremos, debido a la interacción de factores naturales y antropogénicos.

En este contexto, es fundamental evaluar cómo las metodologías impartidas para zonificación de amenaza por inundación detallada por el IDEAM y la Guía detallada del Servicio Geológico Colombiano (SGC) para evaluación de avenidas torrenciales, las cuales se adaptan y responden a las características específicas de los asentamientos humanos, considerando aspectos como la ocupación del suelo, la infraestructura existente, la capacidad de respuesta comunitaria y las condiciones socioeconómicas de la población afectada.

Se examinará la efectividad de los modelos hidrológicos, sistemas de información geográfica (SIG), tecnologías de teledetección y herramientas participativas, entre otros, en la identificación y delimitación de las zonas de amenaza.

Además, se analizará la integración de criterios multidisciplinarios, incluyendo aspectos urbanísticos, ambientales y sociales, para desarrollar enfoques holísticos y contextualizados que permitan una gestión integral de la amenaza. Se discutirá la

importancia de la participación comunitaria y la comunicación de riesgos en la implementación de medidas de prevención, preparación y respuesta.

En conclusión, este análisis busca proporcionar una visión del análisis de zonificación considerando la sistematización de la experiencia, enfocándose en su aplicabilidad, precisión y relevancia para la zonificación de amenaza en asentamientos humanos.

## **2. Planteamiento del problema**

¿Existe una relación directa entre la caracterización de la vulnerabilidad social y la zonificación de eventos de amenaza por inundación y avenidas torrenciales?

La gestión y análisis de eventos de inundación y avenidas torrenciales representan un desafío significativo para las autoridades y expertos en áreas de planificación urbana, gestión del agua y respuesta a emergencias. Estos fenómenos naturales pueden tener consecuencias devastadoras, incluyendo pérdidas humanas, daños materiales, interrupciones en servicios básicos y deterioro del medio ambiente.

Además, la variabilidad y el cambio climático está aumentando la frecuencia e intensidad de eventos extremos, lo que añade una consideración adicional de complejidad a la problemática planteada. Esto requiere de enfoques adaptativos y resilientes que puedan anticipar y mitigar los impactos de estos eventos en comunidades vulnerables.

En este contexto, y considerando los estudios que respaldan la importancia de la implementación de estos estudios como “Estudio de amenaza por inundación y avenida torrencial para identificar medidas de mitigación en la zona urbana de la ciudad de Mocoa”, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, considerando la relevancia de análisis y de caracterización para emisión de recomendaciones para implementar medias de control fluvial sobre las poblaciones que se localizan de manera aferente de acuerdo a los registros históricos detallados. (Ávila, 2024)

Así mismo, y de acuerdo a las consideraciones que presentan las poblaciones que se localizan en inmediaciones a zonas con este tipo de amenaza resulta importante analizar si existe una relación directa entre la caracterización de la vulnerabilidad social de las poblaciones y la zonificación de áreas expuestas a eventos de inundación y avenidas torrenciales. Este análisis permitiría identificar patrones en los cuales ciertas comunidades podrían estar en mayor riesgo, no solo por su ubicación geográfica, sino también debido a sus condiciones socioeconómicas, como el acceso a servicios básicos, la infraestructura de sus viviendas, y los recursos disponibles para hacer frente a estas amenazas.

Por lo tanto, es crucial realizar un análisis exhaustivo de la zonificación empleando las metodologías en el estudio desarrollado en los Sectores Priorizados de la Comuna 10 y 11 (*Luz De Salvación 1 Y 2, Brisas De Provenza, Balcones Del Sur, Brisas Del Palmar, Granjas Reagan, Villas Del Nogal, Villa Real*), para identificar sus fortalezas y limitaciones, y proponer recomendaciones para mejorar su eficiencia y aplicabilidad en diferentes contextos. Este análisis contribuirá a fortalecer la capacidad de las autoridades y expertos para gestionar de manera efectiva los riesgos asociados con eventos de inundación sobre el alrededor de 150 viviendas localizadas en inmediaciones al cauce y avenidas torrenciales, y promover la resiliencia de las comunidades ante estos desafíos naturales.

### **3. Justificación**

La realización del trabajo de zonificación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en los Sectores Priorizados de la Comuna 10 y 11 de Bucaramanga, Santander, surge como respuesta a la necesidad imperante de proteger a la población residente en áreas vulnerables.

Estos sectores densamente poblados enfrentan riesgos significativos ante eventos hidrológicos extremos, destacando la importancia de implementar medidas preventivas y mitigadoras. En este contexto, la aplicación de metodologías específicas, como las impartidas por el IDEAM y el Servicio Geológico Colombiano, se convierte en un paso

crucial para evaluar de manera precisa los riesgos y establecer estrategias efectivas de zonificación. La adaptación de estas metodologías a las características locales, considerando factores como la ocupación del suelo y la infraestructura existente, garantiza la pertinencia y efectividad de las medidas propuestas, maximizando así la protección de la población vulnerable. Además, la utilización de tecnologías avanzadas, como modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica, facilita la identificación y delimitación de las zonas de amenaza, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas.

Este enfoque multidisciplinario e integral, inspirado en los principios promovidos por Gustavo Wilches-Chaux (2007), aborda aspectos urbanísticos, ambientales y sociales, asegurando una gestión integral de la amenaza y promoviendo la sostenibilidad a largo plazo. Wilches-Chaux, reconocido por su enfoque en la gestión del riesgo desde una perspectiva integral, resalta que “los desastres no solo son fenómenos naturales, sino que están profundamente conectados con las vulnerabilidades y capacidades de las comunidades”. De este modo, la participación comunitaria y la comunicación efectiva de riesgos juegan un papel fundamental en la implementación exitosa de medidas preventivas, preparatorias y de respuesta, fomentando la conciencia pública y la colaboración activa en la protección de la comunidad ante los riesgos hidrológicos extremos. En conjunto, estos elementos delinean un marco integral para la gestión de riesgos en asentamientos humanos, destacando la importancia de la planificación y la colaboración interdisciplinaria en la construcción de comunidades resilientes frente a amenazas naturales.

## **4. Objetivos**

### **2.1. Objetivos General**

Evaluar la Amenaza por Inundación y Avenidas Torrenciales en los Sectores Priorizados de la Comuna 10 y 11 del municipio de Bucaramanga.

## **2.2. Objetivos específicos**

Identificar la incorporación de criterios multidisciplinarios (hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos), incluyendo aspectos urbanísticos, y sociales, en la zonificación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales.

Analizar mediante la integración y aplicabilidad de modelos hidrológicos, sistemas de información geográfica (SIG), y aplicación de fichas para la identificación de la vulnerabilidad y delimitación de las zonas de amenaza.

Evaluar los mapas de zonificación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales y caracterización de vulnerabilidad, considerando las variables específicas aplicables al área de interés.

## **5. Marco referencial**

### **5.1. Marco Teórico**

La gestión del riesgo se describe como el proceso de identificar, analizar y evaluar las probabilidades de pérdidas y los posibles efectos secundarios derivados de desastres, así como las medidas preventivas, correctivas y de reducción necesarias que deben implementarse.

Según la Ley 1523 de 2012, la Gestión del Riesgo de Desastres, o simplemente Gestión del Riesgo, se entiende como un proceso social que abarca la planeación, ejecución, monitoreo y evaluación de políticas y acciones continuas. Este proceso busca comprender el riesgo y fomentar una mayor conciencia del mismo, evitando su aparición o mitigándolo si ya está presente, y preparándose para responder ante situaciones de desastre, así como para la recuperación posterior, que incluye la rehabilitación y reconstrucción. Todo ello con el objetivo de promover la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas, y contribuir al desarrollo sostenible. (Ministerio de Ambiente , sf)

La gestión ambiental y la gestión del riesgo se complementan entre sí, por lo que el rol de las distintas autoridades, instituciones y otros actores debe concebirse de esta manera. En este contexto, se deben impulsar procesos de planificación territorial en las regiones que respondan a su desarrollo sostenible.

Por tanto, el enfoque integral de la gestión del riesgo se basa en implementar acciones tanto antes como después de los desastres, y se fundamenta en: (a) la identificación y evaluación de los riesgos; (b) el diseño e implementación de medidas de prevención y reducción de riesgos; (c) la protección financiera mediante mecanismos de transferencia o retención de riesgos; y (d) la preparación y respuesta para las etapas de atención, recuperación y reconstrucción. (CONGRESO DE COLOMBIA, 2012)

## **5.2. Amenaza por inundación**

Las inundaciones son fenómenos naturales mayormente desencadenados por lluvias intensas, provocando la expansión del agua hacia áreas normalmente secas. Mediante modelos hidráulicos, que simulan el comportamiento de los cursos de agua, es viable segmentar las llanuras inundables y establecer los niveles máximos de crecida del agua. Esto permite identificar las regiones susceptibles de ser inundadas por lluvias extremas en diversos períodos de retorno. Este análisis hidráulico resulta crucial en la planificación del uso del suelo, al delimitar las zonas en riesgo de sufrir desastres hidrológicos, clasificando el grado de amenaza según la probabilidad de ocurrencia del evento.

### **5.2.1. Características Básicas**

Las inundaciones se definen como eventos temporales de acumulación de agua fuera de los cauces y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje, ya sean naturales o construidas. Estos eventos ocurren cuando los caudales de escorrentía exceden la capacidad de retención e infiltración del suelo, así como la capacidad de transporte de los canales. Son fenómenos naturales que forman parte de la dinámica periódica de las

cuencas hidrográficas, influenciados por sus características físicas y el entorno hidrometeorológico.

Las inundaciones pueden ser desencadenadas por diversos factores, ya sean naturales o de origen humano. Entre estos se incluyen la alteración de la cobertura natural del suelo, modificaciones en el curso y la sección de los cauces, construcción de obras hidráulicas, ocupación de áreas de amortiguamiento, retención de grandes volúmenes de agua en embalses y cambios en las condiciones hidrometeorológicas debido al cambio climático, entre otros efectos. Por lo tanto, las inundaciones pueden clasificarse en naturales y antropogénicas.

La naturaleza espacial y temporal de las inundaciones varía según su tipo. Las inundaciones por desbordamiento de cauces debido a lluvias intensas son las que más comúnmente causan desastres. Sin embargo, la extensión del área afectada y la intensidad de la inundación dependen de varios factores, como la pendiente del terreno, el caudal de agua, los sedimentos, la sección del cauce, la intensidad y duración de las lluvias, y las características físicas del entorno.

Las inundaciones pueden ser clasificadas en naturales y antrópicas según se muestra en la Tabla 1. El carácter espacial y temporal de las inundaciones varía ampliamente según el tipo de inundación, siendo la inundación por desbordamiento de cauces por lluvias intensas la que con mayor frecuencia causa desastres. Aun así, la extensión del área afectada y la intensidad de la inundación varían según el tipo de corriente (pendiente, caudal, sedimentos, sección, etc.), la intensidad y duración de las lluvias y las características físicas de las áreas adyacentes (pendiente, cobertura).

Tabla 1. Clasificación de la Amenaza

<b>Clasificación De Las Inundaciones</b>	
<b>Naturales</b>	<b>Antrópicas</b>
Empozamiento por lluvia	Empozamiento por lluvia
Zonas bajas	Deficiencia de drenaje
Zonas planas impermeables	Obstáculos, obstrucciones
Desbordamiento	Desbordamiento
De lagos	De embalses
De corrientes (ríos, quebradas, arroyos)	De canales
Represamiento	Represamiento
Confluencias de cauces	Por obstrucción del cauce
Coincidencia de crecientes	Por descargas de caudal
Deslizamientos	
Palizada	
Mareas	Mal manejo del recurso
	Alteración de cursos de agua

Nota. Tomado de la (Guía Técnica para la interpretación y aplicación del análisis de amenazas y riesgos, 2009)

Una inundación puede ser caracterizada a través de los siguientes parámetros: área, profundidad, velocidad de flujo, tasa de inundación, tiempo de arribo, tiempo de inundación y período de retorno de la creciente. La intensidad de la inundación se puede expresar a través de uno de ellos o su combinación (ej. el producto de la profundidad por la velocidad de flujo). El fenómeno de inundación es característico (relación frecuencia – intensidad) de cada corriente particular (río, quebrada, arroyo, etc.) pero correlacionado con la cuenca a la cual pertenece. Por ello en el manejo del riesgo de inundación es necesario considerar integralmente las cuencas o microcuencas y su efecto específico sobre los ríos de interés.

### **5.2.2. Noción Del Impacto**

El efecto de la inundación sobre los elementos expuestos depende principalmente de la profundidad de inundación, la velocidad del flujo, el tiempo de inundación y el tipo y contenido de sólidos. En relación con las inundaciones por desborde, la velocidad de flujo está relacionada con la energía de impacto que es baja en inundaciones lentas y muy alta en inundaciones rápidas. Si a ello se agrega el efecto de la profundidad, se comprende que a mayor profundidad mayor es el impacto. Así mismo, a mayor tiempo de inundación, mayor es el daño de los elementos expuestos por el deterioro causado por el contacto con el agua. Finalmente, el tipo y contenido de sólidos puede aumentar el daño por mayor energía de impacto, así como por exposición directa sobre los elementos expuestos (ej. residuos de lodo y sustancias orgánicas).

En general las personas son muy vulnerables a inundaciones rápidas y torrenciales; la profundidad de inundación aumenta la probabilidad de muertes especialmente de niños, ancianos y personas discapacitadas; y el tiempo de inundación incrementa la afectación a la salud y economía de la población expuesta.

El daño sobre los elementos materiales (edificaciones e infraestructura) y las actividades económicas varía ampliamente de acuerdo con su naturaleza. Así, por ejemplo, mientras el daño de edificaciones en mampostería confinada es relativamente menor en inundaciones lentas, aun a profundidades importantes, en edificaciones de adobe/bareque bastan profundidades entre 0,5m y 1,0 m para causar daños importantes sobre sus muros y cimientos. El efecto de la inundación sobre una escuela o un hospital probablemente esté mayormente determinado por el tiempo en el cual se suspende el servicio, que por los daños físicos de algunos de sus elementos.

En esencia, mediante el análisis geomorfológico, se busca reconstruir y caracterizar la dinámica histórica del río a partir de los análisis multitemporales y las evidencias de terreno. Ello constituye una primera aproximación al conocimiento de la amenaza y es muy

útil cuando hay limitaciones de recursos económicos. El modelamiento hidrológico permite conocer la respuesta del sistema fluvial a los eventos climatológicos, es decir, la relación entre precipitación, caudales y períodos de retorno. El modelamiento hidráulico busca establecer las características físicas de la inundación en un tramo específico del río. De esta forma, mediante los modelos hidrológicos e hidráulicos, es posible diseñar ‘escenarios’ de inundación para diferentes períodos de retorno, los cuales son de gran utilidad para ordenamiento territorial como se explicará adelante

Siempre que estos modelos se basan en métodos probabilísticos y por lo tanto requieren registros históricos de lluvia y otra información hidrometeorológica, la existencia de redes de monitoreo y de registros constituyen frecuentemente una de las principales limitaciones para llevar a cabo estos análisis. Por ello es importante advertir que, si bien es deseable para el proceso de planificación territorial contar con estos modelos ‘prospectivos’ de posibles inundaciones futuras, si ello no es factible por limitaciones de recursos o información, igualmente a partir de la información histórica se puede avanzar en la incorporación de criterios de reducción de riesgo en la planificación territorial. Un adecuado programa de estudios de la amenaza por inundación debe lograr un balance entre el tipo y resolución de los resultados deseables, los recursos tecnológicos y económicos y la información histórica disponible.

Es deseable desarrollar los análisis de vulnerabilidad y riesgo en escala de detalle a partir del modelamiento hidráulico, que ofrece la mayor información de las características de inundación y por lo tanto facilita la determinación de funciones de daño y el cálculo de pérdida probable. Sin embargo, en escalas intermedia y general es posible hacer aproximaciones gruesas utilizando metodologías simplificadas que frecuentemente se centran en la exposición como factor determinante de la vulnerabilidad, las características sociales de las comunidades y factores de daño generales por grandes sectores (vivienda, cultivos, ganadería, etc.). La información de pérdidas causadas en inundaciones históricas es muy útil para determinar estos factores.

### **5.2.3. Categorización De La Amenaza Y Niveles De Inundación**

Existen diferentes criterios para la zonificación de la amenaza por inundación a nivel nacional e internacional, denotándose que en la mayoría de los casos dichas clasificaciones tienen como criterios de base al análisis en conjunto de la altura de la lámina de agua y la velocidad del flujo, bajo el reconocimiento de tres condiciones hidráulicas principales tales como 1) Caminos preferentes del flujo, 2) Zonas de almacenamiento y 3) franjas de desborde, los cuales procuran ser tenidos en cuenta en el sistema de categorización del “Federal Emergency Management Agency (FEMA)” en su guía “Flood Risk Analysis and Mapping” del 2014 , en donde a partir del producto de la velocidad del flujo y la profundidad se definen las siguientes categorías de amenaza, con su respectiva reclasificación ajustando se los tres niveles de amenaza (Alta, Media y Baja):

Se deben analizar como mínimo los siguientes periodos de recurrencia:

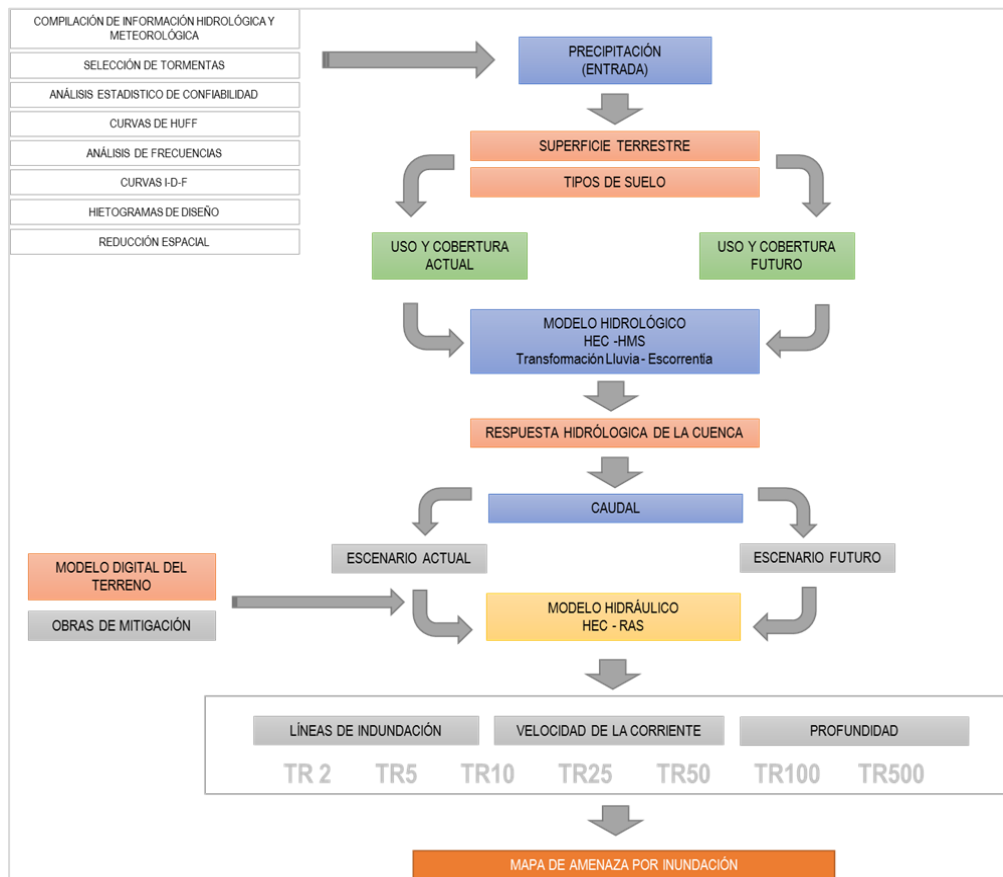
#### **Creciente Básica**

La creciente básica se define como la creciente que solo tiene el 1% de posibilidad de ocurrencia en un año, lo cual equivale a una creciente con periodo de retorno de 100 años. Esta creciente básica puede utilizarse como criterio cuando no existe riesgo de pérdida de vidas humanas por la amenaza de la creciente.

#### **Creciente Máxima**

La creciente máxima o supercreciente es la que tiene un 0.2% de probabilidad de ocurrencia en un año, equivalente a una creciente con periodo de retorno de 500 años. Esta creciente máxima debe utilizarse como criterio siempre que exista riesgo de pérdida de vidas humanas por la amenaza de la creciente.

Figura 1. Diagrama Metodológico para el estudio de inundación.



Nota. Esta salida gráfica fue realizada en el marco del desarrollo del contrato por la empresa JM Construcción y Consultoría (2022).

#### 5.2.4. Análisis De Inundación Por Desbordamiento Del Río

La amenaza por inundación en un área determinada se representará, en términos de probabilidad, como los sucesos estadísticos que generan una distribución de intensidades diferentes (definida generalmente por la profundidad de inundación) en el área de análisis. Esto serán las posibles intensidades que se evidenciarán en la zona de estudio, que generarán cambios en las distribuciones de eventos de inundación, y así afectar directamente el lugar del análisis en la figura se evidencia el mapa de amenaza alta, los cuales representa los datos anteriormente obtenidos, para los periodos de retorno determinados.

Como se muestra del alcance de modelamiento de inundación, realizando el análisis de inundación por desbordamiento de la Quebrada la Chiquita se ejecutan los análisis hidrológicos e hidráulicos con el fin de determinar la huella de inundación asociada a un periodo de retorno en particular. Al sobre poner la huella de inundación a la información topográfica.

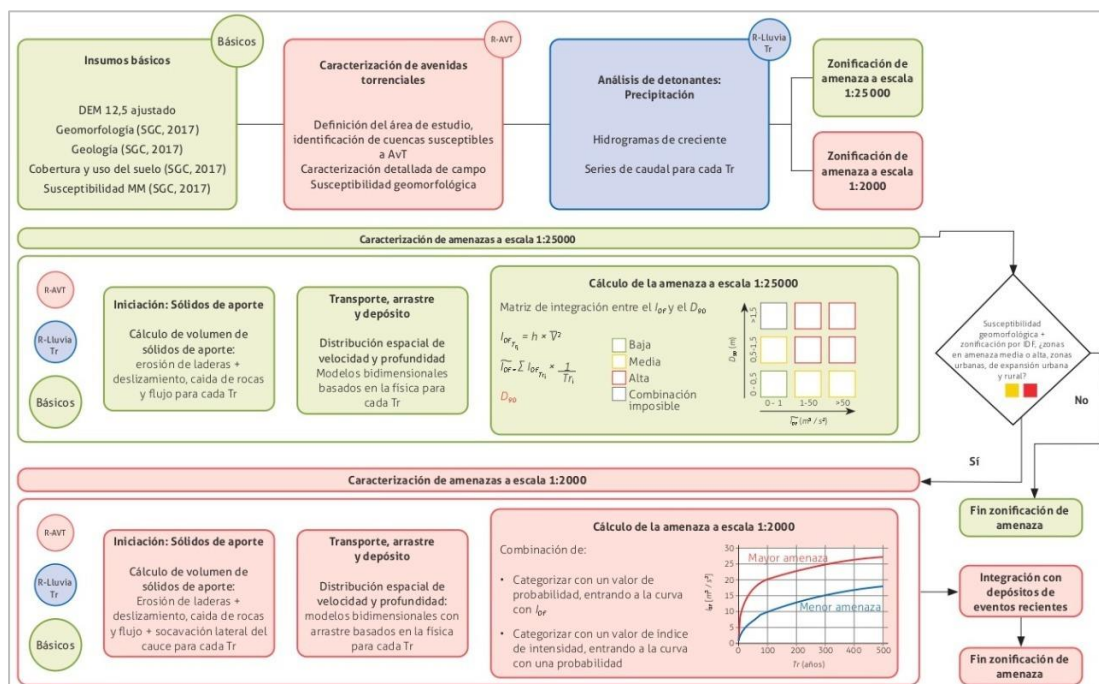
### **5.3. Avenidas Torrenciales**

Los flujos torrenciales se definen como una combinación de agua y sedimentos en distintas proporciones, que se desplazan velozmente a lo largo de cauces en cuencas pequeñas y de montaña. Estos eventos son desencadenados por diversos factores, que pueden incluir lluvias intensas concentradas o previas, movimientos en masa, sismos, roturas de presas naturales o artificiales, o la liberación repentina de grandes volúmenes de agua debido al deshielo. Esto genera un tiempo de respuesta muy corto para que la población ubicada en áreas bajas propensas a inundaciones pueda tomar medidas adecuadas. En Colombia, los profesionales de la geología interpretan las avenidas torrenciales como fenómenos de tipo gravitacional, mientras que los expertos en hidrología las consideran como crecidas repentinas de origen hidrológico. (Aristizábal, Arango Carmona, & García López, 2020).

El decreto 1077 de 2015, en su artículo 2.2.2.1.3.2.1.3 regula el contenido de los estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales, los cuales deben cumplir con las siguientes especificaciones técnicas. *“La evaluación de las avenidas torrenciales debe adelantarse en todos los cauces presentes o con influencia en el municipio o distrito, que por sus condiciones topográficas puedan tener un comportamiento torrencial. Se deben utilizar como insumos la geomorfología, estudios hidrológicos de la cuenca, orientado al flujo torrencial, considerando el ciclo de sedimentos, análisis hidráulico del área a zonificar, teniendo en cuenta factores detonantes como precipitación o movimientos en masa y la base cartográfica para la realización de la zonificación debe estar a escala 1:2.000”.*

La Guía de metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales del Servicio Geológico Colombiano, plantea un análisis con el objetivo de reconstruir la historia fluviotorrencial de las zonas de drenaje a partir de fuentes de información secundaria y de su registro geomorfológico y sedimentológico. De igual manera, resalta la importancia de la caracterización y representación cartográficamente de los factores condicionantes que interactúan en la ocurrencia de una avenida torrencial, como parte de los insumos necesarios para la evaluación de la amenaza. Para ello se parte de la caracterización geoambiental realizada en el marco de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa detallada y la amenaza por inundación, entre otras fuentes consideradas para el desarrollo de la fotointerpretación y la reconstrucción histórica del área de estudio.

Figura 2. Esquema metodológico para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.



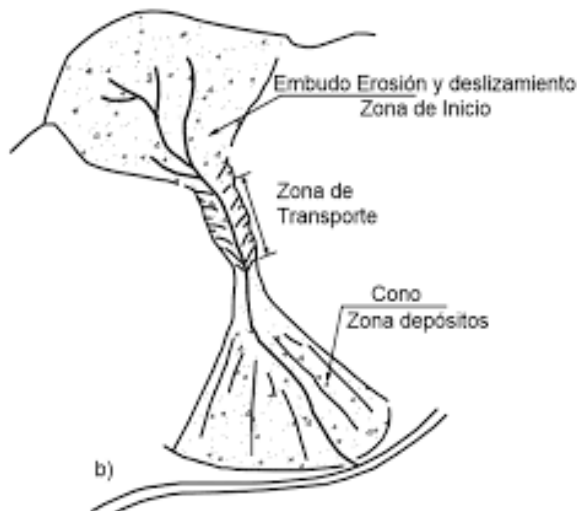
Nota. El diagrama metodológico fue tomado de Ramos et al., 2021

### 5.3.1. Caracterización de las avenidas torrenciales

La caracterización de las avenidas torrenciales se detalla con el objetivo de estudiar las condiciones topográficas y los eventos fluviotorrenciales para las zona de estudio, especialmente la historia fluviotorrenciales de las áreas de drenaje identificadas con carácter torrencial, a partir de fuentes de información secundaria y de su registro geomorfológico y sedimentológico.

En un evento de avenida torrencial puede distinguirse tres partes como se observa en la Figura 3. La zona de inicio, la zona de transporte o transición y la zona de depósito. Después de su generación, en la zona de inicio el flujo se canaliza siguiendo la topografía que marcan los ríos y las gargantas. Se desarrolla en la zona de transición, según el terreno. Una vez la inclinación decrece y el confinamiento del flujo desaparece, este se expande en forma de abanico en la zona de deposición. La inclinación del terreno va desde 40° en la zona de inicio hasta 3° en la zona de deposición (Oto Mir, 2007).

Figura 3. Partes básicas de un flujo torrencial



Fuente: (Suarez, 2001)

### **Zona de inicio del movimiento o ruptura**

En la zona de inicio, se produce la rotura y suele localizarse en la alto desde la pendiente o en el lado de una pendiente o canal principal. VanDine (1996) reporta pendientes mayores a 25° para esta área. El flujo representa el proceso por el cual una masa aparentemente rígida del suelo, sedimento o roca pasa de un estado estático a un flujo de escombros. La movilización requiere el desplazamiento de la masa, suficiente agua para saturarla, y la conversión de energía potencial gravitacional en energía cinética capaz de cambiar el tipo de movimiento del desplazamiento al flujo (Costa, 1984; Takahashi, 1991; Shelby, 1993; Iverson, 1997).

El inicio del movimiento de un flujo detrítico puede explicarse básicamente con dos mecanismos: por licuefacción de una masa que se desliza o bien por erosión de la superficie (surface runoff). El primer mecanismo consiste en la rotura del suelo en una pendiente inclinada o el desprendimiento pendiente abajo de material sedimentado. En ambos casos un incremento de energía debido a un incremento en la pendiente del terreno y a la incorporación de agua puede propiciar la transformación en flujo de derrubios. En estos casos el inicio del movimiento depende del ángulo de inclinación de la pendiente, las propiedades mecánicas del suelo (cohesión, ángulo de fricción interna) y el grado de saturación (Oto Mir, 2007). El criterio que define este mecanismo es el de Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c + (\sigma - p)tg\phi$$

Donde  $\tau_f$  es la tensión resistente a la profundidad considerada,  $c$  la cohesión,  $\sigma$  la tensión total normal debida al peso de los sedimentos y al agua subyacentes,  $p$  es la presión en los poros y  $\phi$  es el ángulo de fricción interna.

El segundo mecanismo tiene lugar en el lecho de los ríos. El material saturado del lecho es erosionado y arrastrado, formando un flujo detrítico. Este proceso requiere una longitud importante de canal para erosionar y mezclar una gran cantidad de sólidos con agua.

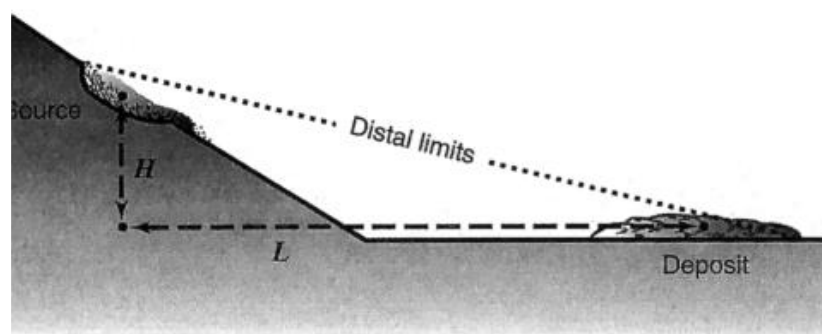
### **Zona de transporte**

Corresponde al lugar por donde el flujo de escombros discurre. Durante este trayecto, el movimiento puede aumentar su volumen, erosionando el material en esta zona o cargando el material depositado en movimientos anteriores. La tasa de erosión dependerá de las características geológicas y condiciones materiales en la zona de la trayectoria del flujo (Hung, 2005). Normalmente esta zona de transporte tiene pendientes superiores a 10 ° (Bathurst et al., 1997; Hung, 2005). Según Iverson (1997), la conversión de energía durante el movimiento del flujo se puede demostrar mediante la transformación de la energía potencial, la cual se encuentra asociada a la altura a la que se genera el movimiento (H) en energía perdida a formas no recuperables por fuerzas de resistencia aplicado a la distancia máxima recorrida L, hasta que el movimiento se detenga. Esta energía perdida durante el movimiento puede calcularse de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$MgH = mGrL$$

Donde M representa la masa del flujo, g es la magnitud de la gravedad y R es un coeficiente de resistencia adimensional.

Figura 4. Perfil esquemático que define H y L del transporte de la avenida torrencial. H y L están definidos por las líneas que conectan la zona de inicio y el depósito.



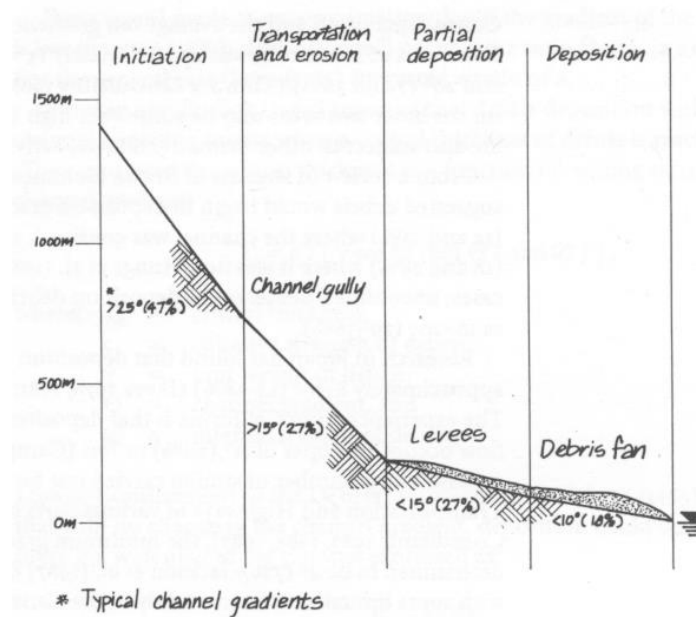
Fuente: (Iverson, 1997).

## Zona de depósito

Corresponde a la zona donde la masa movilizada inicia su proceso de depositación. El área de deposición generalmente se presenta en forma de abanico, conocido como abanico de detritos. La deposición generalmente resulta de la combinación de pendiente reducida y la pérdida del confinamiento (Hungr, 2005).

La depositación ocurre cuando toda la energía cinética se disipa, a través de calor generado durante el transporte de estos sedimentos (Iverson, 1997). En la mayoría de los eventos observados y estudiados se identifica que la pendiente donde comienza la deposición del flujo suele estar entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$ . Según VanDine (1996), la zona de deposición se divide en una deposición parcial con pendientes inferiores a  $15^\circ$  y en la zona de deposición final con pendientes inferiores a  $10^\circ$ .

Figura 5. Pendientes de las zonas de canales de flujo de detritos en grados y porcentaje.

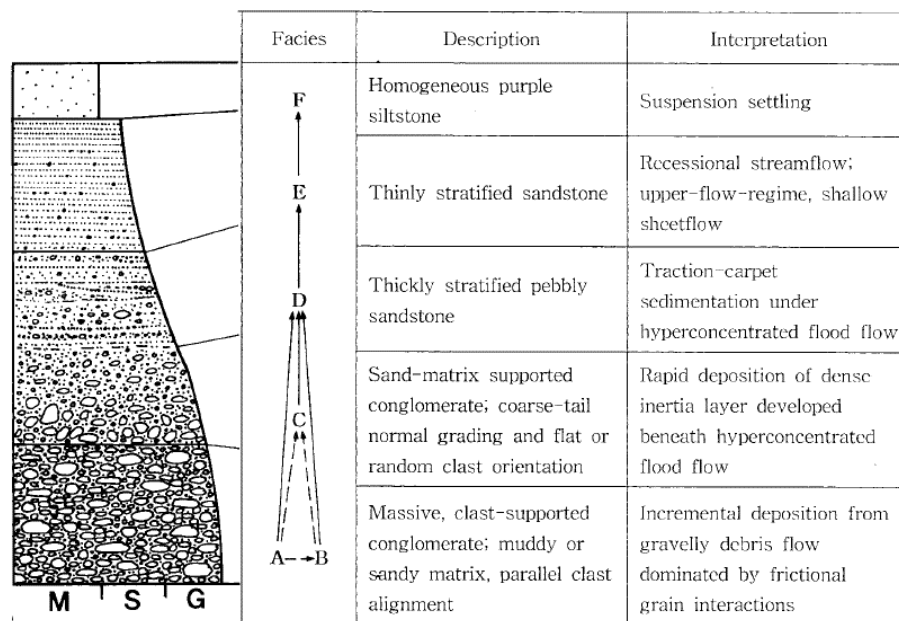


Nota: Fue tomado de (VanDine, 1996).

Generalmente, las áreas de depósitos están asociados a abanicos aluviales que presentan diversas características, dependiendo del tipo de fenómenos que lo han

generado, Sohn et.al (1999) describe a partir de observaciones en campo una secuencia de facies idealizada de los depósitos relacionados a diversos tipos de flujo, desde flujos de detritos dominados por la interacción friccional de los granos, hasta eventos de crecientes súbitas, con un régimen de flujo alto. En la Figura 6 se muestra esta secuencia de facies. Esta secuencia es tripartita y consta de conglomerados masivos clasto-soportados con matriz lodosa o arenosa en la parte inferior (facies A o B), conglomerados normalmente graduados y matriz arenosa y arenas o gravas estratificadas en la parte media (facies C y D), y finamente arenas laminadas o estratificadas en la parte superior (facies E) (Sohn, 1999). Esta secuencia de facies representa la relación de campo más común que puede darse en depósitos de este tipo.

Figura 6. Representación idealizada de una secuencia de facies que puede ser producto de un evento flujo de detritos-inundación de flujos hiperconcentrados - creciente súbita.



Nota: Fue tomado de (Sohn, 1999).

#### 5.4. Marco legal

El decreto 1807 del 2014 (compilado en el Decreto 1077 del 2015) contempla las disposiciones, condiciones y escalas de trabajo requeridas para la incorporación de la

gestión del riesgo en la planificación de los planes, esquemas y planes básicos de ordenamiento territorial. Del Decreto en cuestión se obtiene las siguientes definiciones:

### **Artículo 3. Estudios básicos para la revisión o expedición de planes de ordenamiento territorial**

Para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial, se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa, que contienen:

- ✓ Delimitación y zonificación de las áreas de amenaza
- ✓ La delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza en las que se requiere adelantar estudios detallados.
- ✓ La delimitación y zonificación de áreas con condición de riesgo en las que se requiere adelantar estudios detallados.
- ✓ Determinación de medidas de intervención, orientadas a las restricciones y condicionamientos mediante la determinación de normas urbanísticas.

### **Artículo 4. Estudios detallados**

Los estudios detallados están orientados a determinar la categorización del riesgo y establecer las medidas de mitigación correspondientes.

### **Artículo 5. Escalas de trabajo**

El decreto 1807 de 2014 en su artículo 5°, establece las escalas de trabajo propuestas para estudios básicos y detallados, tal como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 2. Escalas de trabajo para estudios básicos y detallados.

<b>TIPO DE ESTUDIO</b>	<b>CLASE DE SUELO</b>	<b>ESCALA</b>
<b>Estudios Básicos</b>	Urbano	1:5000

<b>TIPO DE ESTUDIO</b>	<b>CLASE DE SUELO</b>	<b>ESCALA</b>
	Expansión	1:5000
	Urbana	
	Rural	1:25000
<b>Estudios</b>		1:2000
<b>Detallados</b>	Urbano	
	Expansión	1:2000
	Urbana	
	Rural	1:5000

*Nota. Tomado de. Decreto 1807 del 2014*

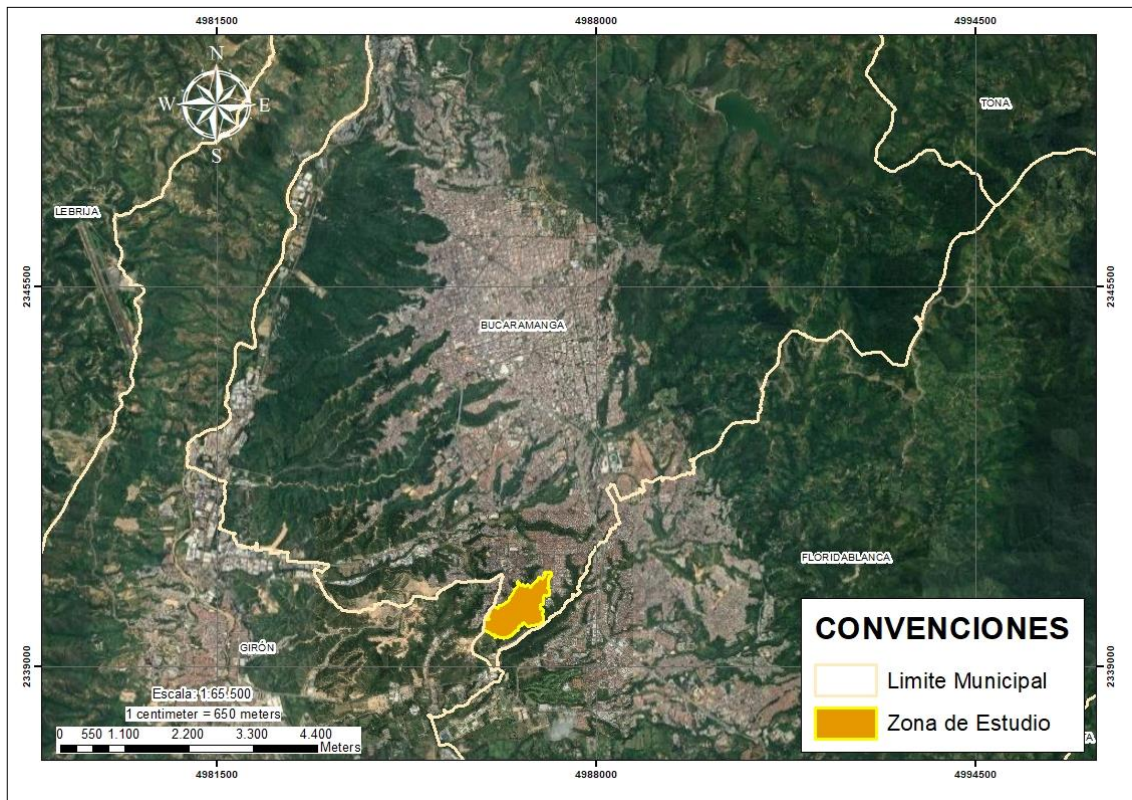
Es importante precisar que para el desarrollo del estudio (De acuerdo con los términos contractuales del mismo), para el cálculo de la amenaza se implementaron los lineamientos y especificaciones técnicas consignados en las siguientes Guías Metodológicas de orden nacional:

- ✓ Guía Metodológica para Amenaza por Inundación, desarrollado por el IDEAM (2017).
- ✓ Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Avenidas Torrenciales (diciembre, 2020).

### **5.5. Marco Geográfico**

Bucaramanga es la capital del departamento de Santander, fundada el 22 de diciembre de 1662, se encuentra a 424.3 Km de Bogotá. El municipio cuenta con una extensión de 165 km<sup>2</sup> dividida en 17 comunas contando con una población de 581.130 personas. Se localiza a una Latitud 7° 6' 50" Norte y una longitud 73° 7' 11" Oeste y se ubica a una altitud de 950 metros sobre el nivel del mar. Limita al Norte con el municipio de Rionegro, por el Oriente con los municipios de Matanzas, Charta y Tona, por el Sur con el municipio de Floridablanca y por el Occidente con el municipio de Girón (AMB, 2015).

Figura 7. Localización Regional del municipio de Bucaramanga-Santander

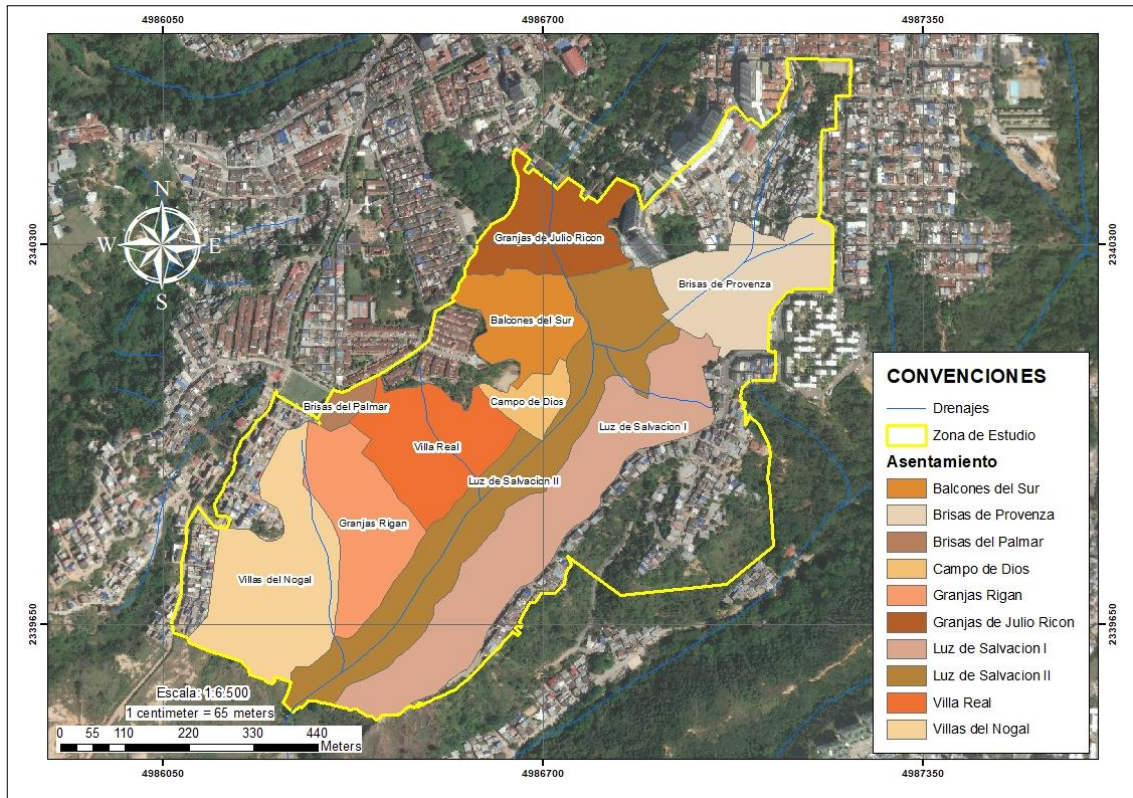


Nota. Esta salida gráfica fue realizada en el marco del desarrollo del contrato por la empresa JM Construcción y Consultoría (2022).

## 5.6. Delimitación área de desarrollo del estudio

La zona de estudio comprende áreas directas e indirectas dentro del polígono de estudio; por lo cual, las áreas directas corresponden a los diez barrios de incidencia del proyecto, los cuales están presentes en la comuna 10 y 11 del municipio de Bucaramanga y lo cual se logra apreciar en la Figura 8. (Luz de Salvación 1 y 2, Brisas de Provenza, Balcones del Sur, Brisas del Palmar, Granjas Reagan, Villas del Nogal, Villa Real, Granjas de Julio Rincón y Cristal Alto).

Figura 8. Barrios enfoque de estudio, pertenecientes a la comuna 10 y 11 del municipio de Bucaramanga.



*Nota.* Esta salida gráfica fue realizada en el marco del desarrollo del contrato por la empresa JM Construcción y Consultoría (2022).

## 6. Metodología

### 6.1. Recopilación de información existente

Se llevó a cabo la recopilación de información secundaria con base en estudios ejecutados por distintas entidades como la Alcaldía Municipal de Bucaramanga y la Corporación Autónoma de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), enfocadas a la gestión del riesgo en zonas cercanas al área de estudio y/o localizadas en inmediaciones de esta; Por tanto, se llevó a cabo el análisis y clasificación de la información relevante para el desarrollo del proyecto y de la zonificación a detallar por cada uno de los componentes objetos del desarrollo.

Considerando entonces el desarrollo del estudio se realizó la recopilación de la información a partir de información existente en los siguientes estudios:

“INVESTIGACIÓN TOPOGRÁFICA Y GEOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LOS BARRIOS QUE COMPRENDEN LA COMUNA 14, LOS BARRIOS ANTONIA SANTOS, SAN PEDRO, SAN MARTÍN Y QUEBRADA LA IGLESIA DE LA COMUNA 9, EL SECTOR EL CRISTAL PARTE BAJA DE LA COMUNA 10 Y BARRIO PORVENIR DE LA COMUNA 11 DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA – CONVENIO 6676-08.”, desarrollado en el año 2010 por la Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta de Bucaramanga – CDMB, se realizó una caracterización geológica y geomorfológica en el área de estudio delimitada en el título del documento en cuestión, área estimada en 140 Ha, de la cual, para el caso de estudio requerido por la presente consultoría, se tomará la información referente a la comuna 10, que para el estudio de referencia mencionado, corresponde al barrio El Cristal – Parte Baja.

“ESTUDIO DETALLADO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA E INUNDACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS LUZ DE SALVACIÓN 1 Y 2, BRISAS DE PROVENZA, BALCONES DEL SUR, BRISAS DEL PALMAR, GRANJAS DE REAGAN, PUNTA PARAÍSO, VILLAS DEL NOGAL, BRISAS DEL PARAÍSO, VIVEROS DE PROVENZA, VILLA REAL, CRISTAL ALTO Y GRANJAS DE PROVENZA DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA.”, llevado a cabo por el CONSORCIO EDARFRI 2015, se realizó un estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo para los asentamientos en mención.

“ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DE ALGUNAS LADERAS DE LOS MUNICIPIOS DE BUCARAMANGA, FLORIDABLANCA, GIRÓN”, llevado a cabo por INGEOMINAS y CDMB en el año 2009 a escala 1:5000.

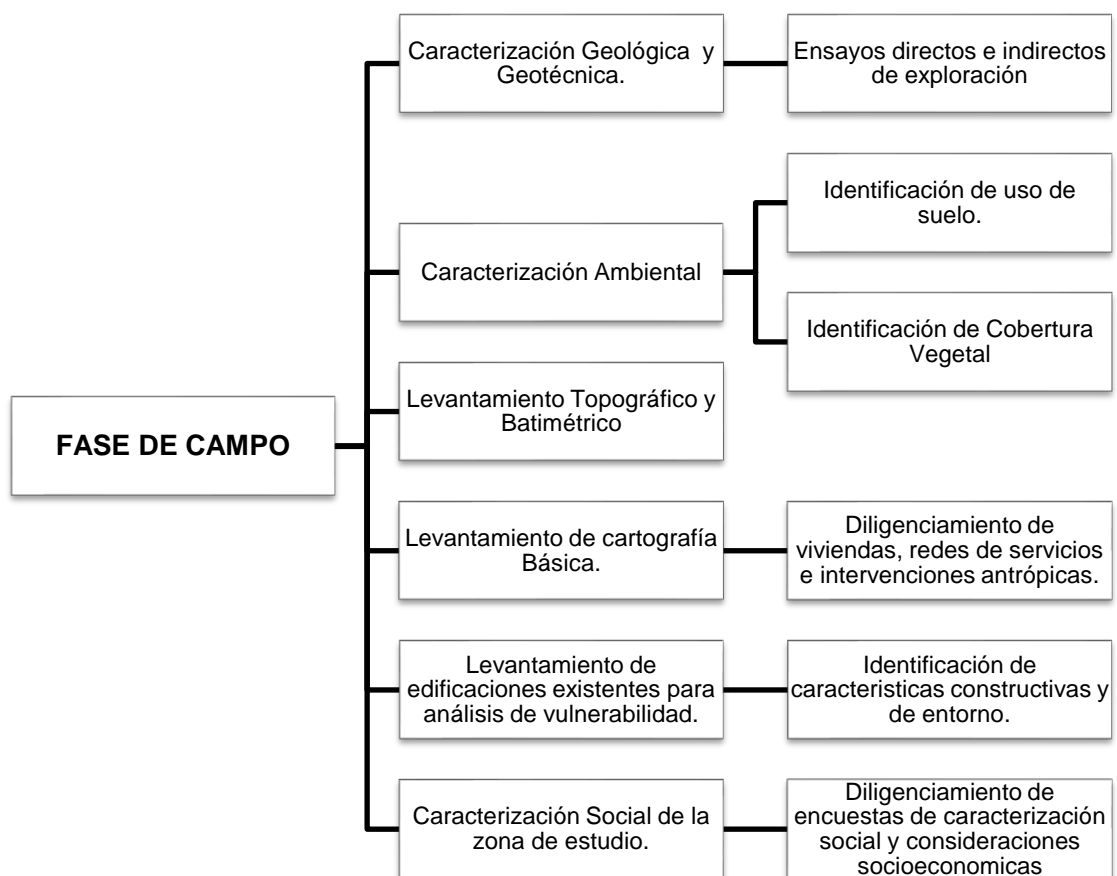
## **6.2. Recopilación de información campo**

Se llevó a cabo a la recopilación de información de campo, lo correspondiente a identificación del área de estudio, caracterización general del área, identificación de zonas

de atención y de antecedentes de eventos de afectación y reconocimiento de campo. Así mismo, también se evaluó el uso de herramientas participativas, como la participación comunitaria y la consulta de expertos locales, en el proceso de caracterización y zonificación del área.

Las actividades llevadas a cabo en el desarrollo de este componente comprenden lo detallado en la siguiente figura para cada una de las áreas de desarrollo:

Figura 9. Actividades detalladas en la fase de recolección de información



Nota. Autor

Fotografía 1. Fotografías de reconocimiento del área de estudio.



*Nota.* Esta fotografía corresponde a la registrada en el marco del desarrollo del contrato por la empresa JM Construcción y Consultoría (2022).

### **6.3. Cartografía básica y topografía detallada**

Se analizó la integración y aplicabilidad de herramientas tecnológicas, como modelos hidrológicos, sistemas de información geográfica (SIG) y tecnologías de teledetección, en la identificación y delimitación de zonas de amenaza debido a consideraciones actuales de levantamiento.

A partir de la adquisición de las fotografías o de la información obtenida, se procedió a importarlas y organizarlas por cada fecha de vuelo considerando un levantamiento a escala detallada con un sensor LIDAR, de 3 retornos con cámara de 24 mpx. captura de Ortomosaico con cámara DJI zenmuse P1 calidad < 5 cm/pixel. Esta organización fue importante, ya que algunas fotos presentaban errores como desplazamientos, nubosidad o variaciones de tonalidad, debido a factores externos que podrían afectar las etapas del mosaico o el producto final.

Una vez seleccionadas las fotografías a trabajar, se alinearon en el software especializado Agisoft Metashape para la primera etapa. En esta fase, Metashape encontró la posición y orientación de la cámara para cada imagen y generó un modelo de nube de puntos disperso. Luego de este proceso, se importaron los puntos de control que se utilizarían como marcadores, estos puntos de control consistían en unos mojones de amarre para validar la precisión de la información levantada y el ajuste de cada uno de los vuelos realizados para el área. Estos puntos de control proporcionaron una información más precisa, ya que fueron localizados manualmente en cada fotografía donde se visualizaba el punto de foto de control materializado en campo.

Figura 10. Modelo de malla con triangulación, visualización en alambre y texturizado.



*Nota.* Estas figuras corresponden a la registrada en el marco del desarrollo del contrato por la empresa JM Construcción y Consultoría (2022).

La etapa final consistió en la generación del ortomosaico, en la cual se asignaron el tamaño de pixel, el sistema de coordenadas en el que se trabajaría, el formato de compresión y la relación de compresión. Lo anterior dio como resultado el mosaico con los valores previamente asignados, el cual se entregó como producto final de todo el procesamiento, en formato GeoTiff.

Fotografía 2. Ortomosaico final de fotografías aéreas



*Nota.* Esta fotografía corresponde a la registrada en el marco del desarrollo del contrato por la empresa JM Construcción y Consultoría (2022).

#### **6.4. Análisis climatológico e hidrológico**

Este capítulo se enfoca en el análisis de los aspectos climatológicos de la zona de estudio y tiene como finalidad comprender y caracterizar las variables atmosféricas, así como las cuencas o unidades hidrográficas que inciden en el área de estudio y que puedan prescindir en el desarrollo de posibles amenazas ocasionadas por distintos fenómenos naturales como artificiales, principalmente inundaciones y/o avenidas torrenciales.

##### **6.4.1. Especialización De Estaciones Meteorológicas**

Para el análisis de las variables climatológicas se analizó la distribución espacial de las estaciones meteorológicas del IDEAM y de la CDMB con registros de datos históricos, esto con la finalidad de identificar las estaciones más cercanas, priorizando las que se

encuentran activas de tal forma que permitan estimar la tormenta y caracterización climática representativa de la zona de interés (*estaciones contenidas en un radio menor de 50km, de acuerdo a las recomendaciones de la resolución 1294 de la CDMB*).

Para el desarrollo de los polígonos de Thiessen se consideraron en total diecisiete (17) estaciones del IDEAM, pero por falta de datos o no registro de los mismos, solo se analizaron trece (13) estaciones. Por otro lado, en respuesta a la solicitud de los datos de las estaciones meteorológicas de la CDMB, solo se analizaron cinco (5) estaciones. A continuación, se presentan las estaciones meteorológicas consideradas para el desarrollo de los polígonos de Thiessen, que buscó precisar el análisis de precipitaciones y caracterización de variables climatológicas.

Tabla 3. Características de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM cercanas al área de interés

Código	Nombre	Categoría	Estado	Altitud	X	Y	Precipitación	Rango de años
23190700	PIEDECUUESTA GJA	PG	ACTIVA	1280	4.992.516.762	2.330.752.631	OK	48
23190280	PALO GORDO	PM	ACTIVA	950	4.985.308.731	2.327.899.521	OK	51
23190260	LA LAGUNA	PM	ACTIVA	1500	4.976.419.847	2.340.303.695	OK	51
23190600	EL PANTANO	PM	ACTIVA	1280	4.974.575.558	2.331.218.742	OK	51
23190590	LA FLORESTA	PG	ACTIVA	925	4.986.324.456	2341466.52	OK	43
23190300	EL PICACHO	PM	ACTIVA	3310	5.003.710.021	2343644.19	OK	51
23190380	LAS PALMAS	PM	ACTIVA	855	4.975.954.494	2.354.819.811	OK	51
23190440	EL NARANJO	PM	ACTIVA	825	4.966.923.125	2.354.152.695	OK	51
23195110	LLANO GRANDE	CO	ACTIVA	777	4.981.538.506	2.334.316.019	OK	46
23195502	APTO. PALONEGRO	SP	ACTIVA	1189	4.979.632.152	2.344.915.834	OK	44
23195040	UNIV. IND. SANTANDER	CP	SUSP.	1018	4.986.510.022	2347482.75	OK	44
23195230	NEOMUNDO	CO	SUSP.	970	4.987.857.845	2342540.16	OK	24
Código	Nombre	Categoría	Estado	Altitud	X	Y	Precipitación	Rango de años
23190830	IDEAM BUCARAMANGA	PG	ACTIVA	1250	4.986.938.785	2.345.671.614	OK	13
231950043	FLORIDABLANCA AUT	CP	ACTIVA	980	4.986.324.456	2341466.52	NO REGISTRA	NO REGISTRA
23197700	MAJADAS - AUT	LM	ACTIVA	760	4.989.729.572	2.349.200.937	NO REGISTRA	NO REGISTRA
2319500159	ESTACIÓN ISOTÓPICA	CP	ACTIVA	NO REGISTRA	NO REGISTRA	NO REGISTRA	NO REGISTRA	NO REGISTRA
2319500176	ESTACIÓN ISOTÓPICA	CP	ACTIVA	NO REGISTRA	NO REGISTRA	NO REGISTRA	NO REGISTRA	NO REGISTRA

Nota. JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA en base a datos del IDEAM en coordenadas CTM-12

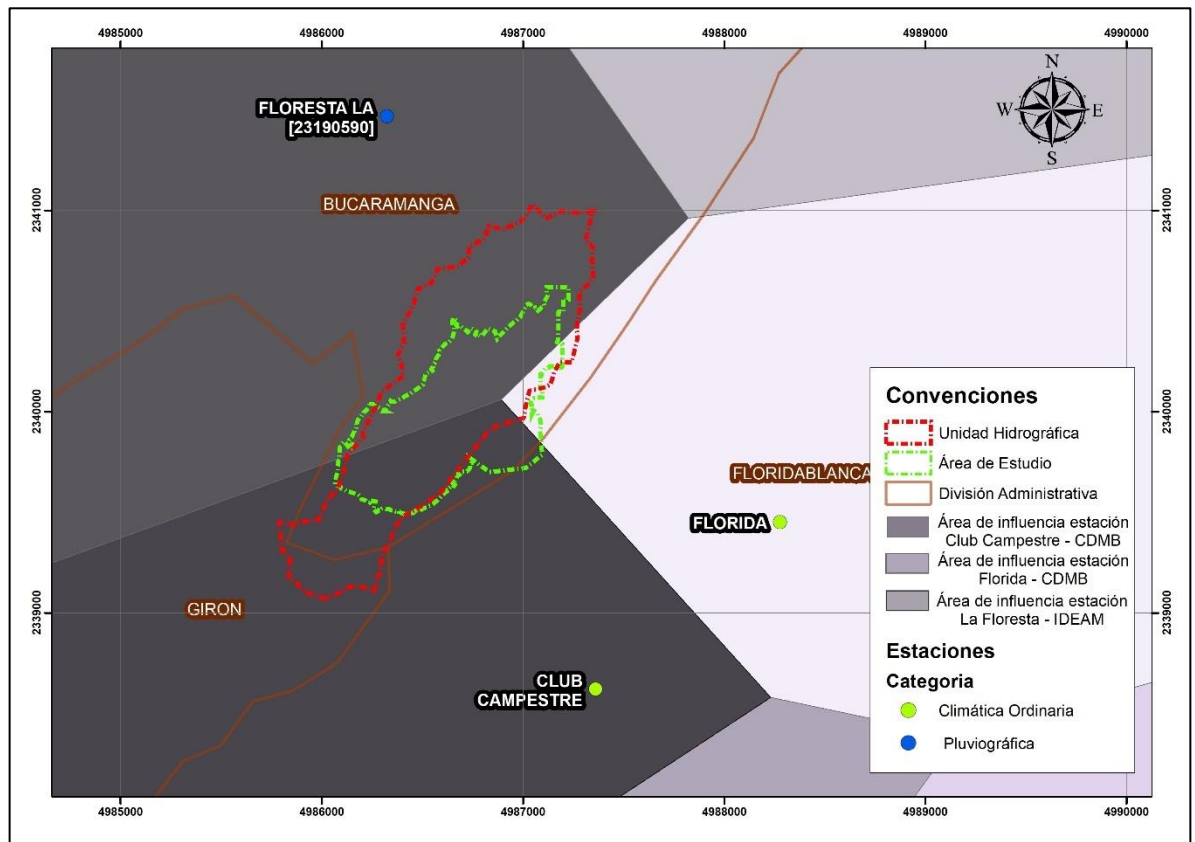
Tabla 4. Características de las estaciones meteorológicas de la CDMB cercanas al área de interés

Nombre	Cuenca	Ciudad	Altitud	X	Y	Precipitación	Rango de años
CDMB	Río de Oro	Bucaramanga	1280	4896924.23	2344845.78	OK	8
CIUADELA	Río de Oro	Bucaramanga	950	4986341.7	2343178.72	OK	8
CLUB CAMPESTRE	Río de Oro	Floridablanca	1500	4987361.16	2338620.61	OK	8
FLORIDA	Río de Oro	Floridablanca	1280	4988278.23	2339449.71	OK	8
NORTE	Río de Oro	Bucaramanga	925	4985151.00	2347968.04	OK	8

Nota. JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA en base a datos del IDEAM en coordenadas CTM-12

Considerando las estaciones analizadas, en la siguiente figura se presenta los polígonos de Thiessen generados a partir de las estaciones mencionadas anteriormente, cada polígono de Thiessen define un área de influencia considerando el área aferente de la estación que se encuentra contenida en el centro. Generalmente este método se emplea para determinar la lluvia media en una zona, cuando se sabe que las medidas de precipitación en los diferentes pluviómetros sufren variaciones. Para el caso presentado los polígonos de Thiessen se obtuvieron a partir del procesamiento en el software computacional ArcGIS.

Figura 11. Polígonos de Thiessen con incidencia dentro del área d estudio considerando de las estaciones meteorológicas presentadas.



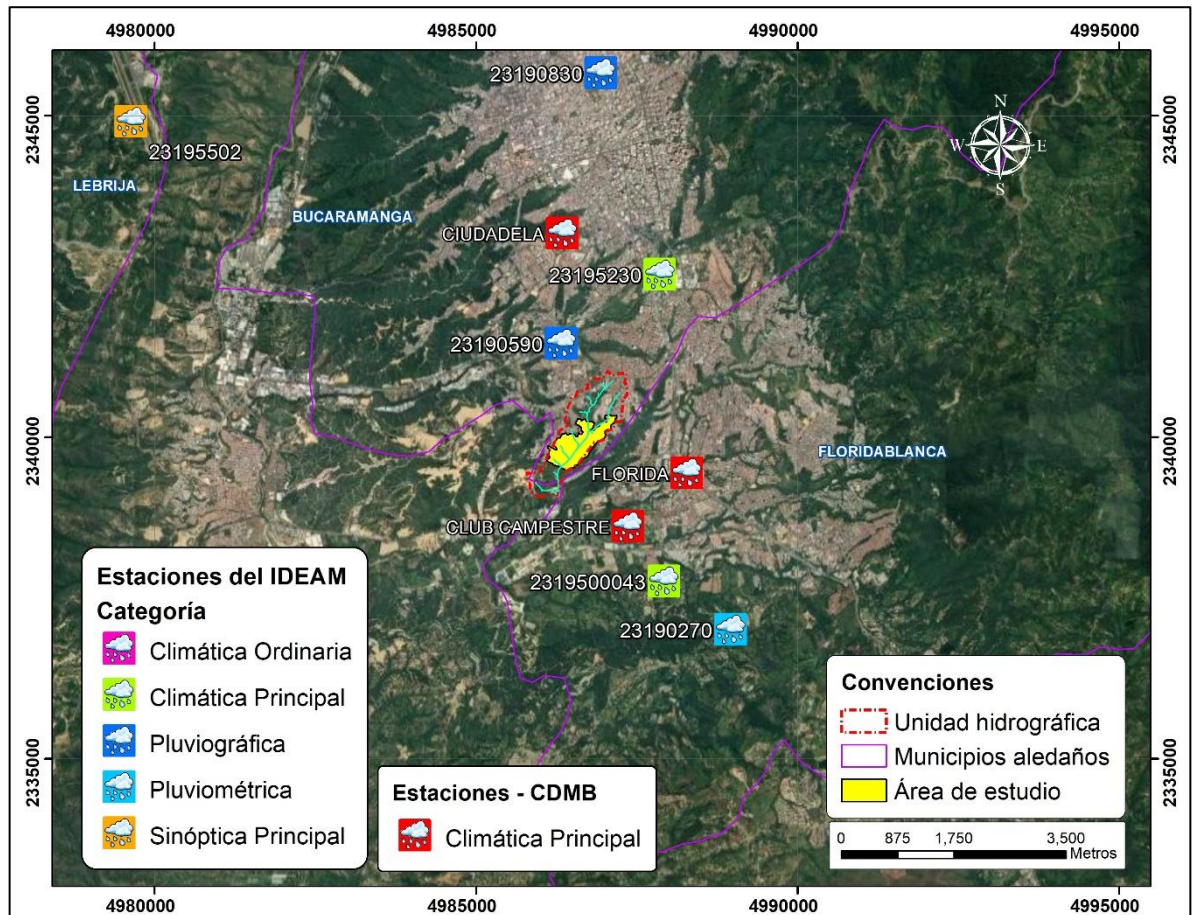
*Nota.* Tomado de JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

De la imagen previamente presentada se resalta que el área de estudio y unidad hidrográfica de interés se encuentra contenida en tres polígonos correspondientes al área de influencia de la estación pluviométrica del IDEAM 23190590 – LA FLORESTA, la cual abarca la mayor parte de tanto de la zona de estudio como de la unidad hidrográfica de interés. De igual manera las estaciones climático-ordinarias de la CDMB (FLORIDA y CLUB CAMPESTRE) tienen influencia en el área de estudio.

En base a estas áreas de influencia se discretizo el análisis climatológico, cabe mencionar que las estaciones climático-ordinarias CLUB CAMPESTRE y FLORIDA de la CDMB cuentan con un registro de datos desde el 2013 hasta el 2021 de las variables climatológicas de precipitación, temperatura y humedad relativa. Por otro lado, la estación pluviográficos del IDEAM - LA FLORESTA solo cuenta con datos continuos de precipitación

desde 1979 hasta el 2021. La siguiente figura presenta la localización de las estaciones y área de estudio detallado.

Figura 12. Localización de las estaciones meteorológicas analizadas



Nota. Tomado de JM Construcción y Consultoría SAS

Por tanto, se llevó a cabo un análisis de consistencia de datos climatológicos para cada una de las variables

#### 6.4.2. Estimación de Caudales líquidos

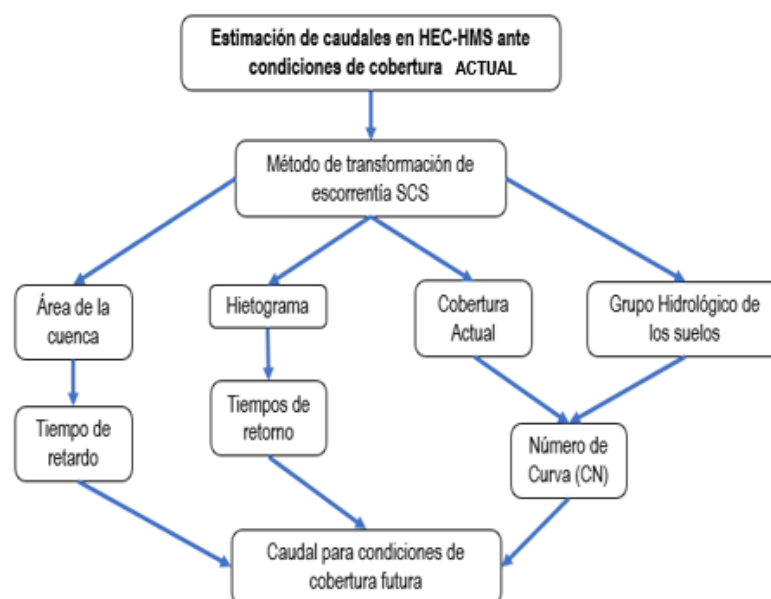
Considerando la necesidad de estimación de caudales líquidos (sin considerar los sedimentos) que se generan en la cuenca o unidad hidrográfica de la Quebrada La Chiquita que atraviesa el área de estudio, y es un insumo para el modelo hidráulico requerido para justificar la zonificación de amenazas por inundación y avenidas torrenciales. La estimación de caudales en este estudio se obtiene mediante los métodos más acordes al tamaño la unidad hidrográfica o justificados de acuerdo con los requerimientos técnicos del proyecto; y

siguiendo lo dispuesto en las normativas vigentes colombianas para la estimación de caudales de aguas lluvias.

El cálculo de caudales se determinó para ocho (8) periodos de retorno correspondientes a 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años y dos escenarios (i) cobertura actual y (ii) cobertura futura. Adicionalmente en este capítulo se contempla los aportes de caudal hacia la quebrada la Chiquita, por parte de las redes sanitarias y combinadas de las viviendas ubicadas en zonas aferentes que descargan sus aguas directamente a la Quebrada La Chiquita.

Por tanto, la estimación de los caudales de la unidad hidrográfica de la Quebrada La Chiquita para cada periodo de retorno de análisis se determinó mediante el software computacional de licencia libre HEC-HMS, considerando el método del hidrograma de escorrentía superficial (Sherman, 1932) y el método de transformación de escorrentía del número de curva (NC) del Soil Conservation Service (SCS). El modelamiento en HEC-HMS implica ingresar la siguiente información en el software para posteriormente correrlo.

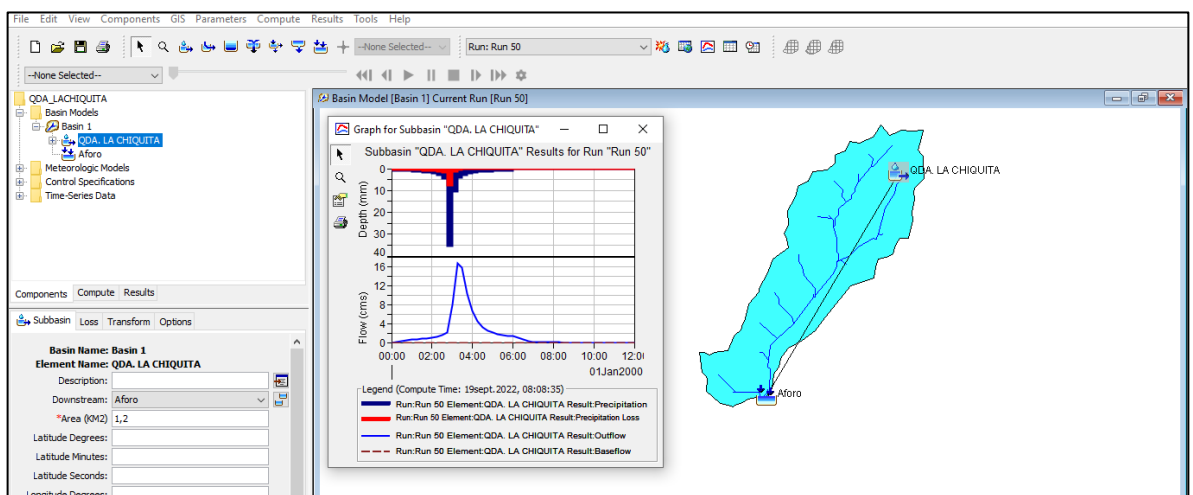
Figura 13. Insumos para la estimación de caudales ante escenarios de cobertura actual



*Nota.* JM Construcción y Consultoría SAS

La estimación de caudales para la unidad hidrográfica se estableció a partir del software de licencia libre HEC-HMS, considerando los hietogramas de diseño anteriormente presentados en este documento para distintos periodos de retorno, así como el valor de número de curva de la unidad hidrográfica de la quebrada La Chiquita y el área de esta. De igual manera se consideró el método de hidrograma unitario SCS para estimar los caudales. A continuación, se presenta a manera de ejemplo una ilustración de la interfaz del modelamiento hidrológico en HEC-HMS para un periodo de retorno de 50 años.

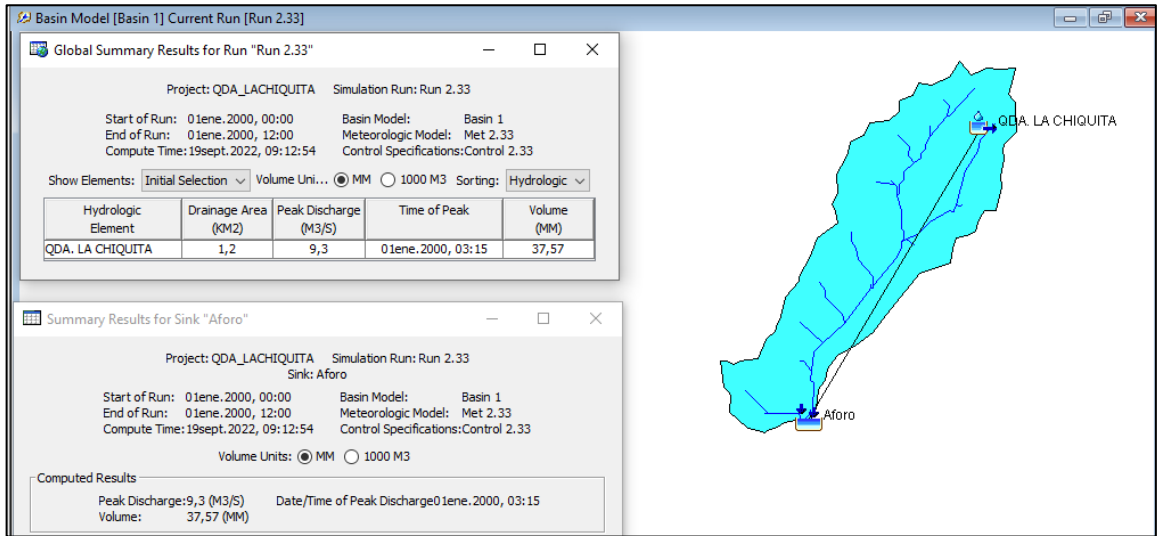
*Figura 14. Representación de la unida hidrográfica de la Quebrada La Chiquita para un  $Tr = 50$  años*



Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

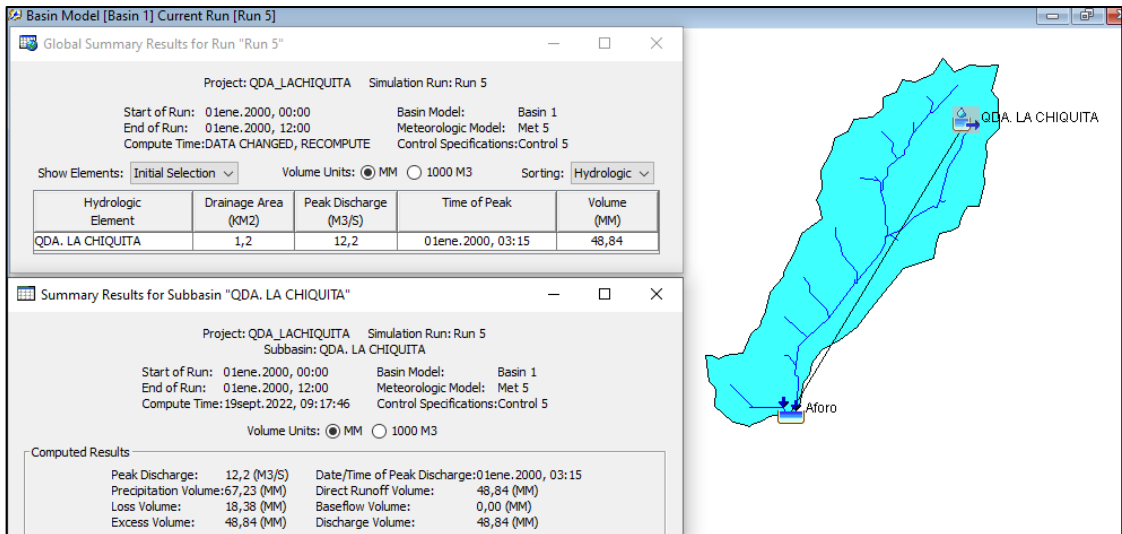
Una vez definidas todas las variables solicitadas por el software (área de la cuenca, método de transformación de escorrentía, número de curva, tiempo de retardo, hietograma, entre otros), se procede a correr el programa para cada periodo de retorno de análisis.

**Figura 15. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 2.33 años**



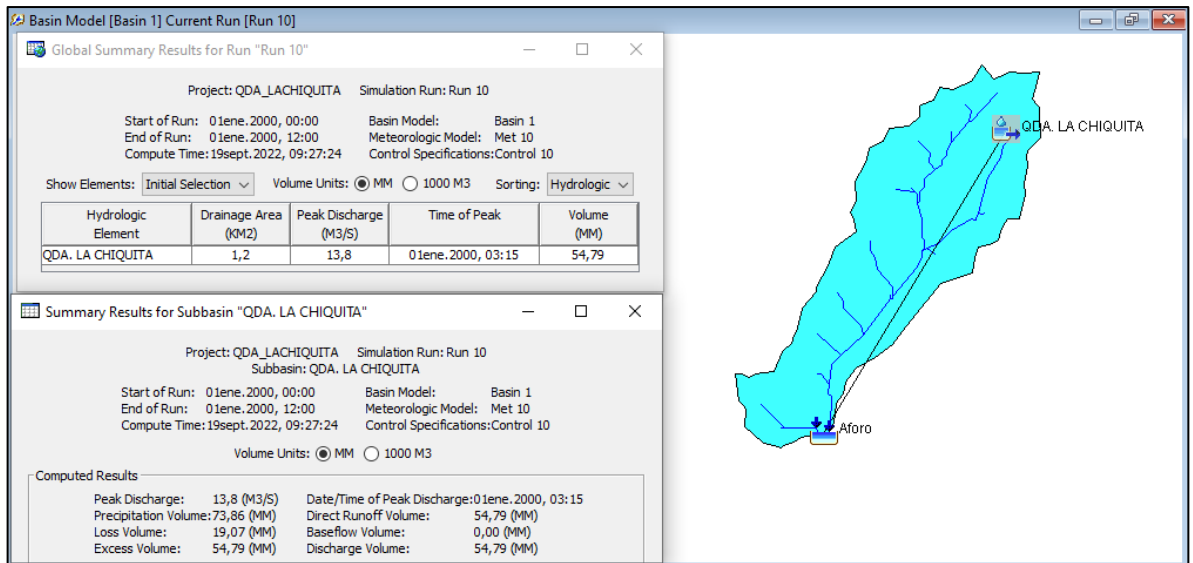
Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

**Figura 16. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 5 años**



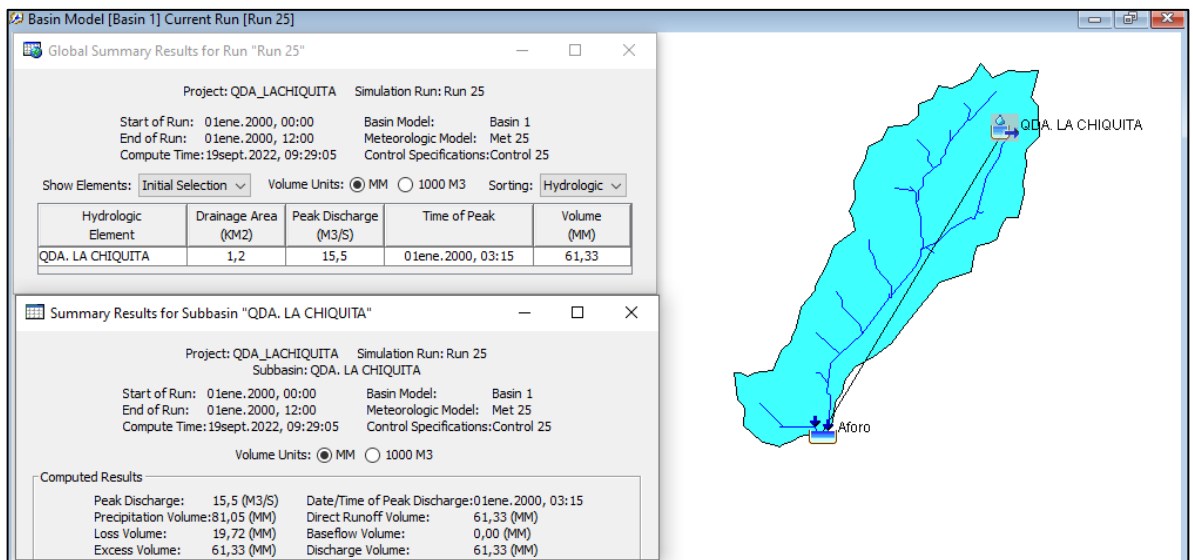
Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

**Figura 17. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 10 años**



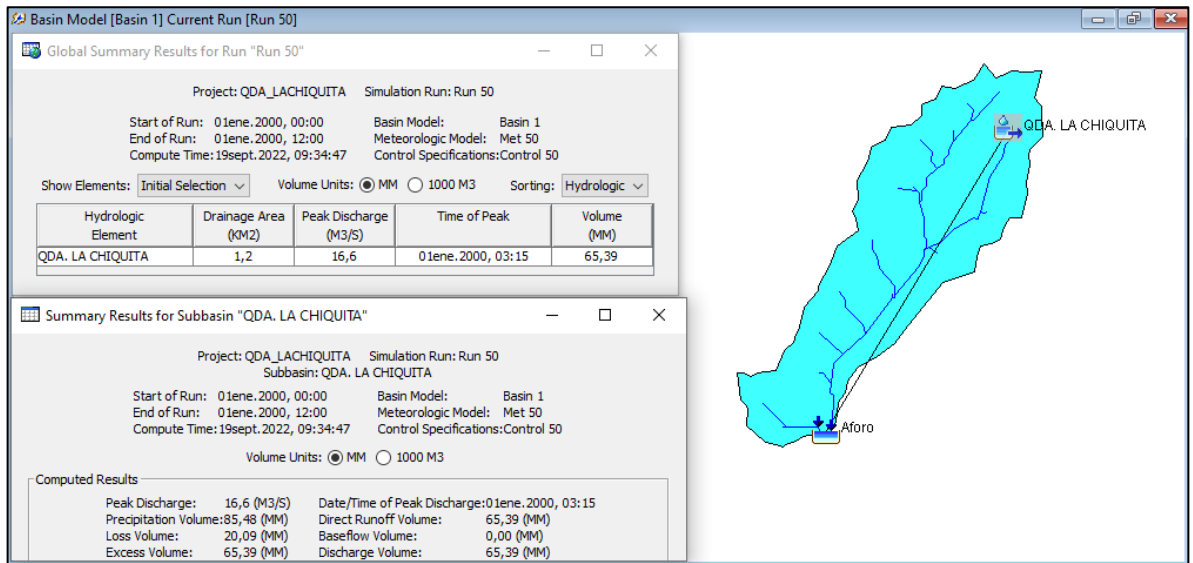
Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

*Figura 18. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 25 años*



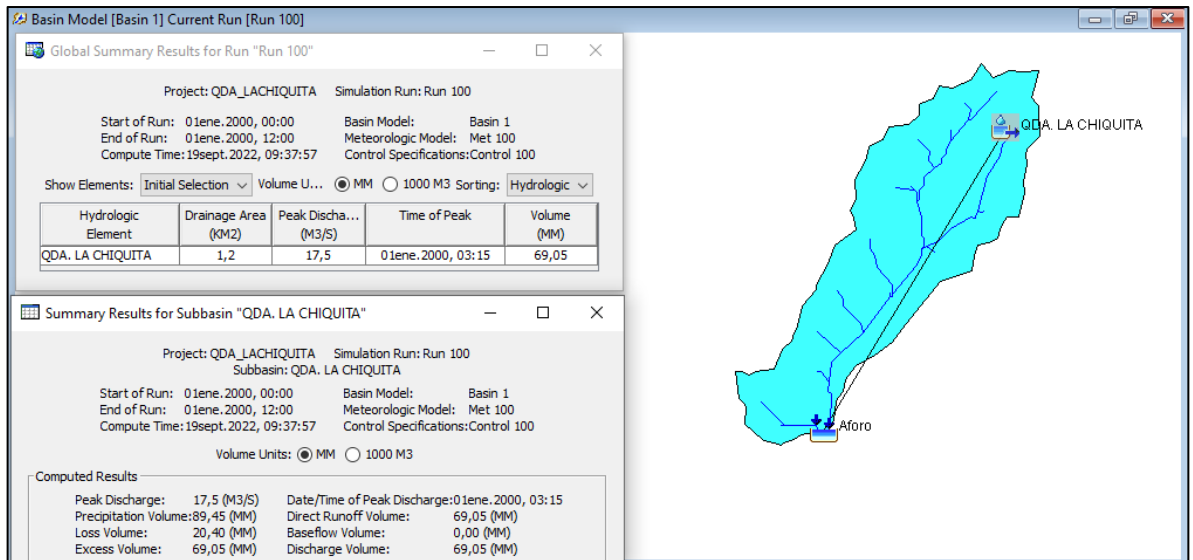
Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

Figura 19. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 50 años



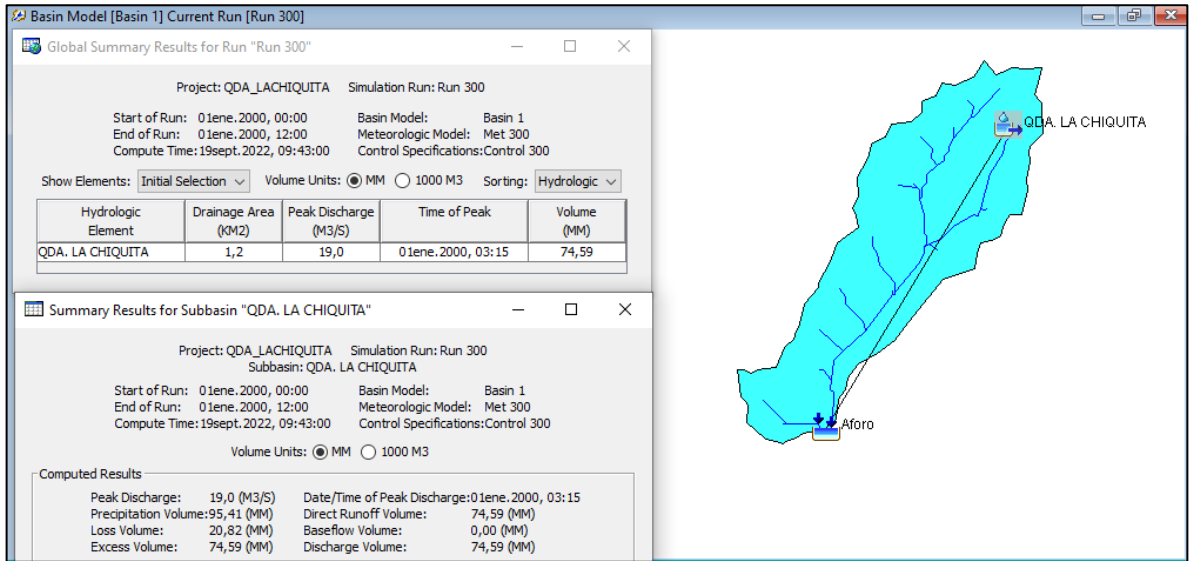
Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

Figura 20. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 100 años



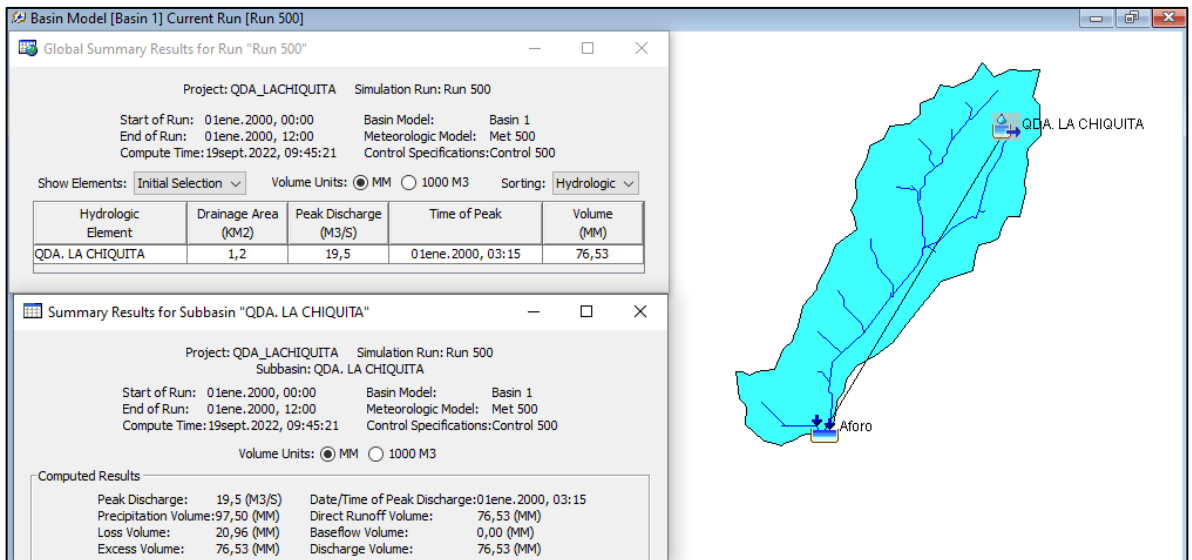
Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

Figura 21. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 300 años



Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

Figura 22. Resultados de Caudales para un Periodo de Retorno de 500 años



Fuente: JM CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA

Del modelamiento hidrológico se obtuvieron los siguientes valores de caudal que determinan cada hidrograma, cabe aclarar que un hidrograma corresponde a la

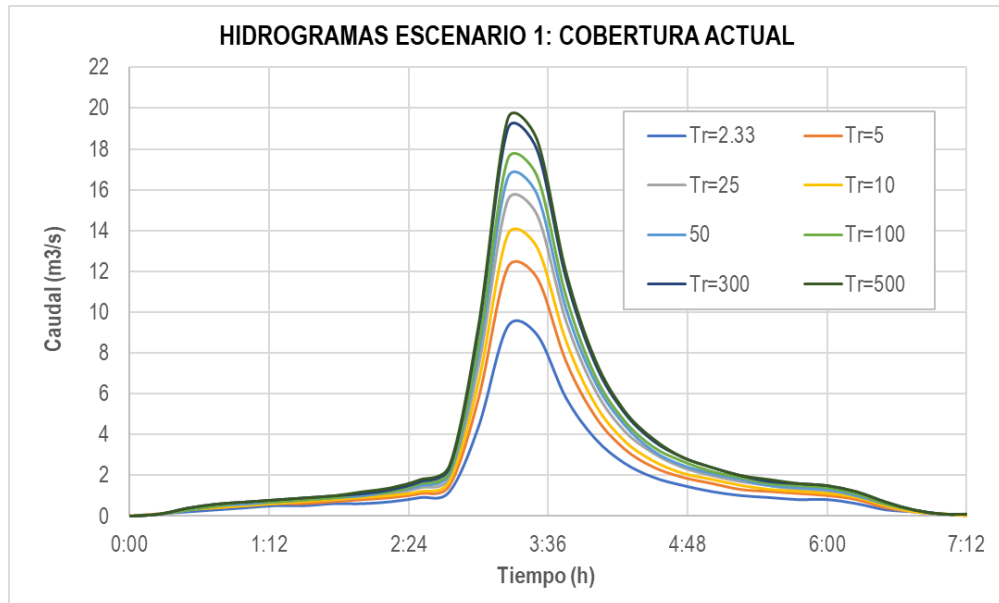
representación gráfica de la variación del caudal con respecto al tiempo. La siguiente tabla presenta el reporte de caudal registrados por el software con una frecuencia de 15 minutos.

Tabla 5. Registro de caudales ESC 1 cada 15 minutos para cada periodo de retorno de análisis

Tiempo (min)	Caudales según tiempo de retorno - Escenario 1: Cobertura Actual							
	Tr=2.33	Tr=5	Tr=10	Tr=25	50	Tr=100	Tr=300	Tr=500
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0
0:15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0:30	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
0:45	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
1:00	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7
1:15	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
1:30	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
1:45	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1	1
2:00	0.6	0.8	0.9	1	1	1.1	1.1	1.2
2:15	0.7	0.9	1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4
2:30	0.9	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
2:45	1.2	1.5	1.7	1.9	2.1	2.2	2.4	2.5
3:00	4.4	5.8	6.6	7.4	8	8.4	9.2	9.4
3:15	9.3	12.2	13.8	15.5	16.6	17.5	19	19.5
3:30	8.9	11.7	13.2	14.8	15.8	16.7	18	18.5
3:45	5.8	7.6	8.6	9.6	10.2	10.8	11.7	12
4:00	3.8	4.9	5.5	6.2	6.6	6.9	7.5	7.7
4:15	2.6	3.3	3.7	4.2	4.5	4.7	5.1	5.2
4:30	1.9	2.4	2.7	3.1	3.2	3.4	3.7	3.8
4:45	1.5	1.9	2.1	2.4	2.5	2.7	2.9	2.9
5:00	1.2	1.6	1.8	2	2.1	2.2	2.4	2.4
5:15	1	1.3	1.5	1.7	1.8	1.9	2	2
5:30	0.9	1.2	1.3	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8
5:45	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6
6:00	0.8	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5
6:15	0.6	0.8	0.9	1	1	1.1	1.2	1.2
6:30	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7
6:45	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
7:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
7:15	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
7:30	0	0	0	0	0	0	0	0
7:45	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota. JM Construcción y Consultoría SAS

Figura 23. Hidrogramas para distintos periodos de retorno bajo condiciones de cobertura actual



*Nota.* JM Construcción y Consultoría SAS

En resumen, los valores máximos de caudal se presentan entre las 3 a 3:30 horas una vez iniciado el evento de precipitación crítico, que para el caso es de 6 horas (tormenta crítica registrada en la zona). La siguiente tabla presenta los valores máximos de caudal según el periodo de retorno.

Tabla 6. Valores máximos de caudal registrados ESC1

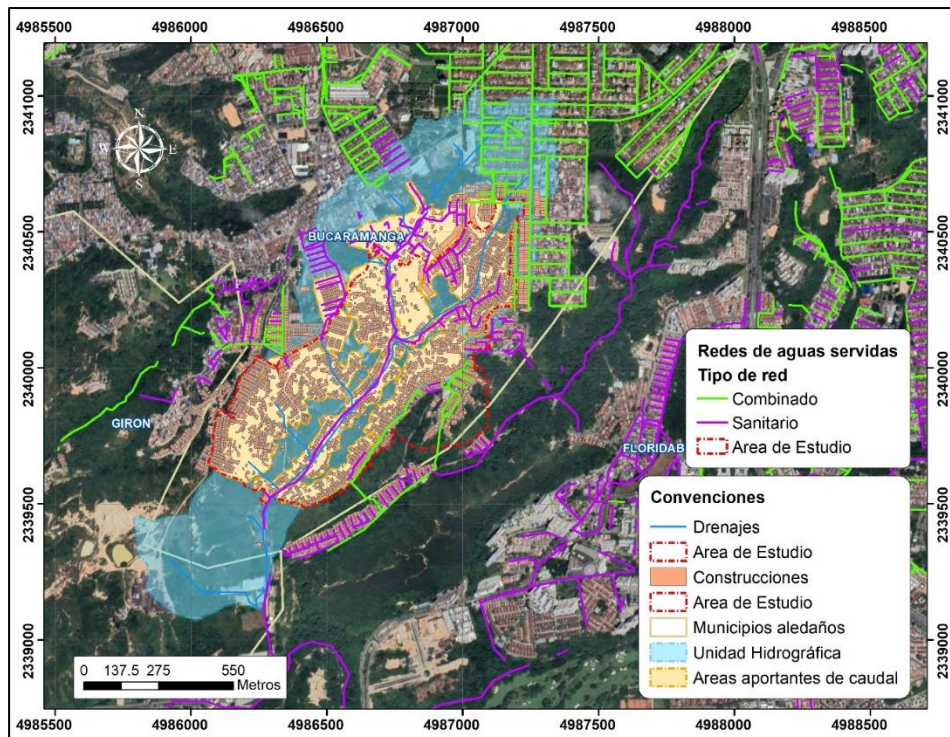
TR (años)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
2.33	9.3
5	12.2
10	13.8
25	15.5
50	16.6
100	17.5
300	19
500	19.5

*Nota.* JM Construcción y Consultoría SAS

### 6.4.3. Estimación de caudales aportantes a la Quebrada La Chiquita por las redes Sanitarias y redes combinadas existentes

Para la estimación de los caudales aportantes de las redes sanitarias y las redes combinadas existentes en el área de estudio, se empleó el método racional sobre de las áreas aferentes en las que se presenta un registro visual de urbanización consolidado. Esto en base a la respuesta del EMPAS (Empresa Pública de Alcantarillado de Santander S.A. E.S. P), en la que se expresa la NO incorporación de usuarios en los sectores de estudio. No obstante, cabe aclarar que en la zona de estudio si se cuenta con un sistema de redes primario (Interceptor La Chiquita) que tiene la capacidad de transportar las aguas servidas de las áreas aferentes. Lo anterior se especifica en la respuesta por parte del EMPAS a la petición del radicado 2926 dada el 8 de agosto de 2022. A continuación, se presentan la discretización de las áreas aferentes que aportan aguas servidas a la Quebrada La Chiquita desde aguas arriba hasta aguas abajo.

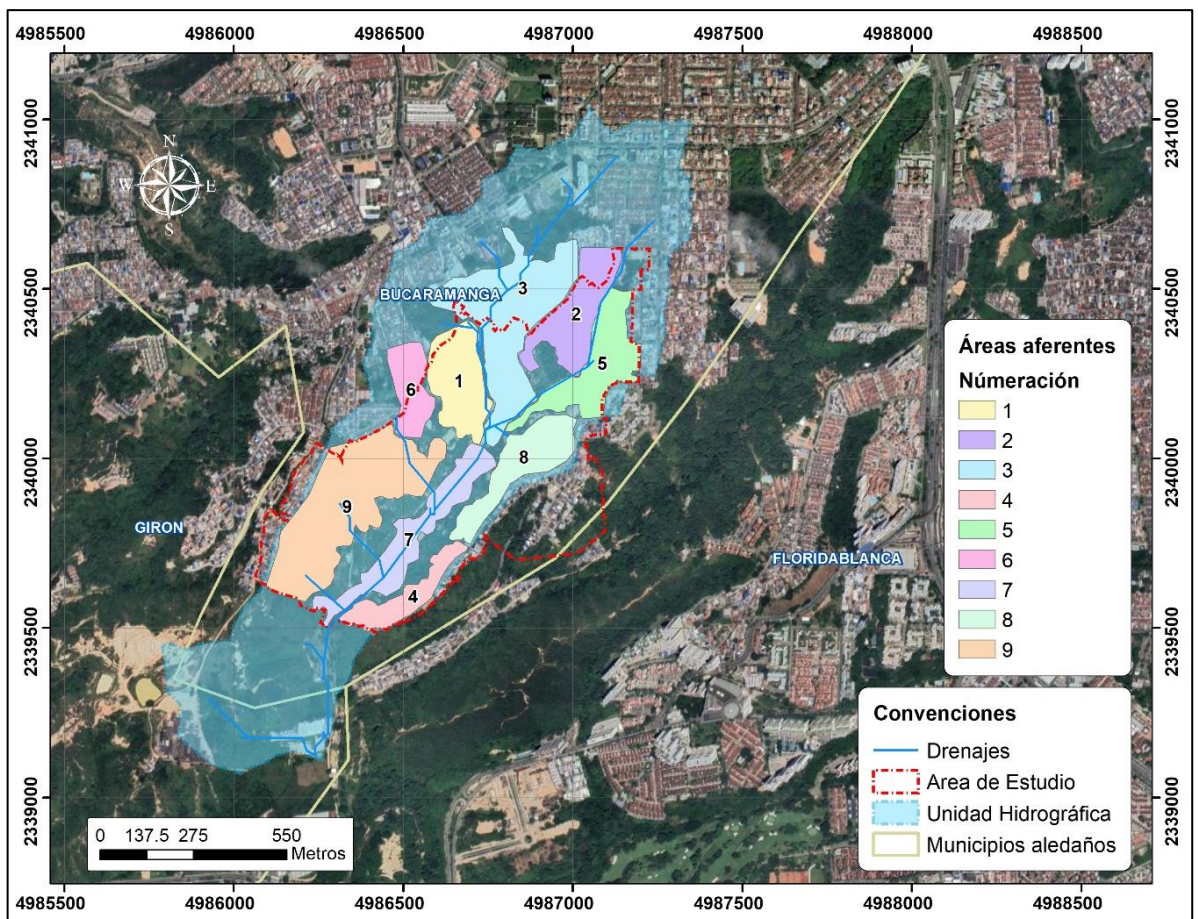
Figura 24. Discretización de áreas aportantes de caudal según las Redes sanitarias y combinadas existentes del EMPAS



Nota. JM Construcción y Consultoría SAS

En el área de estudio actualmente se encuentran varias redes de aguas servidas no inventariadas por el EMPAS ya que son realizadas por los mismos habitantes locales, estas redes se caracterizan por drenar directamente hacia la Quebrada La Chiquita. Por tal motivo al no tener certeza de la distribución de estas redes se asume el método racional para la estimación de caudales aportantes de aguas servidas de las viviendas aledañas o contenidas en la unidad hidrográfica. La siguiente figura presenta cada una de las áreas aportantes de aguas servidas consideradas en este estudio.

Figura 25. Identificación de áreas aferentes que aportan caudal a la Quebrada La Chiquita de aguas servidas



Nota. JM Construcción y Consultoría SAS

Tabla 7. Estimación de caudales aportantes de aguas servidas

Numeración	Área (km2)	Coefficiente de escorrentía	Tr=2.33 años	Caudal (m3/s)
1	0.046331	0.9	98.23	4.10
2	0.047921	0.9	98.23	4.24
3	0.103062	0.9	98.23	9.11
4	0.026598	0.9	98.23	2.35
5	0.053063	0.9	98.23	4.69
6	0.026777	0.9	98.23	2.37
7	0.051753	0.9	98.23	4.58
8	0.044598	0.9	98.23	3.94
9	0.11945	0.9	98.23	10.56
<b>APORTES TOTALES DE CAUDAL</b>				45.93

*Nota.* JM Construcción y Consultoría SAS

### **6.5. Caracterización y modelación de Inundación**

El área de interés de los puntos priorizados analizados para el Municipio de Bucaramanga, correspondientes a la quebrada Las Chiquita, se encontraba localizada en el sector de las comunas 10 y 11 del municipio de Bucaramanga, departamento de Santander. En la Figura 14 (Figura 1) se mostró la ubicación de los puntos priorizados con respecto al municipio de Bucaramanga.

Figura 26. Ubicación de puntos de modelación hidráulica en el municipio de Bucaramanga Comuna 10 y 11



*Nota.* JM Construcciones y consultoría S.A.S en base a datos del IDEAM

Con base en el caudal de diseño para la Quebrada Las Chiquita, obtenido en el capítulo de hidrología para los diferentes tipos de retorno, y utilizando el programa HEC-RAS versión 6, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, alimentado con la topografía de la zona de análisis y la determinación del coeficiente de Manning, se determinaron los niveles de inundación considerando el método de Curva Numero (SCS).

La topografía se tomó mediante topografía de detalle con estación total, registrando secciones transversales del cauce, con una periodicidad de cada 20 metros.

El coeficiente de Manning se calculó siguiendo la metodología sugerida por Ven T. Chow en su libro Hidráulica de Canales Abiertos (Chow, 1994). Para su determinación, se incorporaron las condiciones del canal, como el material, el grado de irregularidad, las

variaciones de la sección transversal, el efecto relativo de las obstrucciones, la vegetación y el grado de los efectos por meandros. Se consideró un número de Manning uniforme considerando la sección transversal de esta en concreto.

Una vez definida la geometría del drenaje con sus características principales y los caudales de diseño determinados, y de acuerdo con las características hidráulicas de los drenajes modelados, se procedió a realizar el análisis de flujo de forma mixta para determinar las condiciones dinámicas de la morfología fluvial e identificar las áreas afectadas por flujos subcríticos y supercríticos.

Con el fin de comprender el comportamiento hidráulico del cauce analizado y determinar el alcance del cauce y el estudio de inundación, se determinaron las características hidráulicas en cada sección transversal modelada, para cada tiempo de retorno. A estas características se les aplicó un tratamiento estadístico para determinar los valores extremos de los datos obtenidos (máximos y mínimos).

## **6.6. Caracterización y modelación de Avenidas Torrenciales**

Se integraron criterios multidisciplinarios, como aspectos urbanísticos, ambientales y sociales, en el análisis de las zonas de amenaza. Esto permitió desarrollar enfoques holísticos que consideraran tanto los aspectos técnicos como las necesidades y capacidades de la comunidad afectada.

### **6.6.1. Información secundaria de entidades públicas y medios de comunicación**

La reconstrucción de la historia fluviotorrencial del área de estudio se hizo a partir de informes de entidades como el Servicio Geológico Colombiano, la CDMB y la alcaldía municipal de Bucaramanga y otros documentos. De igual manera en los medios de comunicación se encontró registro fotográfico, narrativo y audiovisual, específicamente del flujo de detritos ocurrido el 18 de febrero de 2022, que evidencias claves en el tipo de sedimentos involucrados en el evento y su distribución en área de estudio. A continuación, son enlistadas algunas de las fuentes secundarias referidas en esta sección:

- ✓ Sistema De Información De Movimientos En Masa (SIMMA)
- ✓ DESInventar
- ✓ Vanguardia Liberal
- ✓ Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB)
- ✓ Memoria explicativa plancha 109 y 120
- ✓ Documento técnico de soporte POT Municipio de Bucaramanga
- ✓ POMCA Río Lebrija Alto
- ✓ Estudio Detallado de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa e Inundación de los Asentamientos Luz de Salvación 1 y 2, Brisas de Provenza, Balcones del Sur, Brisas del Palmar, Granjas de Reagan, Punta Paraíso, Villas del Nogal, Brisas del Paraíso, Viveros de Provenza, Villa Real, Cristal Alto y Granjas de Provenza del Municipio de Bucaramanga

#### **6.6.2. Fotografías aéreas y sensores remotos**

Las fotografías aéreas y sensores remotos utilizados para la cartografía de los eventos fluviotorrenciales y fotointerpretación de movimientos en masa y rasgos geomorfológicos asociados a procesos morfodinámicos fueron:

- ✓ Fotografías aéreas
- ✓ Ortofoto de 0.15m

#### **6.6.3. Procedimiento general de la aplicación**

Siguiendo la metodología propuesta para la caracterización de avenidas torrenciales en la guía metodológica para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales se detallan:



***Identificación de la geomorfología indicativa y temporalidad  
relativa***

Se llevó a cabo la fotointerpretación de la geomorfología indicativa de depósito y aporte a escala 1:1.000 partiendo del DEM de 0,25m, la ortofoto de 0,15 m y las curvas de nivel cada 0,5 m generados por el equipo consultor en el marco del desarrollo del contrato.

***Zonificación de susceptibilidad geomorfológica por avenidas  
torrenciales a partir de las geoformas indicativas de depósito  
fluviotorrencial.***

Las geoformas indicativas de depósito fueron categorizadas en susceptibilidad baja, media y alta según su temporalidad relativa definida a partir de la fotointerpretación y las características de los depósitos vistas en campo.

***Identificación de los depósitos a lo largo de la zona de tránsito y  
de depósito***

La capa de la caracterización de los depósitos fue hecha a partir de las geoformas indicativas equivalentes. Las UGS fueron extraídas de la información adquirida en campo.

***6.6.4. Productos de la caracterización de avenidas torrenciales***

A continuación, son descritos los productos resultantes de la caracterización de avenidas torrenciales en el área de estudio que comprende dos áreas de drenaje y dos zonas de depósito. Estas dos áreas de drenaje se encuentran en la cuenca de la Quebrada La Chiquita.

***Inventario histórico de avenidas torrenciales***

Se identificó un evento asociado a flujo de detritos reportado el día 22 de febrero de 2022, en el cual se presenta daño total en algunas viviendas en la parte baja del asentamiento humano Luz de Salvación. En este se observan bloques de hasta 60 cm de diámetro proveniente del miembro órganos de la formación Bucaramanga.

Fotografía 3. evento de flujo de detritos ocurrido el 18 de febrero de 2022 en el asentamiento Luz de Salvación 2.



*Nota.* Tomado de Vanguardia Liberal 2022

De acuerdo con el informe realizado por la CDMB se evidenciaron los rastros del paso del flujo (Avenida torrencial) por el asentamiento Luz de Salvación, en donde se observaron clastos de rocas de tamaños grandes (35 cm – 60 cm aproximadamente) combinados con tierra que presentaba alto grado de humedad.

Recurrentemente también se han presentado procesos de flujo de detritos de menor tamaño sobre la vía principal del asentamiento Luz de Salvación.

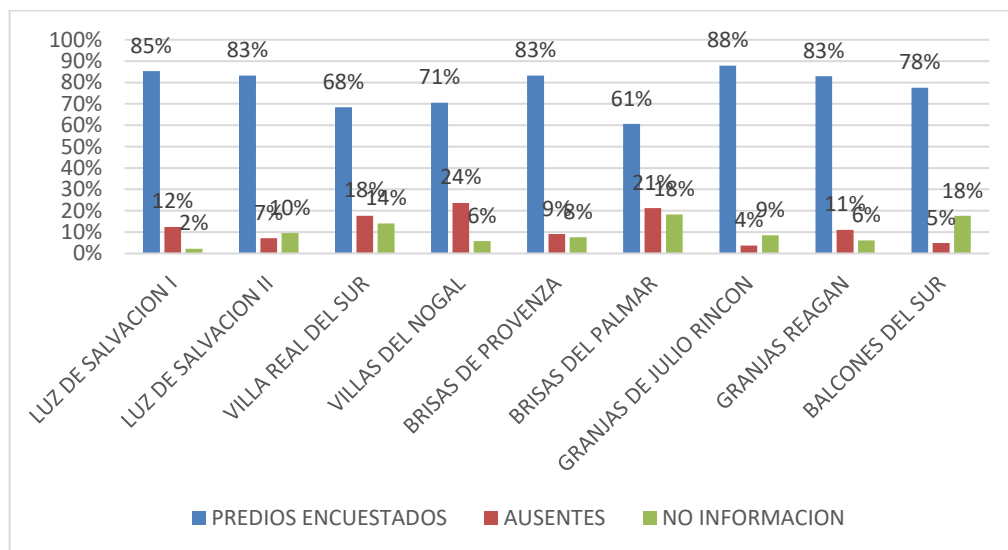
### **6.7. Análisis de consideraciones sociales**

La fase de campo se realizó a través del diálogo ciudadano y la comunicación estratégica con las comunidades y líderes de cada sector, así como con la implementación de herramientas para la recolección y análisis de información. También se utilizaron técnicas de observación directa para describir y resaltar puntos clave del territorio.

Con esta base, se elaboró un diagnóstico de vulnerabilidad utilizando datos cualitativos y cuantitativos del sector investigado, destacando los aspectos sociales más relevantes de las comunidades, obtenidos a partir de la información proporcionada por los habitantes encuestados. La trazabilidad y tabulación de la información permitió identificar aspectos importantes, tales como: datos generales de los encuestados, información sobre los hogares (edad, nacionalidad, número de familias por hogar, entre otros), información comercial y económica (salario, ocupación), caracterización del sector (imagen del sector, seguridad, lugares de esparcimiento para todas las edades), y el conocimiento sobre riesgos ante desastres. El objetivo fue comprender las dinámicas sociales que enfrentan estas familias.

Con esta información, se logró impactar a 1,682 familias, actualizando datos específicos y relevantes para la Alcaldía de Bucaramanga, con el fin de apoyar futuras intervenciones orientadas a mejorar la calidad de vida de la comunidad.

Figura 28. Caracterización del Encuestado.



*Nota.* Resultados de la caracterización social en el desarrollo del contrato por parte de JM Construcción y Consultoría (2022).

Se identificaron 2087 predios correspondientes a la comuna 10 y 11 de los cuales se encuestaron 1682 viviendas, los cuales se encontraban habitados y el equipo fue recibido,

de igual forma se evidencio 243 predios correspondientes a los ausentes, quienes al momento del trabajo de campo no se encontraban a pesar de realizar varias visitas y 162 predios corresponden a las viviendas que no otorgaron información alguna.

A partir de la recopilación de la información y del análisis de los datos, se pudo inferir que la población cuenta con los servicios domésticos básicos, como agua potable, en algunos casos desde una pila comunitaria, y energía eléctrica. Sin embargo, no existe un sistema de alcantarillado que cumpla con la reglamentación adecuada para garantizar a la comunidad las condiciones de salubridad necesarias.

En cuanto a la condición ambiental, se observó con mayor prevalencia una calificación de regular, debido a la ausencia de una cultura ambiental implementada y de programas medioambientales enfocados en el manejo adecuado de los residuos. Esto ha limitado la formación, sensibilización y concientización de los habitantes sobre la importancia de estas prácticas.

Todos los datos representativos caracterizaron en las estadísticas del estudio, donde se relaciona constata y comprender el entorno social y físico de la conformación de cada uno de los barrios, así como su progreso y crecimiento sociodemográfico, con la participación de las diferentes culturas que lo habitan.

## **7. Resultados**

Con base en los resultados del análisis integrado, se propusieron estrategias de gestión de riesgos y planificación urbana sostenible para los Sectores Priorizados de las Comunas 10 y 11. Estas estrategias estuvieron orientadas a reducir la vulnerabilidad de la población y fomentar un desarrollo urbano resiliente ante amenazas hidrológicas.

### **7.1. Inundación**

Partiendo de un modelo digital del terreno (MDT) e cual fue creado a partir de la topografía elaborada para una de las zonas de estudio es posible obtener una

representación matemática de los valores de altura y consecuentemente definir y caracterizar la expresión morfológica del relieve de cada zona analizada.

La condición del modelamiento actual es la siguiente: Terreno actual del cauce con caudales máximos multi temporales de 2, 5, 10, 25, 50 100 y 500 años.y consideraciones de Manning en las secciones del área de análisis de:

Tabla 8. Valores del Coeficiente de n para la zona de estudio

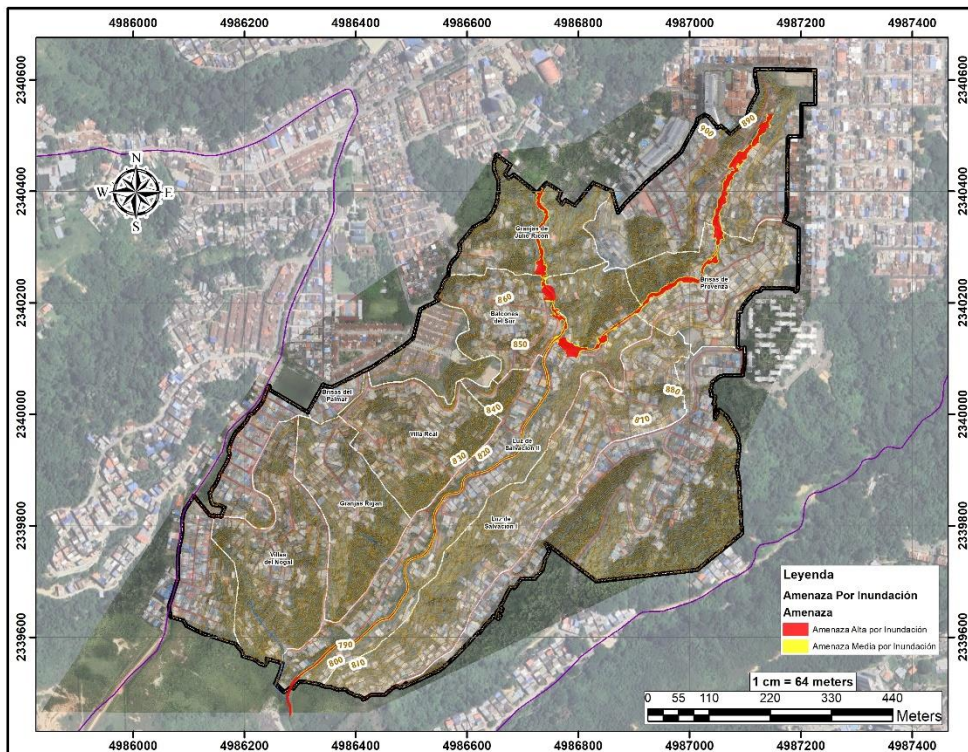
Drenaje	Valores del Corf. Rugosidad para Ecuación de Cowan						Mannin's n Values		
	m	i	v	o	ve	m	OB	Chan nel	OB
Quebrada Chiquita 1	.024	.005	.005	.012	.017		.068	.063	.068
Quebrada Chiquita 2	.024	.005	.005	.012	.017		.068	.063	.068
Unión quebrada Chiquita	A	A	A	A	A	A	.013	.013	.013

Nota. JM Construcciones y consultoría S.A.S

Una vez definida la geometría del drenaje con sus características principales y los caudales de diseño determinados, y de acuerdo con las características hidráulicas de los drenajes modelados se procede a realizar el análisis de flujo de forma mixta, para determinar las condiciones de la dinámica de la morfología fluvial e identificar áreas afectadas por flujos tanto subcrítico como supercríticos.

Los terrenos afectados por amenazas de inundaciones graves, aunque pueden ser objeto de mitigación, no pueden ser estabilizados completamente. Estos terrenos no deben ser utilizados para la construcción de obras, ya que presentan un alto riesgo para la vida y los bienes de la comunidad, y su recuperación es muy compleja o excesivamente costosa. Por ello, deben ser destinados a zonas verdes, reforestación o a tratamientos especiales. Existe el riesgo de que algunas áreas del proyecto sean inundadas durante la creciente básica (con un periodo de retorno de 100 años).

Figura 29. Categorización de la amenaza por inundación

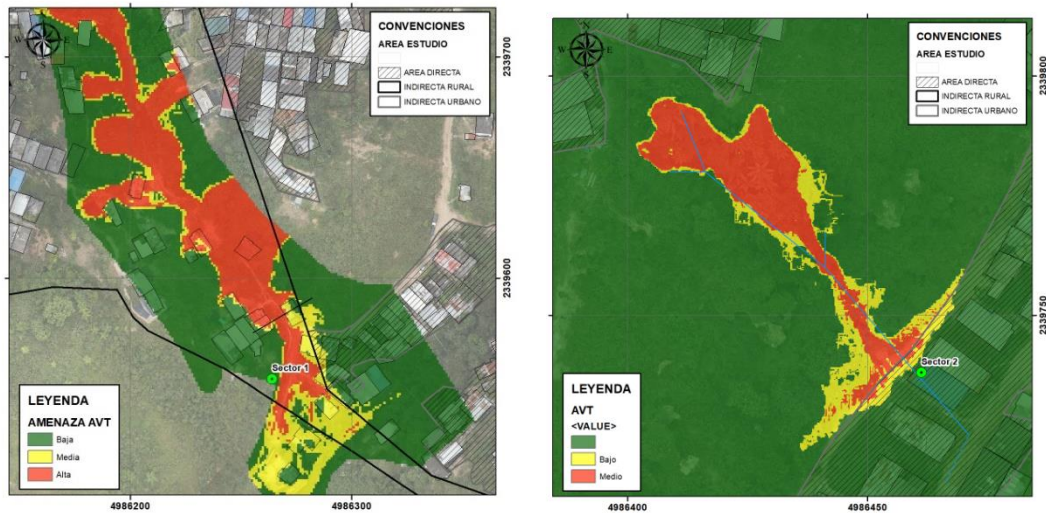


*Nota.* Resultados de la modelación de amenaza por inundación en el desarrollo del contrato por parte de JM Construcción y Consultoría (2022).

## 7.2. Avenidas torrenciales

Una vez analizados los resultados a la luz de la matriz de integración propuesta para la caracterización general de los dos puntos de interés se obtuvo el siguiente resultado.

Figura 30. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales de los sectores estudiados.



Nota. Resultados de la modelación de amenaza por avenidas torrenciales en el desarrollo del contrato por parte de JM Construcción y Consultoría (2022)

El análisis de frecuencia de ocurrencia está precedido por la construcción de las curvas de amenaza de cada punto del espacio, las curvas de amenaza relacionan la probabilidad de excedencia de una avenida torrencial particular, que puede expresarse en términos de su recurrencia esperada (periodo de retorno), con la variable usada para caracterizar la intensidad del evento (que corresponde al índice de intensidad de flujo, definido como

Ecuación 1

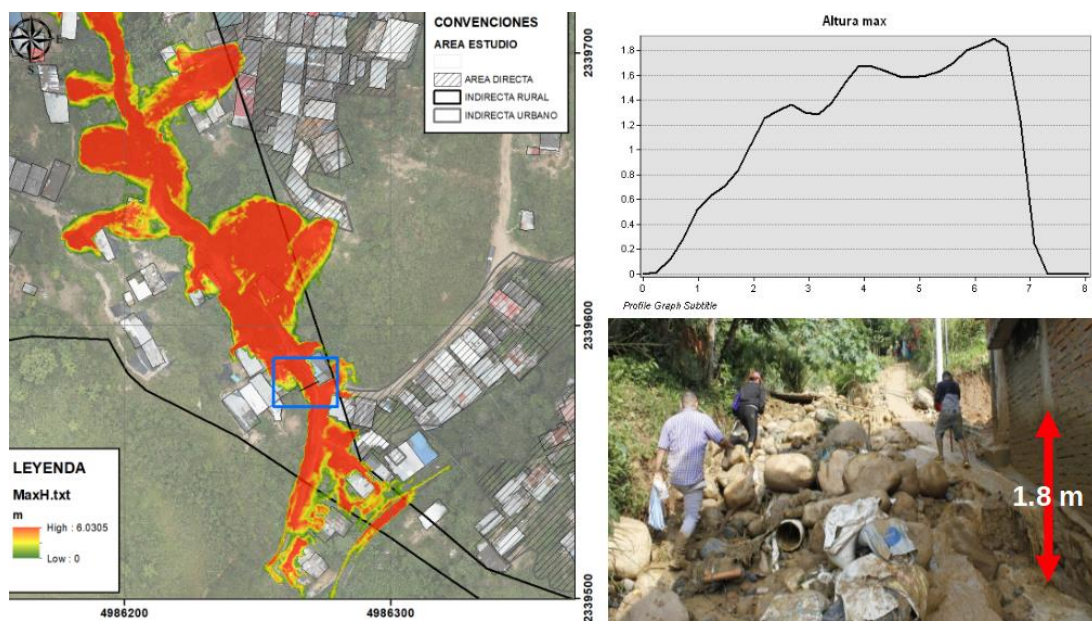
$$I_{DF} = h_{max} \|\vec{u}\|_{max}^2$$

### **Validación de modelo de amenaza**

Como método de verificación, se realizó una comparativa entre los resultados obtenidos de la profundidad de sedimentos en sectores donde se dispone de registro fotográfico del evento ocurrido el 18 de febrero de 2022. En la siguiente figura se presenta el comparativo realizado en el sector 1, donde se ubicó un punto junto a una de las viviendas situadas en el camino hacia la parte alta del asentamiento Luz de Salvación. Se cuenta con una fotografía tomada al día siguiente del evento (19 de febrero de 2022), en la

que se observa que la lámina de agua y sedimento alcanzó la huella en la pared al costado derecho de la foto, con una altura aproximada de 1.8 m. Al compararlo con el perfil de altura de la lámina de agua modelada, que se ubica en el mapa a la izquierda de la figura, se evidencia un valor de altura variable entre 1.5 m y 1.8 m, lo que muestra una buena aproximación al evento.

Figura 31. Validación del modelamiento realizado para el sector 1.



*Nota.* Resultados de la modelación de amenaza por avenidas torrenciales en el desarrollo del contrato por parte de JM Construcción y Consultoría (2022).

### 7.3. Socialización de resultados

Se llevó a cabo la socialización de inicio, avance y resultados en cada uno de los asentamientos estudiados (Luz de Salvación I y II, Brisas de Provenza, Balcones del Sur, Brisas del Palmar, Granjas Reagan, Villas del Nogal, Villa Real y Granjas de Julio Rincón). Las reuniones se realizaron de manera presencial y conjunta, con la participación de los líderes barriales correspondientes, en jornadas organizadas de forma colaborativa. Durante estas socializaciones, la consultoría presentó los avances alcanzados hasta ese momento, destacando la finalización de las actividades de la fase de campo y el comienzo de la fase de oficina. Entre las actividades terminadas se incluyeron las campañas de exploración

geotécnica, geológica, ambiental (coberturas vegetales), vulnerabilidad física, caracterización social-jurídica y topografía. A continuación, se muestra el registro fotográfico recopilado durante las jornadas de socialización realizadas en cada uno de los asentamientos mencionados al inicio de este capítulo.

Fotografía 4. Registro de socializaciones a la comunidad



*Nota.* Registro fotográfico de las socializaciones de resultados en el desarrollo del contrato por parte de JM Construcción y Consultoría (2022).

## **8. Aplicación de análisis en planes de políticas públicas**

De acuerdo a los resultados obtenidos, para generar una aplicación social de caracterización de las comunidades ubicadas en zonas de alta amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales dentro de un plan de política pública y en los planes de mitigación, es fundamental iniciar con un diagnóstico participativo que recoja información socioeconómica, cultural y organizativa de la población afectada. Este análisis debe identificar aspectos como los niveles de vulnerabilidad, capacidades de respuesta, redes de apoyo comunitario, formas de ocupación del territorio, y percepción del riesgo. Con estos insumos, considerando la caracterización de cada una de las áreas se puede diseñar una política pública que reconozca las particularidades del territorio y sus habitantes, permitiendo la formulación de estrategias de mitigación contextualizadas, como la reubicación concertada, el fortalecimiento de capacidades locales para la gestión del riesgo, y el desarrollo de infraestructuras resilientes, garantizando así una respuesta equitativa, efectiva y sostenible frente a los desastres naturales.

Así mismo, este análisis permite identificar no solo las condiciones de vulnerabilidad y exclusión social, sino también las capacidades, conocimientos locales y redes comunitarias que pueden ser potenciadas en la gestión del riesgo. Su implementación promueve una planificación basada en la equidad, la participación ciudadana y la adaptación territorial. Además, contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el clima), al fomentar comunidades resilientes y preparadas frente a los desastres. Asimismo, la implementación de este tipo de enfoques sociales se alinea con las prioridades del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, que destaca la importancia de comprender el riesgo en todas sus dimensiones, fortalecer la gobernanza y aumentar la inversión en medidas de prevención y reducción del riesgo. En conjunto, este enfoque permite avanzar hacia una gestión del riesgo centrada en las personas, con una visión integral del territorio y del desarrollo.

## 9. Análisis de resultados

La incorporación de criterios multidisciplinarios en la zonificación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales llevada a cabo en el desarrollo del contrato permitió integrar aspectos hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, urbanísticos y sociales para una evaluación más precisa y efectiva. Desde el punto de vista hidrológico, se analizaron las cuencas hidrográficas de los dos puntos identificados de aporte y se modelaron caudales máximos con base en datos históricos de precipitaciones, mientras que el análisis e integración de los criterios hidráulicos permitieron modelar la dinámica del flujo en ríos y sistemas de drenaje, identificando zonas críticas con base en la altura y velocidad del agua. En el ámbito geotécnico, se realizó la evaluación de los parámetros geomecánicos del suelo a través de ensayos directos e indirectos generando indicadores del comportamiento de este ante diferentes eventos de sismicidad y saturación, lo que permitió identificar áreas con susceptibilidad a la inestabilidad geotécnica. Además, se consideraron aspectos urbanísticos al analizar la densidad poblacional y el uso del suelo, generando análisis de los factores de uso del suelo y finalmente, la integración de perspectivas sociales incluyó consultas participativas con las comunidades afectadas para la identificación de las consideraciones sociales particulares dentro del desarrollo urbanístico. Esta sinergia interdisciplinaria ha resultado en mapas de amenaza más precisos y contextualizados, mejorando la capacidad de respuesta y planificación ante eventos extremos, generando la identificación de zonas de amenaza por avenida torrencial y las viviendas afectadas por este evento, y lo mismo considerando los eventos de inundación sobre la parte alta de la cuenca de la Quebrada la Chiquita.

Por otra parte, el análisis mediante la integración de modelos hidrológicos, sistemas de información geográfica (SIG) y la aplicación de fichas de vulnerabilidad social y estructural realizada a las viviendas del área de estudio, permitió abordar de manera integral la identificación de la vulnerabilidad y la delimitación de zonas de amenaza. Los modelos hidrológicos se emplearon para simular el comportamiento de las cuencas

hidrográficas y los sistemas de drenaje en distintos escenarios, lo que facilitó la estimación de caudales máximos y la evaluación de periodos de retorno. A través de los SIG, se logró procesar y representar espacialmente información clave, como mapas topográficos, usos del suelo y resultados de cada uno de los escenarios de modelación y análisis, así como cada una de las variables analizadas como la morfometría de la cuenca, lo que permitió delimitar con precisión las áreas de amenaza.

Además, se implementaron fichas de evaluación para recopilar datos en campo sobre vulnerabilidades específicas, incluyendo condiciones socioeconómicas y vulnerabilidades estructurales de las viviendas del área. Este enfoque integrado no solo identificó las zonas con mayor nivel de amenaza, sino que también permitió evaluar la exposición y la susceptibilidad de los elementos presentes en el territorio. Al considerar las variables de amenaza junto con las características del entorno, se logró un análisis más preciso de los factores de riesgo, integrando aspectos como la geomorfología, el uso del suelo y la dinámica ambiental. Como resultado, se obtuvieron diagnósticos detallados que guiaron la priorización de medidas de mitigación y fortalecieron la planificación territorial orientada a la reducción del riesgo, asegurando estrategias adaptadas a las condiciones específicas de cada área. Considerando el análisis de amenaza por inundación, como resultado de las modelaciones, se determinó que, según las características geomorfológicas y morfométricas de la microcuenca de la quebrada Chiquita, el comportamiento de inundación en la parte alta es mínimo debido a la topografía, la forma del vaso hidráulico y del cauce, factores que contribuyen a mitigar el riesgo de desbordamiento en ciertas zonas. Además, se comprobó que el canal existente tiene capacidad suficiente para manejar los caudales asociados a periodos de retorno de 100 y 500 años.

El modelamiento hidráulico, realizado con el programa HEC-RAS, incorporó caudales calculados para periodos de retorno de 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años, permitiendo analizar el comportamiento de la lámina de agua en función de la topografía

obtenida en los estudios. Este análisis permitió identificar las áreas potencialmente afectadas y validar la capacidad hidráulica existente.

Así mismo, para el análisis de avenidas torrenciales, los resultados del estudio evidenciaron diferencias significativas en las características hidrológicas y geomorfológicas de los sectores analizados. El sector 1 presentó una mayor propensión a la torrencialidad debido a su curva hipsométrica de cuenca joven, su forma circular y una alta densidad de drenaje, lo que incrementa la posibilidad de concentraciones rápidas de flujo. En contraste, el sector 2 mostró una menor tendencia a la torrencialidad; sin embargo, su alta pendiente representa un factor determinante que justifica un estudio detallado. La integración de estas variables con las consideraciones del territorio permitió una evaluación más precisa del riesgo, facilitando la identificación de áreas prioritarias para la implementación de medidas de mitigación y gestión del riesgo.

Para mitigar los riesgos asociados a este evento, se recomendó la reubicación de los elementos expuestos en ambos sectores con el fin de prevenir daños y pérdidas humanas en futuros eventos. Sin embargo, esta medida debe ir acompañada de un proceso participativo con las comunidades afectadas, asegurando su inclusión en la toma de decisiones y considerando sus dinámicas socioeconómicas y culturales.

Además, se sugirió la canalización de los drenajes y la recolección adecuada de aguas negras en las construcciones contiguas al cauce, con el propósito de reducir la erosión y evitar el deterioro progresivo del suelo. Estas intervenciones se plantearon llevar a cabo con campañas de educación y sensibilización sobre el manejo adecuado del agua y la conservación del entorno, promoviendo la corresponsabilidad comunitaria en la gestión del riesgo.

En el sector 2, se propone la construcción de una obra de contención que permita desviar el material sedimentario y minimizar las afectaciones a las viviendas cercanas. Para garantizar su efectividad y sostenibilidad, es fundamental considerar el impacto social de

esta infraestructura, evaluando su aceptación por parte de la comunidad y su compatibilidad con las actividades económicas y cotidianas de la población local.

De esta manera, las estrategias de mitigación no solo buscan reducir la vulnerabilidad física del territorio, sino también fortalecer la resiliencia social, fomentando la apropiación de las medidas por parte de la comunidad y promoviendo un desarrollo territorial más seguro y sostenible.

## **10. Conclusiones**

La zonificación de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales, basada en un enfoque multidisciplinario, permitió integrar de manera efectiva criterios hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, urbanísticos y sociales, logrando una evaluación precisa y contextualizada. El análisis hidrológico y los modelos de sistemas de información geográfica fueron fundamentales para identificar áreas críticas mediante la simulación de caudales y la representación espacial de variables claves para la zonificación e identificación de áreas críticas. En términos hidráulicos, las modelaciones realizadas proporcionaron información detallada sobre el comportamiento del flujo en distintos escenarios de retorno, mientras que los estudios geotécnicos identificaron zonas con alta susceptibilidad a la inestabilidad del suelo.

Desde el enfoque urbanístico y social, se analizaron usos del suelo y se integraron perspectivas comunitarias, enriqueciendo el diagnóstico y la priorización de medidas. Los resultados confirmaron que la parte alta de la microcuenca de la quebrada Chiquita tiene un riesgo mínimo de inundación, mientras que los sectores analizados presentan vulnerabilidades diferenciadas. En el análisis de avenidas torrenciales se evidenciaron características torrenciales significativas en las áreas identificadas de análisis debido a consideraciones de manejo de aguas sanitarias y de esorrentía.

Este análisis multidisciplinario permitió desarrollar mapas de amenaza detallados, identificar vulnerabilidades críticas y proponer estrategias concretas para mitigar riesgos, optimizando la planificación territorial y la gestión del riesgo para la comuna 10 y 11 sobre los asentamientos priorizados.

## **11. Recomendaciones**

Se recomienda continuar con la implementación de un enfoque integral y multidisciplinario en la gestión de riesgos de inundación y avenidas torrenciales, dado que

este ha permitido una evaluación precisa de las amenazas y vulnerabilidades. Es fundamental reforzar la planificación de las viviendas expuestas a riesgos, para minimizar el impacto de futuros eventos extremos. Además, se recomienda la mejora y mantenimiento continuo del sistema de drenaje, garantizando que pueda manejar los caudales estimados para los periodos de retorno más altos. La implementación de una red de monitoreo hidrológico y geotécnico también resultará crucial para una respuesta temprana ante posibles desbordamientos o movimientos de tierra. Finalmente, es importante seguir involucrando a las comunidades en el proceso de planificación, asegurando que las estrategias de mitigación sean comprensibles y que se adapten a sus necesidades locales, fortaleciendo la resiliencia social frente a eventos extremos de este tipo de eventos.

## 12. Referencias bibliográficas

- AMB. (2015). *BUCARAMANGA*. Bucaramanga-Santander: Área Metropolitana de Bucaramanga.
- Aristizábal, E., Arango Carmona, M. I., & García López, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 245-258. doi:<https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
- Ávila, O. D. (2024). *Estudio de amenaza por inundación y avenida torrencial para identificar medidas de mitigación en la zona urbana de la ciudad de Mocoa*. Bogotá.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*.
- CONGRESO DE COLOMBIA. (24 de abril de 2012). LEY 1523 DE 2012.
- Guía Técnica para la interpretación y aplicación del análisis de amenazas y riesgos. (2009). *Incorporando La Gestión Del Riesgo De Desastres En La Planificación Y Gestión Territorial*.
- Iverson, R. M. (1997). The Physics of debris flow. *Reviews of geophysics*, 3(35), 245-296.
- Ministerio de Ambiente . (sf). Obtenido de ¿Qué es la Gestión del Riesgo de Desastres?: <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/gestion-del-riesgo-de-desastres/>
- Oto Mir, A. (2007). *Estudio experimental de Corrientes Detríticas (Debris Flow)*. Universidad Politecnica de Catalunya.
- Ramos Cañón, A. M. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Libros del Servicio Geológico Colombiano.

Sohn, Y. K. (1999). Debris flow and hyperconcentrated flood-flow deposits in an alluvial fan, northwestern part of the Cretaceous Yongdong Basin, Central Korea. *The Journal of Geology*, 107(1), 111-132.

Suarez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga: Geotecnología S.A.S. Obtenido de erosion.com.co

VanDine, D. F. (1996). Debris flow control structures for forest engineering. *Res. Br., BC Min. For., Victoria, BC, Work. Pap.*

### **13. Anexos**

Anexo 1. Informe ejecutivo