



**“ESTUDIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN PARA EL TRAMO DE LA QUEBRADA
MEDIANÍA COMPRENDIDO ENTRE LA CALLE 107B SUR CON CARRERA 9 ESTE Y LA
CALLE 111 SUR CON CARRERA 8 ESTE (VÍA AL LLANO), EN BOGOTÁ D.C.**

**LAURA ANGELA GONZÁLEZ ORTIZ
LUIS MIGUEL MESA CUERVO**

**TRABAJO DE GRADO
Para optar por el título de
Especialistas en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

**Asesor
CAMILO ANDRÉS ROJAS CRUZ**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
BOGOTÁ
2026**



TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	4
2.	INTRODUCCIÓN	5
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
4.	OBJETIVOS	6
4.1.	Objetivo general	6
4.2.	Objetivos específicos.....	6
5.	JUSTIFICACIÓN	6
6.	GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO	7
6.1.	Localización	7
6.2.	Características generales de cuenca.....	8
6.3.	Problemática Actual.....	9
7.	MARCO CONCEPTUAL.....	11
7.1.	Hidrograma Sintético	12
7.1.1.	Método del Soil Conservation Service (SCS) para el cálculo de las abstracciones y la precipitación efectiva.....	12
7.1.2.	Transformación lluvia escurrentía – Hidrograma Unitario del SCS.....	16
7.2.	Caracterización morfométrica de una cuenca.....	17
7.3.	Evaluación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inundación.....	21
7.3.1.	Evaluación de la Amenaza	21
7.3.2.	Evaluación de la Vulnerabilidad Física	23
7.3.3.	Evaluación del Riesgo	25
8.	METODOLOGIA.....	26
8.1.	Recopilación de información.....	26
8.1.1.	Curvas IDF	26
8.1.2.	Información Cartográfica y Topográfica	27
8.2.	Delimitación de la cuenca.....	27
8.3.	Morfométrica de la cuenca	28
8.4.	Cobertura del Suelo.....	28
8.5.	Análisis hidrológico.....	28
8.6.	Modelación hidráulica.....	30



8.7.	Evaluación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inundación	30
8.7.1.	Evaluación de la Amenaza	30
8.7.2.	Evaluación de la Vulnerabilidad Física	31
8.7.3.	Evaluación del Riesgo	31
9.	RESULTADOS	31
9.1.	Modelo Digital del Terreno.....	31
9.2.	Caracterización morfométrica de la cuenca	33
9.3.	Cobertura del suelo	34
9.4.	Caracterización hidrológica	36
9.4.1.	Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia	36
9.4.2.	Hietogramas de aguaceros puntuales	37
9.4.3.	Estimación del Número de Curva	41
9.4.4.	Modelo HEC-HMS	44
9.5.	Modelo Hidráulico.....	49
9.5.1.	Construcción del modelo	49
9.6.	Evaluación de la Amenaza por Inundación.....	61
9.6.1.	Zonificación general de amenaza	61
9.6.2.	Zonificación de amenaza a nivel de construcción	63
9.7.	Evaluación de la Vulnerabilidad Física por Inundación	66
9.8.	Evaluación del Riesgo por Inundación.....	70
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
11.	LIMITACIONES	77
12.	MEDIDAS DE MITIGACIÓN	79
13.	CONCLUSIONES.....	81
14.	RECOMENDACIONES	83
15.	BIBLIOGRAFIA	84
	ANEXOS.....	86



1. RESUMEN

En el presente trabajo se adelanta la evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación en el tramo de la quebrada Medianía comprendido entre la Calle 107B Sur con Carrera 9 Este y la Calle 111 Sur con Carrera 8 Este, en la localidad de Usme, Bogotá D.C. De acuerdo con las visitas de campo adelantadas se pudo evidenciar que este tramo de la quebrada presenta un crecimiento urbano desordenado, alta impermeabilización del suelo, construcciones en proximidades del cauce y según reportes de la comunidad se han presentado eventos de inundación, especialmente a la altura de la Vía al Llano (Carrera 8 Este).

Como punto de partida, se realizó un vuelo fotogramétrico con dron para construir el Modelo Digital del Terreno (MDT), se adelantó la caracterización morfométrica de la cuenca y la definición de las coberturas del suelo. Ante la falta de datos pluviométricos suficientes, se emplearon las curvas IDF definidas por INGETEC (2015) para la EAAB-ESP; a partir de las cuales se obtuvo el hietograma para un periodo de retorno de 100 años. Con esta información, se desarrolló la modelación hidrológica de la cuenca en el programa HEC-HMS v4.12, aplicando el método del SCS para el cálculo de abstracciones y de la precipitación efectiva, y el hidrograma unitario del SCS para la transformación de la lluvia en escurrimiento. Posteriormente, se adelantó la modelación hidráulica bidimensional en el programa HEC-RAS v6.6, obteniendo profundidades y velocidades de flujo.

A partir de estos resultados, se aplicó la metodología propuesta por IDIGER (2023), para evaluar la amenaza, vulnerabilidad física y riesgo por inundación a nivel de construcción. Los resultados evidencian zonas con calificación de riesgo medio y alto, asociadas a su proximidad a la zona inundable y a las características desfavorables de la construcción. Finalmente, se proponen medidas conceptuales para la mitigación del riesgo por inundación en la cuenca estudiada.



2. INTRODUCCIÓN

En muchas ciudades de Colombia el riesgo por inundación tiene su origen en la expansión urbana desorganizada, porque las intervenciones antrópicas cambian completamente el ciclo hidrológico de un territorio. La construcción de asentamientos humanos deforesta cuencas y reemplaza las coberturas vegetales por materiales impermeables, con esto disminuye la tasa de infiltración en el suelo, pero aumentan los caudales de escorrentía directa que finalmente llegan a los cuerpos de agua (ríos y quebradas).

Este es el caso de la quebrada Medianía, ubicada al sur de Bogotá, donde la construcción de los barrios El Refugio I, Puerta al Llano, y Portal del Divino modificó las condiciones de la cuenca, además de que algunas viviendas fueron construidas dentro de la ronda hídrica e incluso muy cerca del cauce. Esto ha generado eventos de inundación que, según lo reportado por la comunidad, afectan especialmente las viviendas localizadas en las zonas bajas planas donde se acumula el agua.

En este contexto, en el presente trabajo se adelanta la evaluación de las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones de tipo fluvial, en el tramo de la quebrada Medianía comprendido entre la Calle 107B Sur con Carrera 9 Este y la Calle 111 Sur con Carrera 8 Este (Vía al Llano), donde se ubican los mencionados barrios. Para tal fin, se desarrolla la modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca mediante el uso de los programas HEC-HMS v4.12 y HEC-RAS v6.6, y todos los insumos requeridos para ello, como el Modelo Digital del Terreno, la caracterización morfométrica de la cuenca y las coberturas del suelo.

A partir de los resultados de la modelación hidráulica y aplicando la metodología definida por IDIGER (2023), se adelanta la evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones de tipo fluvial, generando la cartografía correspondiente y planteando las medidas conceptuales para la mitigación del riesgo en la zona de estudio.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La quebrada Medianía se encuentra ubicada en el sur de Bogotá, en la localidad de Usme. El tramo a estudiar está delimitado entre la Calle 107B Sur con Carrera 9 Este y la Calle 111 Sur con Carrera 8 Este (Vía al Llano), donde se ubican los barrios El Refugio I, Puerta al Llano y El Portal del Divino.

Estos barrios son producto del crecimiento urbano desordenado que ha tenido consecuencias directas sobre la estabilidad ambiental de la quebrada Medianía. Entre los impactos más evidentes, se destacan la deforestación de la cuenca alta y el aumento de coberturas impermeables, lo que disminuye la capacidad de infiltración del suelo e incrementa la escorrentía superficial durante eventos de lluvia, generando aumentos en los caudales que circulan por la quebrada. Como resultado de estas condiciones, la comunidad ha reportado inundaciones en las zonas bajas de los barrios Portal del Divino y Puerta al Llano.

Un factor adicional que agrava esta problemática es la construcción de viviendas directamente en la ronda hídrica de la quebrada y en inmediaciones del cauce, lo que incrementa la exposición de la población a eventos de inundación y eleva las condiciones de riesgo en la zona.



Otra problemática corresponde a la falta de pavimento en las vías de los barrios cercanos a la quebrada. La mayor parte de estas se encuentran en afirmado o tierra, lo que sumado a las altas pendientes del terreno, genera erosión y arrastre de sedimentos durante eventos de lluvia, incluso con reportes de pérdida de banca en algunos sectores, condiciones que pueden favorecer el aporte de sedimentos y materiales sólidos hacia el cauce.

Al respecto, es importante mencionar que el alcance del presente trabajo corresponde a la evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación fluvial de tipo desbordamiento. No se incluyen análisis de inundaciones con arrastre de sedimentos, crecientes súbitos o avenidas torrenciales, procesos de socavación ni movimientos en masa en las márgenes de la quebrada.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Desarrollar el estudio de riesgo por inundación para el tramo de la quebrada Medianía comprendido entre la Calle 107B Sur con Carrera 9 Este y la Calle 111 Sur con Carrera 8 Este (Vía al Llano).

4.2. Objetivos específicos

- Realizar los análisis hidrológicos e hidráulicos del tramo de estudio para identificar caudales, velocidades y alturas de la lámina de agua.
- Definir la zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación en el área de interés.
- Proponer medidas conceptuales para la reducción del riesgo por inundación.

5. JUSTIFICACIÓN

Históricamente se han presentado procesos de urbanización en la periferia de Bogotá. Algunos de estos asentamientos se construyen cerca de cuerpos de agua, sin importar la afectación al medio ambiente y sin evaluar posibles escenarios de riesgo, (Castillo García & Carvajal González, 2023). Un ejemplo de esta problemática se presenta en un sector de la quebrada Medianía, ubicado entre la Calle 107B Sur con Carrera 9 Este y la Calle 111 Sur con Carrera 8 Este (Vía al Llano), donde se ubican los barrios El Refugio I, Puerta al Llano y El Portal del Divino de la localidad de Usme.

Estos Barrios fueron construidos muy cerca de la quebrada, alterando de forma significativa las coberturas del suelo e invadiendo su ronda hídrica. En consecuencia, en épocas de lluvia se incrementan los caudales que llegan a la quebrada, lo que favorece la ocurrencia de eventos de inundación en las zonas bajas y aumenta las condiciones de riesgo de las comunidades que se encuentran en este sector.

Son pocos los cuerpos de agua que en Bogotá tienen estudios de amenaza por inundación y la quebrada Medianía actualmente no cuenta este tipo de estudios. Es por ello que se propone un



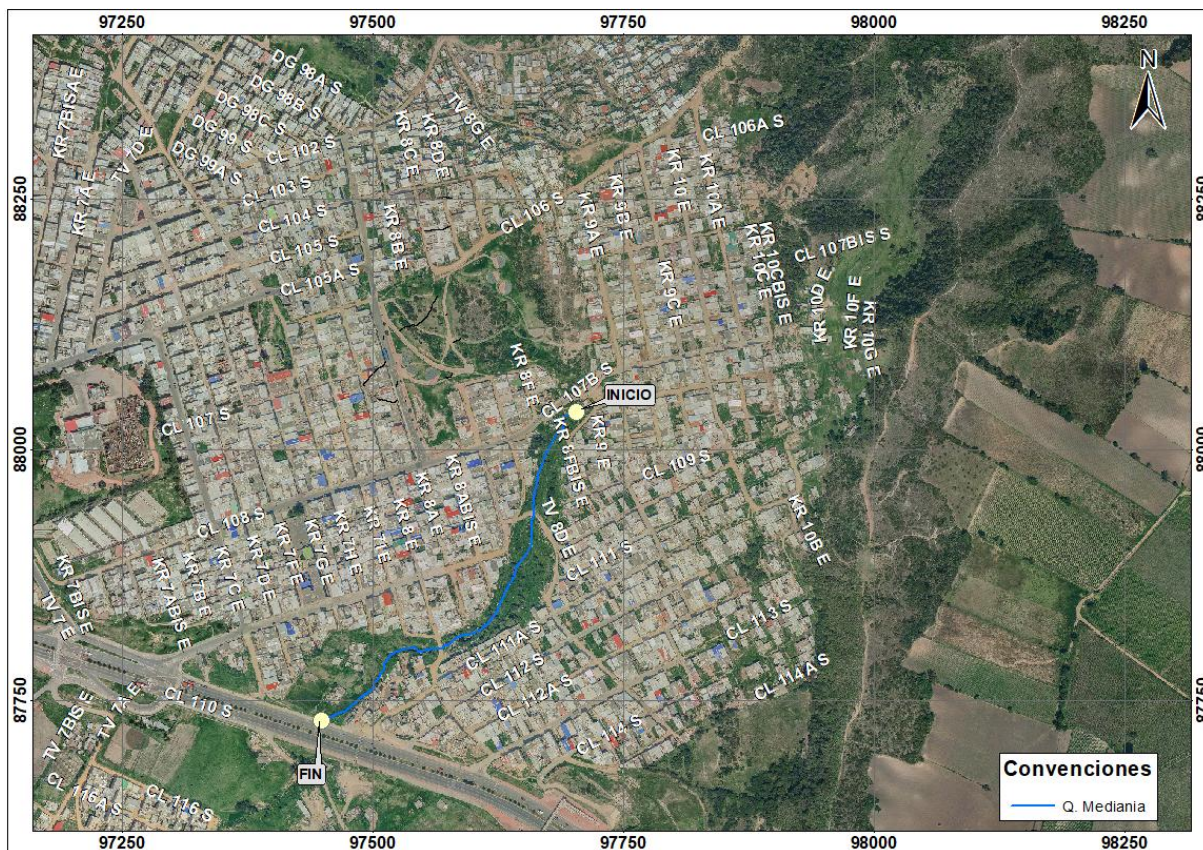
trabajo que permita zonificar las áreas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, y plantear medidas conceptuales de mitigación que contribuyan a la reducción de los impactos de futuras inundaciones. Este trabajo puede servir como herramienta de planificación para que entidades como la Alcaldía Local de Usme puedan plantear estrategias y realizar controles en las zonas susceptibles a inundación

6. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

6.1. Localización

El área de estudio de la Quebrada Medianía se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá D.C., en la Localidad (05) Usme, en las Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ) número 59 y 61 denominadas Alfonso López y Ciudad Usme. la ubicación geográfica de su drenaje principal está delimitado entre la Calle 107B Sur con Carrera 9 Este y la Calle 111 Sur con Carrera 8 Este (Vía al Llano), donde se ubican los barrios El Refugio I, Puerta al Llano y El Portal del Divino. La quebrada presenta una longitud aproximada de 0.456 Kilómetros desde su nacimiento, es afluente de la Quebrada Fucha y pertenece a la Subcuenca del Río Tunjuelo.

Figura 1. Localización del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.



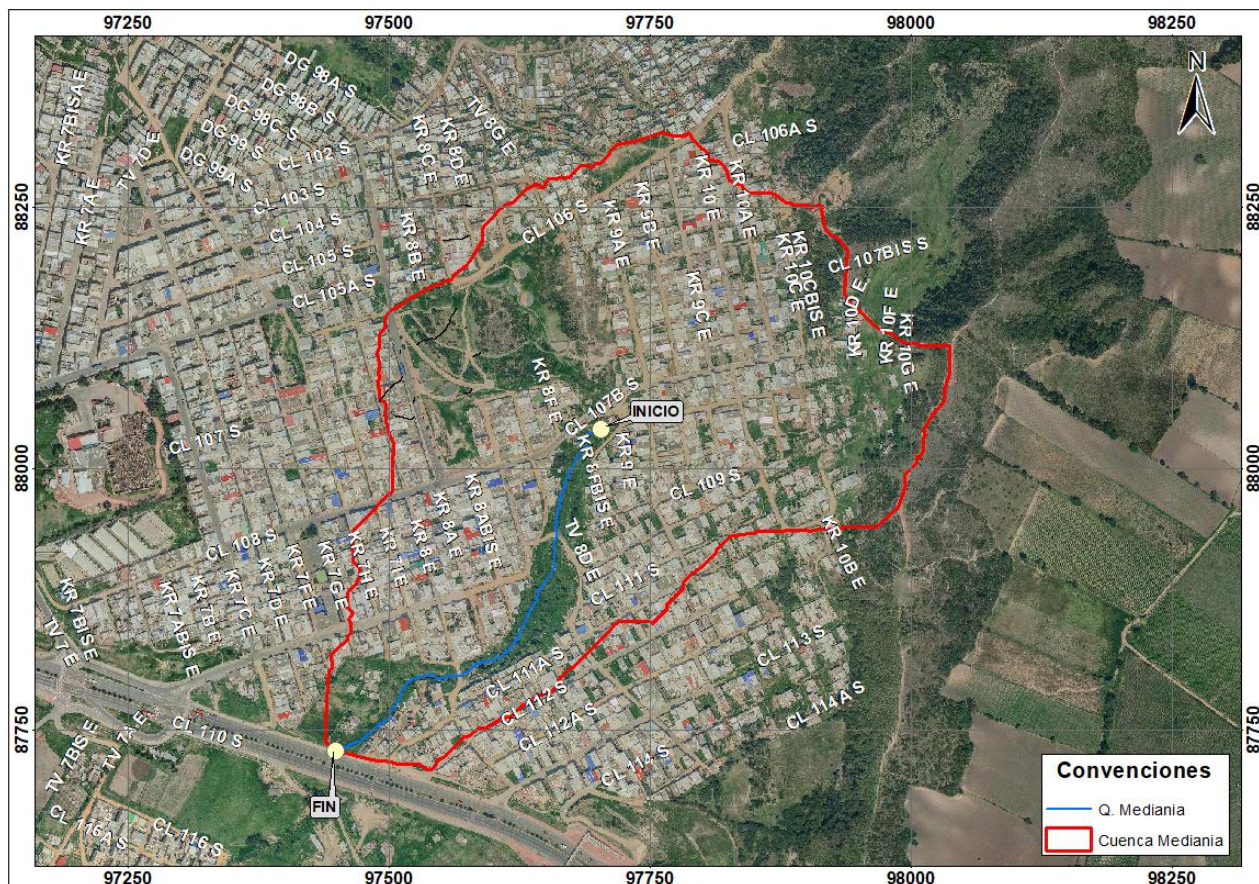
Como se observa en la Figura 1, el área de estudio presenta un alto grado de intervención antrópica, de manera que la mayor parte del área está impermeabilizada debido a la construcción de vías y viviendas. Solamente en las zonas más cercanas al cauce se encuentran coberturas de pastos y a algunos individuos arbóreos de bajo y mediano porte.

6.2. Características generales de cuenca

La delimitación de la cuenca se realizó a partir de un Modelo Digital de Terreno (MDT), generado mediante el procesamiento fotogramétrico de un vuelo con dron en el área de estudio, a partir de este insumo y mediante el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se determina que el área de la cuenca es de 0.21 km² (21.31 Ha) y su perímetro es de 2.07 km (ver Figura 2). La ubicación del centroide de la cuenca corresponde a las coordenadas X=97707.74 m., Y=88032.75 m y Z= 2949.86 m.

Dentro de su área, la cota máxima es de 3061.87 msnm y la mínima es de 2886.56 msnm, es decir que hay una diferencia de altitud de aproximadamente 175.31 m. Así mismo, se determina que la pendiente media es de 31.16 %, lo que evidencia, junto a su alto grado de impermeabilización, una alta capacidad de escorrentía ante eventos de alta precipitación.

Figura 2. Delimitación de la cuenca de la quebrada Medianía en su tramo de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

6.3. Problemática Actual

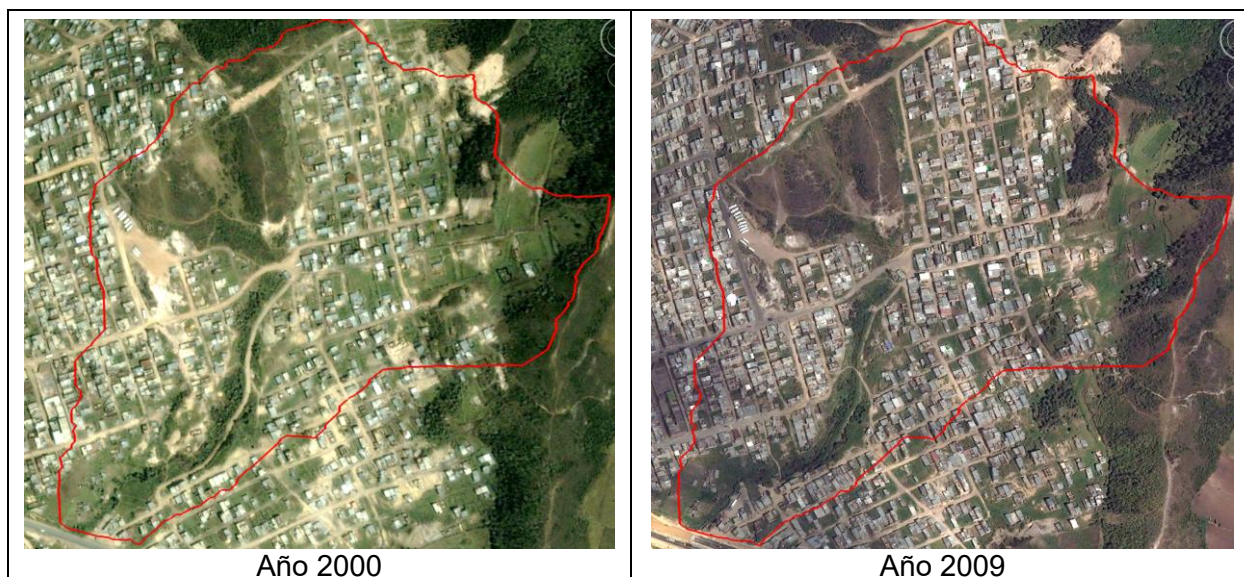
La cuenca en estudio presenta una problemática asociada principalmente a los procesos de urbanización descontrolada, en su mayoría sin una planificación adecuada, lo que ha conllevado a un cambio en su cobertura, pasando de áreas permeables a impermeables. Dicha impermeabilidad es predominante en la cuenca y se estima que corresponde a un 72.48 % de su área total, como se evidencia en la Figura 2.

Ahora bien, teniendo en cuenta esta predominancia de coberturas impermeables, y de acuerdo con el análisis realizado a partir del Modelo Digital de Terreno, donde se estimó una pendiente media de 31.16 %, estas condiciones favorecen un aumento de la escorrentía superficial y una disminución en la infiltración.

De acuerdo con lo anterior, y según lo manifestado por la comunidad, durante eventos de precipitación en temporada de lluvias se incrementa la acumulación de agua en las zonas bajas de la cuenca, especialmente en proximidades de la Vía al Llano, generando emergencias por inundación en las construcciones cercanas, particularmente en los barrios Portal del Divino y Puerta al Llano.

Adicionalmente, mediante un análisis multitemporal se evidencia un aumento en la construcción de nuevas viviendas en proximidades de la ronda hidráulica de la quebrada, lo cual incrementa la exposición de la población a eventos de inundación y agrava las condiciones de riesgo en el área de estudio (ver Tabla 1).

Tabla 1. Análisis multitemporal para la cuenca objeto de estudio.





Año 2010



Año 2013



Año 2015



Año 2019



Año 2020



Año 2026

Fuente: Elaboración propia.



Por otra parte, en el cauce y las márgenes de la quebrada se encuentran varios puntos donde se ha hecho disposición indebida de residuos sólidos, basuras y escombros de construcción, situación que puede contribuir a la reducción de la capacidad hidráulica de la quebrada (ver Fotografía 1 y Fotografía 2).

1/03/2024 12:42:40 p.m. 28°58,824' N - 74°6'10,53' W 310' NW 748 Calle 147c Sur Usme Bogotá Altitud: 2864.2m Velocidad: 7.7km/h Número de índice: 2296	1/03/2024 12:27:59 p.m. 29°9,696' N - 74°5'57,864' W 209' SW 930 Calle 111a Sur Usme Bogotá Altitud: 2928.5m Velocidad: 0.0km/h Número de índice: 2296
Fotografía 1. Vertimiento de escombros en las márgenes de la quebrada Medianía Fuente: Elaboración propia.	Fotografía 2. Vertimiento de basuras que obstruyen la sección entubado Tubo 2 Fuente: Elaboración propia.

Otra problemática corresponde a la presencia significativa de vías en afirmado, las cuales, debido a sus pendientes pronunciadas, favorecen la erosión y el arrastre de sedimentos hacia la quebrada, depositándose en el cauce y obstruyendo el flujo normal, lo que podría contribuir a la reducción de la capacidad hidráulica y a la generación de procesos de inestabilidad del suelo.

7. MARCO CONCEPTUAL

Durante una precipitación, no toda el agua se convierte en escorrentía superficial. Parte del agua permanece en el dosel vegetal, otra cae sobre el suelo e incluso puede acumularse en depresiones topográficas, como encharcamientos. Esta agua puede dirigirse hacia la atmósfera mediante evaporación o ser absorbida por las raíces de las plantas y posteriormente liberada mediante el proceso de transpiración vegetal. Asimismo, parte del agua precipitada logra infiltrarse hacia capas más profundas del suelo, proceso que depende principalmente de factores como la cobertura, la textura y la permeabilidad del suelo (Krest Engineers, 2021).

Finalmente, la fracción restante de la precipitación se convierte en escorrentía superficial y es conducida hacia los cuerpos de agua (ríos y quebradas), generando un incremento en su caudal.



7.1. Hidrograma Sintético

Un hidrograma sintético es una representación teórica de la variación del caudal de un cuerpo de agua en el tiempo, que no se obtiene a partir de mediciones directas debido a la ausencia de estaciones limnimétricas o limnigráficas. En su lugar, se construye mediante métodos conceptuales que utilizan las características morfométricas de la cuenca, la textura del suelo y su cobertura.

Uno de los métodos para la obtención de hidrogramas sintéticos es el propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés), que será empleado en el presente trabajo, dado que es apropiado para cuencas con áreas inferiores a 250 km².

7.1.1. Método del Soil Conservation Service (SCS) para el cálculo de las abstracciones y la precipitación efectiva

Como se indicó anteriormente, para un evento de precipitación con volumen total (P) y distribución temporal definida, una parte del volumen es retenido por la vegetación y las depresiones del terreno, constituyendo las abstracciones iniciales (I_a). Otra parte del volumen se infiltra en el suelo (F_a), por lo que solo una fracción de la precipitación total se transforma en escorrentía directa, definida como precipitación efectiva (P_e).

Para el SCS la precipitación efectiva se calcula con la Ecuación 1:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

P_e = Precipitación efectiva acumulada en un tiempo (t)

P = Profundidad de precipitación acumulada en el tiempo (t)

I_a = Abstracción inicial o pérdida inicial

S = Máximo potencial de retención del suelo

De acuerdo con (U.S. Army Corps of Engineers, s.f.), del análisis experimental en múltiples cuencas pequeñas se concluye que la abstracción inicial es función del máximo potencial de retención:

$$I_a = 0.20 S \quad \text{Ecuación 2}$$

La retención máxima y las características de la cuenca están relacionadas mediante el Número de Curva (CN), indicado en la Ecuación 3:



$$S = \frac{100 - 10CN}{CN} \quad (\text{Sistema inglés})$$

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (\text{Sistema internacional})$$

Ecuación 3

7.1.1.1 Número de Curva

El Número de Curva (CN) se determinó según lo establecido en la norma NS-085 de la EAAB-ESP, específicamente en el Cuadro 2, donde los valores dependen del uso, la cobertura y el grupo hidrológico del suelo. De esta forma, los valores adoptados corresponden a la Condición III (suelo saturado), considerando un escenario conservador para la estimación de la escorrentía y los caudales máximos en el área de estudio.

Tabla 2. Números de Curva según la Norma NS-085 de la EAAB-ESP.

Cuadro 2. Número de curva de escorrentía (CN) para grupos hidrológicos en cuencas condición III e $I_a = 0,20$ S							
Categoría	Uso del suelo y cobertura	Tratamiento del suelo	Condición para la infiltración	Grupo hidrológico del suelo			
				A	B	C	D
ÁREAS URBANAS	Residencial ¹						
	Tamaño promedio del lote		% promedio de impermeabilidad ²				
	0,05 ha o menor		65	89	94	96	97
	0,10 ha		38	61	75	93	95
	0,13 ha		30	75	72	92	94
	0,20 ha		25	73	70	91	94
	0,40 ha		20	70	68	91	93
	Parqueaderos pavimentados, techos, garajes, etc.			99	99	99	99
	Calles y carreteras:						
	Pavimentadas con sardineles y drenajes de aguas lluvias ³			99	99	99	99



Cuadro 2. Número de curva de escorrentía (CN) para grupos hidrológicos en cuencas condición III e la = 0,20 S							
Categoría	Uso del suelo y cobertura	Tratamiento del suelo	Condición para la infiltración	Grupo hidrológico del suelo			
				A	B	C	D
	Zanjas o diques pavimentados			93	96	97	98
	Zona cubierta de grava			89	94	96	97
	Zona cubierta de arenas o polvo (En tierra sin afirmar)			86	92	95	96
	Zonas comerciales y de negocios		85% de impermeabilidad	96	97	98	98
	Zonas Industriales		72% de impermeabilidad	92	95	97	98
	Espacios abiertos, prados, parques, campos de golf, cementerios, etc.						
	Buenas condiciones: cobertura de pasto en más del 75% del área			59	78	88	91
	Cobertura parcial: cobertura de pasto entre el 50% y 75% del área			69	84	91	93
	Cobertura pobre (cobertura de pastos < 50%)			84	91	94	96
	Barbecho	Hileras rectas	Mala	89	94	97	98

Cuadro 2. Número de curva de escorrentía (CN) para grupos hidrológicos en cuencas condición III e la = 0,20 S							
Categoría	Uso del suelo y cobertura	Tratamiento del suelo	Condición para la infiltración	Grupo hidrológico del suelo			
				A	B	C	D
ÁREAS NO URBANAS	Cultivo en hileras	Hileras rectas	Mala	86	92	95	97
		Hileras rectas	Buena	83	90	94	96
		Líneas de nivel	Mala	85	81	93	95
		Líneas de nivel	Buena	82	88	92	94
		Terrazas a nivel	Mala	82	88	91	92
		Terrazas a nivel	Buena	79	86	90	92
	Cereales	Hileras rectas	Mala	82	89	93	95
		Hileras rectas	Buena	80	88	93	95
		Líneas de nivel	Mala	80	88	92	94
		Líneas de nivel	Buena	78	87	92	93
		Terrazas a nivel	Mala	78	86	91	92
		Terrazas a nivel	Buena	77	85	90	92

Fuente: Cuadro 2. Norma NS-085, EAAB-ESP (2024).

Los tipos de suelo A, B, C y D son una clasificación hidrológica basada en el potencial de escorrentía del suelo, donde típicamente los suelos tipo A presentan el potencial de escorrentía más bajo y los suelos tipo D presentan el potencial de escorrentía más alto.

U.S. Department of Agriculture (2009), define los grupos de suelo de la siguiente forma:



- **Grupo A.** Suelos con altas tasas de infiltración incluso cuando están completamente saturados, compuestos principalmente por arenas y/o gravas profundas, bien drenadas a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen alta tasa de transmisión de agua y presentan un potencial de escorrentía bajo.
- **Grupo B.** Suelos con tasas de infiltración moderadas cuando están completamente saturados, con drenaje moderadamente bueno a bueno, y texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos presentan una tasa de transmisión de agua moderada.
- **Grupo C.** Suelos con tasas de infiltración lentas cuando están completamente saturados, compuestos principalmente por: (1) suelos con un horizonte que restringe el movimiento descendente del agua, o (2) suelos de textura moderadamente fina a fina con tasa de infiltración baja. Estos suelos presentan una tasa de transmisión de agua lenta.
- **Grupo D.** Suelos con tasas de infiltración muy lentas cuando están completamente saturados, compuestos principalmente por: (1) suelos arcillosos con alta capacidad o potencial de expansión, (2) suelos con nivel freático permanentemente elevado, (3) suelos con horizontes de arcilla compacta en superficie o cerca de ella, y (4) suelos someros sobre materiales casi impermeables. Estos suelos presentan una tasa de transmisión de agua muy lenta.

Para áreas de drenaje que incluyan subáreas con números de curva diferentes, el valor de CN representativo del área se calcula como el promedio ponderado con las respectivas áreas.

$$CN = \frac{\sum CN \cdot A}{\sum A} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

CN = Número de curva

A = Área de drenaje

7.1.2. Transformación lluvia escorrentía – Hidrograma Unitario del SCS

Para estimar la escorrentía generada a partir de la precipitación, se emplea el hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service. Este se define a partir de parámetros característicos de la cuenca, donde el caudal pico (Q_p) se estima en función del área de drenaje (A) y del tiempo al pico (T_p), como se muestra en la Ecuación 5:

$$Q_p = \frac{2.08A}{T_p} \quad \text{Ecuación 5}$$

A su vez, el tiempo al pico se determina como se muestra en la Ecuación 6:



$$T_p = \frac{tr}{2} + tp$$

Ecuación 6

Donde:

tr = Duración de la precipitación efectiva

tp = Tiempo de retardo

Cuando se conoce el tiempo de concentración (T_c), es posible determinar el tiempo de retardo, considerando que $tp = 0.6T_c$. Finalmente, la rama de recesión del hidrograma se extiende aproximadamente hasta $1.67 T_p$, lo que permite definir su forma temporal completa (ver Figura 3).

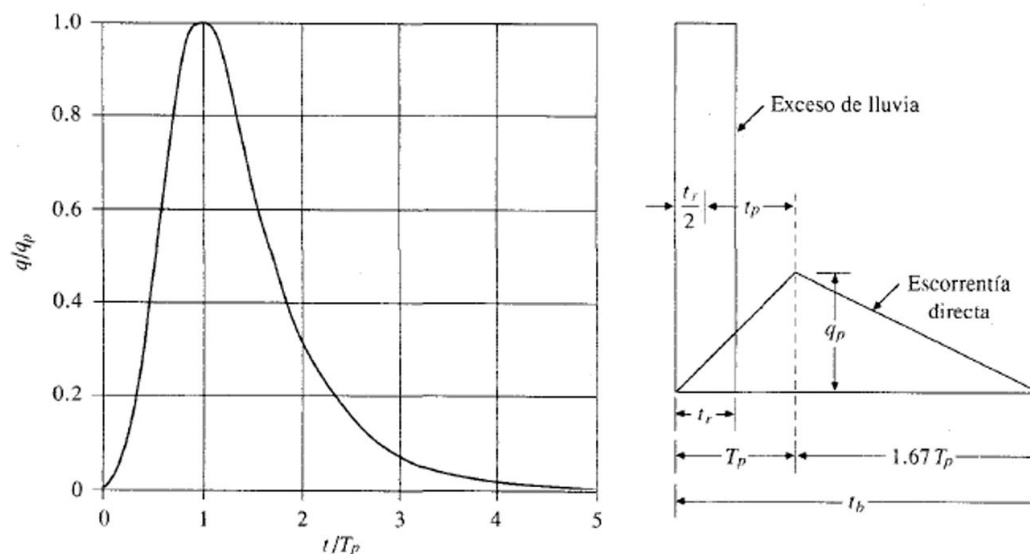


Figura 3. Derecha, Hidrograma unitario sintético SCS. Izquierda, Modelo simplificado de hidrograma triangular.

Fuente: Chow et al. (1994)

7.2. Caracterización morfométrica de una cuenca

La caracterización morfométrica es el análisis cuantitativo de las características geométricas y topográficas de una cuenca hidrográfica. A continuación, se presentan los principales parámetros morfométricos utilizados en el presente trabajo, conforme lo indicado por Monsalve Sáenz (2023):



Tabla 3. Parámetros morfométricos de una cuenca.

Parámetro	Definición	Ecuación	Observaciones
Área (A)	Área de drenaje de la cuenca en km ²	—	—
Perímetro (P)	Longitud del contorno de la cuenca en km	—	—
Longitud del cauce (L)	Distancia en planta del cauce principal entre un punto aguas abajo y su punto más alto, medida en km	—	—
Longitud axial (La)	Distancia en línea recta entre la desembocadura del cauce principal y el punto más alejado de la cuenca, expresada en km	—	—
Ancho medio (B)	Relación entre el área de drenaje (A) y la longitud de la cuenca (L)	$B = A/L$	—
Desnivel altitudinal (H)	Diferencia entre la cota máxima y mínima del cauce	$H = H_{max} - H_{min}$	—
Pendiente media de la cuenca (m _c)	—	—	Obtenida a partir del modelo digital de elevación (DEM) mediante herramientas de análisis espacial en ArcGIS

Parámetro	Definición	Ecuación	Observaciones
Pendiente del cauce principal (S)	Relación entre el desnivel longitudinal (H) y la longitud del cauce principal (L)	$S = H/L$	—
Pendiente media ponderada del cauce (S_m)	Relación entre la sumatoria de las pendientes de cada tramo del cauce principal y la longitud del cauce principal	—	—
Índice de alargamiento (I_a)	Relación entre la longitud máxima de la cuenca en el sentido del cauce principal y su ancho máximo	$L_a = L_{max} / A_{max}$	0.0 – 1.4 Poca alargada 1.5– 2.8 Moderadamente alargada 2.9 – 4.2 Muy alargada
Coefficiente de compacidad (K_c)	Relación entre el perímetro y el área de la cuenca	$K_c = 0.28 * \left(\frac{P}{A^{1/2}} \right)$	Cercano a 1 → forma circular
Factor de forma (K_f)	Relación entre el ancho medio (B) y la longitud axial de la cuenca (L_a) $A = \text{área de drenaje}$	$K_f = A / L_a^2$	> 0.22 Muy alargada 0.22 - 0.30 Alargada 0.300 - 0.37 Ligeramente alargada 0.37 - 0.450 Ni alargada ni ensanchada 0.45 - 0.60 Ligeramente Ensanchada 0.60 - 0.80 Ensanchada



Parámetro	Definición	Ecuación	Observaciones
			0.80 - 1.20 Muy Ensanchada > 1.200 Rodeando el Desagüe
Tiempo de concentración (T _c)	Tiempo que tarda el agua desde el punto más lejano en llegar a la salida	$T_c \text{ Kirpich} = 3.978 * L^{0.77} * S^{-0.385}$ T_c = Tiempo de concentración en horas L = Longitud del cauce principal en km S = Pendiente del cauce principal en m/m	
		$T_c \text{ Témez} = 0.30(L / S^{0.25})^{0.75}$ T_c = Tiempo de concentración en horas L = Longitud del cauce principal en km S = Pendiente del cauce principal en %	
		$T_c \text{ Giandioti} := \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{LS}}$ T_c = Tiempo de concentración en horas A = Área de la cuenca en km² L = Longitud del cauce principal en km S = Pendiente del cauce principal en m/m	
		$T_c \text{ V. T Chow} = 0.273(L / Sm^{0.5})^{0.64}$ T_c = Tiempo de concentración en horas L = Longitud del cauce principal en km Sm = Pendiente media ponderada del cauce en m/m	
		$T_c \text{ Cuerpo de ingenieros} = 0.28(L / Sm^{1/4})^{0.76}$ T_c = Tiempo de concentración en horas L = Longitud del cauce principal en km Sm = Pendiente media ponderada del cauce en m/m	
		$T_c \text{ Williams} = 0.683 \left(\frac{LA^{0.4}}{\sqrt{\frac{4A}{\pi}} S^{0.2}} \right)$	



Parámetro	Definición	Ecuación	Observaciones
		T_c = Tiempo de concentración en horas A = Área de la cuenca en km^2 L = Longitud del cauce principal en km S = Pendiente del cauce principal en %	
		T_c SCS Ranser = $0.947(L^3/H)^{0.385}$ T_c = Tiempo de concentración en horas L = Longitud del cauce principal en km H = Diferencia entre la cota máxima y mínima del cauce en m	
		T_c Ventura – Heras = $0.30(L/S^{0.25})^{0.75}$ T_c = Tiempo de concentración en horas L = Longitud del cauce principal en km S = Pendiente del cauce principal en %	

Fuente: Adaptado de Monsalve Sáenz (2023)

7.3. Evaluación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inundación

Para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad física y riesgo por inundación se adoptaron los criterios establecidos por IDIGER (2023), porque esta entidad define los lineamientos técnicos para la gestión del riesgo de desastres en Bogotá D.C. y los aplica en sus propios estudios y conceptos. Usar la misma metodología que emplea la autoridad distrital en la materia permite tener coherencia con el marco técnico vigente en el Distrito y hace que los resultados sean comparables.

7.3.1. Evaluación de la Amenaza

Para la evaluación de la amenaza por inundación, se aplican las metodologías recomendadas por IDIGER (2023) dentro del estudio “*Evaluación de riesgos por inundaciones y avenidas torrenciales de la cuenca de la quebrada Limas: zonificación de amenaza y riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales en Bogotá D.C.*”. Estas metodologías usan variables como la profundidad y la velocidad del flujo, para categorizar la amenaza frente a eventos de inundación fluvial de tipo desbordamiento.

En el presente trabajo de grado, se escogerá el criterio que mejor represente las condiciones del área de estudio.

- Categorización propuesta por García et al. (2003): está basada en la profundidad de flujo (H) y en la multiplicación de la profundidad por la velocidad ($H \cdot V$). Como resultado de esta categorización se tiene a siguiente Tabla:



Tabla 4. Categorización de amenaza propuesta por García et al. (2003) para inundaciones.

Categoría	H (m)	Condición	H*V (m ² /s)
Alta	> 1.5	o	>1.5
Media	0,5 – 1,5	o	0,5 – 1,5
Baja	0,5	y	0,5

Fuente: (García, y otros, 2003) citado por IDIGER (2023)

- Categorización de la intensidad de la amenaza según el Australian Institute for Disaster Resilience (2017):** la categorización de amenaza está basada en criterios de velocidad (V) y profundidad (H). La amenaza se clasifica en seis (6) categorías según el nivel de daño que puede generar en personas (niños, ancianos y personas en general), vehículos y edificaciones (Figura 4). Los límites entre cada zona han sido generados a través de estudios y experimentos en laboratorio (Smith et al., 2014).

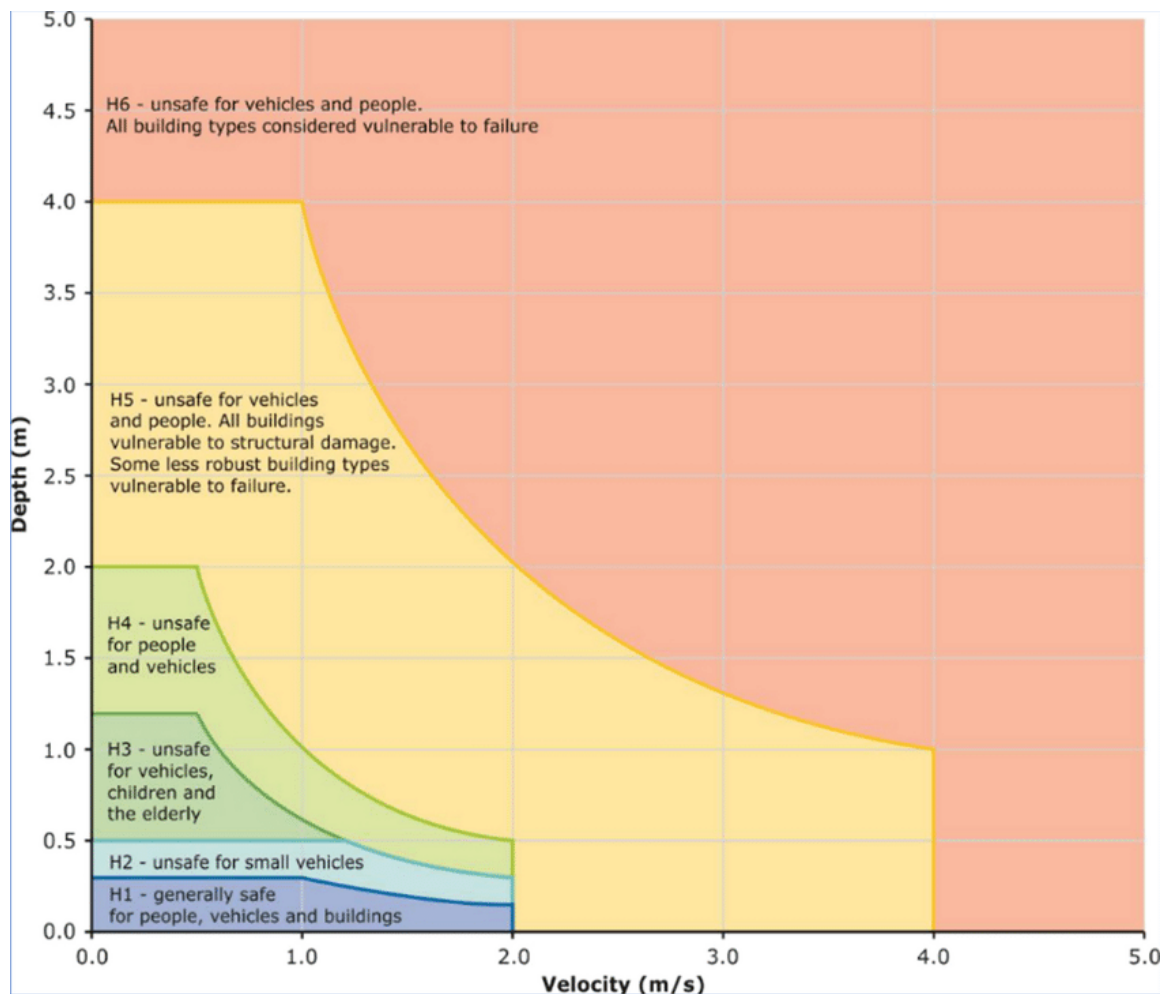


Figura 4. Categorización de la intensidad de la amenaza, curvas combinadas de riesgo de inundación. Fuente: (Smith et al., 2014) citado por IDIGER (2023)



A partir de los criterios de Australian Institute for Disaster Resilience (2017), IDIGER (2023) combina estas seis categorías para convertirlas en tres: Amenaza Alta, Amenaza Media y Amenaza Baja. El detalle de esta zonificación se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Zonificación a partir de las categorías del Australian Institute for Disaster Resilience (2017).

IDENTIFICACIÓN CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	ZONIFICACIÓN A	ZONIFICACIÓN B
H1	Generalmente seguro para gente, vehículos y edificaciones.	Baja	Baja
H2	Inseguro para vehículos pequeños.	Media	Baja
H3	Inseguro para vehículos, niños y ancianos.	Alta	Media
H4	Inseguro para la gente y para los vehículos		Alta
H5	Inseguro para vehículos y gente. Todos los edificios son vulnerables a daños estructurales y algunos tipos de edificaciones menos robustos son vulnerables a fallos estructurales.		
H6	Inseguro para vehículos y gente. Todos los tipos de edificaciones son vulnerables a fallos estructurales.		

Fuente: IDIGER (2023).

La Zonificación A es la más conservadora, puesto que incluye las zonas peligrosas para niños y ancianos (H3) dentro de la zonificación de amenaza alta; mientras que, la Zonificación B no incluye la categoría H3 en la zonificación de amenaza alta.

7.3.2. Evaluación de la Vulnerabilidad Física

De acuerdo con IDIGER (2023), la vulnerabilidad física es la relación que existe entre la exposición y la resistencia al fenómeno amenazante. Para el caso de la cuenca de estudio, la exposición es el grado en el que las edificaciones cercanas están sometidas a la acción de una eventual inundación y la resistencia es la capacidad de dichas edificaciones de soportar y amortiguar sus efectos.

IDIGER (2023) señala que la vulnerabilidad puede estimarse mediante un Indicador de Vulnerabilidad Física - IVF, que es una combinación lineal de las variables que pueden determinar la resistencia de una edificación ante inundaciones. Este autor concluye que el IVF está dado por la combinación de las variables sistema estructural, número de pisos y perímetro no colindante, (ver Tabla 6), aunque es posible adicionar otras variables a criterio del especialista.

Tabla 6. Variables consideradas para construir indicadores de vulnerabilidad física.

Variable	Objetivo	Valor
Número de pisos	Para una profundidad específica la tasa de daño de una construcción es generalmente más alta en una construcción de un piso que en una de dos o más (Reese & Ramsay, 2010) (Ettinger et al. 2016). Esta consideración es aplicable para cualquier tipo de flujo (inundaciones fluviales o flujos de detritos) debido a que en el caso de flujos de	1-7



Variable	Objetivo	Valor
	detritos generalmente entre más alta es la construcción, la posibilidad de daño debido a la entrada de material a través de las ventanas y puertas es menor (Godfrey et al. 2015).	
Sistema estructural	Según el tipo de estructura y material las construcciones muestran diferente respuesta a la presión dinámica causada por inundaciones, avenidas torrenciales y/o movimientos en masa (Godfrey et al. 2015).	0-1
Construcciones entre otras construcciones	Este criterio fue usado por (Godfrey et al. 2015) ya que construcciones que están adyacentes a otras tienen menos superficie de estructura expuesta al impacto directo del flujo y menos ventanas. Para medir este variable se propone utilizar el perímetro de la construcción no colindante con otra edificación.	metros

Fuente: IDIGER (2023).

De esta forma el IVF está dado por la Ecuación 7:

$$\text{Vulnerabilidad física (IVF)} = (A * 0.5) + (B * 0.25) + (C * 0.25)$$

Ecuación 7

Donde:

A = Corresponde al sistema estructural

B = Corresponde al número de pisos

C = Construcciones entre construcciones (porcentaje de perímetro libre)

El puntaje del sistema estructural se asigna en una escala de 0 (no relevante) a 1 (altamente vulnerable). En la Tabla 7 se muestran los sistemas estructurales, con puntajes basados en valores asignados en la literatura generados a través de juicio experto (IDIGER 2023, citando a Leal et al., 2021).

Tabla 7. Categorías de sistemas estructurales y puntaje asignado.

Categoría	Puntaje
Sin sistema estructural (SIN) o material de recuperación o madera	1
Adobe y bahareque	0.9
Mampostería simple, semiconfinada y prefabricada	0.6
Concreto*	0.3

Fuente: IDIGER (2023).

Con respecto al número de pisos, IDIGER (2023) recomienda utilizar los pesos propuestos por Leal et al. (2021) en donde para viviendas de un (1) piso se asigna el mayor puntaje, es decir 1,



para viviendas de dos (2) pisos 0.5 y para viviendas de tres (3) o más pisos 0.33. La asignación del puntaje obedece al razonamiento de que edificios de un (1) piso son afectados un 100% al estar expuestos a una inundación, edificios de dos (2) pisos generalmente son afectados en un 50% de su área en caso de que la inundación alcance una profundidad suficiente y edificios de tres (3) o más pisos se afectan en menor medida (Leal et al. 2021).

Por otra parte, para medir el criterio de construcciones entre construcciones, se debe calcular el porcentaje (%) del perímetro de las construcciones que no colinda con otra construcción. Entre más alto sea este porcentaje más expuesta está la vivienda al impacto directo del flujo. Una vez calculado el valor ponderado de IVF, se aplica la categorización de vulnerabilidad de la Tabla 8:

Tabla 8. Categorización de vulnerabilidad IVF a partir de los valores ponderados.

Nombre	Categoría	Valor Ponderado IVF
IVF alto	Alta	0,7 - 1
IVF Medio	Media	0,33 – 0,7
IVF Bajo	Baja	0 – 0,33

Fuente: IDIGER (2023).

7.3.3. Evaluación del Riesgo

IDIGER (2023) indica que la calificación de riesgo se puede hacer a partir de los criterios del García et al. (2003) o del Australian Institute for Disaster Resilience (2017), como se indica a continuación. Se debe evaluar cuál de las dos zonificaciones representa mejor el riesgo para las construcciones que se encuentran en el área de estudio:

Tabla 9. Matriz de categorización del riesgo aplicando criterios de García et al. (2003).

		vulnerabilidad		
amenaz	a	alta	media	baja
	baja			
	media			
	alta			

Fuente: (García, y otros, 2003) citado por IDIGER (2023)

Tabla 10. Matriz de categorización del riesgo por inundaciones según la Zonificación A de Amenaza.

		VULNERABILIDAD		
AMENAZA		ALTA	MEDIA	BAJA
	H1			
	H2			
	H3			
	H4			



		VULNERABILIDAD		
		ALTA	MEDIA	BAJA
	H5			
	H6			

Fuente: Australian Institute for Disaster Resilience (2017), citado por IDIGER (2023).

Tabla 11. Matriz de categorización del riesgo por inundaciones según la Zonificación B de Amenaza.

		VULNERABILIDAD		
		ALTA	MEDIA	BAJA
AMENAZA	h1			
	h2			
	h3			
	h4			
	h5			
	h6			

Fuente: Australian Institute for Disaster Resilience (2017), citado por IDIGER (2023).

8. METODOLOGIA

8.1. Recopilación de información

Para el desarrollo del presente trabajo fue necesario recopilar información de curvas IDF, topográfica y cartográfica. A continuación, se describen las fuentes consultadas y la información obtenida.

8.1.1. Curvas IDF

Se consultó el Sistema de Alerta de Bogotá - SAB¹ a cargo del IDIGER, encontrando que la estación climatológica Colegio Ciudad de Villavicencio (IED) se localiza aproximadamente a 300 m de la quebrada Medianía. Sin embargo, al revisar los registros se observó que la estación cuenta con cerca de cinco años de información, periodo que resulta insuficiente para desarrollar análisis de series de lluvias.

Por lo anterior, se consultó el estudio “Caracterización de tormentas y actualización de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF)”, elaborado por INGETEC S.A. (2015) para la EAAB-ESP. A partir de análisis hidrológicos y estadísticos, este estudio desarrolla una zonificación

¹ Sistema de Alerta de Bogotá SAB. <https://www.sab.gov.co/>



pluviográfica y un análisis espacial de tormentas para dividir el Distrito capital en zonas, a las que se les definen curvas IDF propias.

8.1.2. Información Cartográfica y Topográfica

Como insumo base se utilizó la información contenida en el Mapa de Referencia de la Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA), con el fin de proporcionar soporte espacial al área de estudio.

Como complemento a esta información, se realizaron visitas de campo para la inspección de la infraestructura presente en el cauce de la quebrada. Durante estos recorridos se recolectó información relacionada con el diámetro, material y cotas de las secciones entubadas existentes. Por otro lado, se efectuó la captura de puntos de fotocontrol mediante receptores GNSS, distribuidos estratégicamente, con el fin de garantizar una adecuada precisión geométrica en los productos generados, como el Modelo Digital del Terreno (MDT) y la ortofoto.

Posteriormente, se realizó un sobrevuelo con dron cubriendo el área de estudio, con el propósito de obtener información actualizada. A partir de estas capturas, se llevó a cabo el procesamiento fotogramétrico, incluyendo la orientación de las imágenes, la generación de una nube de puntos densa y su respectivo filtrado, con el fin de obtener un Modelo Digital del Terreno.

Finalmente, para contar con el área total de influencia de la cuenca, el modelo digital fue complementado con información secundaria de curvas de nivel provenientes de IDECA.

En conjunto, esta información cartográfica y topográfica sirvió como base para el desarrollo de los análisis morfométricos y la modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca.

8.2. Delimitación de la cuenca

El proceso de delimitación de la cuenca se realizó a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT), tal como se definió anteriormente, apoyado de geoprocesos hidrológicos en entorno SIG.

El trabajo inició con la eliminación de zonas vacías (fill) definidas como sumideros, con el fin de rellenar y contar con un modelo continuo, enseguida, se calculó la dirección del flujo (flow direction) y la acumulación del flujo (flow accumulation), con estos geoprocesos se logró identificar la red de drenaje presente en la zona y conocer el comportamiento del sistema de drenaje.

Con base en lo anterior, se definió el punto de salida establecido en la Calle 111 Sur con Carrera 8 Este (outlet) y posteriormente, utilizando la herramienta de delimitación (Watershed) se define el polígono correspondiente a la cuenca del tramo evaluado en el presente trabajo.

Finalmente, como proceso de validación y ajuste, se utilizaron visores 3D y curvas de nivel generadas, con el fin de garantizar la coherencia en la delimitación con las condiciones reales del terreno.



8.3. Morfométrica de la cuenca

La caracterización morfométrica de la cuenca se desarrolló utilizando geoprocesos hidrológicos permitiendo obtener los parámetros indicados en la Tabla 3 del numeral 7.2.

En el caso del parámetro tiempo de concentración (T_c), se aplicaron ocho ecuaciones definidas en la literatura técnica, para finalmente adoptar la mediana del conjunto de valores. A partir del T_c se determinó el tiempo de retardo (Lag Time), que equivale al 60% del T_c , parámetro que es requerido para la transformación lluvia-escurrimiento en el modelo hidrológico.

8.4. Cobertura del Suelo

Para la definición de la cobertura del suelo, se inició con información secundaria contenida en el mapa de referencia de IDECA, especialmente en las capas correspondientes a calzadas y construcciones, dicha información fue revisada e integrada en primera fase como base para el análisis.

Seguidamente, al finalizar el proceso de generación de la ortofoto con el Modelo Digital del terreno (MDT), se validó lo presente en la base cartográfica de IDECA y se complementó mediante la interpretación de las coberturas visibles, utilizando clasificación supervisada en entorno SIG. Este proceso permite contar con una mejor precisión en el proceso de generación de las diferentes coberturas en el área de estudio.

Posteriormente, al compilar dichas coberturas se realizó validación y agrupación con base en los criterios establecidos en la norma NS-085 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP).

Finalmente, las coberturas consolidadas fueron cuantificadas mediante el cálculo de áreas y porcentajes, de acuerdo con su clasificación en superficies permeables e impermeables, insumo base para el análisis hidrológico.

8.5. Análisis hidrológico

Como se mencionó en el numeral 8.1.1 se realizó una búsqueda inicial para identificar estaciones cercanas al sitio de estudio, encontrando la estación Colegio Ciudad de Villavicencio (IED). Sin embargo, la misma no cuenta con suficiente información, por lo que fue necesario adoptar las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) desarrolladas por INGETEC S.A. (2015) para la EAAB-ESP. Las intensidades de lluvia fueron estimadas mediante la ecuación general, cuyos parámetros de ajuste (c , e , f y m) se obtuvieron mediante las coordenadas del centroide de la cuenca, de acuerdo con la metodología planteada por INGETEC S.A. (2015).

Una vez obtenidas las curvas IDF, se construyeron las curvas de masa de precipitación con una duración de hasta 180 minutos con intervalo de 5 minutos. Para su desarrollo se consideraron periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años. A partir de estas curvas de masa se definieron los incrementos de lluvia para cada intervalo de tiempo, correspondientes a la diferencia entre las precipitaciones acumuladas.



Para la definición de la distribución temporal de la lluvia se empleó el método del bloque alterno, el cual genera una condición conservadora al ubicar los mayores incrementos de precipitación en el centro del evento. A partir de este proceso, se obtuvieron los hietogramas de diseño para los diferentes periodos de retorno utilizados como insumo en el desarrollo del modelo hidrológico.

Para la estimación del Número de curva (Curve Number – CN), se utilizaron como insumo la cobertura del suelo y el grupo hidrológico del suelo. Como anteriormente se mencionó la cobertura del suelo se obtuvo mediante análisis en SIG, mientras que el grupo hidrológico se definió a partir de la zonificación geotécnica de la microzonificación sísmica de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010), realizando asignación de los grupos de acuerdo con la composición del suelo.

Con dichos insumos, mediante geoprocesos en SIG se realizó la intersección espacial entre las capas de cobertura del suelo y los grupos hidrológicos, obteniendo así la distribución espacial del CN. Posteriormente, se realizó la ponderación de los valores de CN en función del área, obteniendo así el número de curva representativo de la cuenca.

Una vez desarrollados los procesos anteriores, se procedió a la construcción del modelo hidrológico mediante el software HEC-HMS versión 4.12, que permite simular la transformación de la precipitación en escorrentía.

Para la estimación de las pérdidas se empleó el método del Soil Conservation Service (SCS) y la transformación lluvia – escorrentía se generó mediante el método del Hidrograma Unitario del SCS.

La selección de este método responde a las características propias de la cuenca y a la información disponible. En primer lugar, el método SCS fue desarrollado para cuencas pequeñas, y Chow et al. (1994) lo consideran apropiado para áreas inferiores a 250 km², condición que se cumple debido a que la cuenca de la quebrada Medianía tiene un área de 0.21 km². En segundo lugar, la falta de registros hidrométricos en la cuenca imposibilita la aplicación de métodos estadísticos directos sobre series de caudales, lo que hace del método SCS una alternativa válida, que requiere únicamente información de precipitación y características del suelo y la cobertura vegetal para estimar la escorrentía directa mediante el parámetro del Número de Curva (CN).

Como condiciones de entrada al modelo hidrológico se utilizaron los hietogramas de diseño para cada uno de los diferentes periodos de retorno mencionados. Una vez incorporados los diversos parámetros al modelo, este permitió obtener los hidrogramas de respuesta de la cuenca, a partir de los cuales se determinaron los caudales pico asociados a cada periodo de retorno evaluado.

Finalmente, para la modelación hidráulica se seleccionó el hidrograma correspondiente al periodo de retorno de 100 años. Este periodo se eligió porque corresponde al escenario extremo utilizado en estudios de amenaza y riesgo por inundación para Bogotá D.C., de acuerdo con los lineamientos técnicos establecidos por la Secretaría Distrital de Ambiente, el IDIGER y la EAAB-ESP.



8.6. Modelación hidráulica

Se utilizó el programa HEC-RAS versión 6.6 para modelar de forma bidimensional el comportamiento del flujo en condiciones no permanentes (*unsteady flow*). Los insumos para la modelación son el Modelo Digital del Terreno, el hidrograma con periodo de retorno de 100 años y los coeficientes de Manning.

Para la modelación, se tuvieron en cuenta las secciones del cauce que se encuentran entubadas y la existencia de un box culvert en el punto de salida de la cuenca. Las secciones entubadas fueron incluidas en el modelo, definiendo el diámetro, las cotas de batea, la ubicación en la sección transversal y el coeficiente de Manning.

Posteriormente, se definieron las condiciones de frontera del modelo; para la condición aguas arriba se empleó el hidrograma con periodo de retorno de 100 años, mientras que para la condición aguas abajo se utilizó la curva de gasto (*Rating Curve*), obtenida de la modelación del box culvert en el programa HY-8.

Con respecto al coeficiente de rugosidad de Manning, los valores fueron definidos a partir de referencias técnicas ampliamente utilizadas en estudios hidráulicos, particularmente se consultaron los valores recomendados por CivilWeb Spreadsheets, (s.f.), EAAB-ESP (2024), U.S. Army Corps of Engineers, (s.f.), Suárez Díaz (2021) y TxDOT, (s.f.).

Para mejorar el nivel de detalle del estudio, a cada una de las coberturas identificadas espacialmente se le asignó un coeficiente de Manning según sus características particulares, con el fin de que la modelación hidráulica logre una representación más cercana a la realidad del comportamiento del flujo.

Con los insumos previamente definidos, se procede a hacer el mallado del modelo y a ajustar el paso de tiempo en el programa HEC-RAS, para posteriormente correr la simulación con el fin de obtener las profundidades y velocidades de flujo en el área de estudio de la quebrada Medianía.

8.7. Evaluación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inundación

Para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad física y riesgo por inundación se adoptaron los criterios establecidos por IDIGER (2023), dado que esta entidad define los lineamientos técnicos para la gestión del riesgo de desastres en Bogotá D.C. y los aplica en sus propios estudios y conceptos. El empleo de esta metodología que emplea la autoridad distrital en la materia permite tener coherencia con el marco técnico vigente en el Distrito y hace que los resultados sean comparables con otros estudios oficiales en la ciudad.

8.7.1. Evaluación de la Amenaza

De acuerdo con lo anterior y Como se indica en el numeral 7.3.1, para la evaluación de la amenaza se fundamentó en los criterios establecidos por la entidad distrital dentro del estudio por inundación de la quebrada Limas. Estas metodologías emplean relaciones entre las variables



de profundidad (D) y velocidad del flujo (V), o de su producto DV obtenidas de la modelación hidráulica para realizar la categorización de amenaza alta, media y baja.

A partir de lo anterior y mediante herramientas SIG, se hicieron operaciones con los ráster de profundidad y velocidad obtenidos de la modelación hidráulica, para definir la zonificación de amenaza en la zona de estudio.

8.7.2. Evaluación de la Vulnerabilidad Física

Para la evaluación de la vulnerabilidad física se dio continuidad a este marco metodológico el cual consiste en calcular un Índice de Vulnerabilidad Física – IVF para cada una de las edificaciones en las zonas de inundación, en función de las variables número de pisos, sistema estructural y perímetro expuesto, entendido como el perímetro no colindante con otras construcciones. Una vez calculado el IVF, se aplicó la categorización de vulnerabilidad, alta, media, baja, detallados en el numeral 7.3.2.

En este sentido, a partir de las fotografías aéreas y de la información disponible en el IDECA se realizó un inventario general de las edificaciones en la zona de inundación, identificando las variables de interés para el cálculo del IVF. Finalmente, se emplearon herramientas SIG para especializar la zonificación de vulnerabilidad.

8.7.3. Evaluación del Riesgo

Finalmente, Para la evaluación del riesgo se realizó bajo los mismos lineamientos institucionales, descrita en el numeral 7.3.3, donde se plantean matrices según la metodología empleada para la estimación de la amenaza. Estas matrices relacionan la amenaza y la vulnerabilidad para asignar una categorización de riesgo alto, medio o bajo. Por ejemplo, una condición de amenaza alta, asociada a vulnerabilidad alta o media, corresponde a un nivel de riesgo alto, mientras que, una condición de amenaza alta y vulnerabilidad baja corresponde a riesgo medio.

Finalmente, mediante herramientas SIG se realizó la zonificación de riesgo por inundación en la zona de estudio.

9. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de la metodología descrita en el numeral 8 y de los fundamentos conceptuales expuestos en el numeral 7, iniciando por el Modelo Digital del Terreno hasta llegar a la evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación.

9.1. Modelo Digital del Terreno

El principal insumo para la modelación hidrológica e hidráulica es un Modelo Digital de Terreno (MDT) que presente alto nivel de detalle y precisión, representando adecuadamente las condiciones topográficas del sector.

Como se mencionó anteriormente, el MDT fue generado a partir de información primaria obtenida mediante un sobrevuelo con dron, generando así todo el flujo de trabajo fotogramétrico para la consecución de un MDT adecuado. Este modelo fue complementado con información secundaria



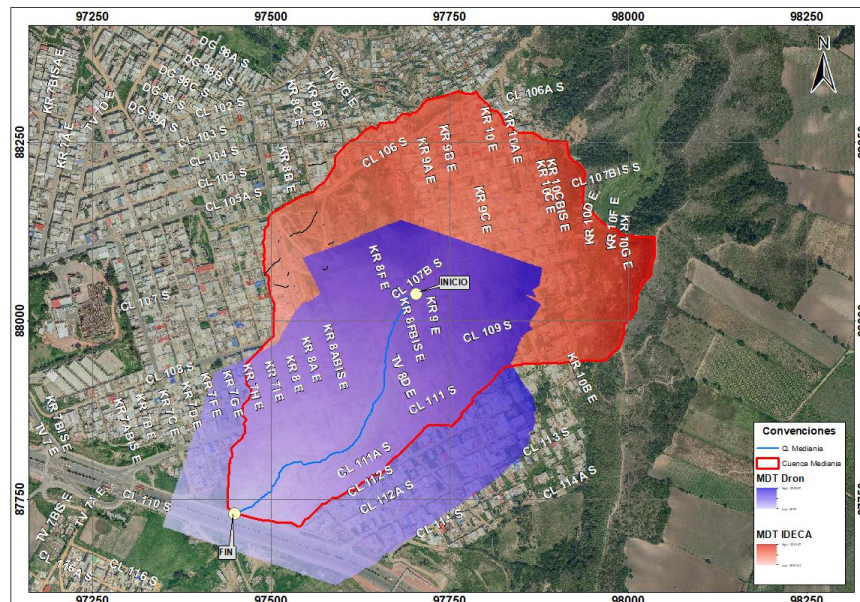
de curvas de nivel del IDECA, principalmente en la zona de la cuenca alta donde no se contaba con información capturada mediante el sobrevuelo con Dron. A continuación, se presentan las dos fuentes de información:

Figura 5. Nube de puntos densa del vuelo fotogramétrico con Dron.



Fuente: Elaboración propia.

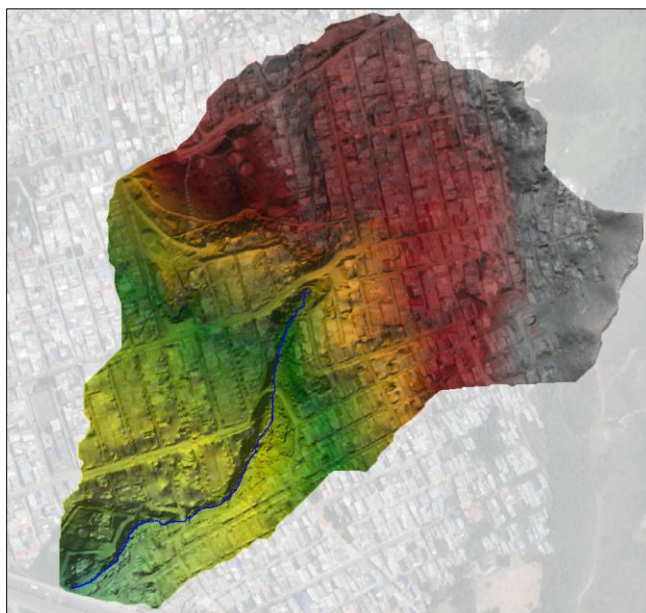
Figura 6. Nube MDT generado con Dron y MDT IDECA.



Fuente: Elaboración propia.

Debido a que las dos fuentes de información presentan diferentes resoluciones espaciales, fue necesario unificar y ajustar dichas resoluciones, mediante remuestreo y fusión de datos, con el fin de garantizar coherencia espacial entre las dos fuentes. Como resultado del proceso, se obtuvo un Modelo Digital de Terreno integrado con una resolución espacial de 0.20 m por 0.20 m, cubriendo la totalidad de la cuenca en estudio.

Figura 7. Fusión y remuestreo MDT.



Fuente: Elaboración propia

9.2. Caracterización morfométrica de la cuenca

Los parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Medianía fueron calculados según lo indicado en el numeral 7.2, la Tabla 12 resume los valores obtenidos:

Tabla 12. Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Medianía.

Parámetro	Valor	Observaciones
Área (A)	0.21 km ²	—
Perímetro (P)	2.07 km	—
Longitud del cauce (L)	0.85 km	—
Longitud axial (La)	0.70 km	—
Ancho medio (B)	0.30 km	—
Desnivel altitudinal (H)	104.55 m	—



Parámetro	Valor	Observaciones
Pendiente media de la cuenca (m_c)	31.16%	—
Pendiente del cauce principal (S)	12.30 %	—
Pendiente media ponderada del cauce (S_m)	12.30 %	—
Índice de alargamiento (I_a)	2.38	1.5– 2.8. Moderadamente alargada
Coeficiente de compacidad (K_c)	1.27	—
Factor de forma (K_f)	0.42	Ni alargada ni ensanchada
T_c Kirpich	7.87 min	—
T_c Témez	9.95 min	—
T_c Giandioti	19.94 min	—
T_c V. T Chow	28.87 min	—
T_c Cuerpo de ingenieros	22.11 min	—
T_c Williams	21.86 min	—
T_c SCS Ranser	7.86 min	—
T_c Ventura – Heras	9.95 min	—
T_c mediana	14.95 min	—

Fuente: Elaboración propia.

Para la modelación en HEC-HMS, el tiempo de concentración se define como la mediana de los ocho (8) valores calculados; en consecuencia, se adopta un valor de 14,95 min. Por tanto, el tiempo de retardo (Lag time) que es igual al 60% del tiempo de concentración, es equivalente a 9 min (8.67 min).

9.3. Cobertura del suelo

La caracterización de la cobertura del suelo se adelantó inicialmente mediante revisión de información incluida en el mapa de referencia del IDECA, específicamente en las calzadas y construcciones. Posteriormente, a partir de la ortofotografía generada mediante el vuelo con dron, se detallaron las áreas mediante análisis en SIG. En general, la clasificación de las coberturas se adelantó según el Cuadro 2 de la NS-085 (EAAB-ESP, 2024).



En la *Tabla 13* se presentan los tipos de cobertura identificados en la quebrada Medianía, indicando las áreas y porcentajes de cada tipo con respecto al área total de la cuenca:

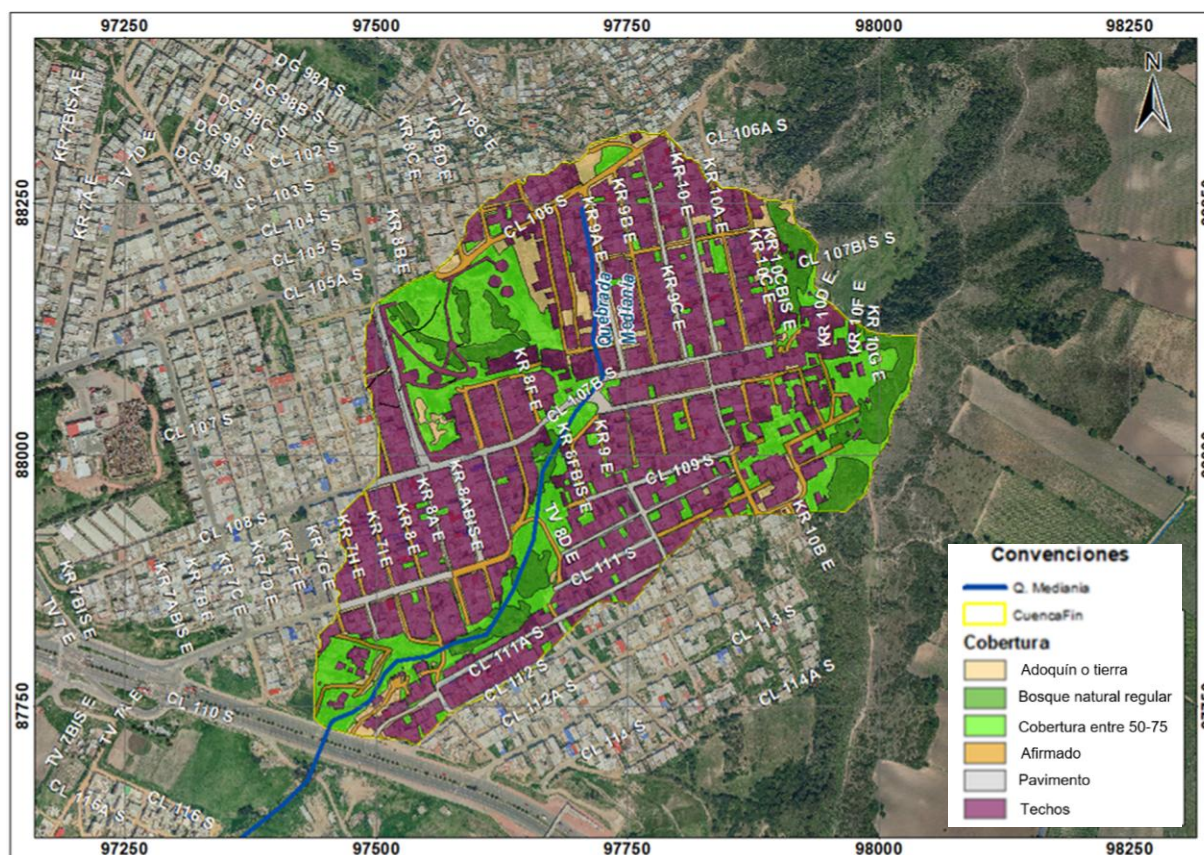
Tabla 13. Cobertura del suelo en la quebrada Medianía.

Cobertura	Área (Ha)	Área (m2)	Porcentaje (%)
Adoquín y tierra	1.44	14398.00	6.76
Bosque natural regular	1.58	15750.00	7.39
Cobertura entre 50 -75	4.29	42893.00	20.13
Afirmado	1.63	16326.00	7.66
Pavimento	1.55	15480.00	7.26
Techos	10.83	108262.00	50.80
Total	21.31	213109.00	100.00

Fuente: Elaboración propia.

La *Figura 8* muestra la distribución espacial de las coberturas de suelo en la quebrada Medianía.

Figura 8. Cobertura del suelo en la quebrada Medianía.



Fuente: Elaboración propia.



Producto de este análisis se evidencia que la cuenca presenta un 72.48% de coberturas impermeables, correspondientes a zonas urbanizadas (techos, pavimentos, vías en afirmado), frente a un 27.52% de área permeable representada en bosques y pastos presentes en pequeños sectores del costado oriental y occidental de la cuenca y en su ronda hídrica.

9.4. Caracterización hidrológica

Aproximadamente a 300 m de la quebrada Medianía se localiza la estación climatológica Colegio Ciudad de Villavicencio (IED), a cargo del IDIGER; esta cuenta con cerca de cinco años de registros de precipitación, periodo que resulta insuficiente para adelantar análisis de series de datos. Por lo anterior, en el presente trabajo se emplean las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) definidas por INGETEC S.A. (2015) para la EAAB-ESP.

9.4.1. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia

Según INGETEC S.A. (2015), las curvas IDF siguen la siguiente ecuación:

$$I = \frac{c * T^m}{D^e + f}$$
Ecuación 8

Donde:

I = Intensidad de precipitación (mm/hora)

T = Periodo de retorno (año)

D = Duración del aguacero

c, e, f, m = Parámetros de ajuste

Los parámetros de ajuste se determinan a partir de las coordenadas de la zona de estudio; en este caso, se emplean las coordenadas del centroide de la cuenca. A partir de estas coordenadas y de acuerdo con lo definido por INGETEC S.A. (2015), se obtienen los parámetros de las curvas IDF aplicables al área de análisis, como se muestra en la Figura 9.

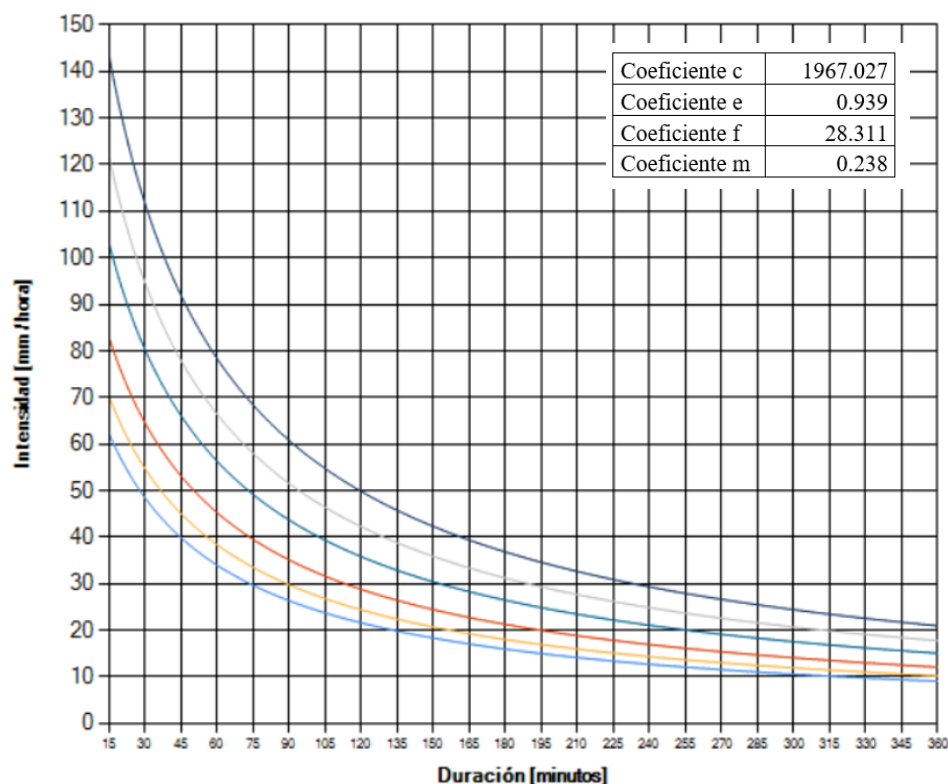


Figura 9. Curvas IDF para la zona de estudio.
Fuente: INGETEC S.A. (2015)

9.4.2. Hietogramas de aguaceros puntuales

Utilizando las curvas IDF, se obtuvieron las curvas de masa para eventos de lluvia con una duración de hasta 180 min (3 horas) y un intervalo de tiempo de 5 minutos. Este análisis consideró periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años. La Tabla 14 presenta los valores de intensidad resultantes, expresados en mm:

Tabla 14. Curvas de masa para eventos de lluvia en la cuenca de la quebrada Medianía.
(valores en mm).

Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)					
	3	5	10	25	50	100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	6.48	7.32	8.63	10.74	12.66	14.93
10	11.51	12.99	15.32	19.06	22.48	26.51
15	15.56	17.57	20.73	25.78	30.40	35.85
20	18.93	21.38	25.21	31.35	36.98	43.61
25	21.78	24.59	29.00	36.07	42.54	50.17
30	24.23	27.36	32.27	40.13	47.33	55.82



Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)					
	3	5	10	25	50	100
35	26.36	29.77	35.11	43.67	51.50	60.74
40	28.24	31.90	37.62	46.78	55.18	65.07
45	29.92	33.79	39.85	49.56	58.44	68.93
50	31.42	35.48	41.84	52.04	61.37	72.38
55	32.77	37.01	43.65	54.28	64.02	75.50
60	34.00	38.40	45.29	56.32	66.42	78.34
65	35.13	39.67	46.78	58.18	68.62	80.93
70	36.16	40.83	48.16	59.89	70.64	83.31
75	37.11	41.91	49.42	61.47	72.49	85.50
80	37.99	42.90	50.60	62.93	74.21	87.53
85	38.81	43.83	51.69	64.28	75.81	89.41
90	39.57	44.69	52.70	65.55	77.30	91.17
95	40.28	45.49	53.65	66.73	78.69	92.81
100	40.95	46.25	54.54	67.83	80.00	94.35
105	41.58	46.96	55.38	68.87	81.23	95.80
110	42.17	47.63	56.17	69.86	82.39	97.16
115	42.73	48.26	56.91	70.78	83.48	98.45
120	43.26	48.86	57.62	71.66	84.51	99.67
125	43.76	49.42	58.29	72.49	85.49	100.83
130	44.24	49.96	58.92	73.28	86.42	101.92
135	44.69	50.47	59.52	74.03	87.31	102.97
140	45.13	50.96	60.10	74.75	88.15	103.96
145	45.54	51.43	60.65	75.43	88.96	104.91
150	45.93	51.87	61.17	76.08	89.73	105.82
155	46.31	52.30	61.68	76.71	90.47	106.69
160	46.67	52.71	62.16	77.31	91.17	107.52
165	47.02	53.10	62.62	77.88	91.85	108.32
170	47.35	53.47	63.06	78.43	92.50	109.09
175	47.67	53.84	63.49	78.96	93.13	109.83
180	47.98	54.18	63.90	79.47	93.73	110.54

Fuente: Elaboración propia.

Con esta información, se procedió a calcular los incrementos de lluvia para cada intervalo de 5 minutos. Esto corresponde a la diferencia de las precipitaciones acumuladas entre intervalos consecutivos, permitiendo así definir la cantidad de lluvia caída en cada intervalo de tiempo (ver Tabla 15).

Tabla 15. Incrementos de lluvia para cada intervalo de tiempo (valores en mm).

Intervalo de tiempo (min)		Periodo de retorno (Años)					
		3	5	10	25	50	100
0	5	6.48	7.32	8.63	10.74	12.66	14.93
5	10	5.02	5.67	6.69	8.32	9.81	11.57
10	15	4.06	4.58	5.40	6.72	7.93	9.35
15	20	3.37	3.80	4.48	5.57	6.57	7.75
20	25	2.85	3.22	3.79	4.72	5.57	6.56



Intervalo de tiempo (min)		Periodo de retorno (Años)					
		3	5	10	25	50	100
25	30	2.45	2.77	3.26	4.06	4.79	5.65
30	35	2.14	2.41	2.84	3.54	4.17	4.92
35	40	1.88	2.12	2.51	3.12	3.68	4.34
40	45	1.67	1.89	2.23	2.77	3.27	3.86
45	50	1.50	1.69	2.00	2.49	2.93	3.46
50	55	1.35	1.53	1.80	2.24	2.65	3.12
55	60	1.23	1.39	1.64	2.04	2.40	2.83
60	65	1.12	1.27	1.50	1.86	2.20	2.59
65	70	1.03	1.17	1.37	1.71	2.02	2.38
70	75	0.95	1.07	1.27	1.58	1.86	2.19
75	80	0.88	0.99	1.17	1.46	1.72	2.03
80	85	0.82	0.92	1.09	1.36	1.60	1.88
85	90	0.76	0.86	1.02	1.26	1.49	1.76
90	95	0.71	0.81	0.95	1.18	1.39	1.64
95	100	0.67	0.75	0.89	1.11	1.31	1.54
100	105	0.63	0.71	0.84	1.04	1.23	1.45
105	110	0.59	0.67	0.79	0.98	1.16	1.36
110	115	0.56	0.63	0.74	0.93	1.09	1.29
115	120	0.53	0.60	0.70	0.88	1.03	1.22
120	125	0.50	0.57	0.67	0.83	0.98	1.16
125	130	0.48	0.54	0.63	0.79	0.93	1.10
130	135	0.45	0.51	0.60	0.75	0.89	1.04
135	140	0.43	0.49	0.58	0.72	0.84	1.00
140	145	0.41	0.47	0.55	0.68	0.81	0.95
145	150	0.39	0.45	0.53	0.65	0.77	0.91
150	155	0.38	0.43	0.50	0.62	0.74	0.87
155	160	0.36	0.41	0.48	0.60	0.71	0.83
160	165	0.35	0.39	0.46	0.57	0.68	0.80
165	170	0.33	0.38	0.44	0.55	0.65	0.77
170	175	0.32	0.36	0.43	0.53	0.63	0.74
175	180	0.31	0.35	0.41	0.51	0.60	0.71
		47.98	54.18	63.90	79.47	93.73	110.54

Fuente: Elaboración propia.

Conforme lo indicado por Monsalve Sáenz (2023), para definir una distribución temporal conservadora se empleó el método del bloque alterno. Con este procedimiento los incrementos de lluvia se reorganizaron de forma simétrica, de manera que los valores más pequeños se ubican en los extremos y el valor más alto encuentra en el centro. Mediante este procedimiento se obtuvieron los hietogramas para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años (ver Tabla 16).



Tabla 16. Incrementos de lluvia organizados según el método del Bloque Alterno. Hietogramas para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años (valores en mm).

Intervalo de tiempo (min)		Intervalo de tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)					
			3	5	10	25	50	100
0	5	0-5	0.31	0.35	0.41	0.51	0.60	0.71
5	10	5-10	0.33	0.38	0.44	0.55	0.65	0.77
10	15	10-15	0.36	0.41	0.48	0.60	0.71	0.83
15	20	15-20	0.39	0.45	0.53	0.65	0.77	0.91
20	25	20-25	0.43	0.49	0.58	0.72	0.84	1.00
25	30	25-30	0.48	0.54	0.63	0.79	0.93	1.10
30	35	30-35	0.53	0.60	0.70	0.88	1.03	1.22
35	40	35-40	0.59	0.67	0.79	0.98	1.16	1.36
40	45	40-45	0.67	0.75	0.89	1.11	1.31	1.54
45	50	45-50	0.76	0.86	1.02	1.26	1.49	1.76
50	55	50-55	0.88	0.99	1.17	1.46	1.72	2.03
55	60	55-60	1.03	1.17	1.37	1.71	2.02	2.38
60	65	60-65	1.23	1.39	1.64	2.04	2.40	2.83
65	70	65-70	1.50	1.69	2.00	2.49	2.93	3.46
70	75	70-75	1.88	2.12	2.51	3.12	3.68	4.34
75	80	75-80	2.45	2.77	3.26	4.06	4.79	5.65
80	85	80-85	3.37	3.80	4.48	5.57	6.57	7.75
85	90	85-90	5.02	5.67	6.69	8.32	9.81	11.57
90	95	90-95	6.48	7.32	8.63	10.74	12.66	14.93
95	100	95-100	4.06	4.58	5.40	6.72	7.93	9.35
100	105	100-105	2.85	3.22	3.79	4.72	5.57	6.56
105	110	105-110	2.14	2.41	2.84	3.54	4.17	4.92
110	115	110-115	1.67	1.89	2.23	2.77	3.27	3.86
115	120	115-120	1.35	1.53	1.80	2.24	2.65	3.12
120	125	120-125	1.12	1.27	1.50	1.86	2.20	2.59
125	130	125-130	0.95	1.07	1.27	1.58	1.86	2.19
130	135	130-135	0.82	0.92	1.09	1.36	1.60	1.88
135	140	135-140	0.71	0.81	0.95	1.18	1.39	1.64
140	145	140-145	0.63	0.71	0.84	1.04	1.23	1.45
145	150	145-150	0.56	0.63	0.74	0.93	1.09	1.29
150	155	150-155	0.50	0.57	0.67	0.83	0.98	1.16
155	160	155-160	0.45	0.51	0.60	0.75	0.89	1.04
160	165	160-165	0.41	0.47	0.55	0.68	0.81	0.95
165	170	165-170	0.38	0.43	0.50	0.62	0.74	0.87
170	175	170-175	0.35	0.39	0.46	0.57	0.68	0.80
175	180	175-180	0.32	0.36	0.43	0.53	0.63	0.74
			47.98	54.18	63.90	79.47	93.73	110.54

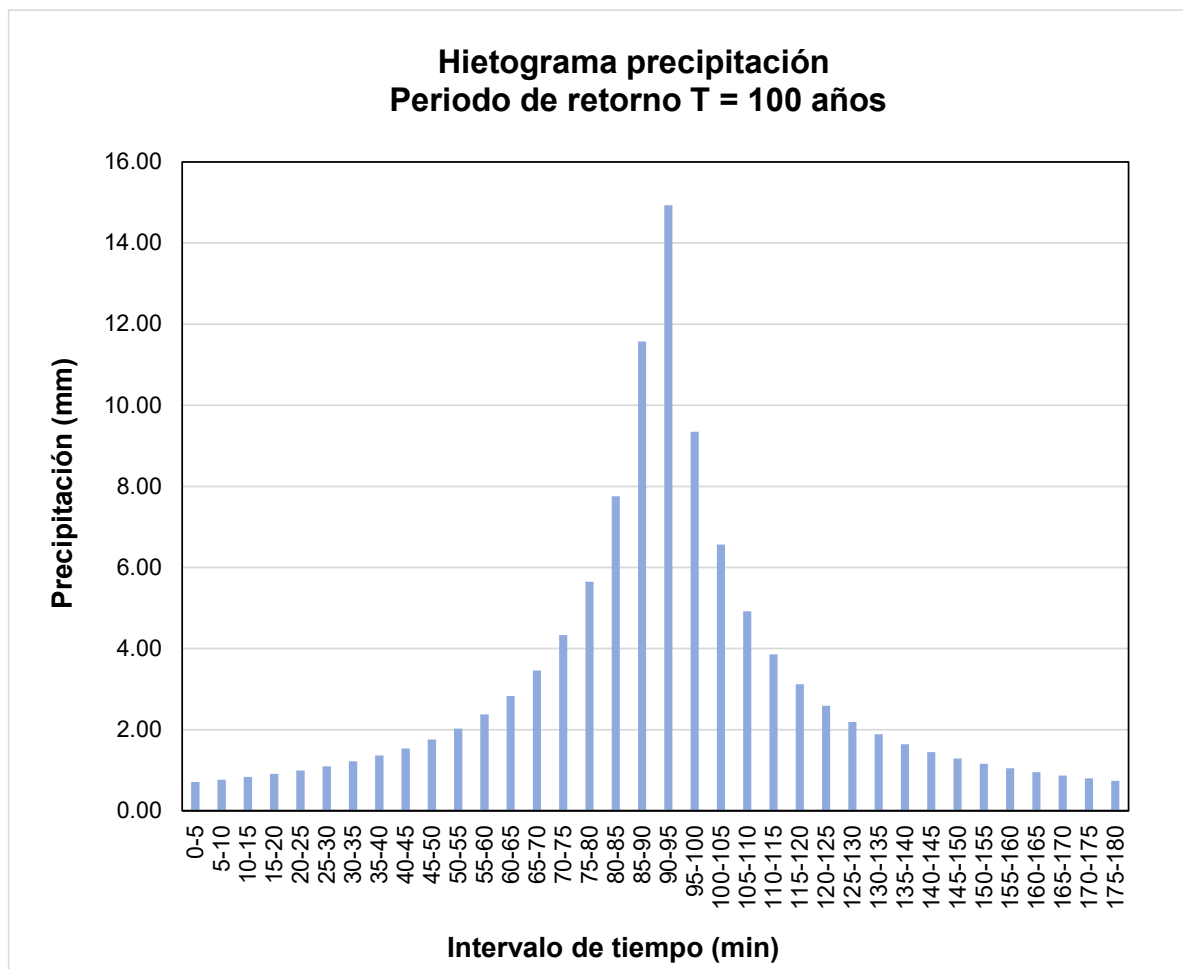
Fuente: Elaboración propia.

La *Figura 10* presenta el hietograma correspondiente al periodo de retorno de 100 años. Cabe mencionar que, aunque se calcularon los hietogramas para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25 y



50 años, solamente se grafica el de 100 años, porque según la normatividad vigente, los análisis de inundación deben hacerse para lluvias con este periodo de retorno.

Figura 10 Hietograma para el periodo de retorno de 100 años.



Fuente: Elaboración propia.

9.4.3. Estimación del Número de Curva

Como se indica en el numeral 7.2.1.1, el Número de Curva (CN) de una cuenca es función de la cobertura y del grupo hidrológico del suelo. En cuencas con varios tipos de cobertura y grupos hidrológicos, se estima un CN ponderado en función de las áreas correspondientes.

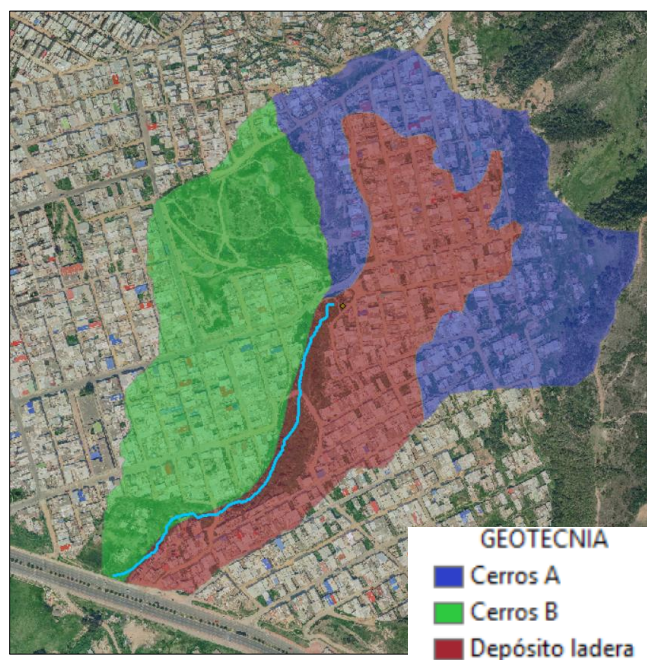
9.4.3.1 Grupo hidrológico del suelo

Para definir el grupo hidrológico del suelo se parte de la zonificación geotécnica establecida en la microzonificación sísmica de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. 2010), que indica que en

la cuenca se encuentran las zonas depósitos de ladera, Cerros A y Cerros B. Según la composición principal de cada zona, se seleccionó el grupo hidrológico correspondiente; por ejemplo, a la zona Cerros A, compuesta principalmente por arcillolitas se le asignó el grupo hidrológico C.

La *Figura 11* presenta las zonas geotécnicas existentes en la cuenca de la quebrada Medianía según la microzonificación sísmica de Bogotá y la *Tabla 17* presenta la geología, composición general, comportamiento geotécnico y el grupo hidrológico asignado a cada una de ellas.

Figura 11. Zonas geotécnicas en la quebrada Medianía.



Fuente: Adaptado de Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010).

Tabla 17. Descripción de las zonas geotécnicas y el grupo hidrológico.

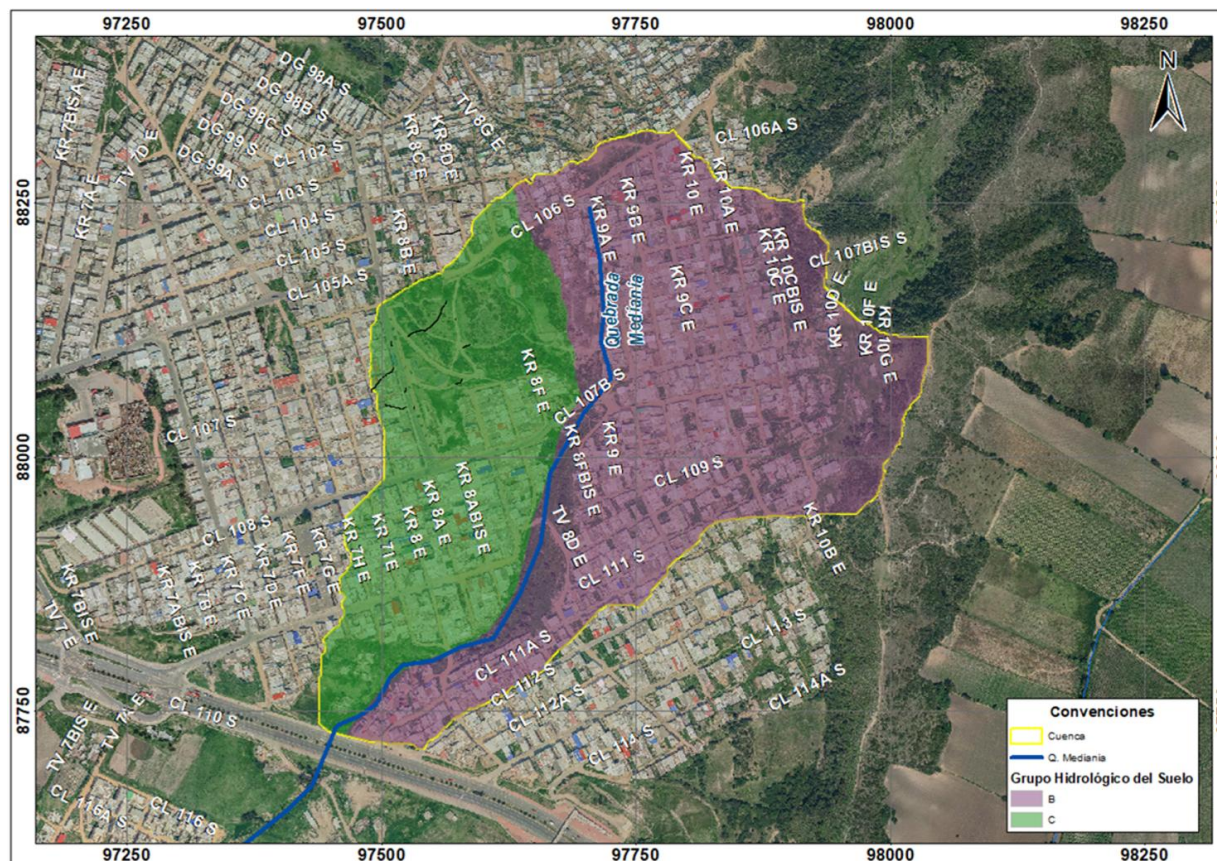
Zona geotécnica	Geología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general	Grupo hidrológico
Depósito de ladera	Suelos de ladera	Gravas areno arcillosas compactas	Suelos de mediana capacidad portante susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	B
Cerros A	Roca de arenisca	Formaciones de Areniscas	Rocas competentes y resistentes a la meteorización, eventuales problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas	B

Zona geotécnica	Geología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general	Grupo hidrológico
Cerros B	Roca de arcillolita	Formaciones de arcillolita	Rocas de moderada competencia y susceptibles a la meteorización, problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas	C

Fuente: Adaptado de Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010).

La *Figura 12* muestra la distribución espacial de los grupos hidrológicos en la quebrada Medianía.

Figura 12. Grupos hidrológicos del suelo en la quebrada Medianía.

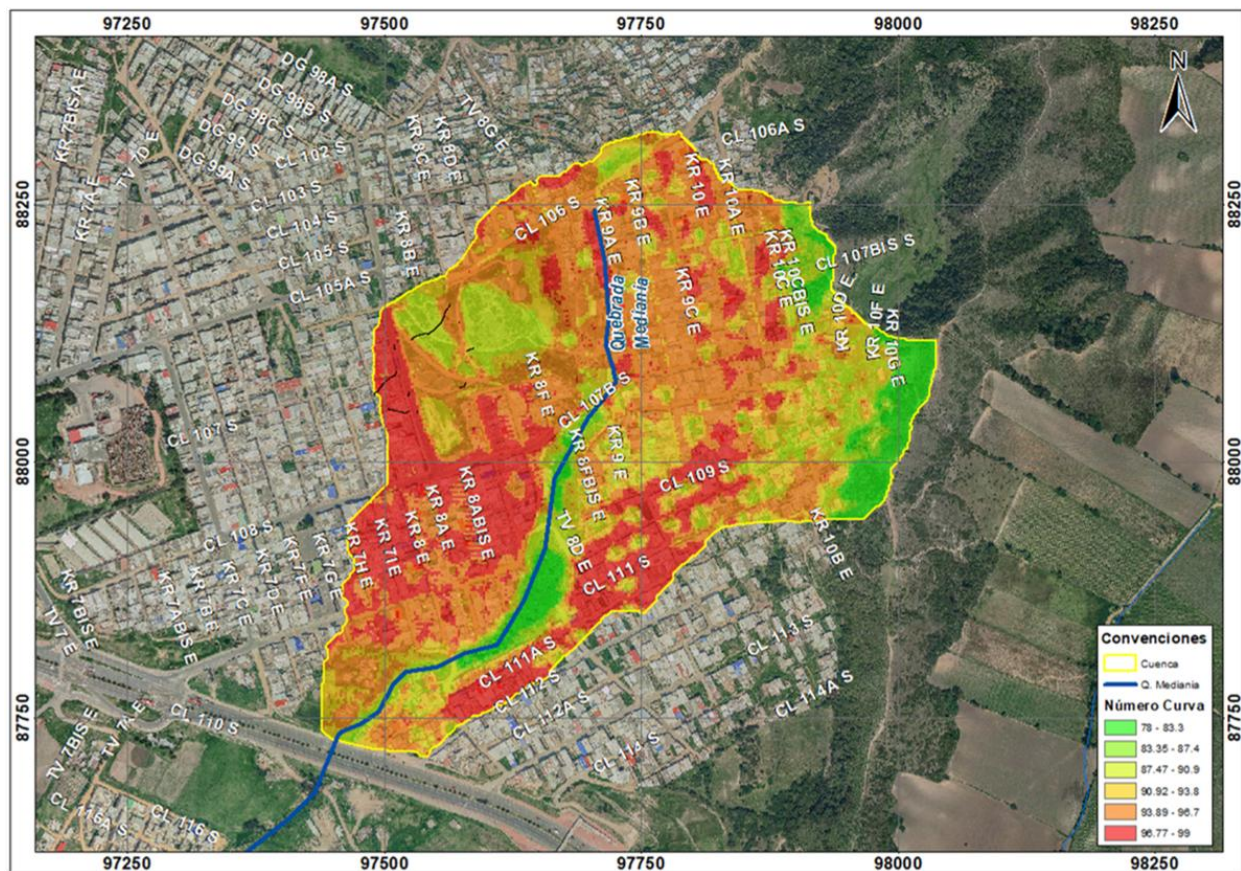


Fuente: Elaboración propia.

9.4.3.2 Número de Curva

Mediante herramientas SIG se adelantó la intersección entre las capas de cobertura del suelo (*Figura 8*) y los grupos hidrológicos (*Figura 12*). A partir de este cruce y según los valores definidos en la Tabla 2, se obtuvo la distribución espacial del Número de Curva - CN que se presenta en la *Figura 13*.

Figura 13. Distribución espacial del Número de Curva (CN) en la quebrada Medianía.



Fuente: Elaboración propia.

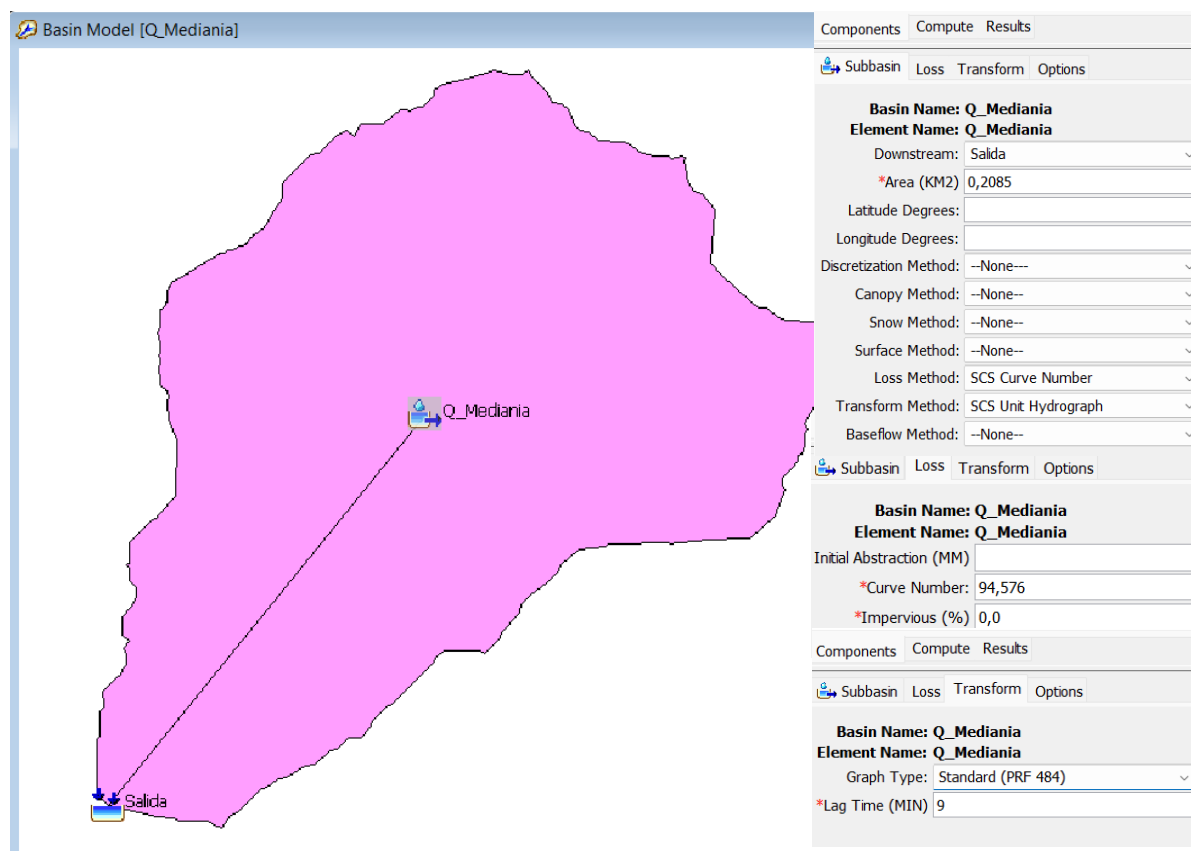
Con el fin de obtener un valor representativo del Número de Curva – CN para la cuenca, se hace una ponderación en función de las áreas correspondientes, obteniéndose un valor de CN igual a **94,57**.

9.4.4. Modelo HEC-HMS

Para la modelación hidrológica de la cuenca se empleó el programa HEC-HMS 4.12, que permite transformar datos de precipitación en caudales de escorrentía. En la modelación se aplicó el Método del Soil Conservation Service (SCS) para el cálculo de las abstracciones y la precipitación efectiva, el Hidrograma Unitario del SCS para la Transformación lluvia escorrentía, el tiempo de retardo obtenido de la morfometría de cuenca, el Número de Curva – CN ponderado y los hietogramas calculados en el numeral 9.4.2. La Figura 14 presenta los datos de entrada al programa HEC-HMS.



Figura 14. Datos de entrada al programa HEC-HMS.



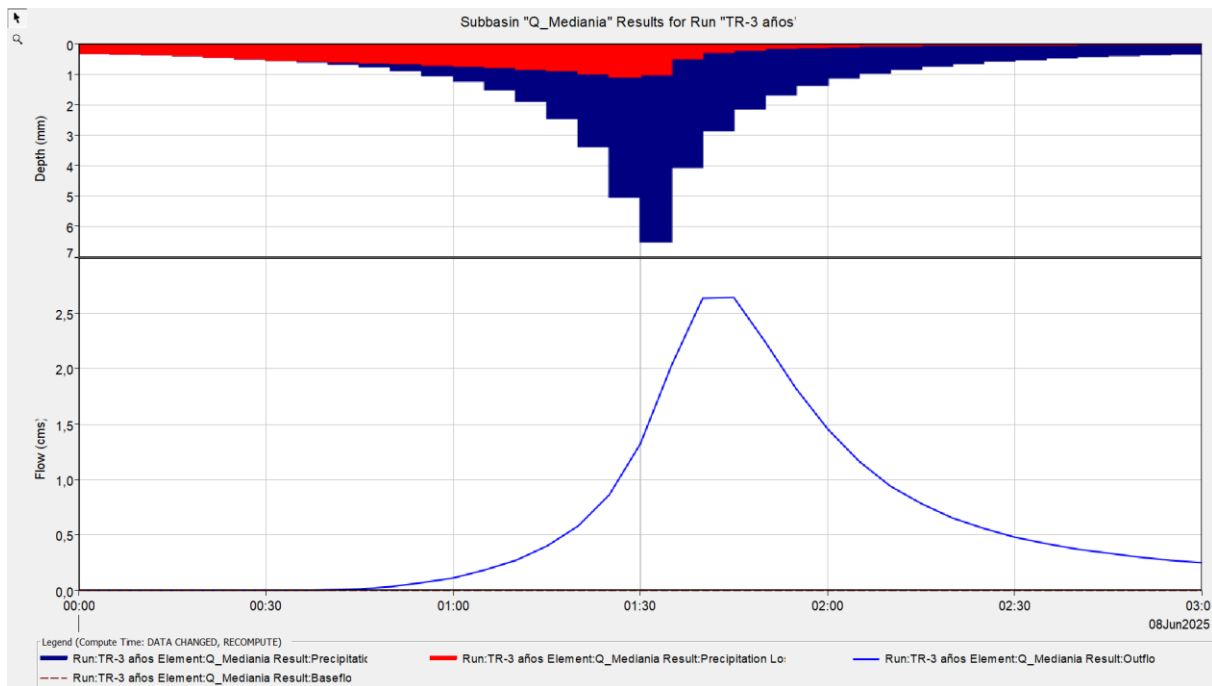
Fuente: Elaboración propia.

La modelación permite obtener los hidrogramas de crecida para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, que representan del comportamiento del caudal ante las precipitaciones esperadas (hietogramas elaborados a partir de curvas IDF).

De la Figura 15 a la Figura 20 se presentan los hidrogramas obtenidos, pero se hace la salvedad de que, para la modelación hidráulica únicamente se utilizará el hidrograma de 100 años, ya que la normativa vigente establece que la amenaza por inundación debe ser calculada para este periodo de retorno.

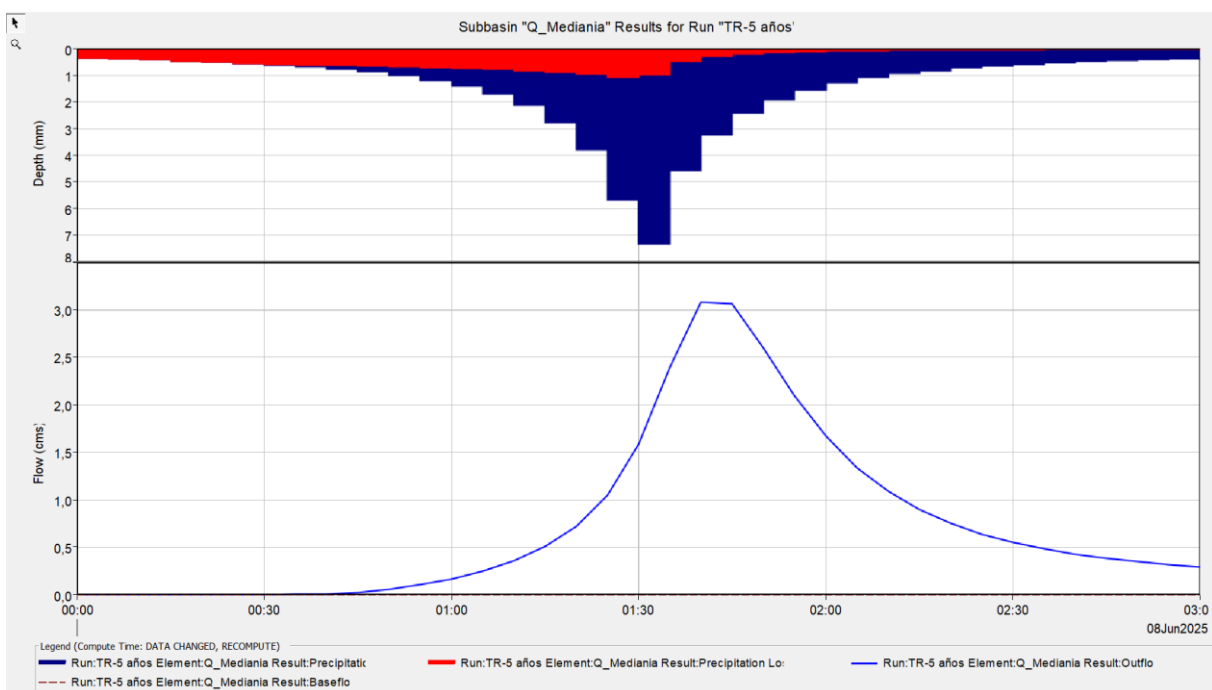


Figura 15. Hidrograma para un periodo de retorno de 3 años, obtenido con el programa HEC.HMS.



Fuente: Elaboración propia.

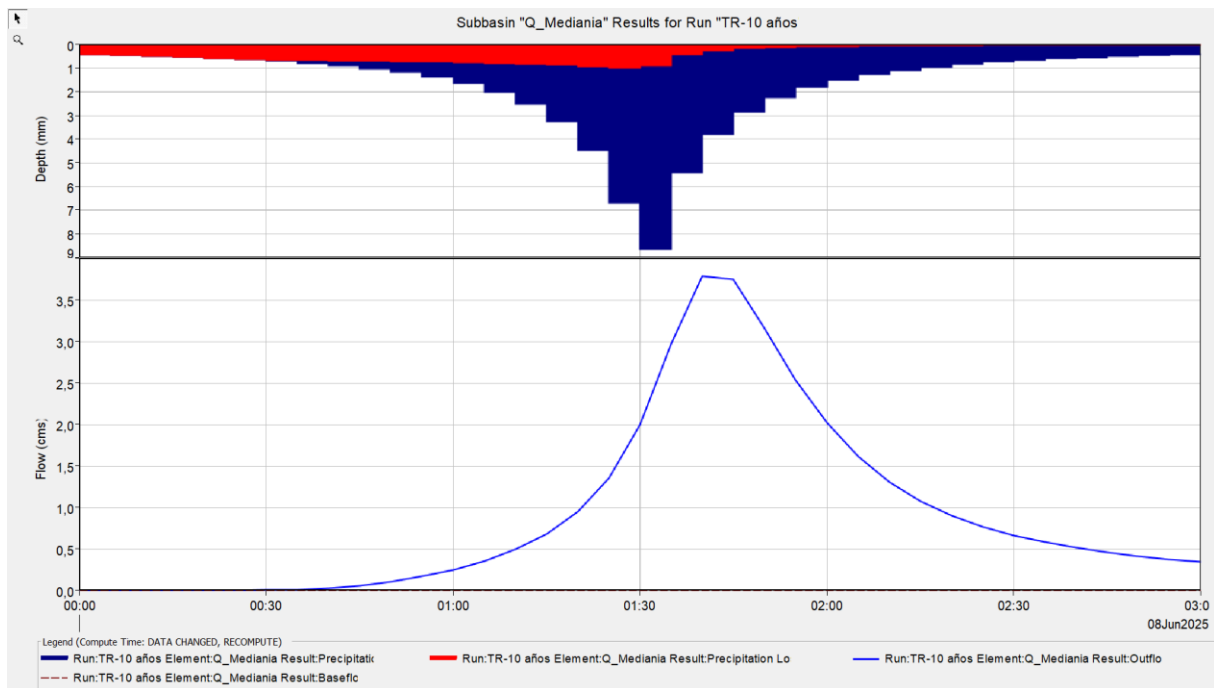
Figura 16. Hidrograma para un periodo de retorno de 5 años, obtenido con el programa HEC.HMS.



Fuente: Elaboración propia.

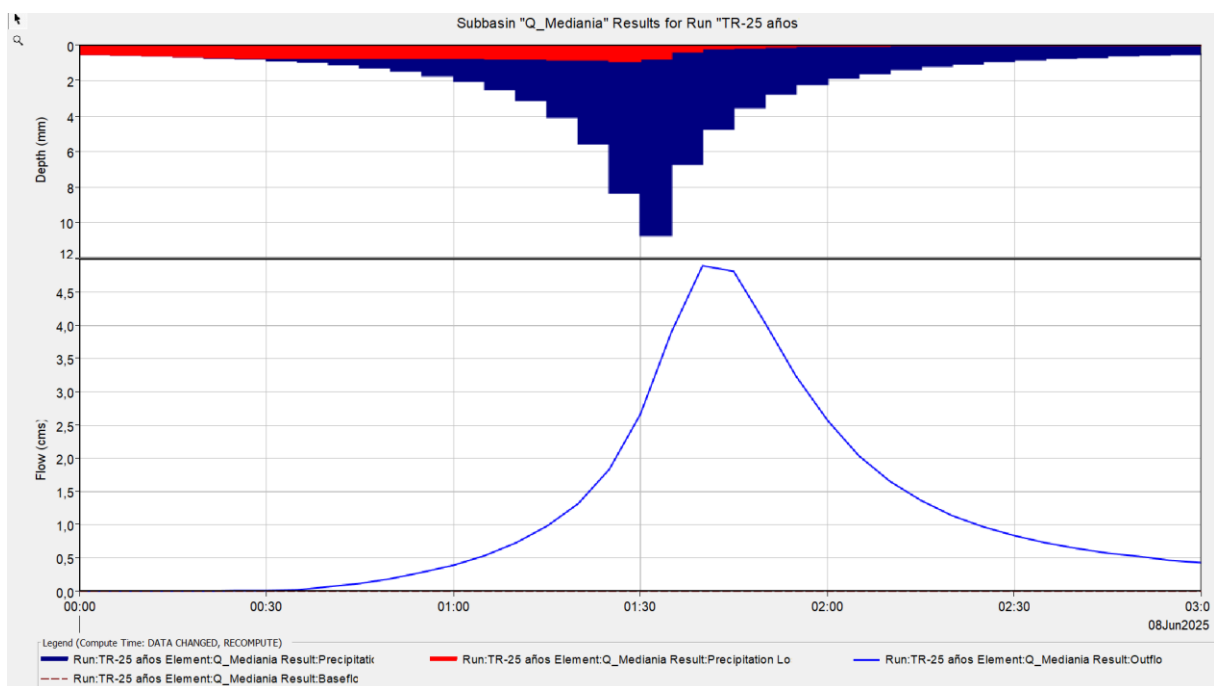


Figura 17. Hidrograma para un periodo de retorno de 10 años, obtenido con el programa HEC.HMS.



Fuente: Elaboración propia.

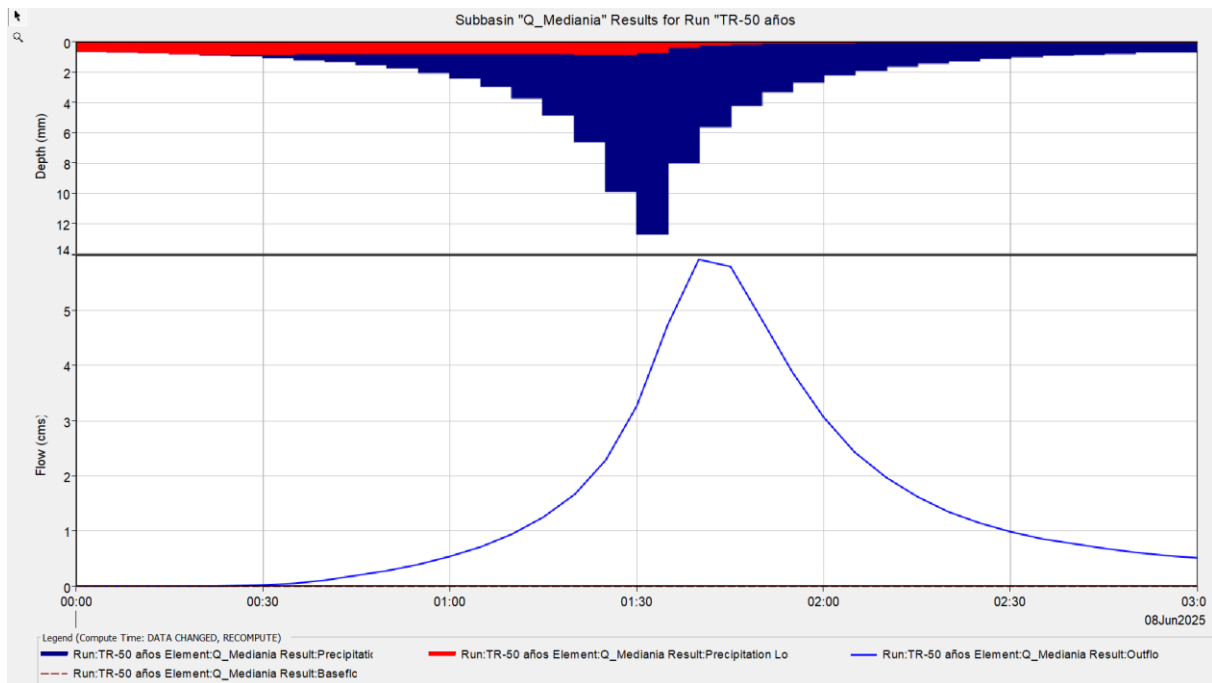
Figura 18. Hidrograma para un periodo de retorno de 25 años, obtenido con el programa HEC.HMS.



Fuente: Elaboración propia.

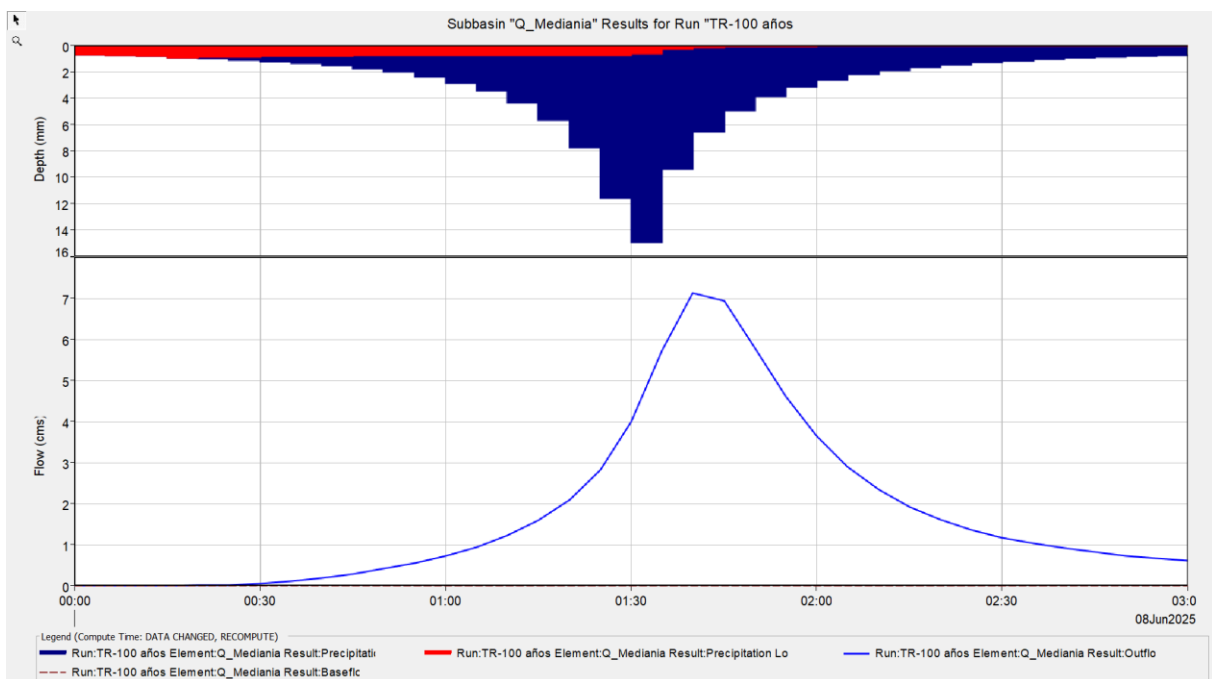


Figura 19. Hidrograma para un periodo de retorno de 50 años, obtenido con el programa HEC.HMS.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Hidrograma para un periodo de retorno de 100 años, obtenido con el programa HEC.HMS.



Fuente: Elaboración propia.



9.5. Modelo Hidráulico

Para la modelación hidráulica de la quebrada Medianía se construyó un modelo hidráulico bidimensional en el programa HEC-RAS 6.6. Este programa permite modelar el comportamiento del flujo de agua para conocer niveles, velocidades y áreas afectadas por inundación, teniendo como dato de entrada los hidrogramas obtenidos en HEC-HMS, el Modelo Digital del Terreno y el coeficiente de rugosidad de Manning.

En HEC-RAS las modelaciones pueden ser unidimensionales o bidimensionales, de flujo permanente y no permanente, aunque también es posible resolver problemas de transporte de sedimentos y calidad del agua. Como flujo permanente se entiende un caudal fijo o estático, mientras que flujo no permanente se refiere al paso de un hidrograma.

Para modelos unidimensionales, el programa resuelve la ecuación de energía para flujo permanente, y en el caso de flujo no permanente, resuelve las ecuaciones de Saint-Venant (ecuación de continuidad y ecuación de momento). Para modelos bidimensionales, HEC-RAS puede resolver las ecuaciones de Saint-Venant 2D y las ecuaciones de onda difusa (Diffusion wave).

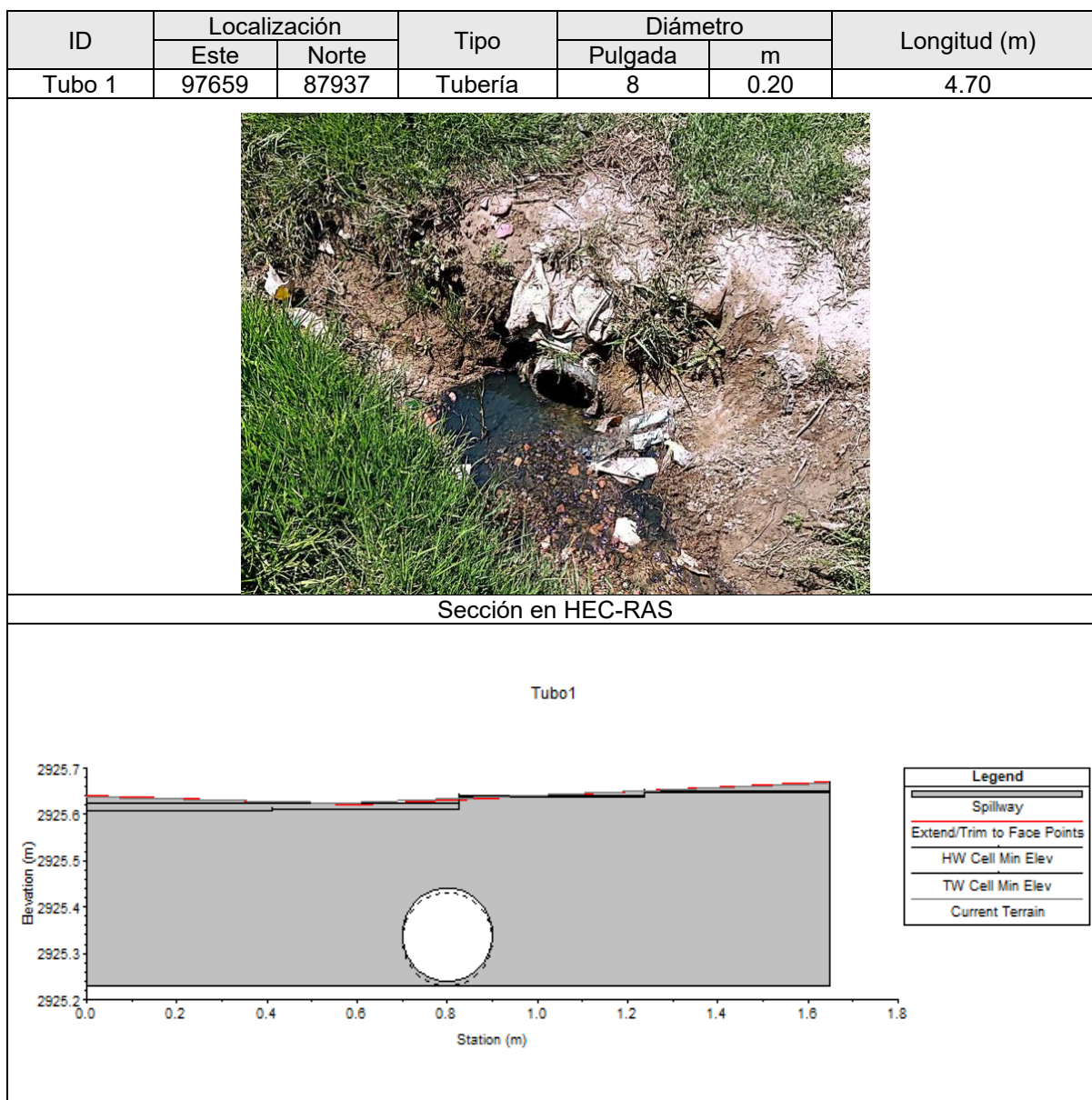
Adicionalmente, para análisis de flujo bidimensional en régimen no permanente, el programa emplea el esquema de volúmenes finitos, lo que ofrece mayor estabilidad numérica y precisión en los resultados.

9.5.1. Construcción del modelo

9.5.1.1 Secciones entubadas

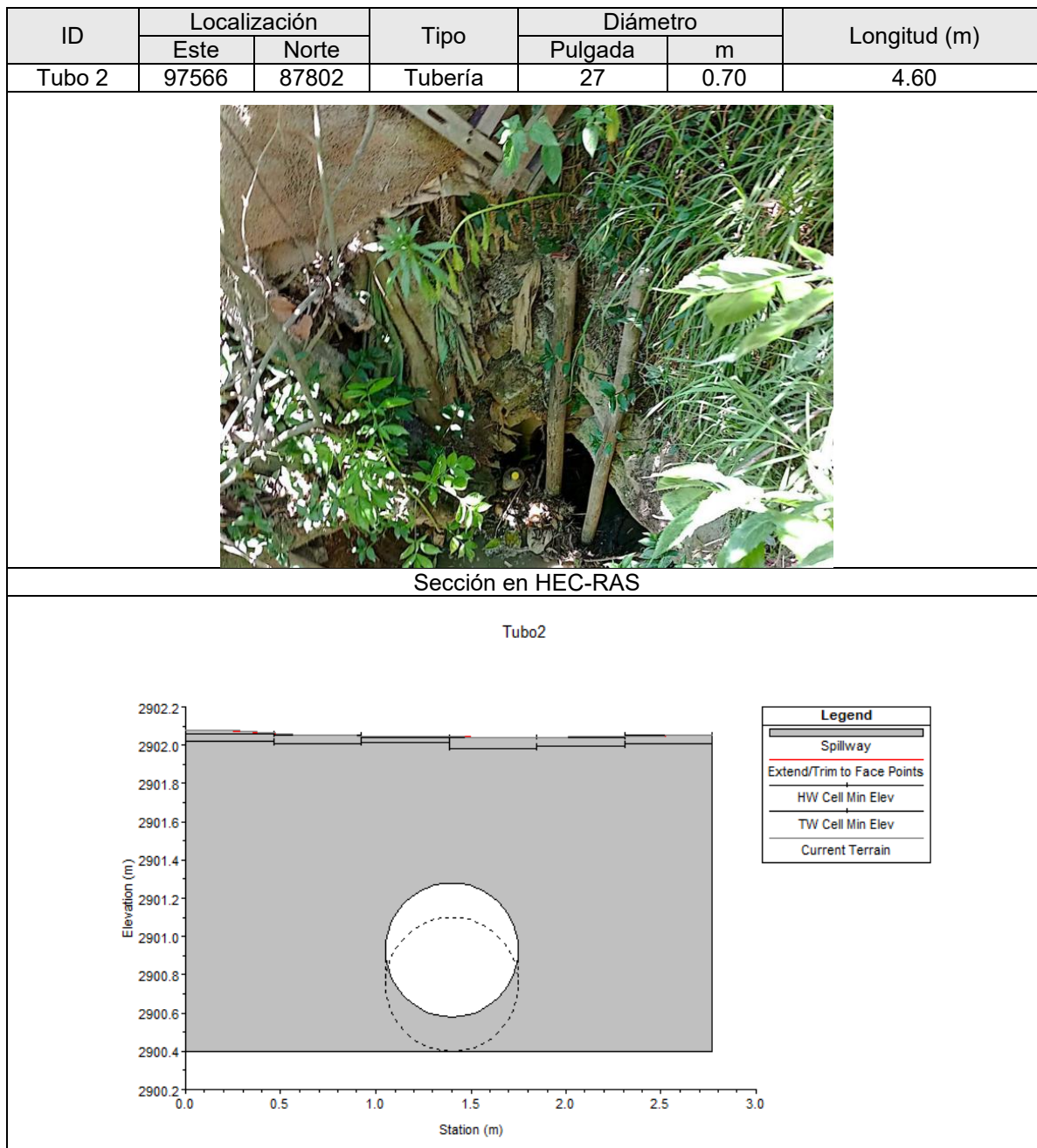
A lo largo del tramo de cauce evaluado, se identificaron tres secciones entubadas que interceptan el flujo natural de la quebrada. A continuación, se presenta la ubicación, los diámetros y el registro fotográfico de cada una de estas secciones:

Tabla 18. Sección entubada Tubo 1.



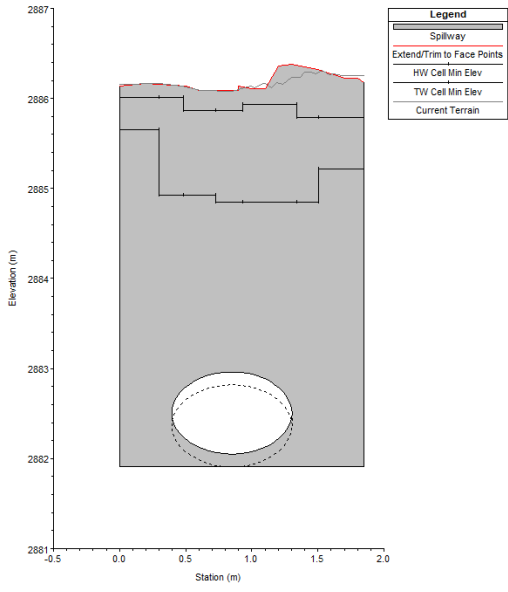
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Sección entubada Tubo 2.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Sección entubada Tubo 3 – Box culvert.

ID	Localización		Tipo	Diámetro		Long. (m)	Sección en HEC-RAS
	Este	Norte		Pulgada	m		
Tubo 3 Box Culvert	97450	87733	Box Culvert	35	0.91	41.00	Tubo3  Esta sección no se incluyó en la modelación, porque se le asignó las condiciones de frontera Rating Curve; sin embargo, se presenta la sección transversal, para dar claridad sobre la ubicación y características de este Box Culvert.
 1/03/2024 11:42:54 a.m. 4°29'7.458"N -74°6'1.674"W 207° SW 7c Este 29 40 Usme Bogotá Altitud: 2906.9m PUERTA AL LLANO DE USME EL REFUGIO Calle 115 Sur							

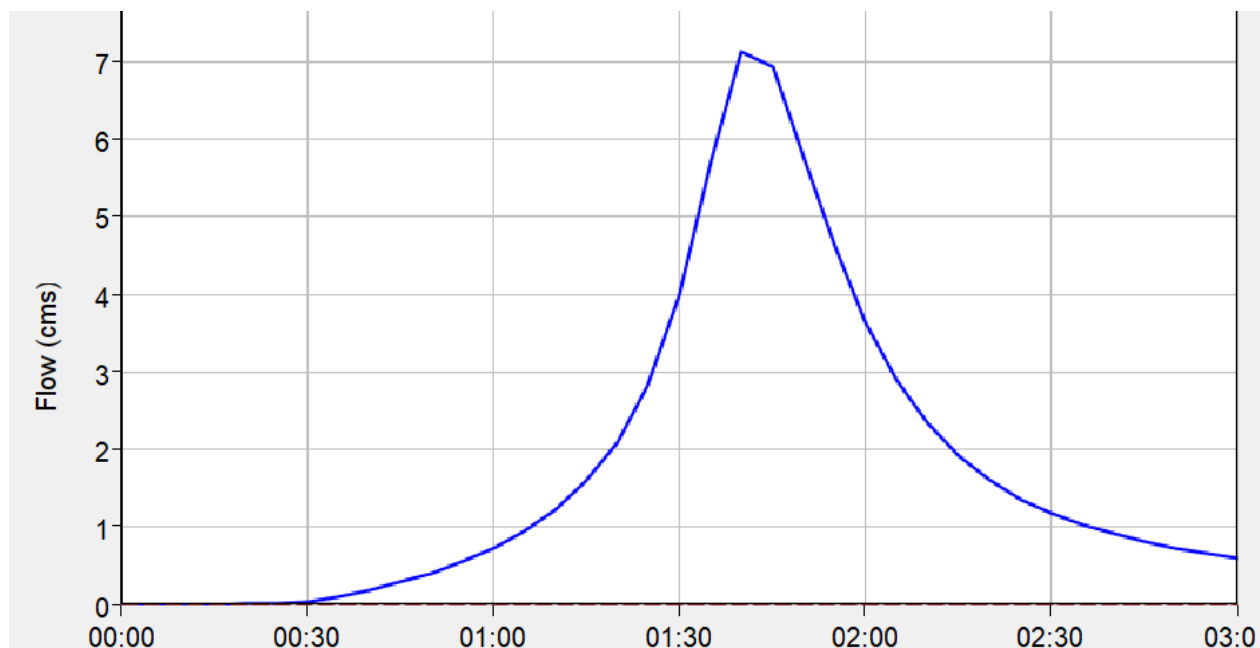
Fuente: Elaboración propia.

9.5.1.2 Caudales de análisis

Debido a que el modelo se desarrolla en un régimen de flujo no permanente y considerando la normatividad vigente – que establece que la evaluación de amenaza por inundación debe realizarse para un periodo de retorno de 100 años – los caudales de entrada al modelo corresponden al hidrograma obtenido en HEC-HMS para este periodo de retorno, cuyos valores se presentan en la Figura 20 y la Figura 21:



Figura 21. Detalle del hidrograma para un periodo de retorno de 100 años, obtenido con el programa HEC.HMS.



Tiempo (Hora)	Caudal (m ³ /s)
0:00	0
0:05	0
0:10	0
0:15	0
0:20	0
0:25	0
0:30	0
0:35	0.1
0:40	0.2
0:45	0.3
0:50	0.4
0:55	0.6
1:00	0.7
1:05	0.9
1:10	1.2
1:15	1.6
1:20	2.1

Tiempo (Hora)	Caudal (m ³ /s)
1:25	2.8
1:30	4
1:35	5.7
1:40	7.1
1:45	6.9
1:50	5.8
1:55	4.6
2:00	3.6
2:05	2.9
2:10	2.3
2:15	1.9
2:20	1.6
2:25	1.4
2:30	1.2
2:35	1
2:40	0.9
2:45	0.8

Tiempo (Hora)	Caudal (m ³ /s)
2:50	0.7
2:55	0.7
3:00	0.6
2:00	3.6
2:05	2.9
2:10	2.3
2:15	1.9
2:20	1.6
2:25	1.4
2:30	1.2
2:35	1
2:40	0.9
2:45	0.8
2:50	0.7
2:55	0.7
3:00	0.6

Fuente: Elaboración propia.



9.5.1.3 Coeficientes de rugosidad

Con respecto al coeficiente de rugosidad de Manning, los valores fueron definidos a partir de referencias técnicas ampliamente utilizadas en estudios hidráulicos, particularmente se consultaron los valores recomendados por CivilWeb Spreadsheets, (s.f.), EAAB-ESP (2024), U.S. Army Corps of Engineers, (s.f.), Suárez Díaz (2021) y TxDOT, (s.f.).

Para mejorar el nivel de detalle del estudio, a cada una de las coberturas identificadas espacialmente se le asignó un coeficiente de Manning según sus características particulares, con el fin de que la modelación hidráulica logre una representación más cercana a la realidad del comportamiento del flujo.

Inicialmente, se verificó el ancho del cauce y se identificaron anchos entre 0.79 m y 1.44 m; sin embargo, estos valores fueron ajustados de acuerdo con la ortofoto generada, con el fin de representar adecuadamente la geometría del cauce.

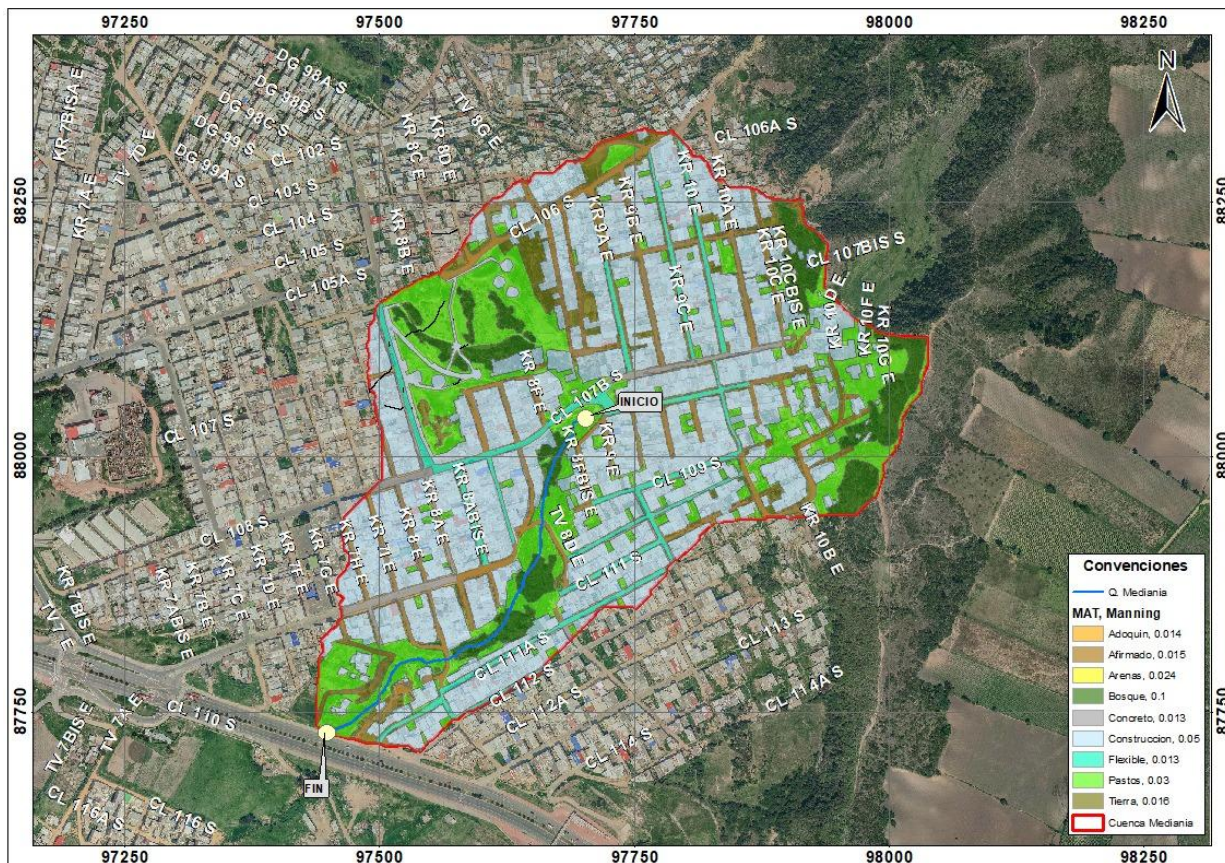
Para el área definida de la geometría del lecho se adoptó un coeficiente de rugosidad de $n = 0.039$, valor definido de acuerdo con rangos reportados en las fuentes consultadas para canales naturales, caracterizados por irregularidades menores en el fondo del cauce, cambios ocasionales en la sección transversal, ausencia de obstrucciones o grandes bloques en el cauce, baja vegetación en el cauce y desarrollo de meandros menores.

Para las demás coberturas, se adoptaron valores para cada tipo de superficie identificada. De acuerdo con ello, se asignó $n = 0.013$ para pavimentos flexibles y en concreto, $n = 0.015$ para vías en afirmado, $n = 0.014$ para vías en adoquín, $n = 0.016$ para vías en tierra, $n = 0.03$ para coberturas de pastos, $n = 0.1$ para bosques y $n = 0.05$ para techos.

Dichos valores fueron asignados en un shapefile con el fin de garantizar la espacialidad del coeficiente a la hora de ser incorporados en el modelo hidráulico.



Figura 22. Coeficiente de Manning espacializado.



Fuente: Elaboración propia.

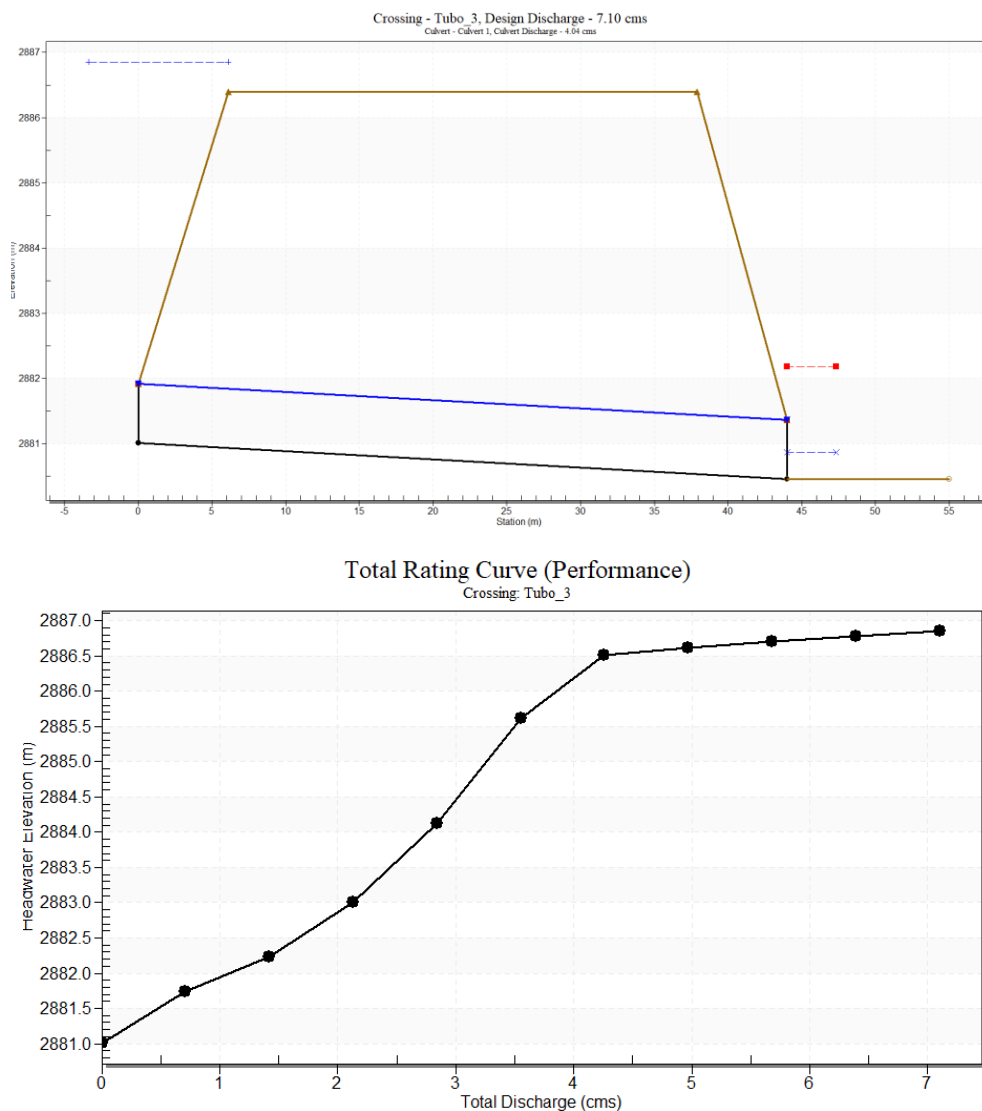
9.5.1.4 Condición de frontera y condiciones iniciales

Para la condición de frontera aguas arriba se empleó la condición *Flow Hydrograph*, que corresponde al hidrograma con periodo de retorno de 100 años. Por su parte, la condición de frontera aguas abajo se trabajó con la *Curva de gasto (Rating Curve)* estimada con el programa HY8, desarrollado por la FHWA para el análisis hidráulico de estructuras de drenaje transversal como box culverts.

Como datos de entrada al programa HY8 se emplearon: el caudal pico estimado para un periodo de retorno de 100 años, equivalente a $7.1 \text{ m}^3/\text{s}$, las cotas de batea de entrada y salida del box culvert, así como su diámetro y longitud. A partir de estos datos, el programa genera la *Curva de gasto* que relaciona los niveles de agua con los caudales que la estructura puede conducir. La Figura 23 presenta la *Rating Curve* obtenida y en el Anexo 2 pueden consultarse de forma detallada los datos de entrada y los resultados de la evaluación en HY8.



Figura 23. Curva de gasto (Rating Curve) obtenida mediante HY-8 y empleada como condición de frontera aguas abajo.



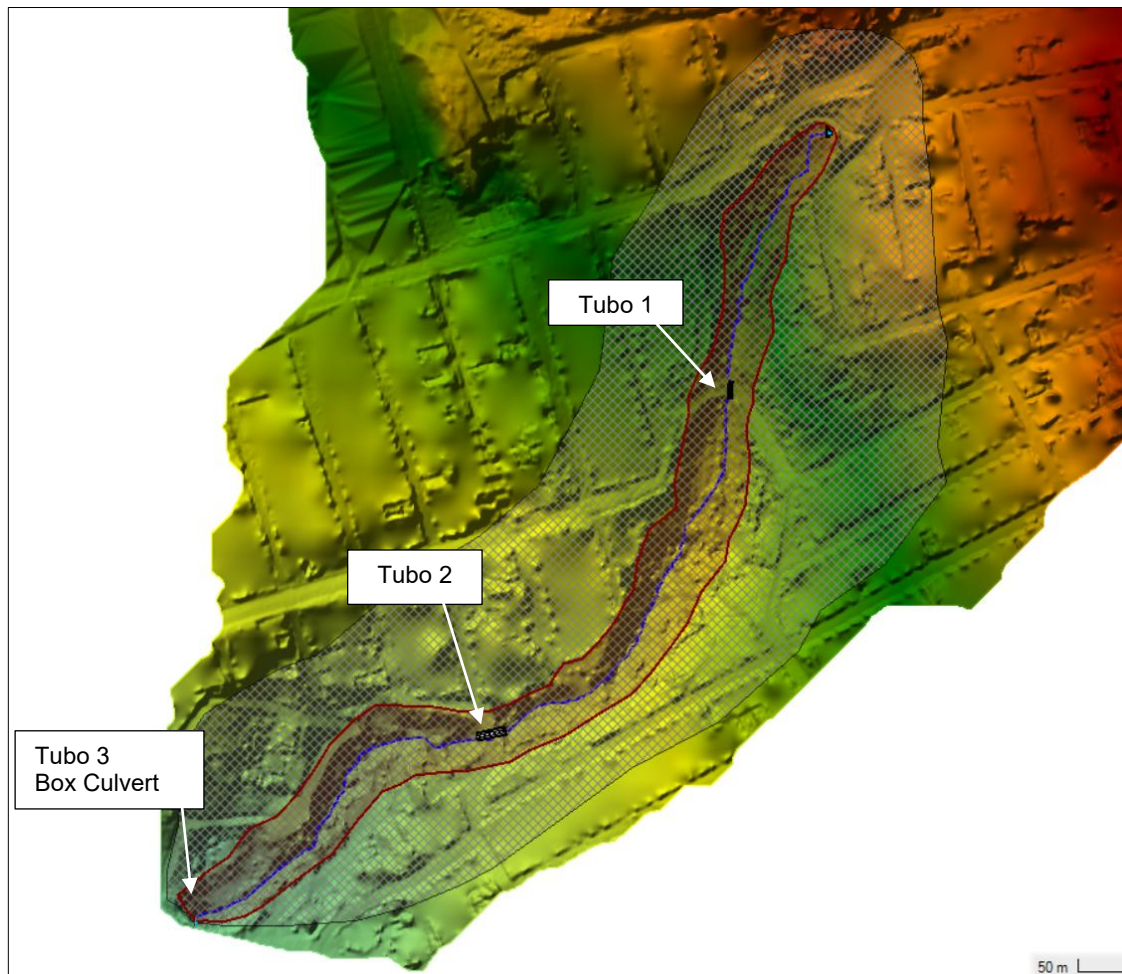
Fuente: Elaboración propia.

9.5.1.5 Características del modelo

El dominio computacional de la quebrada fue definido mediante dos mallas; la primera, con espaciamiento de 2 m x 2 m y la segunda con espaciamiento de 1 m x 1 m, incorporada mediante la opción región de refinamiento con el fin de definir el cuerpo de agua y las zonas de inundación (Figura 24).

Adicionalmente, se generaron celdas en las secciones entubadas (Tubo1, Tubo2 y Tubo3), con el propósito de permitir una mejor transición del flujo en estas zonas y reducir los errores en el modelo.

Figura 24. Dominio computacional de la quebrada Medianía en el programa HEC-RAS.

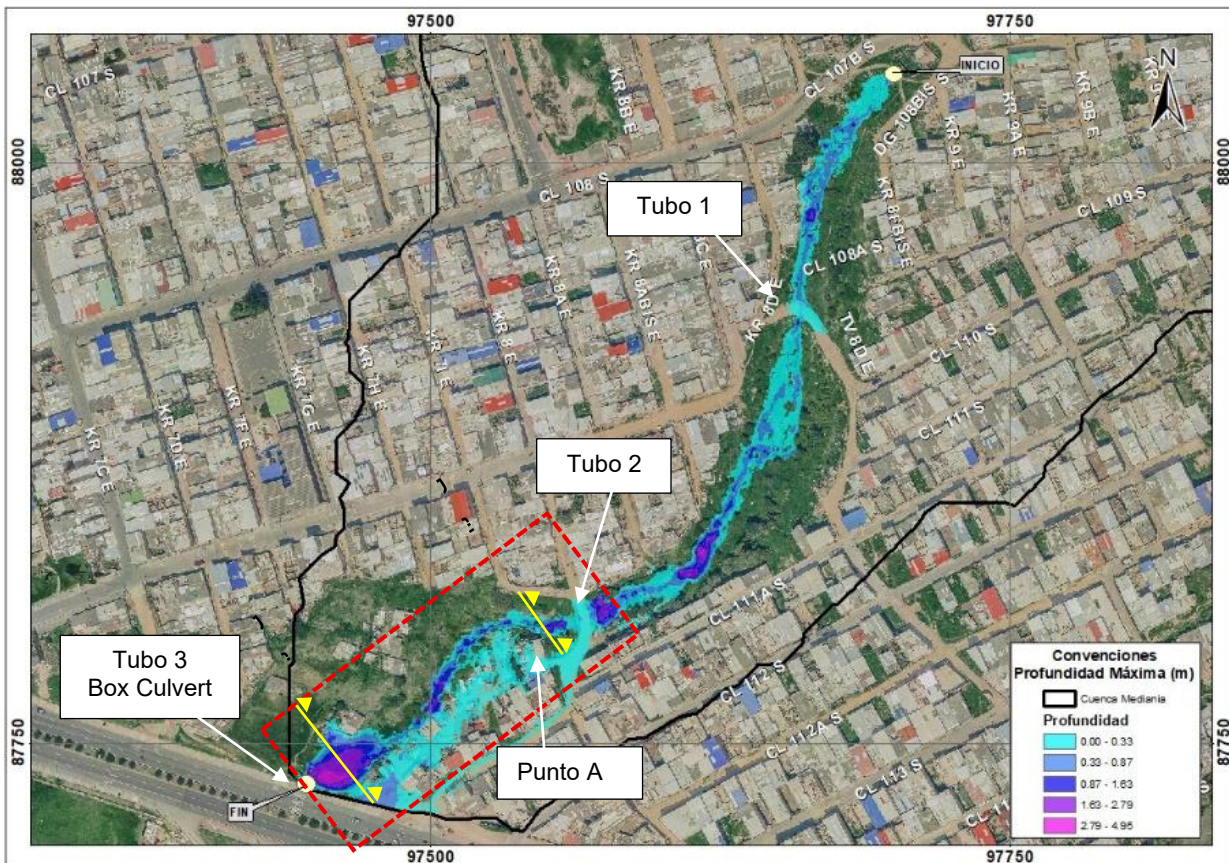


Fuente: Elaboración propia.

9.5.1.6 Resultados de la Modelación Hidráulica

Producto de la modelación hidráulica en HEC-RAS se obtuvo un archivo raster con las profundidades y velocidades de flujo para un periodo de retorno de 100 años. Estos resultados se presentan en la Figura 25 y la Figura 28, y constituyen la base para la evaluación de la amenaza por inundación en la quebrada Medianía.

Figura 25. Profundidad del flujo en la quebrada Medianía, para un periodo de retorno de 100 años.



Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes figuras presentan la profundidad de la lámina de agua en los perfiles A y B. El perfil A está ubicado muy cerca del punto de salida de la cuenca, en una zona plana que permite la acumulación de agua y donde se estima que se alcanzan las mayores profundidades de flujo, llegando a los 4.95 m. El perfil B está localizado aguas debajo de la sección entubada 2, allí se observa una lámina de agua de aproximadamente 1.80 m, limitada por la geometría del cauce.

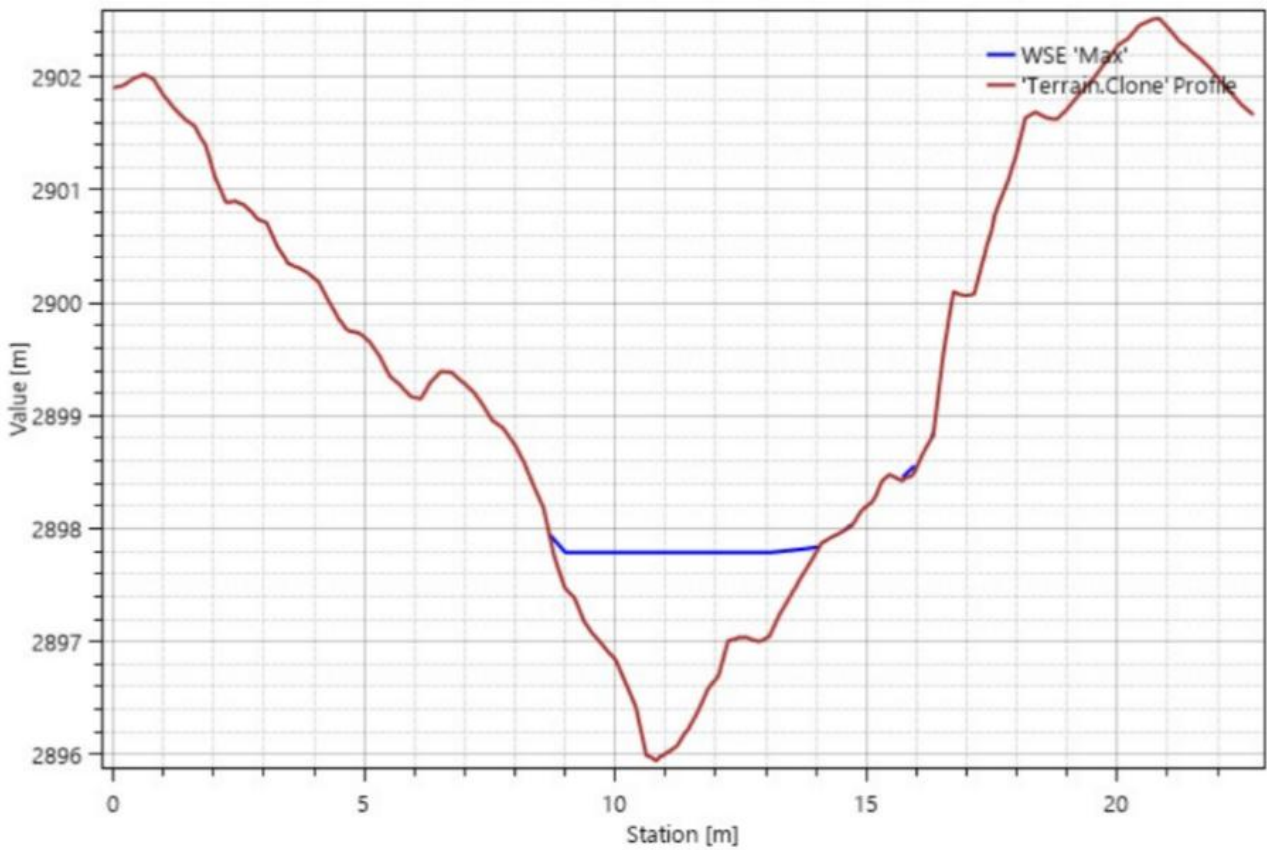


Figura 26. Profundidad del flujo en el Perfil A.



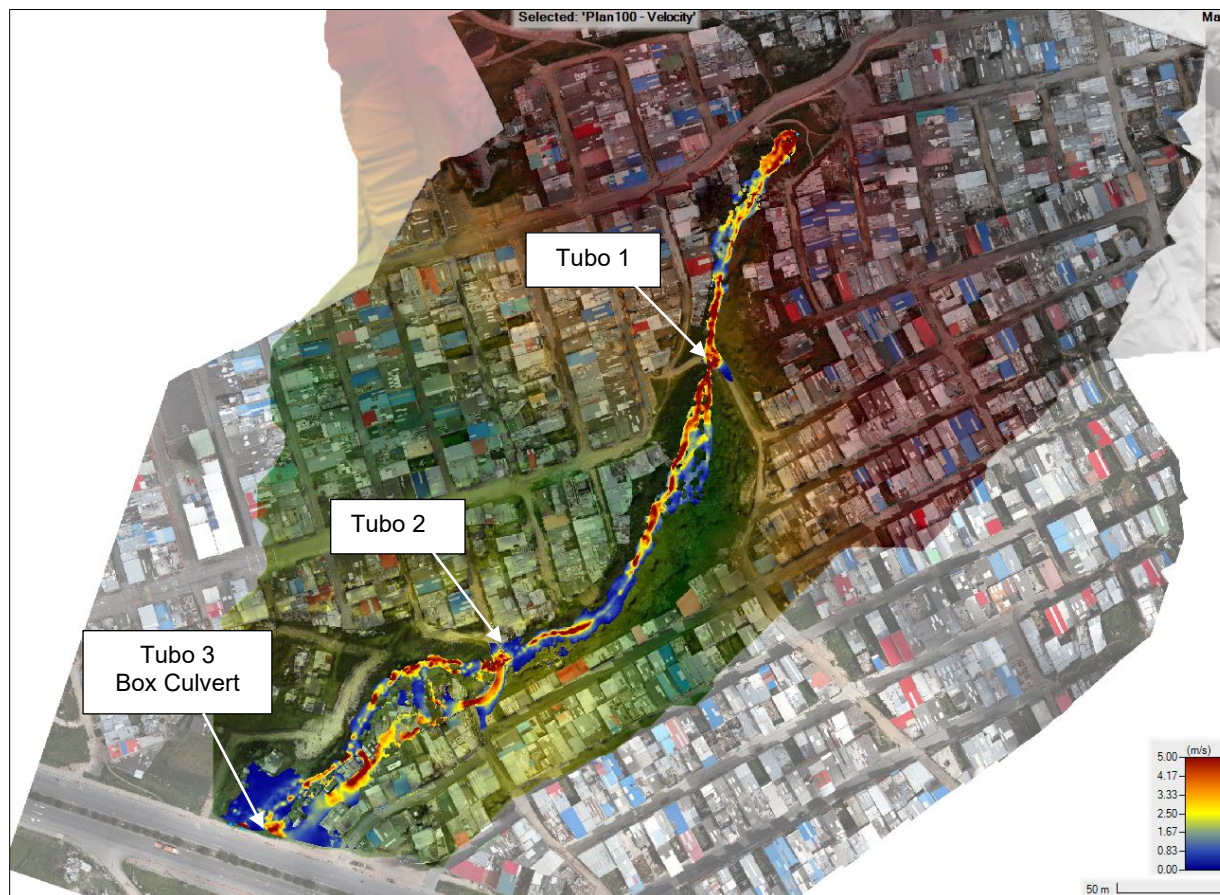
Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Profundidad del flujo en el Perfil B.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Velocidades del flujo en la quebrada Medianía, para un periodo de retorno de 100 años.



Fuente: Elaboración propia.

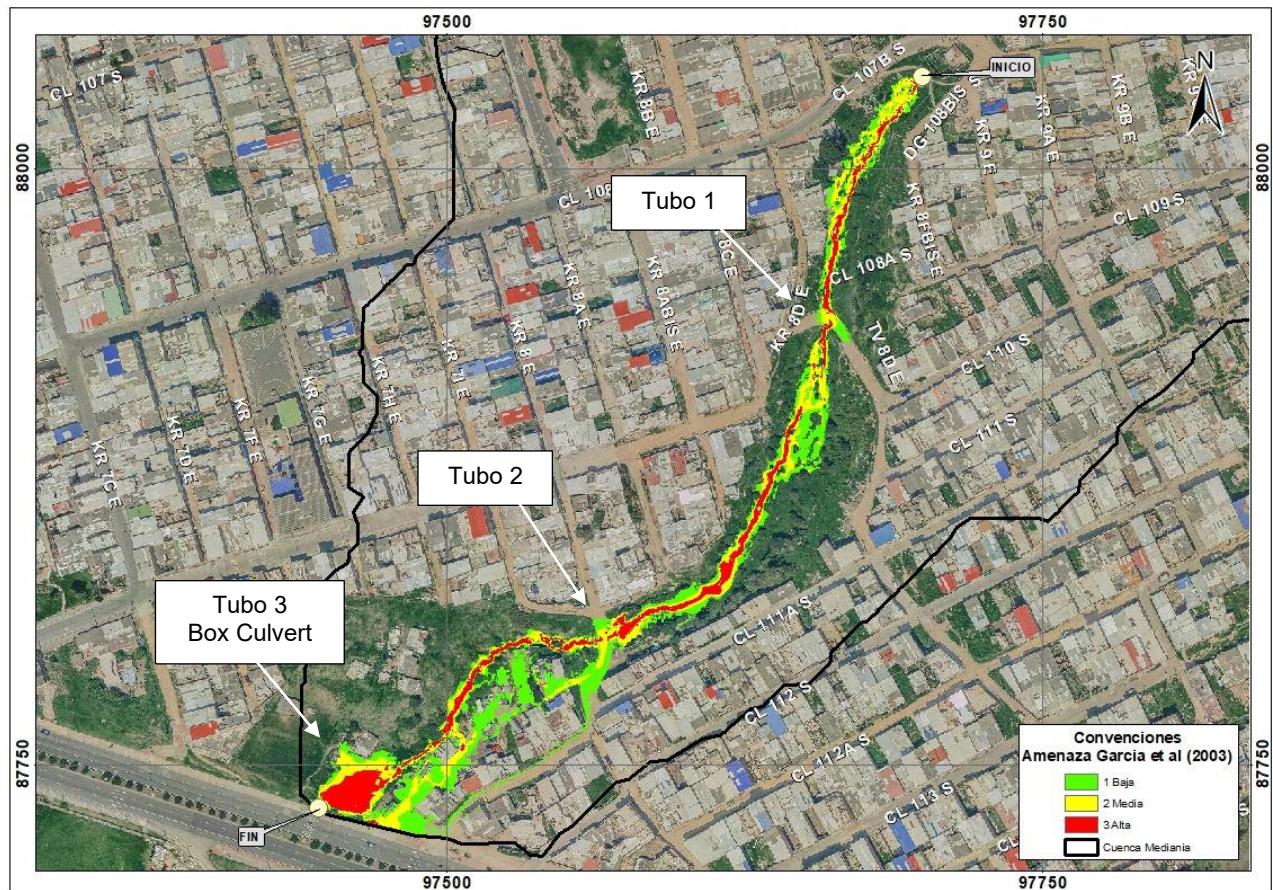
9.6. Evaluación de la Amenaza por Inundación

9.6.1. Zonificación general de amenaza

Para la evaluación de la amenaza por inundación se empleó la metodología propuesta por IDIGER (2023), descrita en el numeral 7.3.1 del presente documento. De esta forma, se obtuvieron dos mapas de amenaza; el primero, bajo los criterios de García et al. (2003) que se presenta en la Figura 29 y el segundo, elaborado con los criterios del Australian Resilience Institute (2017) que se muestra en la Figura 30.

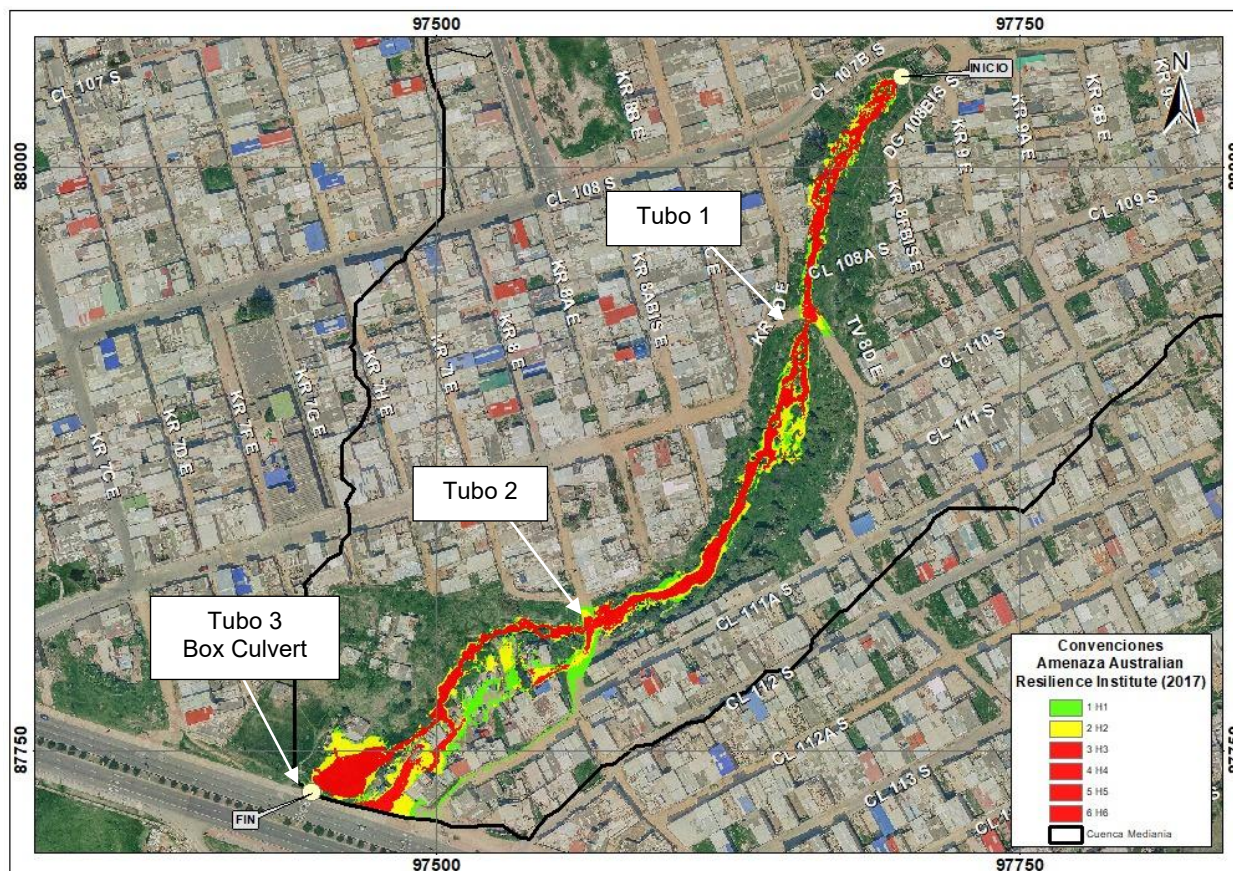
Los mapas también muestran que en la sección entubada 2 se extienden zonas de amenaza media y baja sobre las vías, prolongándose alrededor de las viviendas construidas entre las Calles 111 Sur y 111 A Sur con Carreras 8A Este y 8 Este. De igual forma, se identifica una zona con amenaza alta antes el cruce con la Vía al Llano, donde se obtuvieron las mayores profundidades de flujo.

Figura 29. Mapa de amenaza por inundación según los criterios de García et al (2003)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Mapa de amenaza por inundación según del Australian Resilience Institute (2017)



Fuente: Elaboración propia.

9.6.2. Zonificación de amenaza a nivel de construcción

Teniendo en cuenta que la evaluación de la amenaza y el riesgo se realiza sobre elementos expuestos, es decir sobre edificaciones, es necesario hacer una clasificación de amenaza a nivel individualizado de construcción. Para ello, a partir de las fotografías aéreas y la información disponible en IDECA, se identifican y georreferencian las construcciones localizadas en las zonas de inundación definidas en la Figura 29 y la Figura 30. A continuación, a cada construcción se le asigna la categorización de amenaza correspondiente según los criterios de García et al. (2003) y el Australian Resilience Institute (2017). Finalmente, según las observaciones de campo se elige la categorización de amenaza que mejor representa las condiciones actuales, en coherencia con los resultados de la modelación hidráulica.

La Tabla 21 presenta la categorización de amenaza por inundación asignada a cada construcción, información que se ilustra gráficamente en la Figura 31.



Tabla 21. Categorización de amenaza definida a nivel de construcción

Construcción	Amenaza García et al (2003)	Amenaza Australian Resilience Institute (2017)		Amenaza Definida
		Categoría	H	
1	Media	Media	H2	Media
2	Baja	Baja	H1	Baja
3	Media	Alta	H3	Media
4	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
5	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
6	Baja	Media	H2	Baja
7	Baja	Baja	H1	Baja
8	Baja	Baja	H1	Baja
9	Baja	Baja	H1	Baja
10	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
11	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
12	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
13	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
14	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
15	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
16	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
17	Baja	Baja	H1	Baja
18	Baja	Media	H2	Baja
19	Alta	Alta	H4	Alta
20	Alta	Alta	H4	Alta
21	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
22	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
23	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
24	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
25	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
26	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
27	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
28	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
29	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
30	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
31	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
32	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
33	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
34	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
35	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
36	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
37	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
38	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
39	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
40	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
41	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
42	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
43	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza



Construcción	Amenaza García et al (2003)	Amenaza Australian Resilience Institute (2017)		Amenaza Definida
		Categoría	H	
44	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
45	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
46	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
47	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
48	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
49	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
50	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
51	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
52	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
53	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
54	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
55	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
56	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
57	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
58	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
59	Media	Media	H2	Media
60	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
61	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
62	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
63	Media	Alta	H3	Media
64	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
65	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
66	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
67	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
68	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza	Sin amenaza
69	Baja	Baja	H1	Baja
70	Baja	Media	H2	Media
71	Media	Media	H2	Media
72	Media	Alta	H3	Media
73	Baja	Baja	H1	Baja
74	Baja	Baja	H1	Baja

Fuente: Elaboración propia.

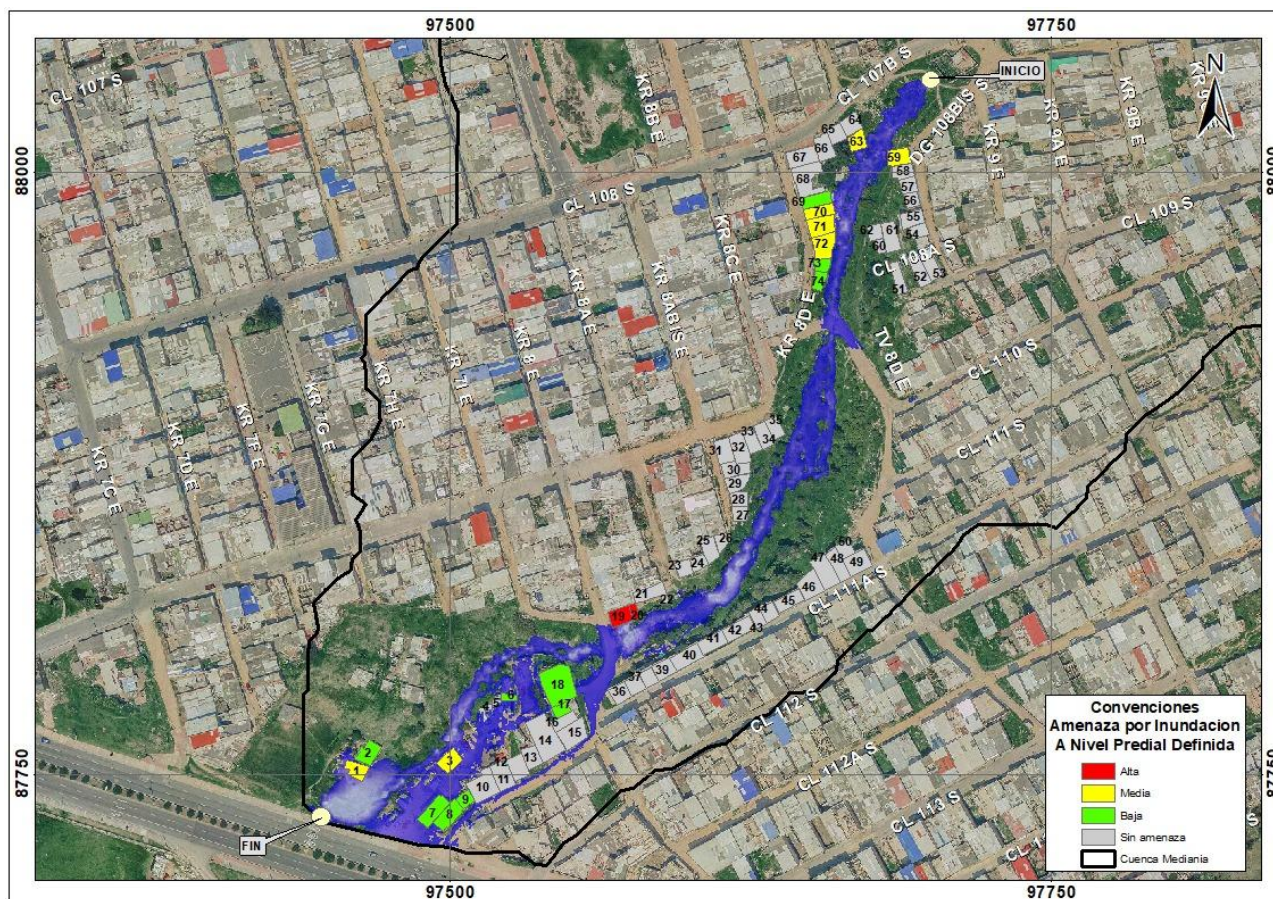
La columna “Amenaza definida” es producto de la revisión de cada construcción, considerando sus condiciones físicas, su proximidad a la mancha de inundación y los resultados de profundidad y velocidad de flujo. Por ejemplo, para las construcciones 17 y 18 se adoptó la categorización de amenaza baja definida por García et al. (2003), al considerarse más consistente con las condiciones del sitio y con la profundidad de flujo estimada que es de 0.20 m aproximadamente.

Luego de este ejercicio, se concluye que la categorización propuesta por García et al. (2003) representa mejor las condiciones actuales, por lo que se asigna a la mayoría de las construcciones, con excepción de la número 70, para el que se considera más adecuada la



condición de amenaza media definida por el Australian Resilience Institute (2017), dada su ubicación cercana al cauce de la quebrada.

Figura 31. Categorización de amenaza definida a nivel de construcción



Fuente: Elaboración propia.

9.7. Evaluación de la Vulnerabilidad Física por Inundación

Para la evaluación de la vulnerabilidad física se parte de las construcciones identificadas en la Tabla 21. Para cada una de ellas se calcula el Índice de Vulnerabilidad Física (IVF); es decir cada construcción se caracteriza en términos del sistema estructural, el número de pisos y el porcentaje de perímetro expuesto ante inundaciones (perímetro libre). Posteriormente, aplicando la matriz de la Tabla 8 se asigna la categorización de vulnerabilidad física como se indica en la Tabla 22 y la Figura 32:



Tabla 22. Categorización de vulnerabilidad física a nivel de construcción

Const	Sistema Estructural			Número de pisos			Porcentaje perímetro libre				IVF	Vulnerabilidad
	Tipología	Puntaje	A*0.50	No. De pisos	Puntaje	B*0.25	Perímetro (m)	Perímetro libre (m)	%	C*0.25		
1	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	31.124	31.124	1.00	0.25	0.80	Alta
2	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	36.307	23.100	0.64	0.16	0.71	Alta
3	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	31.986	31.986	1.00	0.25	1.00	Alta
4	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	9.982	---	---	---	Sin IVF	SED
5	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	11.067	---	---	---	Sin IVF	SED
6	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	20.000	20.000	1.00	0.25	1.00	Alta
7	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	40.309	29.520	0.73	0.18	0.61	Media
8	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	38.190	3.000	0.08	0.02	0.44	Media
9	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	22.831	6.650	0.29	0.07	0.62	Media
10	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	46.445	---	---	---	Sin IVF	SED
11	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	37.706	---	---	---	Sin IVF	SED
12	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	37.799	---	---	---	Sin IVF	SED
13	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	30.481	---	---	---	Sin IVF	SED
14	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	56.391	---	---	---	Sin IVF	SED
15	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	40.887	---	---	---	Sin IVF	SED
16	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	31.349	---	---	---	Sin IVF	SED
17	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	23.519	7.630	0.32	0.08	0.83	Alta
18	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	54.414	24.700	0.45	0.11	0.86	Alta
19	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	32.006	16.370	0.51	0.13	0.88	Alta
20	B1	1	0.50	2	0.50	0.13	18.818	9.000	0.48	0.12	0.74	Alta
21	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	36.998	---	---	---	Sin IVF	SED
22	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	13.136	---	---	---	Sin IVF	SED
23	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	26.929	---	---	---	Sin IVF	SED
24	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	24.752	---	---	---	Sin IVF	SED
25	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	30.561	---	---	---	Sin IVF	SED
26	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	23.875	---	---	---	Sin IVF	SED
27	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	24.930	---	---	---	Sin IVF	SED
28	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	26.134	---	---	---	Sin IVF	SED
29	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	32.126	---	---	---	Sin IVF	SED



Const	Sistema Estructural			Número de pisos			Porcentaje perímetro libre				IVF	Vulnerabilidad
	Tipología	Puntaje	A*0.50	No. De pisos	Puntaje	B*0.25	Perímetro (m)	Perímetro libre (m)	%	C*0.25		
30	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	35.712	---	---	---	Sin IVF	SED
31	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	33.412	---	---	---	Sin IVF	SED
32	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	37.677	---	---	---	Sin IVF	SED
33	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	29.922	---	---	---	Sin IVF	SED
34	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	32.368	---	---	---	Sin IVF	SED
35	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	28.655	---	---	---	Sin IVF	SED
36	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	28.761	---	---	---	Sin IVF	SED
37	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	27.296	---	---	---	Sin IVF	SED
38	B2	0.6	0.30	3	0.33	0.08	25.852	---	---	---	Sin IVF	SED
39	B2	0.6	0.30	3	0.33	0.08	30.486	---	---	---	Sin IVF	SED
40	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	39.287	---	---	---	Sin IVF	SED
41	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	34.588	---	---	---	Sin IVF	SED
42	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	37.318	---	---	---	Sin IVF	SED
43	B2	0.6	0.30	3	0.33	0.08	25.493	---	---	---	Sin IVF	SED
44	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	26.116	---	---	---	Sin IVF	SED
45	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	34.799	---	---	---	Sin IVF	SED
46	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	36.919	---	---	---	Sin IVF	SED
47	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	42.108	---	---	---	Sin IVF	SED
48	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	37.151	---	---	---	Sin IVF	SED
49	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	35.915	---	---	---	Sin IVF	SED
50	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	25.017	---	---	---	Sin IVF	SED
51	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	35.272	---	---	---	Sin IVF	SED
52	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	37.400	---	---	---	Sin IVF	SED
53	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	36.270	---	---	---	Sin IVF	SED
54	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	25.109	---	---	---	Sin IVF	SED
55	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	32.084	---	---	---	Sin IVF	SED
56	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	23.206	---	---	---	Sin IVF	SED
57	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	26.400	---	---	---	Sin IVF	SED
58	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	29.183	---	---	---	Sin IVF	SED
59	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	31.804	17.000	0.53	0.13	0.88	Alta
60	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	19.267	---	---	---	Sin IVF	SED



Const	Sistema Estructural			Número de pisos			Porcentaje perímetro libre				IVF	Vulnerabilidad
	Tipología	Puntaje	A*0.50	No. De pisos	Puntaje	B*0.25	Perímetro (m)	Perímetro libre (m)	%	C*0.25		
61	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	36.675	---	---	---	Sin IVF	SED
62	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	24.296	---	---	---	Sin IVF	SED
63	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	28.844	20.990	0.73	0.18	0.93	Alta
64	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	30.107	---	---	---	Sin IVF	SED
65	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	27.384	---	---	---	Sin IVF	SED
66	B1	1	0.50	1	1.00	0.25	35.527	---	---	---	Sin IVF	SED
67	B2	0.6	0.30	3	0.33	0.08	39.370	---	---	---	Sin IVF	SED
68	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	60.006	---	---	---	Sin IVF	SED
69	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	35.661	5.570	0.16	0.04	0.46	Media
70	B2	0.6	0.30	1.5	0.63	0.16	33.887	4.700	0.14	0.03	0.49	Media
71	B2	0.6	0.30	2	0.50	0.13	37.208	7.050	0.19	0.05	0.47	Media
72	B2	0.6	0.30	1	1.00	0.25	37.896	11.940	0.32	0.08	0.63	Media
73	B1	1	0.50	2	0.50	0.13	23.008	5.840	0.25	0.06	0.69	Media
74	B1	1	0.50	2	0.50	0.13	25.244	7.500	0.30	0.07	0.70	Media

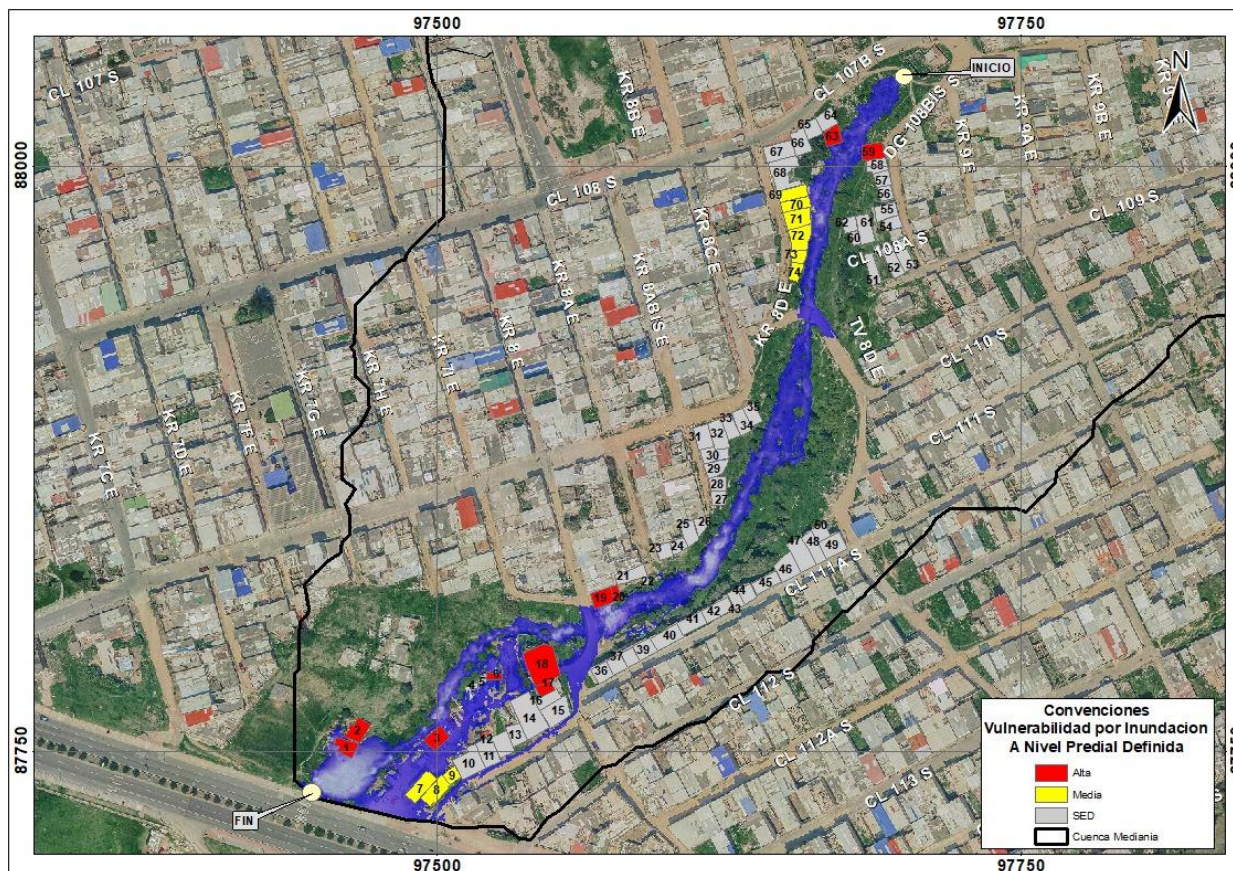
Fuente: Elaboración propia.

SED = Sin Exposición Directa

B1 = Sin sistema estructural o material de recuperación o madera

B2 = Mampostería simple, semiconfinada y prefabricada

Figura 32. Categorización de vulnerabilidad definida a nivel de construcción



Fuente: Elaboración propia.

9.8. Evaluación del Riesgo por Inundación

De acuerdo con lo indicado en el numeral 7.3.3, las matrices de evaluación de riesgo están asociadas a cada uno de los métodos de evaluación de la amenaza, ya sea el propuesto por García et al. (2003) o el del Australian Resilience Institute (2017). En este sentido, el riesgo a nivel de construcción fue estimado mediante estos dos métodos; sin embargo, se adopta la calificación de riesgo relacionada con la metodología de amenaza definida en el numeral 9.6.2.

La Tabla 23 presenta la categorización de riesgo por inundación asignada a cada construcción, información que se ilustra gráficamente en la Figura 33:



Tabla 23. Categorización de riesgo a nivel de construcción

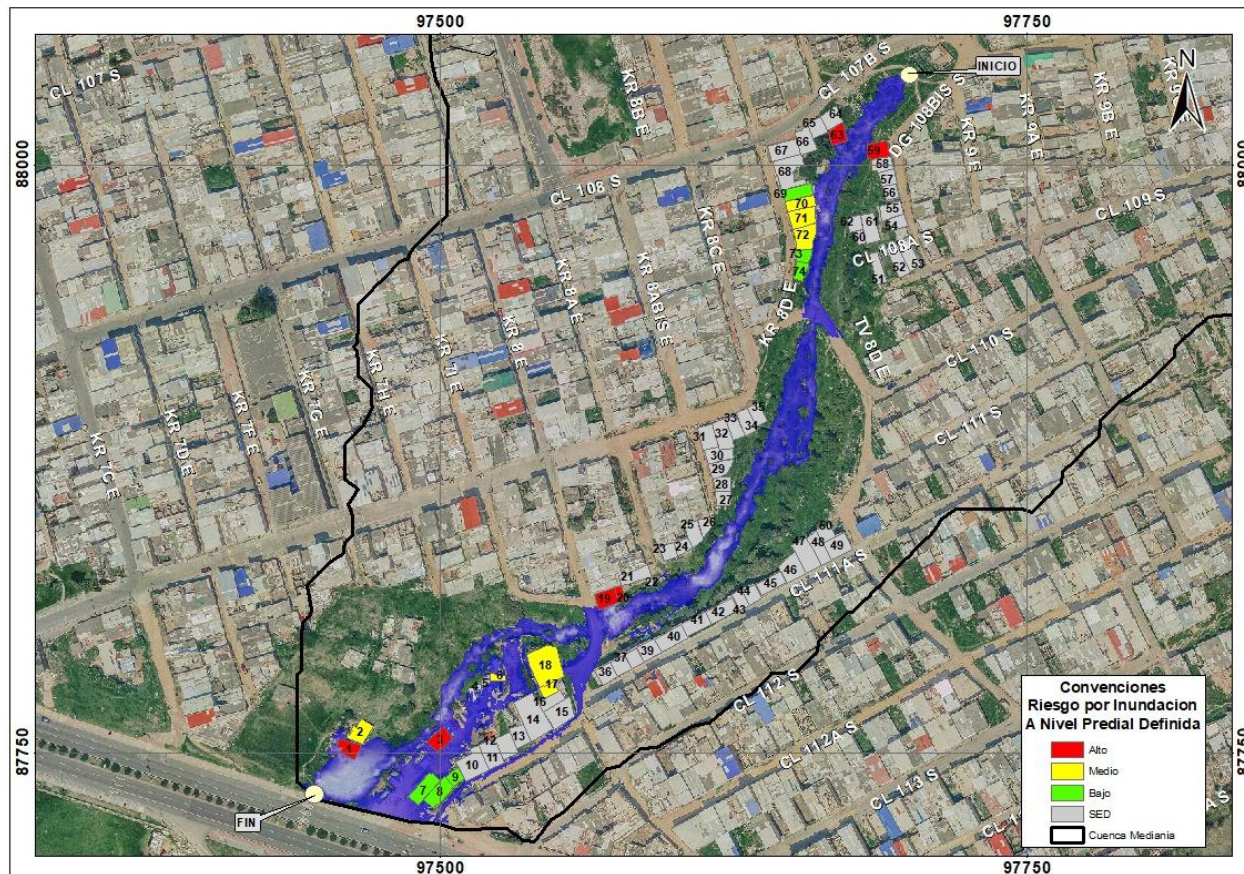
Construcción	Riesgo García et al (2003)	Riesgo Australian Resilience Institute (2017)	Riesgo Definitivo
1	Alto	Alto	Alto
2	Medio	Medio	Medio
3	Alto	Alto	Alto
4	SED	SED	SED
5	SED	SED	SED
6	Medio	Alto	Medio
7	Bajo	Bajo	Bajo
8	Bajo	Bajo	Bajo
9	Bajo	Bajo	Bajo
10	SED	SED	SED
11	SED	SED	SED
12	SED	SED	SED
13	SED	SED	SED
14	SED	SED	SED
15	SED	SED	SED
16	SED	SED	SED
17	Medio	Medio	Medio
18	Medio	Alto	Medio
19	Alto	Alto	Alto
20	Alto	Alto	Alto
21	SED	SED	SED
22	SED	SED	SED
23	SED	SED	SED
24	SED	SED	SED
25	SED	SED	SED
26	SED	SED	SED
27	SED	SED	SED
28	SED	SED	SED
29	SED	SED	SED
30	SED	SED	SED
31	SED	SED	SED
32	SED	SED	SED
33	SED	SED	SED
34	SED	SED	SED
35	SED	SED	SED
36	SED	SED	SED
37	SED	SED	SED
38	SED	SED	SED
39	SED	SED	SED
40	SED	SED	SED
41	SED	SED	SED
42	SED	SED	SED
43	SED	SED	SED
44	SED	SED	SED
45	SED	SED	SED



Construcción	Riesgo García et al (2003)	Riesgo Australian Resilience Institute (2017)	Riesgo Definitivo
46	SED	SED	SED
47	SED	SED	SED
48	SED	SED	SED
49	SED	SED	SED
50	SED	SED	SED
51	SED	SED	SED
52	SED	SED	SED
53	SED	SED	SED
54	SED	SED	SED
55	SED	SED	SED
56	SED	SED	SED
57	SED	SED	SED
58	SED	SED	SED
59	Alto	Alto	Alto
60	SED	SED	SED
61	SED	SED	SED
62	SED	SED	SED
63	Alto	Alto	Alto
64	SED	SED	SED
65	SED	SED	SED
66	SED	SED	SED
67	SED	SED	SED
68	SED	SED	SED
69	Bajo	Bajo	Bajo
70	Bajo	Medio	Medio
71	Medio	Medio	Medio
72	Medio	Alto	Medio
73	Bajo	Bajo	Bajo
74	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: Elaboración propia.
SED = Sin Exposición Directa

Figura 33. Categorización de riesgo definido a nivel de construcción



Fuente: Elaboración propia.

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Según los parámetros indicados en la Tabla 12, la cuenca de la quebrada Medianía tiene un área de 0.21 km² y un terreno escarpado con pendiente media del 31.16%. El factor de forma (Kf) igual a 0.42 indica que la cuenca no es ni alargada ni ensanchada, el coeficiente de compacidad (C) de 1.27 clasifica la cuenca como ovoide oblonga y el índice de alargamiento (I) de 2.38 confirma que la cuenca es moderadamente alargada. Estos parámetros caracterizan una cuenca de respuesta hidrológica intermedia, donde la escorrentía no llega rápidamente al punto de salida, sino que lo hace de forma progresiva.

Sin embargo, estas características morfológicas favorables son superadas por la pendiente del terreno que acelera el flujo superficial para dar a la cuenca un tiempo de concentración de 14.95 min aproximadamente.

- Con respecto a la cobertura del suelo, se estima que la cuenca de la quebrada Medianía tiene un 72.48% de coberturas impermeables que equivalen a 15.33 Ha, frente a un 27.52% de coberturas de pastos y relictos de bosques que corresponden a 5.87 Ha. Este alto porcentaje



de impermeabilidad, combinado con la alta pendiente del terreno, reduce la infiltración de agua en el suelo y genera incrementos de escorrentía superficial, lo que favorece la llegada de caudales altos al cauce.

- Desde el punto de vista hidrológico y a partir de los parámetros obtenidos de las curvas IDF, se establece que para un periodo de retorno de 100 años se obtiene un total de 110.54 mm en un periodo de tiempo de 180 minutos, lo que representa una magnitud considerable de lluvia con capacidad de generar un volumen importante de escorrentía en la cuenca.
- Como se observa en la Tabla 15, los mayores incrementos de lluvia se concentran en los primeros intervalos de tiempo. Para el escenario extremo evaluado, en los primeros 5 minutos se registra el incremento más alto con un valor de 14.93 mm, valor disminuye a medida que avanza el aguacero. Esto puede llevar a una respuesta rápida de la cuenca, debido a que recibe gran cantidad de agua en poco tiempo.
- Al aplicar la distribución mediante el método de bloque alternativo, el hietograma resultante presenta una forma simétrica, donde el mayor aporte de lluvia se presenta en el centro del evento de 3 horas (alrededor de 90 – 95 minutos), esto genera mayores aportes en un mismo instante, favoreciendo picos de caudal elevados en el cauce. Al ocurrir estos picos de lluvia la capacidad de infiltración en zonas permeables puede verse superada incrementando así el nivel de escorrentía superficial.
- En coherencia con la cobertura del suelo, el número de curva (CN) obtenido para la cuenca es de 94.25. Este valor indica que el alto porcentaje de superficies impermeables reduce la capacidad de infiltración del suelo y genera grandes cantidades de escorrentía superficial que circula rápidamente hacia el cauce.
- Los resultados de la modelación en HEC -HMS muestran que para el evento extremo, la cuenca debido a sus características favorece los picos de caudal en periodos cortos de tiempo, lo que conlleva a tener más probabilidad de ocurrencia de inundaciones en sectores susceptibles por intervenciones antrópicas y por disminución de las capacidades hidráulicas.
- Los hidrogramas generados evidencian el comportamiento de la cuenca ante eventos de lluvia para diferentes periodos de retorno, particularmente para el periodo de retorno extremo, se evidencia un pico de caudal de 7.1 m³/s. De acuerdo con su hidrograma, presenta un ascenso y una disminución gradual posterior, reflejando una respuesta típica de cuencas con capacidad limitada de almacenamiento y una reducción de su capacidad de infiltración.
- Este comportamiento favorece que se generen caudales considerables en intervalos cortos de tiempo, incrementado así la incidencia de eventos de inundación en el cauce principal en zonas con una baja capacidad hidráulica. Con base en lo anterior, la cuenca presenta una respuesta hidrológica rápida y una capacidad considerable de generar caudales significativos ante el evento extremo de 100 años.
- El modelo bidimensional desarrollado en el programa HEC-RAS 6.6 permite simular el comportamiento del flujo de agua, estimando niveles, velocidades y áreas afectadas por inundación. La Figura 25 presenta la profundidad de flujo en la quebrada Medianía, se observa que las mayores profundidades se presentan en los siguientes sectores:



- Cauce principal y sectores de curvatura: en estas zonas el encauzamiento natural permite mayor energía de flujo, con profundidades que pueden variar entre 0.1 m y 4.95 m.
- Zona plana previa al cruce de la Vía al Llano: corresponde al sector topográficamente más bajo de la cuenca, caracterizado por pendientes que favorecen la acumulación de flujo, donde se observan profundidades de hasta 4.95 m.

Hacia las márgenes, las profundidades disminuyen de manera progresiva, registrando valores entre 0,1 m y 0,33 m, lo que indica un desbordamiento controlado principalmente por la geometría del valle.

- En general, el patrón longitudinal indica que el flujo mantiene un corredor bien definido a lo largo del eje del cauce, desplazándose de oriente a occidente, con desbordamientos en las secciones entubadas Tubo1 y Tubo2. Esta situación se observa con mayor claridad en el Tubo 2, donde la baja capacidad hidráulica, relacionada con el diámetro y la acumulación de residuos, lleva a que la lámina de agua supere la cota de la vía y genere desbordamiento hacia la Calle 111 Sur con Carrera 8 A Este, donde la profundidad del flujo es de aproximadamente 0.15 m (ver punto A en la Figura 25). En este punto, debido a la inexistencia de una barrera física, el flujo se bifurca; una parte desciende por la Calle 111 Sur, y por condiciones topográficas tiende a unirse al cauce principal. Otra parte, circula por la Calle 111 A Sur, donde una porción del flujo tiende a buscar el cauce principal y otra se estima que podría escurrir sobre la Vía al Llano. (ver área indicada en rojo en la Figura 25).
- Adicionalmente, se generó la distribución espacial de las velocidades de flujo para el mismo período de retorno, como se presenta en la Figura 28. De acuerdo con estos resultados, la quebrada Medianía presenta un patrón de velocidades concentrado en el eje del cauce, donde se registran valores del orden de 1.5 m/s a 5.0 m/s, particularmente en los tramos rectos, las salidas de las curvas y en las entradas y salidas de las secciones entubadas (Tubo 1, Tubo 2 y Tubo 3 – Box Culvert). Hacia las márgenes, se observa una disminución progresiva de la velocidad, con valores comprendidos entre 0.1 y 1.33 m/s. Estos resultados indican que en algunos sectores del cauce se presentan velocidades de flujo mayores de 2 m/s, lo que podría generar procesos de socavación. Sin embargo, el análisis detallado de estos procesos no hace parte del alcance del presente trabajo, que se limita a la evaluación de inundaciones de tipo fluvial por desbordamiento.
- En cuanto a la zonificación de amenaza, se observa que la elaborada con los criterios del Australian Resilience Institute (2017) es más conservadora porque presenta mayor extensión de zonas con categorización de amenaza alta. Sin embargo, los dos mapas convergen al mostrar que las zonas de amenaza alta y media se concentran en el cauce y que la amenaza disminuye progresivamente hacia las márgenes, hasta llegar a una condición baja.
- Los mapas también muestran que desde la sección entubada 2 se extienden zonas de amenaza media y baja sobre las vías, prolongándose alrededor de las viviendas construidas entre las Calles 111 Sur y 111 A Sur con Carreras 8A Este y 8 Este. De igual forma, se identifica una zona con amenaza alta antes el cruce con la Vía al Llano, donde se obtuvieron las mayores profundidades de flujo.



- A partir de fotografías aéreas y de información del IDECA se identificaron y georreferenciaron las edificaciones localizadas en las zonas de inundación, para adelantar la categorización de amenaza a nivel de construcción. Para cada una se definió el nivel de amenaza según los criterios de García et al. (2003) y el Australian Resilience Institute (2017), pero finalmente se adoptó la calificación que mejor representa las condiciones actuales, respetando los resultados de la modelación hidráulica. De las 74 construcciones evaluadas, el 2.7% (2 construcciones) presenta amenaza alta, el 8.1% (6 construcciones) amenaza media, el 14.9% (11 construcciones) amenaza baja y el 74.3% (55 construcciones) restante no presenta amenaza por inundación.
- Se estima que de las 74 construcciones ubicadas en el área de influencia de la quebrada, el 13.51% (10 construcciones) tiene vulnerabilidad alta. Para estas se estiman valores de IVF superiores a 0.7, que se deben principalmente a dos condiciones: (i) su tipología B1, es decir falta de sistema estructural debido a que están construidas con materiales de recuperación y madera, y (ii) el hecho de ser en su mayoría construcciones de un piso, lo que las expone en su totalidad ante una inundación.
- Por otra parte, se estima que el 12.16% de las construcciones presenta vulnerabilidad media, con valores de IVF entre 0.33 y 0.7. La mayoría de estas construcciones cuentan con dos niveles y tienen tipología B2, es decir que son de mampostería simple, semiconfinada y/o prefabricada, lo que en conjunto determina una menor exposición ante eventos de inundación en comparación con las construcciones de vulnerabilidad alta.
- Finalmente, 55 construcciones equivalentes al 74.32% del total, se clasifican como Sin Exposición Directa- SED, debido a que se encuentran por fuera de la mancha de inundación estimada.
- Para la evaluación de riesgo a nivel de construcción, se adopta la calificación de riesgo relacionada con la metodología de amenaza definida en el numeral 9.6.2. Los resultados indican que el 8.11 % (6 construcciones) presentan riesgo alto, el 9.46% (7 construcciones) tienen riesgo medio y otro 8.11 % (6 construcciones) tienen calificación de riesgo bajo. El 74.32% restante, equivalente a 55 edificaciones se clasifica como Sin Exposición Directa (SED).
- Los resultados del presente trabajo muestran la relación que existe entre la amenaza, la vulnerabilidad física de las edificaciones y el riesgo por inundación. Por una parte, la modelación hidráulica permite definir la magnitud y extensión espacial de la amenaza en el territorio. Esta amenaza interactúa con las características constructivas de las edificaciones y con su proximidad a la mancha de inundación; de este modo, una construcción de tipología B1, es decir, (materiales de recuperación), de un solo piso y ubicada en inmediaciones de la zona inundable, presenta una vulnerabilidad física alta debido a su limitada capacidad para resistir los efectos de una inundación.
- El riesgo resulta de la combinación entre la amenaza y la vulnerabilidad, de manera que el escenario descrito anteriormente, donde confluyen una amenaza alta y una vulnerabilidad alta, configura una condición de riesgo alto que justifica la adopción de medidas prioritarias de intervención.



De este modo, la categorización de riesgo alto para seis construcciones no se debe únicamente a su ubicación en la zona inundable, sino a la convergencia de una amenaza hidráulica alta con unas características constructivas que reducen considerablemente la capacidad de resistir los efectos de una inundación. En este sentido, los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo constituyen la base de una adecuada gestión territorial.

Componente Territorial y Social

Los resultados muestran que las condiciones de riesgo identificadas en la cuenca de la quebrada Medianía no dependen únicamente del comportamiento hidrológico e hidráulico de la zona, sino también de problemáticas sociales asociadas con procesos de urbanización descontrolada, ocupación informal de la ronda hídrica e intervenciones antrópicas sobre el territorio.

La urbanización descontrolada está asociada con población de escasos recursos e incluso con población desplazada que se ve obligada a asentarse en zonas de amenaza, debido a la falta de oportunidades y a las limitaciones de la gestión institucional y gubernamental para garantizar el acceso a vivienda segura.

En muchos casos, las familias con menores recursos económicos terminan construyendo viviendas precarias con materiales de recuperación, ubicadas incluso dentro de la ronda hídrica, lo que incrementa considerablemente su nivel de exposición frente a eventos de inundación. De este modo, además de las condiciones de vulnerabilidad social y económica preexistentes, estas comunidades aumentan su nivel de vulnerabilidad al establecer sus viviendas en zonas de amenaza, quedando expuestas de manera permanente a inundaciones y otras situaciones de riesgo asociadas con la dinámica de la quebrada.

Por lo anterior, la gestión del riesgo en la zona requiere no solo medidas hidráulicas, sino también estrategias de control territorial, seguimiento institucional y recuperación de la ronda hídrica, así como procesos de sensibilización y planificación territorial orientados a reducir futuros escenarios de afectación en la cuenca de la quebrada Medianía.

11. LIMITACIONES

Modelo Hidrológico

Con respecto al modelo hidrológico, una de las principales limitaciones corresponde a la falta de información hidrometeorológica local, ya que la estación Colegio Ciudad de Villavicencio (IED) localizada cerca del área del estudio no cuenta con registros suficientes para desarrollar análisis estadísticos de lluvias. Por lo anterior, se utilizaron las curvas IDF desarrolladas por INGETEC SA (2015) para la EAAB-ESP, que corresponden a una regionalización hidrológica para el Distrito Capital. Los coeficientes de las curvas IDF que se obtienen a partir de la metodología planteada por INGETEC (2015) son un insumo avalado por la EAAB-ESP para el desarrollo de los análisis y diseños hidrológicos e hidráulicos asociados a obras de alcantarillado pluvial. A pesar de ello, su aplicación conlleva a cierto nivel de incertidumbre, porque no contempla posibles variaciones espaciales y temporales de las lluvias dentro de la cuenca.



Por otra parte, la modelación en HEC-HMS es una simplificación del comportamiento de la cuenca, en la cual se consideran parámetros como el número de curva, el tiempo de concentración y distribuciones sintéticas de precipitación. Por consiguiente, los resultados son válidos para las coberturas existentes al momento de realizar el vuelo fotogramétrico con dron, que a la fecha de procesamiento de la información presentan un porcentaje de impermeabilidad del 72.48%, lo que evidencia un alto nivel de intervención antrópica en la cuenca.

Los resultados son sensibles a los cambios de cobertura del terreno a lo largo del tiempo, por ejemplo, un aumento de las áreas impermeables puede generar incrementos en la escorrentía superficial y, en consecuencia, mayores caudales pico en las simulaciones hidrológicas.

Modelo Hidráulico

La simulación bidimensional desarrollada en HEC-RAS es una simplificación del comportamiento real del flujo en eventos extremos de precipitación. Aunque en el modelo se incluyeron las principales estructuras hidráulicas identificadas sobre la quebrada Medianía (Tubo 1, Tubo2, Box Culvert de salida), es importante señalar que pueden existir variaciones geométricas locales y obstrucciones no consideradas en la modelación que pueden influir en la capacidad hidráulica y en los resultados del análisis de inundación.

Por otro lado, a pesar de realizar visitas de campo en la zona, un vuelo fotogramétrico con dron y un procesamiento riguroso de la información, en cuanto al filtrado de la nube de puntos y la obtención de un Modelo Digital de Terreno con una resolución espacial de 0.20 m x 0.20 m, la incertidumbre es inherente a cualquier representación topográfica. Por tanto, es posible que algunas condiciones del terreno no estén adecuadamente representadas, lo que puede influir en las velocidades y profundidades del flujo, y en la delimitación de las manchas de inundación.

Validación de los Modelos

Debido a la limitada información de eventos históricos documentados y a la falta de instrumentación para la medición de caudales en la cuenca, no fue posible realizar procesos de calibración hidráulica ni validación de caudales, profundidades de lámina de agua o velocidades del flujo. No obstante, la modelación hidráulica desarrollada se fundamentó en información topográfica de alta resolución espacial, así como en criterios técnicos y metodologías ampliamente utilizadas y aprobadas para el desarrollo de estudios hidrológicos e hidráulicos asociados al análisis de inundaciones.

Los resultados alcanzados en el presente documento son una aproximación técnicamente sustentada del comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca, por tanto, están sujetos a incertidumbres asociadas a la disponibilidad de información histórica, la falta de datos hidrometeorológicos locales (series de precipitación y caudales), y las limitaciones propias de un Modelo Digital del Terreno.

Restricciones temporales del análisis

Los resultados del presente trabajo se basan en las condiciones observadas durante las visitas de campo, el vuelo fotogramétrico, las estructuras identificadas en el cauce de la quebrada y la



cobertura del terreno en el momento del vuelo. En este orden, los análisis tienen validez para un momento y unas condiciones específicas, de manera que es un estudio de carácter temporal. La intervención antrópica es un factor determinante en la cuenca de la quebrada Medianía, y su carácter dinámico puede llevar a intervenciones en el cauce, transformaciones en la cobertura del suelo o alteraciones en las estructuras hidráulicas. Estos cambios implicarían pérdida de representatividad de los resultados y que sea necesario actualizar el estudio bajo las nuevas condiciones.

12. MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Luego del análisis realizado, a continuación, se presentan las medidas de mitigación a nivel conceptual para la disminución del riesgo por inundación, encaminadas a la gestión del uso del suelo en la cuenca y aumentar la capacidad hidráulica.

Las medidas propuestas se plantean de forma secuencial, iniciando desde medidas de baja complejidad e inversión hasta llegar a intervenciones integrales que abarcan espacialmente toda el área de la cuenca e implican mayor costo económico:

Gestión Comunitaria del Riesgo

Se recomienda adelantar una caracterización socioeconómica y cultural de la población ubicada en el área de influencia de la quebrada. A partir de esta información, se recomienda que las entidades distritales y/o locales, junto a la comunidad, desarrollen campañas de sensibilización ambiental, implementen estrategias para prevenir el vertimiento de residuos y escombros, promuevan proyectos de revegetalización, organicen actividades de limpieza y ejerzan control y vigilancia para evitar nuevas construcciones en la zona de ronda de la quebrada. Acciones de este tipo deben hacerse periódicamente, para reducir el riesgo de obstrucciones, inundaciones y el impacto ambiental en la quebrada y sus zonas aledañas.

Manejo de Ronda Hídrica y Control de Urbanización Informal

Producto del análisis se determinó que existen actualmente seis construcciones identificadas como 1, 3, 19, 20, 59 y 63 con alto riesgo de inundación, ubicadas en proximidad al cauce de la quebrada. Para el caso de la construcción 1, esta se encuentra en el sector más susceptible de inundación debido a sus condiciones topográficas y a que según la modelación la profundidad de flujo en esta zona es de alrededor de 4 m, esto se valida de acuerdo con lo reportado por la comunidad.

La construcción 3 por su parte corresponde a una caseta de almacenamiento, pero debido a su cercanía al cauce presenta alto riesgo de inundación y arrastre debido a los materiales que la conforman. Con respecto a las construcciones 19 y 20 estas se encuentran en alto riesgo por inundación ya que según la modelación hidráulica la lámina de agua intercepta directamente estas edificaciones debido a su ubicación en la margen derecha de la quebrada. De igual manera se identificaron las construcciones 59 y 63 con alto riesgo de inundación asociada a la expansión lateral de la mancha de inundación en este sector, alcanzando la ubicación de estas construcciones.



Por lo anterior, con el fin de proteger la vida y la integridad de las personas que habitan en estos predios, se recomienda que las entidades distritales adelanten procesos de reasentamiento en estas construcciones. Para esto, es importante que las entidades no solo se fijen en los temas jurídicos, administrativos y normativos, sino que también planteen alternativas de adquisición justas y eficientes de acuerdo con la caracterización socioeconómica y cultural de la población, para que los procesos sean justos, participativos y respetuosos con la comunidad afectada.

Una vez finalizados los procesos de reasentamiento, se recomienda que las entidades distritales y/o locales implementen cerramientos y señalización para evitar futuros asentamientos en las zonas que fueron recuperadas. De igual forma, se recomienda que la institucionalidad y la comunidad trabajen en conjunto para ejercer control y vigilancia y evitar nuevas construcciones en la ronda hídrica y la cuenca alta.

Recuperación Ecológica de la Quebrada

Se recomienda adelantar obras y medidas de conservación, recuperación y mantenimiento de la quebrada. Posteriormente, se recomienda adelantar obras de reconformación hidráulica que pueden incluir la ampliación del cauce, el perfilado de las márgenes, la estabilización y revegetalización de taludes. Lo anterior, con el fin de aumentar la capacidad de transporte del cauce y garantizar el paso de los caudales generados durante eventos de lluvia extremos.

Evaluación de los Sistemas de Alcantarillado Sanitario y Pluvial

De acuerdo con los resultados de la modelación hidráulica desarrollada en HEC-RAS, las secciones entubadas definidas en el presente trabajo como Tubo 1, Tubo 2 y Tubo 3 (Box Culvert) no cuentan con la capacidad hidráulica suficiente para conducir los caudales estimados para un período de retorno de 100 años. Por esta razón, se recomienda adelantar estudios y diseños que permitan analizar a detalle esta condición y definir las dimensiones (diámetro, número de tubos, etc) que permitan el tránsito de los caudales pico.

Otra medida de mitigación consiste en adelantar estudios y diseños detallados que incluyan el diagnóstico integral del sistema de alcantarillado sanitario y pluvial del sector. Entre otras cosas, dichos estudios deberán evaluar si la capacidad del sistema es suficiente para atender la demanda de la cuenca e identificar posibles conexiones erradas que aporten caudales de agua residual a la quebrada.

Esto es particularmente importante porque el aporte de aguas residuales puede ser crítico durante eventos de lluvia intensa, al sumarse al caudal generado por la escorrentía superficial. Con base en estos resultados, los estudios deben formular las obras y medidas necesarias para solucionar las deficiencias encontradas y garantizar un adecuado desempeño de las redes de alcantarillado sanitario y pluvial del sector. Cabe mencionar que la utilidad de los estudios y diseños está en la ejecución de las medidas y obras propuestas y no solo en su formulación.

Monitoreo Hidrometeorológico Local

Es pertinente implementar un sistema de monitoreo hidrometeorológico local, que incluya estaciones pluviométricas, limnimétricas o limnigráficas, para medir y registrar de forma continua



las lluvias en la cuenca y los caudales en la quebrada. Estas mediciones junto con análisis de riesgos permitirán plantear un sistema de alerta temprana para anticipar eventos de inundación y reducir la exposición de la población localizada en las zonas de mayor susceptibilidad.

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) pueden ser una medida efectiva para la mitigación del riesgo de inundación. Estos sistemas incluyen jardines de lluvia, pavimentos permeables, zanjas de infiltración, techos verdes y tanques de almacenamiento de aguas lluvias, los cuales favorecen la infiltración, retención y almacenamiento temporal de agua. Esto puede reducir la escorrentía superficial producto de la alta impermeabilización del suelo y por ende disminuir los caudales pico. Sin embargo, la viabilidad y efectividad de estas medidas en la cuenca de estudio debe ser evaluada en futuros estudios, porque su análisis e implementación no están dentro del alcance del presente trabajo.

13. CONCLUSIONES

- Los análisis hidrológicos e hidráulicos, soportados en modelaciones con HEC-HMS y HEC-RAS 2D, permitieron determinar lo siguiente:

La cuenca tiene una respuesta rápida ante eventos de precipitación. Los parámetros factor de forma ($= 0.42$), coeficiente de compacidad ($= 1.27$) e índice de alargamiento ($= 2.38$) indican una respuesta hidrológica intermedia, pero la pendiente media del 31.16% y el alto porcentaje de zonas impermeabilizadas resultan en un tiempo de concentración de 14.95 min y un CN de 94.25, lo que significa que la mayor parte de las lluvias se pueden convertir en escorrentía, generando caudales pico importantes en un periodo corto de tiempo.

El hidrograma obtenido en HEC-HMS para un periodo de retorno de 100 años muestra un caudal pico de $7.1 \text{ m}^3/\text{s}$, con una curva de concentración pronunciada que indica que la escorrentía se transforma rápidamente en caudal, y una curva de descenso más lenta pero no muy extendida, lo que señala que el agua sale sin tener mayor almacenamiento en la cuenca. Este comportamiento se debe principalmente a factores como la alta pendiente del terreno y el alto porcentaje de coberturas impermeables.

Según la modelación hidráulica desarrollada en HEC-RAS para el hidrograma de 100 años, en general las mayores profundidades de flujo se concentran en el cauce principal y en los sectores de curvatura. Sin embargo, la mayor profundidad de flujo (4.95 m) se presenta en la zona plana ubicada antes del cruce con la Vía al Llano y el Tubo 3 (box culvert), donde las condiciones topográficas favorecen la acumulación de flujo.

En general, el modelo hidráulico muestra que el flujo se mantiene dentro del eje del cauce, sin embargo, en las secciones entubadas Tubo1 y Tubo2 se evidencian desbordamientos que pueden asociarse con la baja capacidad hidráulica de las tuberías existentes. Específicamente, en el Tubo2 el flujo supera la rasante de la vía y se extiende sobre la malla vial, alcanzando profundidades de hasta 15 cm y siguiendo trayectorias definidas por la topografía del terreno.



Con respecto a las velocidades, la quebrada presenta un patrón de velocidades concentrado en el eje del cauce, donde se registran valores del orden de 1.5 m/s a 5.0 m/s, particularmente en los tramos rectos, las salidas de las curvas y en las entradas y salidas de las secciones entubadas. Estos resultados indican que en algunos sectores del cauce podrían ocurrir procesos de socavación.

Aunque el presente trabajo tuvo como alcance la evaluación de inundaciones fluviales (por desbordamiento), los resultados indican que este podría no ser el evento con mayor impacto en la cuenca. El tiempo de concentración de 14.95 minutos, el alto caudal pico y las altas velocidades de flujo parecen indicar que los eventos más determinantes en la cuenca pueden ser las crecientes súbitas y las avenidas torrenciales.

Se recomienda que futuros trabajos e investigaciones desarrollen análisis de inundaciones con arrastre de sedimentos, crecientes súbitas o avenidas torrenciales, procesos de socavación, y movimientos en masa en las márgenes de la quebrada.

- Se definió la zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación en el área de interés, aplicando las metodologías avaladas por IDIGER (2023) y el desarrollo del análisis a nivel predial, encontrando lo siguiente:

La zonificación de amenaza por inundación se adelantó aplicando los criterios de García et al. (2003) y el Australian Resilience Institute (2017). Independientemente de la metodología aplicada, se concluye que las zonas de amenaza alta y media se concentran en el eje del cauce y disminuyen progresivamente hacia las márgenes.

Los dos mapas coinciden en asignar calificación de amenaza alta a la zona topográficamente más baja de la cuenca (desembocadura), donde se obtuvieron las mayores profundidades de flujo. Asimismo, en los dos mapas se observa que desde la sección entubada 2 se extienden zonas de amenaza media y baja sobre las vías localizadas entre las Calles 111 Sur y 111 A Sur con Carreras 8A Este y 8 Este, resultado consistente con las profundidades de flujo previamente identificadas en este sector.

A partir de fotografías aéreas y de información del IDECA se identificaron y georreferenciaron 74 edificaciones localizadas en las zonas de inundación, para adelantar la categorización de amenaza, vulnerabilidad y riesgo a nivel de construcción. La zonificación de amenaza permitió identificar que, aunque la mayoría de los predios no presentan exposición directa, existe un 10.8% de construcciones en amenaza media y alta, lo cual, sumado a la vulnerabilidad física por materiales precarios (vulnerabilidad alta en 13.51%), configura un escenario de riesgo crítico para 6 viviendas específicas

- En el desarrollo del presente trabajo se formulan medidas y obras de tipo conceptual para mitigar el riesgo de inundación en la quebrada Medianía. Estas se plantean de forma secuencial, iniciando desde medidas de baja complejidad e inversión hasta llegar a intervenciones integrales que abarcan espacialmente toda el área de la cuenca e implican mayor costo económico. Estas incluyen la caracterización socioeconómica y cultural de la población, campañas de sensibilización ambiental, control del vertimiento de residuos y escombros, proyectos de revegetalización, el reasentamiento de las construcciones en riesgo



alto, obras de conservación y recuperación del cauce, obras de reconfiguración hidráulica en tramos críticos, y el diagnóstico integral del sistema de alcantarillado sanitario y pluvial del sector, incluyendo la identificación y eliminación de conexiones erradas.

14. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que las entidades distritales y locales utilicen este trabajo como insumo para priorizar los sectores de intervención y fortalecer la gestión territorial. Una vez finalizados los procesos de reasentamiento de las seis construcciones con alto riesgo de inundación se recomienda hacer la señalización y el cerramiento del terreno, y que las instituciones hagan control y vigilancia permanente para evitar nuevas construcciones en la ronda.
- Se recomienda a las entidades distritales y locales aplicar programas de caracterización socioeconómica y cultural para que los procesos de reasentamiento sean justos y participativos. Asimismo, las instituciones deben liderar campañas de sensibilización ambiental y estrategias participativas, integrando a los habitantes de los barrios cercanos para que realicen jornadas periódicas de limpieza, participen en programas de revegetalización y mantenimiento de la ronda hídrica, y adelanten vigilancia continua para evitar reasentamientos en zonas de alto riesgo.
- Se recomienda adelantar intervenciones de recuperación, restauración, mantenimiento y conservación ambiental de la quebrada Medianía. Estas acciones deben estar encaminadas a mejorar las condiciones ecosistémicas del cauce y su ronda, priorizando la implementación de soluciones basadas en la naturaleza. Se recomienda enfocar las intervenciones en los tramos críticos y en zonas con construcciones próximas a la mancha de inundación. Es importante que todas las labores se adelanten de forma coordinada con la comunidad, para generar sentido de pertinencia y hacer de la quebrada un corredor ambiental protegido y no un receptor de escombros y basuras.
- Se recomienda que las entidades locales inicien los procesos de adquisición y puesta en marcha de equipos de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca de la quebrada mediana, que permitan la transmisión de datos en tiempo real con el fin de realizar su incorporación al sistema de alerta temprana de Bogotá, garantizando una reacción institucional y comunitaria oportuna en la cuenca.
- Debido al alto índice de impermeabilidad de la cuenca que se estima en cerca de 72.48%, se recomienda que futuros diseños de infraestructura vial y de espacio público en el sector incorporen, o al menos evalúen, la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS). Estas soluciones pueden favorecer la reducción natural de los caudales pico, contribuyendo a prevenir riesgos asociados a inundaciones.
- Debido a las condiciones hidrológicas se observa que uno de los eventos más determinantes que se pueden presentar en la cuenca son las crecientes súbitas y las avenidas torrenciales. Por lo anterior se reitera la recomendación de que futuros trabajos de investigación aborden este tipo de eventos, así como los procesos de socavación y movimientos en masa en las márgenes de la quebrada, para hacer una caracterización integral de las condiciones de amenaza y riesgo en la cuenca.



15. BIBLIOGRAFIA

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010). Decreto 523 de 2010: Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C. Alcaldía Mayor de Bogotá.

Australian Institute for Disaster Resilience (2017) Australian Disaster Resilience Handbook Collection Flood Hazard. Available at: <https://knowledge.aidr.org.au/media/3518/adr-guideline-73.pdf>.

Castillo García, C. L., & Carvajal González, V. M. (2023). Modelación hidrológica de la cuenca urbana del río Bélico en la ciudad de Santa Clara, Cuba. Enfoque UTE. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.888>

CivilWeb Spreadsheets. (s.f.). Manning coefficient – sheet flow. <https://civilweb-spreadsheets.com/drainage-design-spreadsheets/runoff-and-rainfall-intensity-calculator-spreadsheet/manning-coefficient-sheet-flow/>

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada (J. G. Saldarriaga, Trad.). McGraw-Hill Interamericana.

EAAB-ESP. (2024). Criterios de diseño para sistemas de alcantarillado (Norma Técnica NS-085, Versión 4.0). Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A., Thouret, J., Manville, V., & Llerena, N. (2016). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541, 563-581.

García, R., López, J., Noya, M., Bello, M., González, & O'Brien, J. (2003). Hazard mapping for debris flow events in the alluvial fans of northern Venezuela. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. Róterdam.

Godfrey, A., Ciurean, R., Van Westen, C., Kingma, N., & Glade, T. (2015). Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach—An application in Nehoiu Valley, Romania. *International journal of disaster risk reduction* (13), 229-241.

IDIGER. (2023). Evaluación de riesgos por inundaciones y avenidas torrenciales de la cuenca Quebrada Limas- Zonificación de amenaza y riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales. Bogotá D.C

INGETEC S.A. (2015). Caracterización de tormentas y actualizaciones de curvas de intensidad–duración–frecuencia (IDF). Contrato 1-02-25500 1318-2013.

Krest Engineers. (2021). Canopy interception, surface storage, and evapotranspiration (ET). RASHMS. Recuperado el 29 de enero de 2026, de <https://rashms.com/blog/canopy-interception-surface-storage-and-evapotranspiration-et/>



Leal, M., Reis, E., Pereira, S., & Santos, P. (2021). Physical vulnerability assessment to flash floods using an indicator-based methodology based on building properties and flow parameters. *Journal of Flood Risk Management*, 14(3). Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jfr3.12712>

Monsalve Sáenz, G. (2023). Estudios hidrológicos e hidráulicos y de determinación del nivel de inundación para la formulación y adopción del Plan Parcial No. 29 - Mudela del río dentro del Plan de Ordenamiento Zonal del Norte, Bogotá D.C. (Informe final). Fernando Mazuera y Cía. S.A.

Reese, S., & Ramsay, D. (2010). RiskScape: Flood fragility methodology. Wellington. Recuperado de: <https://www.wgtn.ac.nz/sgees/research-centres/documents/riskscape-flood-fragility-methodology.pdf>

Smith, G., Davey, E., & Cox, R. (2014). Flood Hazard WRL Technical Report 2014/07. Sydney. Recuperado de: <https://knowledge.aidr.org.au/media/2334/wrl-flood-hazard-technical-report-september-2014.pdf>

Suárez Díaz, J. (2021). Control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander. <https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales/>

U.S. Army Corps of Engineers. (s.f.). Energy loss coefficients. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/6.6/basic-data-requirements/geometric-data/energy-loss-coefficients>

U.S. Army Corps of Engineers. (s.f.). SCS curve number loss model. Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS). <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/canopy-surface-infiltration-and-runoff-volume/infiltration/scs-curve-number-loss-model>

U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2009). National engineering handbook: Part 630 hydrology, chapter 7: Hydrologic soil groups (210-VI-NEH). <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1712930597/11905.pdf>

Texas Department of Transportation (TxDOT). (s.f.). Manning's roughness coefficient values. <https://www.txdot.gov/manuals/des/hyd/chapter-4--hydrology/section-11--time-of-concentration/manning-s-roughness-coefficient-values.html>



ANEXOS



ANEXO 1. Modelación Hidrológica en HEC-HMS



ANEXO 2. Modelación del Box Culvert en HY8



ANEXO 3. Modelación Hidráulica en HEC-RAS