

**DELIMITACIÓN DE LA RONDA HÍDRICA Y ZONIFICACIÓN DEL RIESGO DEL
RÍO BOGOTÁ EN EL MUNICIPIO DE VILLAPINZÓN BASADO EN LA
MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA**

AUTORES

**CARLOS ANDRÉS CASTAÑEDA DÍAZ
JEIMMY LORENA OCAMPO RODRÍGUEZ**



PROYECTO DE GRADO

**MSc. DARWIN MENA RENTERÍA
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTADES DE INGENIERÍA AMBIENTAL E INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2019**

CONTENIDO

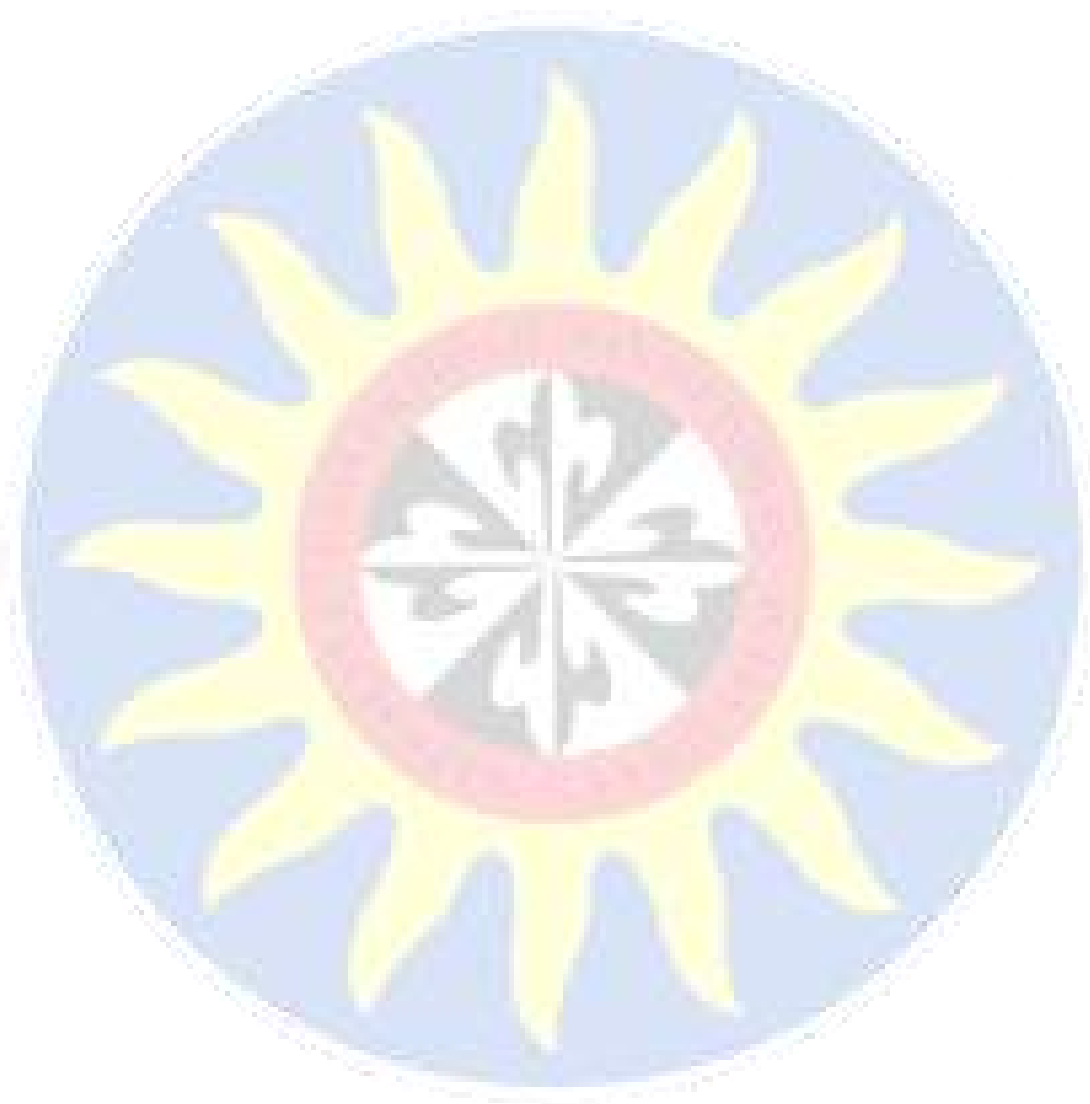
1. RESUMEN.....	9
2. ABSTRACT.....	9
3. INTRODUCCIÓN.....	10
4. OBJETIVOS.....	11
4.1 OBJETIVO GENERAL	11
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
5. MARCO CONTEXTUAL	11
5.1 Modelación de flujo en ríos	11
5.2 Modelación hidráulica unidimensional.....	11
5.3 Datos de entrada para modelación hidráulica	12
5.4 Modelación de inundaciones.....	12
5.5 Gestión del riesgo	12
6. MARCO TEÓRICO.....	13
6.1. Ronda hídrica.....	13
6.2. Componentes de las rondas hídricas.....	13
6.3. Métodos para delimitar ronda hídrica.....	14
6.4. Inundación	16
6.5. Amenaza por inundación	17
6.6. Vulnerabilidad	17
6.7. Riesgo por inundación	17
6.8. Modelación hidráulica	18
6.8.1 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System).....	19
6.9. Marco legal	19
6.10. Descripción del área de estudio.....	19
6.11. Aspectos climáticos	20
7. METODOLOGIA.....	28
7.1. Caracterización hidrológica	28
7.1.1. Delimitación de la Cuenca	28
7.2. Características morfométricas de la cuenca aferente al área de estudio.	29
7.3. Estimación de caudales máximos.....	33

7.3.3. Cálculo Caudales máximos	36
8. MODELAMIENTO HIDRÁULICO.....	37
8.1 Secciones Transversales	37
8.2. INFORMACIÓN DE FLUJO	40
8.3. MODELO.....	41
8.3.1 Caudal Máximo.....	41
8.3.2 Secciones Transversales.....	42
8.3.3 Calibración del modelo	43
9. ZONIFICACIÓN DEL RIESGO	49
9.2. INTRODUCCIÓN	49
9.3. ANTECEDENTES DE INUNDACIÓN.....	49
9.4. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA.....	50
9.5. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD	51
9.6. ESTIMACIÓN DEL RIESGO	51
9.7. METODOLOGÍA PARA EL ANALISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO ANTE INUNDACIONES	52
10. ANALISIS MANCHAS DE INUNDACIÓN.....	57
10.1. Periodo de Retorno T = 2 años.....	57
10.1.1 Zona 3.....	57
10.1.2 Zona 1.....	57
10.1.3 Zona 2.....	57
10.1.4 Zona 4.....	57
1.1. Periodo de Retorno 5 años	58
5.2.1 Zona 3.....	58
5.2.2 Zona 1.....	58
5.2.3 Zona 2.....	58
5.2.4 Zona 4.....	59
1.2. Periodo de Retorno 10 Años	59
5.3.1 Zona 3.....	59
5.3.2 Zona 1.....	59
5.3.3 Zona 2.....	59
5.3.4 Zona 4.....	60
1.3. Periodo de Retorno 20 Años.....	60

5.4.1 Zona 3.....	60
5.4.2 Zona 1.....	60
5.4.2 Zona 2.....	60
5.4.4 Zona 4.....	61
1.4. Periodo de Retorno T= 50 años	61
5.5.1 Zona 3.....	61
5.5.2 Zona 1.....	62
5.5.3 Zona 2.....	62
5.5.4 Zona 4.....	63
1.5. Periodo de retorno 100 años.....	63
5.6.2 Zona 3.....	64
5.6.2 Zona 1.....	65
5.6.3 Zona 2.....	65
5.6.4 Zona 4.....	65
1.6. Periodo de Retorno 200 años	66
5.7.1 Zona 3.....	66
5.7.2 Zona 1.....	67
5.7.3 Zona 2.....	67
5.7.4 Zona 4.....	68
1.7. Periodo de Retorno 500 años	68
5.8.1 Zona 3.....	68
5.8.2 Zona 1.....	69
5.8.3 Zona 2.....	69
5.8.4 Zona 4.....	70
CONCLUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	81

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ronda hídrica.....	13
Ilustración 2. Dirección y velocidad del viento en Villapinzón.....	27

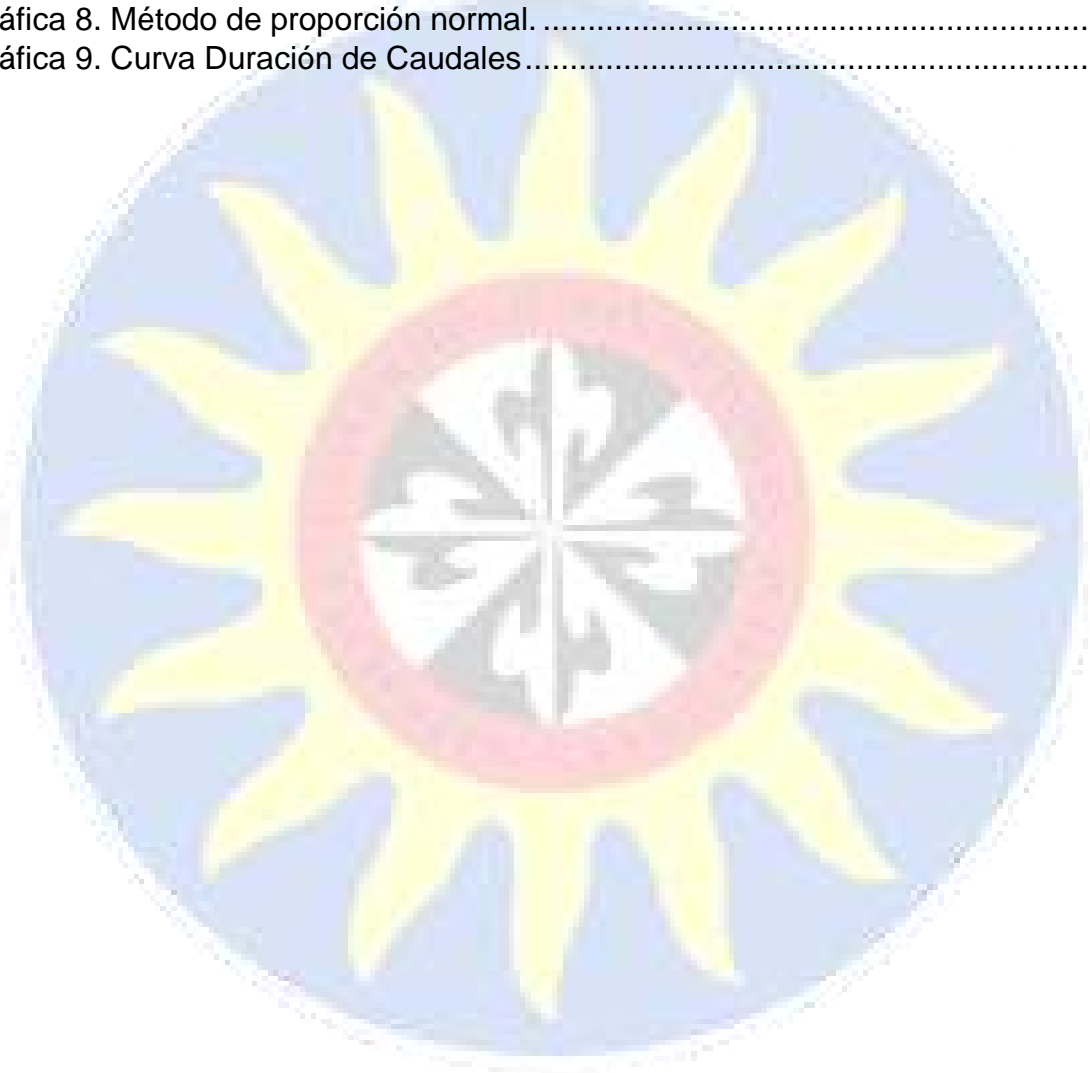


CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Datos de precipitación.....	21
Tabla 2. Datos de temperatura.....	22
Tabla 3. Datos de Humedad Relativa.....	23
Tabla 4. Datos de evaporación.....	24
Tabla 5. Datos Brillo Solar.....	26
Tabla 6. Pendiente media de la cuenca.	30
Tabla 7. Altura media de la cuenca.	31
Tabla 8. Descripción paso a paso de la prueba de bondad de ajuste.....	35
Tabla 9. Comparación entre D y Do para seleccionar la distribución que más se ajusta.....	36
Tabla 10. Caudal máximo de los diferentes periodos de retorno.	37
Tabla 11. Número de Manning del tramo de estudio.....	38
Tabla 12. Caudal máximo para los periodos de retorno establecidos para el municipio de Villapinzón.....	41
Tabla 13. Valores de referencia de Nash-Sutcliffe	44
Tabla 14. Históricas de inundación ocurridas en el municipio de Villapinzón.....	50
Tabla 15. Matriz de relación de los niveles de vulnerabilidad y peligro para obtener el nivel del riesgo de las zonas estudiadas en el municipio de Villapinzón.	56
Tabla 16. Constante $\sqrt{N\alpha\sigma^m}$ en función de ϕ	100
Tabla 17. Constante σ en función de N.....	100
Tabla 18. Intervalo de confianza calculado de acuerdo al periodo de retorno establecido para el municipio de Villapinzón.....	101
Tabla 19. Caudal máximo para los periodos de retorno establecidos para el municipio de Villapinzón.....	102

CONTENIDO DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Precipitación.	21
Gráfica 2. Temperatura.	23
Gráfica 3. Humedad Relativa.	24
Gráfica 4. Evaporación.	25
Gráfica 5. Brillo Solar.	26
Gráfica 6. Rosa de los vientos.	27
Gráfica 7. Frecuencias de las velocidades del viento.	27
Gráfica 8. Método de proporción normal.	33
Gráfica 9. Curva Duración de Caudales.	44



CONTENIDO DE IMAGENES

Imagen 1. Descripción del canal que denota el inicio de la zona urbana del municipio.	38
Imagen 2. Representación de la zona de difícil acceso.	39
Imagen 3. Representación del canal a los alrededores de la plazoleta.....	40
Imagen 4. Representación del límite de la zona urbana.	40
Imagen 5. Modelamiento de la sección con los datos completos.....	41
Imagen 6. Secciones transversales a lo largo del Río Bogotá dentro del municipio de Villapinzón.....	42
Imagen 7. Distribución de secciones.....	42
Imagen 8. Representación en 3D de las secciones interpoladas.....	43
Imagen 9. Perfil de sección transversal modelada.....	46
Imagen 10. Sección sin modelar.....	46
Imagen 11. Ortofoto del Municipio.....	47
Imagen 12. Modelo de Elevación Digital Sin Editar.	47
Imagen 13. Modelo de Elevación Digital Editado.....	47
Imagen 14. Sección Transversal Estación Villapinzón.....	48
Imagen 15. Zonificación urbana de las zonas de estudio del municipio de Villapinzón.....	54



1. RESUMEN

Las inundaciones son eventos generados naturalmente por crecientes o con intervención humana; en donde se presenta el aumento de caudal en una zona provocando desbordamiento sobre el área afectada. Si este evento sucede en un área con asentamientos humanos, puede tener un riesgo de afectar a la población expuesta cercana y provocar una emergencia. Dependiendo de las condiciones de los asentamientos humanos, el riesgo de inundación puede ser alto o bajo respecto al nivel de exposición o vulnerabilidad. Donde se entran a evaluar los daños socioeconómicos y ambientales en la zona afectada.

Por lo anterior, en este proyecto se busca establecer criterios para delimitar la ronda hídrica de la cuenca alta del Río Bogotá, en el municipio de Villapinzón, determinando así el riesgo que representa para éste un evento de inundación, para lo cual se realizará un modelamiento, estableciendo diferentes periodos de retorno sobre un tramo de estudio, analizando las áreas de inundación formadas, determinando un criterio para realizar una adecuada delimitación de la zona de ronda, con el fin de que sirva como herramienta aplicable en planes de ordenamiento del territorio enfocados a la gestión de inundaciones.

Palabras claves: Inundación, ronda hídrica, cuenca, riesgo, población, vulnerabilidad, amenaza, río, Villapinzón, modelamiento, retorno.

2. ABSTRACT

Floods are events that are generated naturally, by the growing of water or human intervention, provoking overflow over the affected area. If this event happens in a zone with human settlements, it may have a risk of affect the population near exposed and provoke an emergency. Depending of the conditions of the human settlements, the risk of flooding may be high or low according to the exposition or the vulnerability. Which it's evaluated the economic, social and environmental damages in the affected zone.

Therefore, this project seeks to establish criteria to delimit the water round of the upper basin of the Bogotá River, in the municipality of Villapinzón, thus determining the risk that this represents a flood event, for which a modeling will be carried out. , establishing different periods of return over a study section, analyzing the flood areas formed, determining a criterion for an adequate delimitation of the round area, in order to serve as an applicable tool in territory planning plans focused on Flood management.

Keywords: Flood, water round, basin, risk, population, vulnerability, threat, river, Villapinzón, modeling, return.

3. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones constituyen un riesgo natural que a lo largo del tiempo se ha agravado debido a las acciones antropogénicas que aumentan su impacto produciendo la pérdida de vidas humanas junto con costosos daños materiales. [1] En el caso de Colombia, cuando empieza la época invernal, ocurren fuertes precipitaciones, que incrementan la vulnerabilidad, impactando a la comunidad y a los sectores productivos, generando así pérdidas superiores a US \$4.870 millones en el 2011, observando un déficit en planes de gestión y de desarrollo de las comunidades de los diferentes municipios [2] . Con lo anterior, se puede decir que la falta de delimitación de las rondas de los ríos y la falta de conciencia por parte de las comunidades que constituyen asentamientos cerca de los mismos, invadiendo su zona de inundación, generan un riesgo latente, volviéndose más vulnerables a un evento natural como lo son las inundaciones. Otro aspecto para tener en cuenta es la pérdida de tierras cultivables, ya que algunas son cubiertas por las aguas, perdiéndose así una capacidad de producción de alimentos vegetales y animales; tal consecuencia varía su grado de importancia de acuerdo a las densidades de las poblaciones y de las características de la zona afectada. [1] Debido a diversos factores socioeconómicos, se han realizado asentamientos en las rondas de los ríos por largos periodos de tiempo, y de esta forma se exponen a una amenaza de inundación en esta zona. En Colombia se han registrado varios casos de inundaciones, por ejemplo, la inundación en la ronda del río Tunjuelo en Bogotá, el río Magdalena en Puerto Wilches y el río Cauca en Cali, entre otros casos por mencionar, esto indica una deficiencia en las metodologías utilizadas para la planeación del territorio [3]. Es necesario aplicar criterios adecuados de delimitación de rondas para evitar estos eventos de tal manera que la población no se vea afectada, o los daños sean minimizados con una pertinente demarcación de zonas de inundación tenidas en cuenta en el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Delimitar la ronda hídrica y zonificar el riesgo de inundación para la subcuenca alta del Rio Bogotá en un tramo comprendido del municipio de Villapinzón.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la modelación hidrológica e hidráulica para los periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años en el tramo de estudio.
- Evaluar la amenaza por inundación correspondiente a los diferentes periodos de retorno modelados, para identificar el periodo de retorno óptimo de delimitación de ronda, identificando la vulnerabilidad de las construcciones teniendo en cuenta el material constructivo.
- Realizar la zonificación del riesgo de inundación para el periodo de retorno seleccionado para la delimitación de la ronda.

5. MARCO CONTEXTUAL

5.1 Modelación de flujo en ríos

Existen varios modelos matemáticos y programas basados en aplicaciones de modelos que permiten analizar el comportamiento del flujo en una corriente, por lo general los modelos más comunes utilizados son unidimensionales aunque también existen y se utilizan modelos bidimensionales; su diferencia radica en la complejidad de planteamiento de modelo y los datos requeridos, por ejemplo un modelo 1D se diferencia de un modelo 2D en la representación de las ecuaciones de conservación, su tiempo de computación es mucho y la demanda de datos de entrada es menor [4].

5.2 Modelación hidráulica unidimensional

Para el análisis del tipo de flujo y el planteamiento del modelo, se realiza su estudio por tramos entre secciones transversales, basado en las ecuaciones básicas de energía y conservación de momento, además de contar con metodologías para describir la sección transversal. Según los parámetros de altura, cabeza de velocidad, cabeza de energía y pérdidas por fricción se evaluará el comportamiento del tramo, teniendo en cuenta factores adicionales como la geometría de la sección transversal [5].

5.3 Datos de entrada para modelación hidráulica

Uno de los programas más conocidos para establecer modelos hidráulicos es el software HEC-RAS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), el cual permite realizar modelación 1D la cual es fácil de asociar a otras herramientas como ARCGIS o GEO-RAS lo que facilita su manejo y aplicabilidad. Para realizar modelación sobre un terreno especificado y un comportamiento se debe tener en cuenta una información básica que requiere el programa para poder operar como se mostrará a continuación [5]. Ver Anexo 1.

5.3.1 Geometría. Esta se realiza para establecer la conectividad en el sistema de río, con información geográfica aguas arriba y aguas abajo del tramo de estudio se toman en cuenta datos como modelos digitales de terreno que permita tener una comprensión amplia de la zona de estudio; con esto se determinan las condiciones de borde, el esquema de río, la pendiente y los posibles afluentes asociados a la geometría. También se realiza el análisis de secciones transversales que tiene el cuerpo de agua.

5.3.2 Información del tipo de flujo. Se tienen en cuenta las condiciones de flujo estable o inestable para el análisis del cuerpo de agua, según el régimen del flujo se analizan factores como las profundidades críticas según la batimetría del río, también se tomarán en cuenta las condiciones de borde, además de los caudales de descargas y las condiciones iniciales del flujo.

5.4 Modelación de inundaciones

La modelación para inundaciones se realiza teniendo en cuenta las condiciones de terreno, las condiciones de flujo del cuerpo de agua que interactúa con la zona; asociado a las variables hidroclimáticas de la cuenca a la que pertenezca, luego se realiza la aplicación de métodos para la evaluación de intrusiones, según las condiciones de los tramos y la información disponible. El programa HEC-RAS cuenta con 5 métodos de evaluación de inundaciones que permiten al usuario escoger de manera personalizada según la necesidad del usuario donde tiene en cuenta las condiciones de borde y de flujo que establecerá el modelo para ejecutarlo [5].

5.5 Gestión del riesgo

A continuación se presentará una serie de conceptos básicos relacionados con el tema de la gestión del riesgo, teniendo en cuenta los temas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, con el fin de determinar las afectaciones sociales y económicas.

5.5.1 Amenaza. Una amenaza (A_i) se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad mayor o igual a i , en un sitio específico y en un periodo de tiempo de exposición determinado (t). [6]

5.5.2 Vulnerabilidad. La vulnerabilidad (Ve), es la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad (e') a ser afectada o sufrir los efectos adversos en caso de que se manifieste una amenaza con una intensidad mayor o igual a i. [6] La vulnerabilidad se determina a partir de 3 factores: Exposición o fragilidad física, Sensibilidad o fragilidad social y Elasticidad o resiliencia.

5.5.3 Riesgo. El concepto riesgo en el estudio de inundaciones tiene dos interpretaciones: en el primero se refiere al suceso, es decir una inundación con una ocurrencia y magnitud; y el segundo, riesgo se entiende como la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. [6]

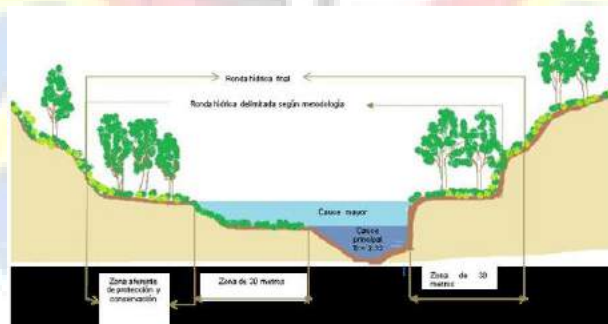
5.5.4 Mitigación. Se refiere a las acciones orientadas a reducir la vulnerabilidad de la población frente a un medio ambiente hostil e incrementar la capacidad de resistencia de los asentamientos frente a la presencia de fenómenos de origen natural o humano potencialmente destructivos. [2]

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Ronda hídrica

Comprende la faja paralela de la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho. Así mismo hará parte de la ronda hídrica el área de protección o conservación aferente [7].

Ilustración 1. Ronda hídrica



Fuente: [8]

6.2. Componentes de las rondas hídricas

El espacio necesario para el desarrollo de la dinámica natural del sistema fluvial, donde se pueden realizar sin restricciones sus funciones hidrológicas y geomorfológicas (flujo y almacenamiento temporal de agua y sedimentos, ajuste de la forma cauce y sus patrones de alineamiento) y así como sus ecosistémicas, constituyen la ronda hídrica, que no es estática en el tiempo

ni en el espacio, puesto que varía según el comportamiento de los factores que los definen y determinan [7].

- Componente Geomorfológico: Procesos morfodinámicos asociados al transporte y almacenamiento temporal del agua y sedimentos [7].
- Componente hidrológico: Zona para el flujo y almacenamiento temporal del agua y sedimentos [7].
- Componente ecosistémico: Zona asociada a la vegetación riparia y a las funciones ecosistémicas del sistema fluvial [7].

De acuerdo a lo anterior, cada factor se desarrolla conforme a lo dispuesto en la “Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia”.

6.3. Métodos para delimitar ronda hídrica

Se encuentran las siguientes metodologías:

- Topografía y modelo digital de terreno: Se efectúa un levantamiento topográfico y batimétrico por vadeo a lo largo de la zona de estudio, para obtener los planos de planta que se utilizarán para la elaboración del Shape de los puntos, el TIN y el modelo digital del terreno [9].
- Posicionamiento geodésico: Todo levantamiento Geodésico, topográfico y/o Batimétrico debe ser enlazado a la Red Geodésica Nacional, cuya precisión debe ser igual o mayor al orden B, de acuerdo a los parámetros de precisión para Geodesia Satelital utilizados por el IGAC, ente rector de la cartografía nacional [9].
- Levantamiento topobatimétrico: El método de posicionamiento para el levantamiento topográfico es el de poligonal abierta el cual consiste en la lectura de ángulos y distancias, para la determinación de la altura se leyó el ángulo vertical, para finalmente calcular la diferencia de altura que con las correcciones correspondientes se obtiene el valor de la altura de la posición medida.

Se puede utilizar el siguiente sistema:

- a) Sistema LIDAR: Acrónimo de “Light Detection and Ranging”. Su traducción literal sería “detección y medición de la luz”, y se trata de un sistema láser de medición a distancia que se utiliza a menudo en los campos de ciencia e industria para la toma de medidas precisas en objetos lejanos e inaccesibles [9].
- Modelo digital del terreno

Los modelos digitales de terreno son la representación estadística de una superficie del terreno mediante un conjunto de puntos cuyos valores en X, Y y Z son conocidos y están definidos en un sistema de coordenadas definido [9].

- Estudio hidrológico [9]

Para la delimitación de la faja de protección se requiere una determinación del caudal de creciente para el período de retorno deseado, para lo cual se puede hacer uso de determinados análisis hidrológicos en función de la calidad y cantidad de información existente para el sitio de interés. Si existen registros de caudal en el sitio de interés, puede llevarse a cabo un análisis de frecuencia de caudales máximos.

Para el estudio hidrológico se tienen las siguientes herramientas:

- a) Registros de caudal en el sitio de interés: En el caso de contar con una estación limnimétrica o limnigráfica en el sitio de interés con datos históricos de caudal máximo instantáneo, se toman sus valores máximos instantáneos anuales, se ajustan a distribuciones probabilísticas conocidas, y se hacen inferencias estadísticas.
- b) Transposición de datos de caudal: Cuando la estación limnimétrica o limnigráfica se encuentre en la misma cuenca hidrográfica pero no en el sitio de interés se pueden transferir caudales máximos instantáneos anuales de diferentes periodos de retorno de esta estación hasta el sitio de proyecto, mediante relaciones de áreas de drenaje.
- c) Análisis regional de caudales máximos instantáneos anuales: Cuando se cuenta con varias estaciones hidrométricas con datos de caudales máximos instantáneos anuales históricos en una región de cierta magnitud e hidrológicamente homogénea, se puede aplicar el método del análisis regional de frecuencias de esta variable hidrológica.
- d) Modelos lluvia-escorrentía: Los modelos de transformación lluvia en escorrentía son utilizados cuando no existe la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje en las cuencas hidrográficas. Dichos modelos calculan la escorrentía superficial a partir de datos históricos de lluvias de corta duración existentes en la cuenca de interés y representativas de ella, en función de sus características geométricas, de suelos, vegetación y usos del suelo. Se pueden utilizar metodologías tales como, el método racional, método del hidrogramas de escorrentía superficial o modelos computacionales como el HEC-HMS.
- e) Modelos computacionales: Cuando las áreas de drenaje en una cuenca son mayores a 20 km², se aconseja subdividirla en subcuencas y aplicar modelos computacionales para tener en cuenta el hidrograma de creciente producido por cada una de las subcuencas y su tránsito a través del canal principal de la misma y así obtener el hidrograma resultante en el punto de interés, del cual se extrae el caudal pico para determinado período de retorno. Por tanto el hidrograma total resultante

es la suma de las ordenadas de los diversos hidrogramas para cada valor constante de tiempo.

- f) Estudio hidráulico: El modelo hidráulico tiene básicamente dos insumos de entrada y un motor de cálculo. Los insumos corresponden a la topología del modelo y a los caudales a transitar, el motor de cálculo corresponde al modelo hidráulico empleado para realizar el tránsito hidráulico de los caudales calculados sobre el tramo evaluado.
- g) Análisis básico predial: En el análisis básico predial realizado en la definición y delimitación de zonas de ronda de protección de cuerpos hídricos se utiliza una sobreposición cartográfica simple, ya que nos permite identificar cuales predios y en qué proporción se encuentran estos predios afectados por los polígonos de ronda de protección encontrados en la aplicación del modelo hidráulico.
- h) Zonificación y usos recomendados del suelo.

6.4. Inundación

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas [10].

Las inundaciones son clasificadas según su origen, a continuación se dan algunas de las clasificaciones:

- Inundaciones por desbordamiento de ríos: El desbordamiento de los ríos ocurre cuando se excede la capacidad de los canales para conducir el agua y por lo tanto se desbordan las márgenes del río superando el lecho mayor, como se observa en la siguiente imagen [11].
- Inundaciones lentas o progresivas: Éstas se presentan en las zonas planas cercanas a las riberas de los ríos cuando las precipitaciones permanecen por largo tiempo [11].
- Inundaciones torrenciales o súbitas: Ocurren ante tormentas fuertes en cuencas de alta pendiente y con baja cobertura vegetal. Pueden desarrollarse en minutos u horas y tienen como características principales una gran capacidad de arrastre de materiales y un alto poder destructivo. También puede presentarse como resultado de la rotura de diques construidos o represamientos de agua [11].
- Inundaciones Costeras: Las olas ciclónicas son un crecimiento anormal del nivel del mar asociado con huracanes y otras tormentas marítimas. Las olas ciclónicas están causadas por fuertes vientos de la costa y/o celdas de muy baja presión y tormentas oceánicas. El nivel de las aguas está controlado por los vientos, la presión atmosférica, las comentes astronómicas existentes, las

olas y el mar de fondo, la topografía de la costa y la batimetría y la proximidad de la tormenta a la costa [11].

6.5. Amenaza por inundación

Los sistemas de alcantarillado de las ciudades o los elementos que los constituyan pueden fallar o verse afectado ante la ocurrencia de eventos que superen la capacidad hidráulica para la cual fueron diseñados y construidos, en sistemas combinados como en el municipio de Villapinzón, es frecuente que se genera el colapso de los sistemas de alcantarillado cuando se presentan lluvias intensas. El principal problema de estos sistemas es que son diseñados para que trabajen con criterios de flujos a superficie libre, pero su correcto funcionamiento se ve afectado cuando el caudal llena la sección hidráulica de la tubería y se genera flujo a presión [12]. Adicionalmente, el cambio climático y los efectos sufridos en la actualidad llevan a un panorama en el cual es más probable la ocurrencia de eventos extremos o a periodos de retorno menores, que seguramente llegaran a sobrepasar las expectativas de caudal esperadas [12]. Las zonas que están aledañas a cuerpo de agua son consideradas zonas de amenaza, que denotan un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presenta con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales [13].

6.6. Vulnerabilidad

6.6.1. Vulnerabilidad social

La vulnerabilidad social hace referencia a las características propias de una comunidad para anticipar, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural [14].

6.6.2. Vulnerabilidad física

De acuerdo con FOPAE la vulnerabilidad física establece el grado de afectación de un elemento o conjunto de elementos en riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada [11].

6.7. Riesgo por inundación

El riesgo no puede ser considerado estático o permanente ya que depende de la relación que existe entre amenaza y vulnerabilidad, de tal forma que el riesgo puede ser mayor o menor de acuerdo con la capacidad de resiliencia (capacidad de recuperación después de ser afectados por un fenómeno natural) con la que cuenta el individuo expuesto [11].

6.7.1. Gestión del riesgo

Es un sistema que busca el manejo de los efectos de las amenazas y reducir la incertidumbre de su ocurrencia, a través de una secuencia de actividades humanas que incluyen evaluación de riesgo, estrategias de desarrollo para manejarlo y mitigación del riesgo utilizando recursos gerenciales [11].

6.7.2. Mitigación del riesgo

Una de las medidas que se deben llevar a cabo en las zonas de amenaza es la mitigación del riesgo, que se entiende como las medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente [14].

6.7.3. Análisis y evaluación del riesgo

Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades [13].

6.7.4. Impactos de la urbanización

Cuando se lleva a cabo la urbanización de áreas nuevas, las inundaciones aumentan en frecuencia y magnitud debido al cambio de condiciones naturales de drenaje de la cuenca, es decir, se alteran las características del balance hídrico dentro de la cuenca urbanizada, incrementando la impermeabilización del suelo y la escorrentía del mismo, por lo cual en la nueva condición se conducen todas las aguas a través de sistemas que pueden llegar a ser progresivamente insuficientes [15].

6.8. Modelación hidráulica

Con el caudal de creciente para el periodo de retorno deseado, el siguiente paso es determinar el perfil de la superficie de agua a lo largo del canal. Este análisis puede llevarse a cabo suponiendo flujo permanente, gradualmente variado, no uniforme, utilizando un modelo unidimensional como el HEC-RAS o un modelo bidimensional basado en diferencias finitas o elementos finitos [9]. Los modelos unidimensionales solamente permiten que las propiedades de flujo varíen a lo largo del canal, mientras que los modelos bidimensionales también tienen en cuenta cambios a lo ancho, en la sección transversal [9]. En forma opcional, puede llevarse a cabo un análisis de flujo no permanente con el fin de identificar la máxima elevación de la superficie del agua en diferentes secciones transversales durante la propagación de la onda de creciente a través del tramo del río [9]. Los

modelos de flujo no permanente son necesarios para la delineación de las planicies de inundación en grandes lagos, debido a que el almacenamiento en el lago altera la forma y el caudal pico del hidrograma de crecientes a medida que el flujo pasa a través de él. En el Anexo 1 se presentan algunos programas y sus respectivas características para la modelación hidráulica [9].

6.8.1 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System)

Es un software que permite realizar cálculos hidráulicos de flujo unidimensional, permanente y no permanente. Fue diseñado para uso interactivo en un ambiente de multitareas y redes multiusuarios. El sistema cuenta con una interface gráfica de usuario, componentes independientes de análisis hidráulico, análisis de capacidades de almacenamiento, manejo de datos y facilidades de gráficas de resultados y reportes [16].

Cuenta con tres componentes de análisis hidráulico unidimensional para: cálculos de perfil de la superficie del agua en condiciones de flujo permanente; simulación de flujo no permanente, y cálculo de transporte de sedimentos entre fronteras movibles. El modelo integra los datos de los tres componentes y realiza cálculos comunes de tipo geométrico, como hidráulico. Finalmente, el HEC- RAS calcula el perfil de agua para flujo permanente y no permanente [16].

6.9. Marco legal

Este proyecto destaca artículos de las siguientes normas que se encuentran detalladas en el Anexo 2: Código nacional de recursos naturales renovables y de protección del medio ambiente decreto 2811 de 1974, Ley 2 de 1959, Decreto 877 de 1976, Decreto 1449 de 1977, Decreto 1541 de 1978, Decreto 1640 de 2012, Ley 79 de 1986, Ley 388 de 1997, Decreto 1600 de 2005, Decreto 3600 de 2007, Decreto 1469 de 2010, Decreto 3930 de 2010, Ley 1450 de 2011 y el Decreto 1640 de 2012 y el Decreto 2245 del 2017.

6.10. Descripción del área de estudio

El municipio de Villapinzón está situado en el Departamento de Cundinamarca en la Provincia de Los Almeydas al norte de la capital de la República y su vocación funcional está determinada por la dinámica ambiental y económica que presenta, la cual se encuentra soportada en la riqueza natural (nacimiento del Rio Bogotá) y paisajística y por su amplia actividad agropecuaria, industrial, minera, turística, comercial y de servicios que se origina desde el mismo Municipio, que abastece a otras empresas y cuyo destino va dirigido al mercado regional, nacional y en algunos casos, internacional, situación que condiciona un alto grado el desarrollo económico del departamento de Cundinamarca [17].

6.10.1. Límites municipales [17]

Norte: Ventaquemada (Boyacá) y Lenguaque (Cundinamarca); Sur: Chocontá, Tibirita (Cundinamarca) y Capilla de Tenza (Boyacá); Occidente: Chocontá y Lenguaque; Oriente: Ventaquemada, Turmequé y Umbita (Boyacá). Ver Anexo 3.

6.10.2. Cuenca del río Bogotá

El río Bogotá nace en el Municipio de Villapinzón, es una de las 14 cuencas principales con las que cuenta el departamento de Cundinamarca. La cuenca se extiende diagonalmente sobre el terreno departamental y ocupa un área de 5.996 km² [17]. La cuenca Alta del río Bogotá, que está comprendida entre los municipios de Villapinzón y el Salto del Tequendama, ocupa una extensión de 4.321 km² y una longitud de 185 km. En su trayectoria por la parte Alta, el río Bogotá recibe residuos orgánicos de una población estimada de ocho millones y además de los vertimientos de las actividades industriales. El río Bogotá, hace parte de la vida de varias poblaciones y del distrito capital, por esta razón se convierte en un recurso integrador de la vida de la región, alrededor del cual se mueven las dinámicas económicas y sociales que actúan sobre el medio ambiente proveyéndose de sus servicios ambientales [17].

6.11. Aspectos climáticos

La OMM (Organización Meteorológica Mundial), en su publicación técnica N°182, define el clima como la síntesis de las condiciones meteorológicas, caracterizadas por los estados y las evoluciones del tiempo (representadas por estadísticas a largo plazo que muestran el comportamiento de los elementos o variables meteorológicas) en una porción determinada del espacio [18]. Una de las razones por las que se estudia el comportamiento del clima, es el comportamiento del caudal que corre por el río y la disponibilidad hídrica de la cuenca; así, con el conocimiento que se tenga acerca de los valores tomados por parámetros como la cantidad de agua lluvia que cae sobre el área del alto Bogotá y la cantidad que se escapa de ella por escorrentía o en forma de vapor es posible determinar, en buena medida, el balance hídrico de esta parte de la cuenca [18].

6.11.1. Precipitación

La precipitación es considerada, al lado de la temperatura, como una de las variables más importantes a la hora de estudiar el régimen climático de un lugar, especialmente en latitudes próximas al ecuador donde el concepto de clima pareciera limitarse al comportamiento de las lluvias [18]. En la cuenca alta del río Bogotá es posible observar la relación directa entre la orografía y el comportamiento de las lluvias. En el valle geográfico del río, por ejemplo, se observa un comportamiento de la precipitación diferente al de las laderas que lo conforman; así mismo, la parte más alta de la cuenca (nacimiento en el municipio

de Villapinzón) presenta cantidades diferentes a las registradas en las estaciones próximas a la sabana de Bogotá [18].

6.11.2. Distribución Temporal

Para el análisis de la distribución temporal del municipio de Villapinzón se tomaron los datos de las precipitaciones mensuales de las estaciones: Villapinzón, El Triángulo, El Saucio, El Puente, La Fortuna, proporcionados por la CAR; como se observa en la siguiente tabla:

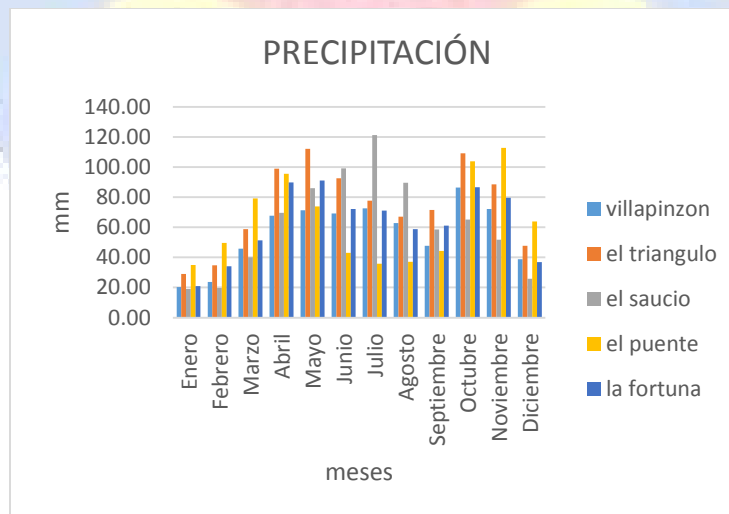
Tabla 1. Datos de precipitación.

MES	ESTACIÓN A: VILLAPINZON	ESTACIÓN B: EL TRIANGULO	ESTACIÓN C: EL SAUCIO	ESTACIÓN D: EL PUENTE	ESTACIÓN E: LA FORTUNA
Enero	20.25	28.94	18.95	35.08	20.99
Febrero	23.74	34.76	19.74	49.70	34.06
Marzo	45.80	58.73	40.10	79.18	51.44
Abril	67.74	98.94	69.52	95.44	89.80
Mayo	71.37	112.07	85.98	73.96	91.18
Junio	69.27	92.62	99.23	43.12	72.11
Julio	72.65	77.66	121.23	35.84	71.02
Agosto	62.78	67.05	89.50	37.08	58.80
Septiembre	47.76	71.45	58.51	44.30	61.18
Octubre	86.47	109.23	65.14	103.94	86.63
Noviembre	72.20	88.58	51.73	112.80	79.53
Diciembre	38.74	47.73	25.83	63.83	36.90

Fuente: [19]

De acuerdo a los datos de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica:

Gráfica 1. Precipitación.



Fuente: Autor.

Como se observa en la gráfica anterior, Villapinzón presentan dos temporadas lluviosas, la primera entre los meses de Mayo y Julio y la segunda entre los meses de Octubre y Noviembre; igualmente encontramos dos temporadas relativamente secas en los meses de Enero y Agosto; lo que indica que la distribución temporal de las precipitación es de tipo bimodal. Por lo anterior, se debe tener presente que en los meses de mayor precipitación el nivel de escorrentía incrementan generando mayor caudal en el cauce del Rio Bogotá en el municipio de Villapinzón, provocando problemas de inundación, problemas de sedimentos y/o derrumbes; por tal motivo se debe conocer que alcance pueden llegar éstos fenómenos y cómo prevenirlos.

6.11.3. *Temperatura*

La cuenca alta del río se encuentra ubicada por encima de los 2600 msnm, ocupando sectores de las franjas fría y de páramo [18]. Cómo en este caso no se tiene estaciones con mediciones de temperatura en la zona de estudio, se toman de puntos cercanos, exactamente del municipio de Chocontá, así se puede tener idea de que temperatura puede tener la zona de trabajo.

Los datos se seleccionaron de la estación de Silos y la Iberia, obteniendo la siguiente tabla:

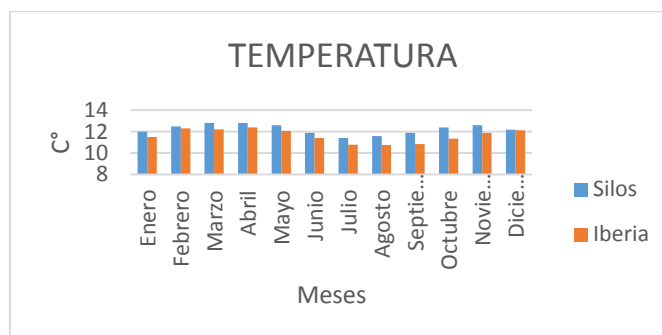
Tabla 2. Datos de temperatura.

MES	ESTACIÓN A: SILOS	ESTACIÓN: LA IBERIA
Enero	12	11.50
Febrero	12.5	12.32
Marzo	12.8	12.23
Abril	12.8	12.41
Mayo	12.6	12.07
Junio	11.9	11.42
Julio	11.4	10.77
Agosto	11.6	10.76
Septiembre	11.9	10.84
Octubre	12.4	11.36
Noviembre	12.6	11.88
Diciembre	12.2	12.14

Fuente: [19]

Con los datos anteriores se obtuvo la siguiente gráfica:

Gráfica 2. Temperatura.



Fuente: Autor.

Las temperaturas medias más bajas en toda el área de la cuenca alta del río Bogotá ocurren entre junio y agosto cuando, como ya se trató en párrafos anteriores, llegan a la cima de la cordillera oriental los fríos y húmedos vientos procedentes del hemisferio sur (en época de invierno). En esta época los cielos se cubren, la radiación disminuye y las permanentes lluvias y lloviznas mantienen el aire fresco durante la mayor parte del día lo que baja los promedios de temperatura [18].

Los municipios que comprenden el área de la cuenca alta del río Bogotá presentan condiciones similares en la distribución temporal de la temperatura, entre diciembre y marzo predominan los cielos ligeramente cubiertos, condición que favorecen el sobre enfriamiento nocturno de los suelos y la probabilidad de ocurrencia de las heladas [18].

6.11.4. Humedad Relativa

En la baja atmósfera existen cantidades variables de agua en estado de vapor, las cuales se constituyen en uno de los componentes más importantes del aire atmosférico. En los primeros kilómetros de la tropósfera se encuentra concentrada la mayor parte del vapor de agua, procedente en su mayoría de los depósitos superficiales de agua (lagos, ríos y mares). Cuando una masa de aire se enfría se reduce su volumen y aumenta su razón de mezcla haciéndose más húmeda, razón por la cual los valores de humedad se incrementan en la medida que se asciende por las laderas de las montañas [18]. En el caso de Villapinzón, se encontró una estación restringida con cinco años, la cual se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 3. Datos de Humedad Relativa.

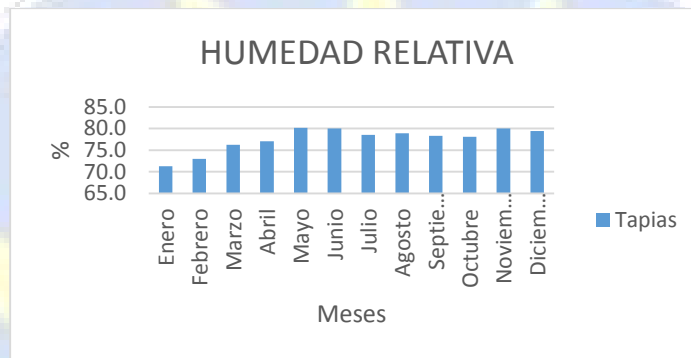
MESES	ESTACIÓN F: TAPIAS
Enero	71.3
Febrero	73.0
Marzo	76.2
Abril	77.1
Mayo	80.2

Junio	80.0
Julio	78.5
Agosto	78.9
Septiembre	78.3
Octubre	78.1
Noviembre	80.0
Diciembre	79.4

Fuente: [19]

Con los anteriores datos de obtuvo la siguiente gráfica:

Gráfica 3. Humedad Relativa.



Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta la deficiencia de estaciones en el lugar de estudio para analizar la humedad relativa del lugar, se puede tener idea que éste parámetro climatológico se comporta de manera bimodal, ya que ésta muy ligada a la precipitación, debido a que crece en la medida en que se asciende por las montañas que limitan la cuenca presentando valores medios que, en su mayoría, oscilan entre 70% en los meses secos (Enero a Marzo y Julio a Octubre) y 80% en los periodos en que aumentan las lluvias (Mayo a Junio y Noviembre a Diciembre).

6.11.5. Evaporación

La evaporación se encuentra ligada con el comportamiento del brillo y radiación solar, junto con la precipitación del lugar en estudio, ya que entre menos precipitación y más brillo solar la evaporación aumenta; y entre más precipitación y menos brillo la evaporación disminuye. Teniendo en cuenta que en el lugar se encuentra la estación de La Fortuna, tenemos los siguientes datos:

Tabla 4. Datos de evaporación.

MES	ESTACIÓN E: LA FORTUNA
Enero	82.4
Febrero	73.4
Marzo	73.4

Abril	65.3
Mayo	68.8
Junio	64.2
Julio	56.6
Agosto	61.8
Septiembre	62.9
Octubre	63.0
Noviembre	64.9
Diciembre	74.1

Fuente: [19]

Con los anteriores datos se obtiene la siguiente gráfica:

Gráfica 4. Evaporación.



Fuente: Autor.

Se observa un comportamiento monomodal, ya que al principio (Enero a Marzo) y al final (Octubre a Diciembre) del año presenta los picos de mayor evaporación, lo que indica que en estas épocas del año los encontramos más seco con una tasa alta de brillo solar. Por tal motivo se dice que durante las épocas de lluvia la nubosidad aumenta haciendo que disminuya la cantidad de radiación sobre la superficie, lo que se ve reflejado en una disminución de la térmica del aire en superficie. El enfriamiento del aire, debido a las lluvias y el decrecimiento de los valores de radiación, dan como resultado un aumento de la humedad del aire, condición que determina la disminución de los procesos de evaporación [18]. Durante los meses en que las lluvias se incrementan hay un notorio descenso en los totales de evaporación, esto sucede en mayor o menor medida en todos los municipios que hacen parte de la cuenca alta del río Bogotá [18].

6.11.6. Brillo Solar

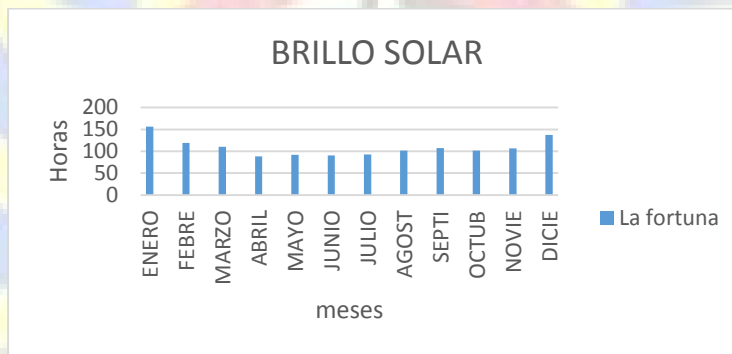
La duración del brillo solar representa el tiempo total (en horas normalmente) durante el cual incide la luz solar de manera directa sobre la superficie, en un lugar cualquiera de la tierra. El total de horas de brillo solar efectivo es uno de los factores que determinan el clima de una región [18]. La distribución temporal del brillo solar, es inversamente proporcional al comportamiento de la nubosidad y las lluvias y directamente proporcional, en la mayoría de los casos, a la temperatura media como se muestra a continuación:

Tabla 5. Datos Brillo Solar.

MES	ESTACIÓN A: LA FORTUNA
Enero	156.33
Febrero	119.05
Marzo	110.26
Abril	88.34
Mayo	91.72
Junio	90.52
Julio	92.80
Agosto	101.39
Septiembre	106.96
Octubre	101.21
Noviembre	106.45
Diciembre	137.35

Fuente: [19]

Gráfica 5. Brillo Solar.



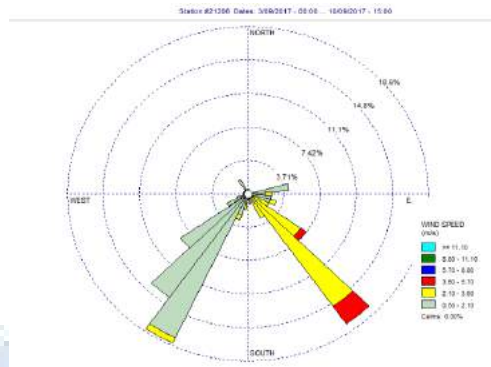
Fuente: Autor.

Como ya se anotó, en la medida que se incrementan las lluvias, a partir del mes de abril y hasta finales de octubre, los valores de brillo solar disminuyen a causa del incremento notorio de la capa nubosa, la cual impide el paso de los rayos solares de manera directa.

6.11.7. Velocidad y Dirección del viento

Teniendo en cuenta los datos de dirección predominante y velocidad media del viento de la estación la fortuna multianual, proporcionados por la CAR, la cual se sometió a revisión de valores extremos y datos faltantes obteniendo la siguiente gráfica:

Gráfica 6. Rosa de los vientos.



Fuente: Autor.

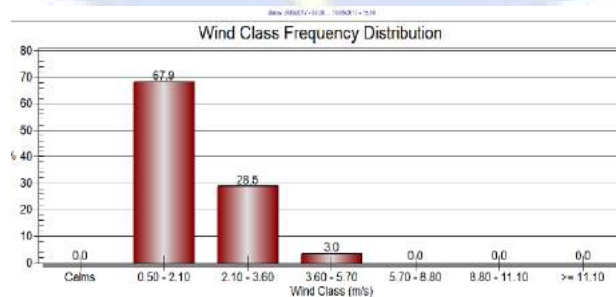
En la cual se puede observar que los vientos de mayor predominación se encuentran hacia la dirección del noroeste y noreste, pero con mayor velocidad en este último; esto indica que el movimiento de las nubes en estos lugares es mayor, generando la colisión de partículas en ella, las cuales caen en forma de precipitación; por ende éste fenómeno es mayor en éstos lugares. Como se observa a continuación éstos fenómenos afectan zonas tanto rurales como urbanas, por lo tanto se deben contemplar la velocidad de éstos y la frecuencia con que se presenta esto, para tener idea del comportamiento de los fenómenos adyacentes a éste, generando un programa de alerta, de acuerdo al riesgo expuesto por los habitantes del lugar.

Ilustración 2. Dirección y velocidad del viento en Villapinzón.



Fuente: [20]

Gráfica 7. Frecuencias de las velocidades del viento.



Fuente: Autor.

Por lo anterior se observa que la velocidad predominantes es de 0.5 a 2.10m/s, lo que indica que en la zona de estudio los vientos no alcanzan gran envergadura, por lo que se descarta fenómenos naturales generados por éste.

7. METODOLOGIA

La realización de este proyecto, se inició con la caracterización de los aspectos climáticos y físicos de la cuenca; en la cual se ubicó las estaciones más cercanas al área de estudio y se obtuvo los datos de cada una en el banco de información de la CAR; con esta información determinamos el comportamiento climático de la zona y se encontró una estación limnimétrica, la cual contenía los caudales máximos de la zona con 39 años de información. Esta información fue sometida a métodos probabilísticos para ver a cual se ajustaba de la mejor forma y así mismo realizar el análisis de frecuencia y obtener el caudal de diseño en los diferentes periodos de retorno con la ayuda del software Hidroesta.

Se realizó una visita técnica, recorriendo el municipio, identificando los tramos de las secciones transversales, caracterizando las zonas, la rugosidad del canal, los puentes y la ubicación de las viviendas; para realizar las matrices cualitativas y cuantitativas de riesgo de las edificaciones del lugar y las características de los canales para el modelamiento hidráulico.

Con los caudales de diseño y la información recolectada en sitio se comenzó a montar el modelo hidráulico, obteniendo la mancha de inundación en los diferentes periodos de retorno, para que de esta forma, elegir el periodo que puede afectar significativamente el municipio.

Teniendo en cuenta lo anterior, cada componente evaluado y estudiado, tanto físico, geomorfológico y climático, se realizó conforme a la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia; comenzándose a desarrollar a continuación:

7.1. Caracterización hidrológica

Se desarrolló para una cuenca de estudio con salida en el municipio de Villapinzón, la estimación y la descripción hidrológica de la zona con el fin de determinar los caudales máximos de la zona [21]. Ver Anexo 3.

7.1.1. Delimitación de la Cuenca

Se realizó la delimitación de la cuenca utilizando sistemas de información geográfica, basándose en un modelo de elevación digital obtenido como imagen digital de una resolución de 30m, del satélite ALOS-PALSAR. De esta forma se realiza el montaje y delineación de los drenajes existentes en la zona de tal forma que se realiza el trazado de los ríos y así mismo se muestra el área de influencia de

dichos drenajes, formando así una zona que delimita la cuenca del río a trabajar hasta un punto de descarga deseado, en este caso el punto de descarga corresponde a la entrada del afluente hacia el municipio de Villapinzón, en donde se puede estimar los caudales de entrada que se obtienen sobre el área de estudio.

7.2. Características morfométricas de la cuenca aferente al área de estudio.

Mediante el uso de herramientas de sistemas de información geográfica e información suministrada por entidades oficiales, se procedió a establecer la caracterización de los parámetros morfométricos que describen las condiciones del área de estudio.

7.2.1. Área:

Se realizó la estimación del área una vez delimitada la cuenca en donde se define el siguiente valor: **69,76 Km²**. Esta área define la zona como una microcuenca [22]

7.2.2. Perímetro:

Con la estimación del perímetro de la cuenca se da el siguiente resultado: **46,95 Km.**

7.2.3. Índice de compacidad:

El índice de compacidad o índice de gravelius se define como el factor de relación del perímetro de la cuenca relacionado a un círculo de la misma área de la cuenca, este factor va a determinar el comportamiento del área de influencia de la cuenca y su red de drenaje.

Esto se define cómo:

$$I_c = 0,282 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right)$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca

A: Área de la cuenca

Aplicando esta ecuación se obtuvo un parámetro con el valor de: **1,58.**

Este índice con una relación diferente a 1, indica un tipo de cuenca irregular, con un valor por encima de 1, indica una cuenca con una forma tipo alargada, que presenta una condición donde posee una baja probabilidad de ser recibir tormentas, que influye en el tipo de respuesta del río. Así mismo un índice mucho mayor indica que es una zona con pocas tendencias a inundaciones [23]. Esta cuenca se clasifica como tipo rectangular oblonga según el valor de compacidad dado.

7.2.4. Factor forma:

Se define como el cociente entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud del cauce principal, esta relación permite determinar el alargamiento de la cuenca estableciendo un valor dado entre el área de la cuenca y la longitud de la cuenca elevada al cuadrado.

Este valor se define cómo:

$$f_f = \left(\frac{A}{L_c^2} \right)$$

Donde:

A= Área de la cuenca

Lc= Longitud de la cuenca, Definida como la distancia entre la salida y el punto más alejado, cercano a la cabecera del cauce principal.

Esta ecuación trata de describir de manera numérica la relación del drenaje de la cuenca respecto a su forma, para cuencas grandes este factor ayuda a determinar una relación de alargamiento. La forma de la cuenca es un factor fundamental que influye en el análisis de los histogramas de caudales máximos [23].

Factor forma Ff: 1,09

7.2.5. Pendiente media

La pendiente media de la cuenca es un parámetro importante para el estudio de la cuenca ya que se relaciona con otros factores como infiltración, escorrentía superficial, la humedad del suelo y la relación de la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Este es uno de los factores físicos más importantes porque tiene influencia sobre el tiempo de flujo sobre el terreno y una relación directa en la magnitud de crecidas. La pendiente media de la cuenca se determinó mediante el uso de la herramienta de sistemas de información geográfica ARCGIS, mediante la cual arrojó el siguiente resultado:

Tabla 6. Pendiente media de la cuenca.

Rango de Pendientes			Relación de áreas	
Inf	Sup	Prom	Ocurrencias	Multip
0.000000	9.34	4.67	205240	958945.95
9.34	16.68	13.02	172390	2243782.55
16.69	24.03	20.36	54361	1106678.22
24.03	31.37	27.70	11815	327277.32
31.37	38.71	35.04	2004	70224.90
38.71	46.72	42.72	449	19180.52
46.72	57.40	52.06	171	8902.76

57.40	72.09	64.74	65	4208.42
72.09	99.45	85.77	45	3859.67
99.45	170.20	134.83	11	1483.12
			446551	4744543.43

Pendiente M (%)	10.6
-----------------	------

Fuente: Autor.

Mediante este proceso se determinó que la pendiente media de la cuenca tiene un valor de 10,6% lo que significa que es un terreno medianamente accidentado, por lo que es susceptible de presentar problemas de erosión. Ver anexo 4.

7.2.6. Coeficiente orográfico

Para definir el coeficiente orográfico primero se debe hallar el coeficiente de masividad, establecido como la relación entre la altitud media de la cuenca y el área de la cuenca, este valor sirve para determinar condiciones de vulnerabilidad a la degradación de la zona y de su posible aprovechamiento del recurso hídrico.

$$C_o = \left(\frac{H^2}{A} \right)$$

Co= Coeficiente orográfico (Adimensional)

A= Área de la cuenca (Km²)

H= altitud media de la cuenca (Km)

$$C_o = \frac{(3.014Km)^2}{69.76km^2} = 0.13$$

Teniendo en cuenta que el coeficiente orográfico es <6, significa que la cuenca presenta un relieve poco accidentado; el cual es propio de cuencas extensas y de baja pendiente [23].

- Altura media de la cuenca

Un parámetro para determinar el coeficiente de masividad es la altura media de la cuenca, para poder determinar este parámetro se realiza un procedimiento de cálculo de las alturas, utilizando los mismos intervalos en los que se realizó la separación para determinar la pendiente media, por medio de este procedimiento se determinan las áreas y alturas medias de cada intervalo para poder crear una relación en la determinación de la altura media de la cuenca expresado en la siguiente tabla:

Tabla 7. Altura media de la cuenca.

Nro Intervalo	Cota(msnm)			Relación de áreas	
	Min	Max	Prom	Área Intervalo	Área*hm
1	2744	2807	2.792,3988	4334687,83	12104176988,0818
2	2808	2870	2.838,6045	11211641,74	31825417224,6856

3	2871	2934	2.903,1429	15441993,35	44830312688,3580
4	2935	2997	2.962,2247	10634159,78	31500771179,6333
5	2998	3061	3.026,9131	5851161,67	17710957886,4418
6	3062	3124	3.092,5177	4536950,02	14030598325,8266
7	3125	3187	3.153,2718	2825689,23	8910166131,5622
8	3188	3251	3.220,5303	2367100,38	7623318599,9696
9	3252	3314	3.283,6788	5910982,03	19409766604,5922
10	3315	3378	3.345,0300	4421490,10	14790016882,9660
11	3379	3441	3.404,1562	1972737,89	6715507868,6419
12	3442	3505	3.456,7663	257662,93	890680558,7623

Hm	3014,94
----	---------

Fuente: Autor.

De esta manera se determina la altura media de la cuenca con el siguiente valor: **3014,94 m.s.n.m.**

7.2.7. Numero de orden

El número de orden de la cuenca es aquel determinado por el grado de ramificación de la red de drenaje, esto se determina mediante criterios de clasificación de tributarios hacia un cauce principal, donde el orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden de su cauce principal. La cantidad de bifurcaciones que se encuentren en una cuenca puede indicar una facilidad para evacuación de aguas ante eventos de tormentas. El número de orden para esta cuenca es de 3.

7.2.8. Densidad de drenaje

Se define como el cociente entre la longitud total de los cauces de la red de drenaje y el área total de la cuenca, la densidad de drenaje sirve como indicador de la respuesta de la cuenca ante precipitaciones.

Este valor se define cómo:

$$D_d = \left(\frac{L_t}{A} \right)$$

Donde:

A= Área de la cuenca

L_t= Longitud total de todos los cauces de la red de drenaje de la cuenca.

Realizando la medición de la longitud total de los drenajes y aplicando la formula anteriormente se obtiene el siguiente resultado: **0,35.**

Obteniendo el valor de una densidad de drenaje catalogada como pobremente drenada para el área de estudio, esto correspondería a suelos que no tienen una gran facilidad de evacuación de agua y se mantienen húmedos con un nivel freático

alto, lo que indicaría que ante eventos de precipitaciones altas tienen la tendencia a saturarse rápido [23].

7.3. Estimación de caudales máximos

Para la estimación de caudales máximos se procedió a realizar una evaluación de las estaciones encontradas dentro del área de influencia del proyecto, tomando como base estaciones situadas en el municipio de Villapinzón, así como estaciones circundantes cerca al lugar del proyecto para poder seleccionar aquellas estaciones con la información necesaria para poder realizar un análisis de frecuencias para la estimación de caudales máximos.

7.3.1. Selección de estaciones

Para realizar la selección de estaciones se realizó un proceso de búsqueda y clasificación de estaciones según el catalogo a disposición por el IDEAM y la CAR, sobre las estaciones de tipo limnimétrica y limnigráfica que se encargan de la medición de caudales mínimos, medios y máximos de la zona de estudio. Una vez determinadas las estaciones de estudio se procedió a analizar según la cantidad de información, la ubicación y el tipo de estación; la estimación de la estación que se iba a tomar como referencia para poder ejecutar el análisis de frecuencia la estimación de los caudales máximos para diferentes periodos de retorno. La estación finalmente seleccionada corresponde a la estación de Villapinzón de tipo limnigráfica, perteneciente a la corriente del Río Bogotá, la cual cuenta con un registro de 38 años desde 1973 hasta 2014. Ver anexo 5.

Los datos indicados en color amarillo en los años 1964 y 2014 representan vacíos o datos faltantes que fueron completados. Además de esto los datos del año 2000 fueron eliminados debido a que no se contaba con información disponible de la información y utilizando el método de las proporciones se complementaron los datos faltantes en los años 1984 y 2014.

Los Datos faltantes se completaron por el método de proporción normal, que completa datos con la misma estación.

Gráfica 8. Método de proporción normal.

$$\frac{\text{Precipitación durante el mes } i \text{ del año en estudio}}{\text{Promedio de precipitación durante el mes } i \text{ para todos los años de registro}} = \frac{\text{Suma de todas la precipitaciones mensuales del año en estudio}}{\text{Promedio anual de precipitación para todos los años de registro}}$$

Fuente: [24]

Además de esto fue también escogida por estar ubicada aguas abajo del punto de descarga escogido para cerrar la delimitación de la cuenca para realizar el proyecto; Por tal motivo las mediciones de esta estación sirven como valores para poder determinar los caudales de entrada según los diferentes periodos de retorno a evaluar para el modelamiento hidráulico.

7.3.2. Análisis de frecuencia

Para plantear el análisis de frecuencia se deben realizar primero las pruebas de bondad de ajuste y determinar a qué distribución de probabilidad se ajustan mejores los datos. La formulación del análisis de frecuencias consiste en utilizar los datos de caudales reportados en la cuenca según la información suministrada de estaciones, y con esto ajustar los datos a una distribución de probabilidad adecuada, para poder determinar los intervalos de éstos para establecer datos de caudales máximos teniendo en cuenta diversos periodos de retorno. Estos datos servirán como el caudal de diseño de entrada para poder realizar el modelo hidráulico [25].

La forma de realizar el análisis de frecuencias se plantea de la siguiente manera:

- Verificación de datos hidrológicos: En la verificación se filtran las estaciones con la mayor cantidad de datos posibles del lugar de estudio.
- Establecimiento de modelos de distribución de probabilidad: Teniendo completos los datos de la estación elegida se selecciona por año el caudal máximo presentado, para luego ordenarlos de menor a mayor y empezar la ejecución de los modelos de distribución: Normal, log-normal, Gamma tipo III y Gumbel, como se describirá más adelante.
Teniendo en cuenta lo anterior el análisis de frecuencia para este trabajo comienza con la selección de los caudales máximos mensuales multianuales de la estación Limnimétrica Villapinzón como se observa en el anexo 6.
- Pruebas de bondad de ajuste de los datos las distribuciones de probabilidad: Las pruebas de bondad de ajuste, consisten en comprobar gráfica y estadísticamente, si la frecuencia empírica de la serie analizada, se ajusta a una determinada función de probabilidad teórica seleccionada a priori, con los parámetros estimados con base en los valores muestrales. Las pruebas estadísticas, tienen por objeto calificar el hecho de suponer que una variable aleatoria, se distribuya según una cierta función de probabilidades. [26] En este caso se realizó la prueba de Smirnov-Kolmogorov, el cual tienen en cuenta el nivel de significancia y el número total de muestras.
- Realizando la prueba de bondad de ajuste se determina el modelo estadístico a utilizar para determinar los caudales máximos de la zona de estudio en diferentes periodos de retorno.

7.3.2.1. Distribuciones de probabilidad

Los datos obtenidos y analizados se pasan a relacionar y evaluar, de tal forma que se interpreta el ajuste de los datos, vistos como variables aleatorias, descritos por

una distribución de probabilidad. Partiendo de esto se realiza el montaje de los modelos de distribución el cual describe el comportamiento de los datos ordenados.

Las distribuciones se aplican con la función acumulada de datos continuos. Los tipos de distribución a analizar son:

- Distribución normal
- Distribución log-normal
- Distribución gamma tres parámetros o Pearson tipo III
- Distribución Gumbell.

Las funciones se detallan en el Anexo 7.

Teniendo en cuenta las funciones acumuladas, se prosigue a establecer las distribuciones anteriormente nombradas para los datos de caudales máximos anuales obtenidos de la estación Villapinzón, generando la información, encontrada en el Anexo 8.

7.3.2.2. Pruebas de Bondad de Ajuste

Con los anteriores datos se prosigue a realizar la prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov; la cual se describe a continuación:

Tabla 8. Descripción paso a paso de la prueba de bondad de ajuste.

PASOS	FUNCIÓN
Primero: se debe calcular la probabilidad empírica o experimental	$P_x = \frac{m}{N+1}$
Segundo : Se debe calcular la probabilidad teórica	Es la ecuación de la función acumulada F(x) de los modelos teóricos de distribuciones (Ver tabla 11)
Tercero: Calcular las diferencias entre la probabilidad teórica y la empírica.	$F(x) - P(x)$
Cuarto: Seleccionar la máxima diferencia.	$D = \max F(x) - P(x) $
Quinto: Hallar el valor crítico D ₀ con el nivel de significancia α:0.05	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$
Quinto: Se debe seleccionar la distribución que más se ajusta con los siguientes criterios.	$D < D_0 \Rightarrow$ El ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado $D \geq D_0 \Rightarrow$ El ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado.

Fuente: [26]

De acuerdo a lo anterior, se obtuvo la tabla que se puede ver en el Anexo 9.

Se halla el valor criterio D_0 con un nivel de significancia de 0.05 (ver Anexo 10), como se observa a continuación:

$$D_0 = \frac{1.36}{\sqrt{38}} = 0.22$$

Se realiza la comparación:

Tabla 9. Comparación entre D y D_0 para seleccionar la distribución que más se ajusta.

DISTRIBUCIÓN	DATO MÁXIMO	CRITERIO
Normal	0.14	El ajuste es bueno
Log-Normal	0.05	El ajuste es bueno
Gamma-3	0.26	El ajuste no es bueno
Gumbel	0.08	El ajuste es bueno

Fuente: Autor.

Con lo anterior, se puede deducir que el ajuste es bueno tanto en la distribución normal, log-normal y Gumbel; por lo tanto para seleccionar la distribución con la cual se va a calcular el caudal de diseño de la cuenca de estudio, se debe tener en cuenta las características de cada distribución y el uso al cual se va a destinar tal información; en este caso la información obtenida de este modelamiento hidrológico, se destinara para la delimitación de la ronda hídrica y zonificación del riesgo a causa de inundaciones; por ende la distribución Gumbel es la que realiza ajustes de distribución empíricas de variables hidrológicas tales como valores de caudales máximos anuales, mensuales o precipitaciones máximas anuales, entre otros, para realizar inferencias estadísticas que se encuentran muy cercanas a la realidad; por esta características se selecciona el método Gumbel [26].

7.3.3. Cálculo Caudales máximos

Para poder realizar la distribución de frecuencias y el cálculo de los caudales máximos se utilizó la herramienta Hidroesta. Hidroesta es un software libre para cálculos hidrológicos que permite el análisis de parámetros estadísticos con cálculos de regresiones lineales y determinación de ajustes de distribuciones de probabilidad, su fundamento teórico reside en el análisis de las funciones de probabilidad de las variables aleatorias y su estimación de pruebas de bondad de ajuste de las frecuencias ingresadas [27]. Realizando la distribución de frecuencias el programa permite evaluar si una serie de datos se ajustan a una serie de distribuciones: normal, log-normal de 2 y 3 parámetros, gamma de 2 y 3 parámetros, log-Pearson tipo III, Gumbel y log-Gumbel, tanto con momentos ordinarios, como con momentos lineales. Si la serie de datos se ajusta a una distribución, permite calcular por ejemplo caudales o precipitaciones de diseño, con un período de retorno dado o con una determinada probabilidad de ocurrencia [28].

Con la selección del método Gumbel, se prosigue a calcular los caudales de diseño para los periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años, con el uso del software HidroEsta obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 10. Caudal máximo de los diferentes periodos de retorno.

PERIODO DE RETORNO (años)	Caudal Máximo de Diseño (m ³ /s)
2	9.43
5	15.52
10	23.31
20	26.74
50	31.19
100	34.53
200	37.85
500	42.23

Fuente: [29]

8. MODELAMIENTO HIDRÁULICO

Se realizó el planteamiento del modelo hidráulico para el tramo del Río Bogotá, que se encuentra en el municipio de Villapinzón, específicamente en la parte urbana cuyo tramo alcanza aproximadamente 2,1 km. Una vez determinado este tramo, se realizó el recorrido a lo largo de éste, en donde se verificaron en campo las secciones transversales entregadas por la CAR, obteniendo como resultado 38 secciones para todo el recorrido.

Insumos del modelo:

Para plantear y ejecutar el modelo se requirieron de los siguientes insumos:

- Geometría – secciones transversales.
- Información del flujo.
- Tramo del río a trabajar.
- Modelo digital del terreno DEM.
- Caracterización física.
- Número de Manning.

8.1 Secciones Transversales

Se realizó el análisis de las secciones transversales, según su ubicación en campo y así mismo se planteó la determinación del número de manning para los tramos de cada sección. El número de manning se debe definir en las partes principales de la sección transversal que son: el canal principal, el banco o borde izquierdo y el banco o borde derecho; el cual va determinado según el material de la superficie del canal;

esto permite una interpretación más acertada sobre el flujo en las planicies de inundación que podrían formarse en caso de un desbordamiento del canal principal.

Designación Número de Manning para el tramo de estudio

Para la designación del número de manning en el tramo de estudio se planteó por zonas, las cuales comparten características similares en el canal, por lo que cada zona se les es asignada un número de manning; que se encuentra en la tabla descrita en el Anexo 11.

Tabla 11. Número de Manning del tramo de estudio.

Zona	Numero de Manning		
	Borde Izquierdo	Canal Principal	Borde Derecho
Entrada a la zona urbana del municipio	0.050	0.045	0.035
Zona urbana municipio	0.035	0.045	0.035
Tramo plazoleta de Villapinzón	0.027	0.035	0.027
Salida de zona urbana del municipio	0.035	0.045	0.035

Fuente: Autor.

- **Entrada a la zona urbana del municipio:** Corresponden al grupo de secciones transversales que por la topología del terreno tienen un canal principal caracterizado por sus bajos niveles, tramo de corriente en general lenta, con alta presencia de piedras. Sobre el borde, antes de hacer contacto con el canal principal se evidencian matorrales, los bancos presentan hacia el lado izquierdo matorrales y árboles y hacia el lado derecho se denota un terreno más vacío solo con presencia de pasto.

Imagen 1. Descripción del canal que denota el inicio de la zona urbana del municipio.



Fuente: Autor.

De esta forma queda definido el número de Manning de las secciones ubicadas en la entrada a la zona urbana del municipio.

- **Zona urbana municipio:** Atravesando a lo largo de la parte urbana de Villapinzón; en el recorrido del canal principal se vuelve más angosto pero la profundidad del canal es mayor, también se evidencia que aunque pasa por detrás de barrios del municipio, el canal principal en su base se encuentra demarcado por su estado natural, aunque en los bordes se encuentran ciertas estructuras de contención para la estabilidad de taludes, así como muros que hacen parte de las viviendas. Dentro de la zona que atraviesa la parte urbana del municipio se presentó una falta de información en casi 200 metros, en donde los datos no son confiables, ya que no se pudieron definir bien las secciones transversales, debido al difícil acceso que se presentaba al acceder a esta zona.

Imagen 2. Representación de la zona de difícil acceso.



Fuente: Autor.

- **Tramo Plazoleta de Villapinzón:** Llegando al tramo que pasa cerca a la plazoleta de Villapinzón, se observa las estructuras de 3 puentes que atraviesan el río y además de esto se evidencia una canalización de este tramo de río simulando un canal abierto con bordes de concreto, pero este presenta una alta presencia de material orgánico, basuras e incluso crecimiento de matorrales alrededor del canal.

Imagen 3. Representación del canal a los alrededores de la plazoleta.



Fuente: Autor.

- **Salida zona urbana:** En este tramo ya no se evidencian estructuras ni asentamientos en la misma proporción que a unos 50 metros hacia arriba, en este punto se va finalizando el casco urbano del municipio, dejando lugar a una cantidad más limitada de estructuras, las cuales se empiezan a dispersar mucho más aguas abajo.

Imagen 4. Representación del límite de la zona urbana.



Fuente: Autor.

8.2. INFORMACIÓN DE FLUJO

La información de flujo proviene de los datos de los periodos de retorno calculado para los caudales máximos del análisis hidrológico, donde se evaluaron 8 perfiles con 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 años de periodo de retorno. Estos periodos basados en la guía metodológica para la delimitación de zonas de ronda [30], de la CAR, donde adicional a esto se plantean evaluar un periodo de retorno de 500 años para analizar un caso de un caudal tan extremo. Se hizo un análisis sobre

profundidad normal del flujo, evaluando las pendientes del perfil aguas arriba y aguas abajo.

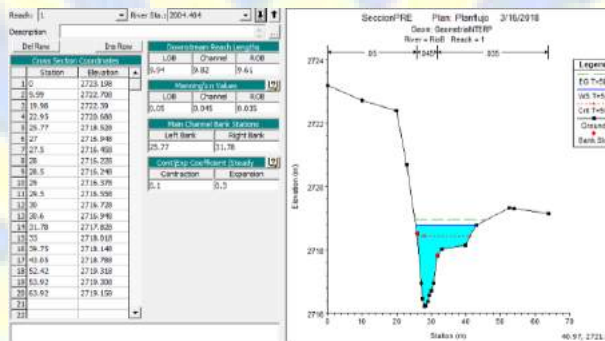
Pendiente Aguas Arriba: 0.015

Pendiente Aguas Abajo: 0.012

8.3. MODELO

Una vez ingresada la información de flujo y realizada la geometría se corre el modelo, estableciendo los datos de geometría y de secciones transversales. El ingreso de las secciones transversales al modelo se ajusta con datos de distancias respecto de los bancos y el canal hacia la siguiente sección, los números de manning correspondientes, el caudal de diseño y la posición de los bancos.

Imagen 5. Modelamiento de la sección con los datos completos.



Fuente: Autor.

8.3.1 Caudal Máximo

Se realiza el análisis de frecuencias basado en la metodología de Gumbel utilizando la herramienta HidroEsta. Igualmente se realizó la aplicación del método de Gumbel por medio de herramienta ofimática, para verificar los resultados de la herramienta de software. La explicación de la ecuación de Gumbel se puede encontrar en el anexo 12.

Luego de realizar el cálculo de los caudales máximos se tiene como resultado la siguiente Tabla:

Tabla 12. Caudal máximo para los periodos de retorno establecidos para el municipio de Villapinzón.

Probabilidad	Periodo de retorno	Caudal máximo (m ³ /s)
P	Tr	Qmax
50	2	9.4258152
20	5	15.524524
10	10	23.306678
5	20	26.743628

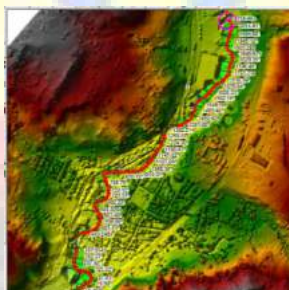
2	50	31.192408
1	100	34.526142
0.5	200	37.847712
0.2	500	42.229893

Fuente: Autor.

8.3.2 Secciones Transversales

Debido a la incertidumbre de información en ciertos tramos de la zona urbana, para poder ajustar el modelo de elevación digital de terreno a datos reales de la sección, se utilizó la interpolación de secciones para permitir complementar datos de terreno que el DEM no podía mostrar por la resolución del mismo.

Imagen 6. Secciones transversales a lo largo del Río Bogotá dentro del municipio de Villapinzón.

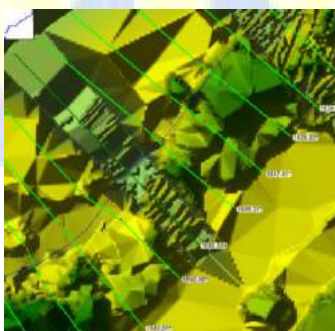


Fuente: Autor.

8.3.2.1 Distribución de secciones

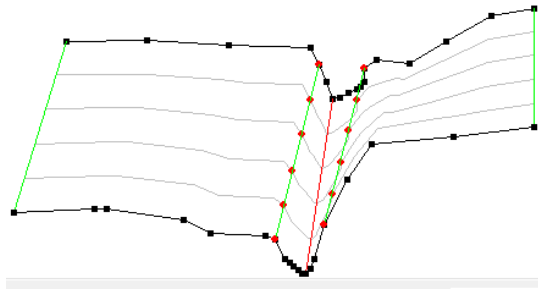
La distribución de las secciones se define por el canal principal, las secciones transversales, en donde las secciones generales se distribuyen cada 50m y las secciones interpoladas cada 10 metros.

Imagen 7. Distribución de secciones.



Fuente: Autor.

Imagen 8. Representación en 3D de las secciones interpoladas.



Fuente: Autor.

8.3.3 Calibración del modelo

Para poder verificar los datos de resultados de la simulación se realiza una comparación entre varios parámetros utilizados como insumos para ejecutar el modelo y las condiciones reales de las condiciones en campo que se ajusten a los aspectos que permitirán que el modelo se ajuste en la mayor medida posible a la realidad.

Considerando las entradas para la ejecución del modelo se toman en cuenta varios aspectos que puedan generar un error en el momento de realizar la simulación, tales como los datos de flujo, la geometría del tramo a evaluar, las condiciones topológicas y las condiciones de frontera para ejecutar el modelo.

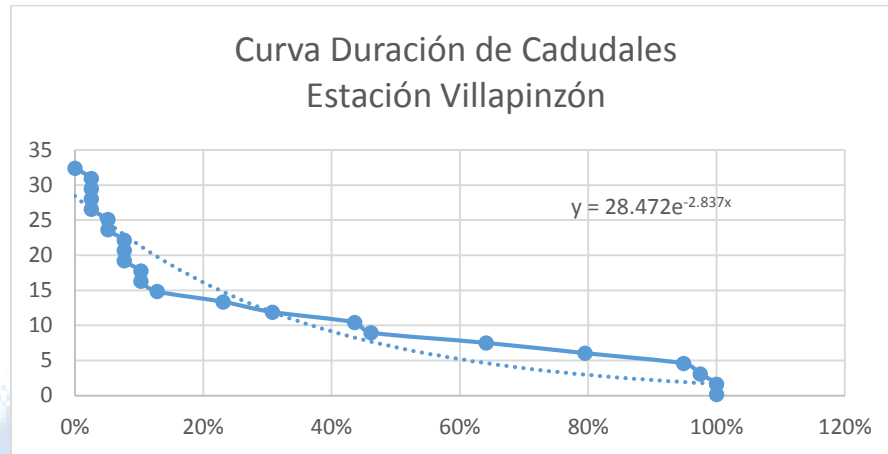
- *Datos de flujo:*

Para determinar la efectividad de datos de flujo, puesto que se cuenta con un análisis único comparativo entre varias estaciones que se ajustaran a las condiciones para poder ejecutar el modelo, se encontró una estación limnimétrica que permitía una mejor evaluación de datos debido a que se encontraba en la zona de estudio del tramo a evaluar y era una estación directamente situada para el Río Bogotá. De esta manera, cuando se realiza el análisis de frecuencias de caudales máximos para el Río Bogotá, tomando como base la información de la estación limnimétrica de Villapinzón; la forma y el procedimiento para realizar la estimación de caudales máximos, obedecen a una serie de pasos que determinan el tratamiento de datos y el ajuste a distribuciones de probabilidad que permite establecer de la mejor manera la realización del análisis de frecuencias. Por tanto la calibración de los datos de flujo se da desde el trato estadístico de estos valores para la determinación de caudales máximos.

Durante la verificación de Gumbel, para calcular los caudales máximos, se realizó la Curva de distribución de caudales, acompañado del procedimiento de análisis de

frecuencia, se realizó el análisis del comportamiento de los datos, obteniendo lo siguiente:

Gráfica 9. Curva Duración de Caudales



Fuente: Autor.

Para verificar la calidad del modelo, se evaluaron los ajustes de caudales de datos reales contrastados con los caudales simulados, para esto se aplicó el criterio de distribución de Nash-Sutcliffe (NSE) en el que plantea [31]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs,t} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Donde:

Q_{obs} = Caudal observado en un cierto tiempo t

Q_{sim} = Caudal simulado para un cierto tiempo t

$\overline{Q_{obs}}$ = Caudal promedio observado

Teniendo esto se toman los valores de referencia de Nash- Sutcliffe donde indica:

Tabla 13. Valores de referencia de Nash-Sutcliffe

NSE	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Suficiente
0.4 – 0.6	Bueno
0.6– 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

Fuente:[31].

Teniendo este criterio se debe tener en cuenta que por la naturaleza de las estaciones, aunque el tipo de estación es ideal para medición de caudales, puede presentar incertidumbre por la toma de muestras, así como también se tienen en cuenta que la falta de datos de algunos años sobre los caudales máximos presentados puede disminuir la idoneidad de la simulación a una situación real.

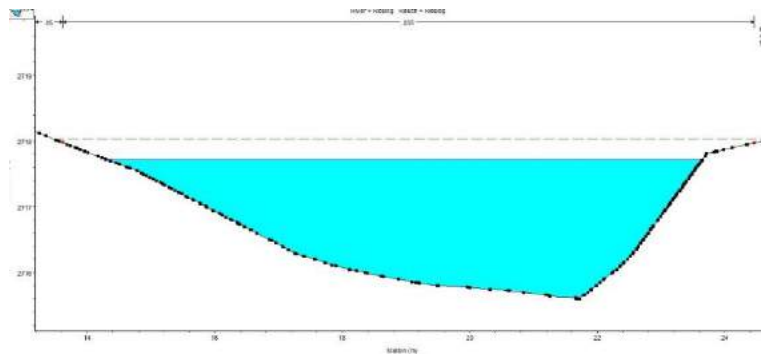
Teniendo en cuenta esto según la evaluación de criterio de Nash- Sutcliffe se obtuvo un valor para el acumulado de los diversos periodos de retorno comparado con los datos observados de: **NSE = 0.7121**.

- *Datos Geométricos:*

Debido al tramo escogido para evaluar el modelo, que obedece a la zona urbana del municipio de Villapinzón, en los 2,1 Km de tramo por evaluar, se presentan bastantes variaciones en aspectos de geometría del canal, topología, materiales y pendientes que dan lugar a un amplio margen de generación de errores debido a la numerada cantidad de ajustes que se deben realizar para la ejecución del modelo, a continuación se mencionan varios aspectos que fueron tomados en cuenta para realizar la calibración del modelo teniendo en cuenta los aspectos geométricos del tramo de estudio:

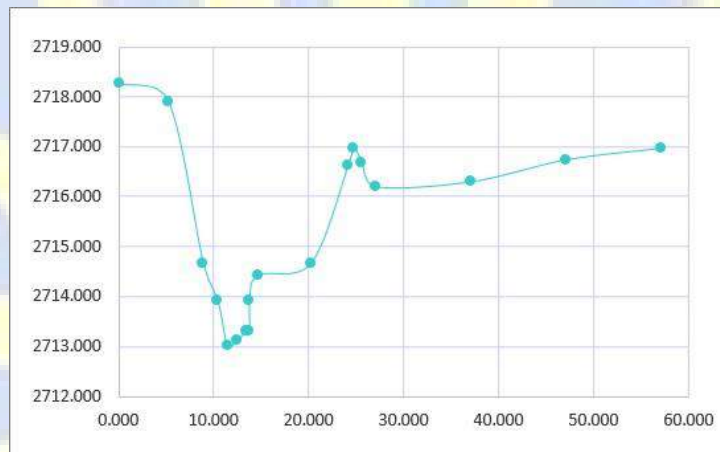
1. Geometría del canal y secciones transversales: Cuando se analiza la información de las secciones transversales, sobre los datos provistos por la CAR Cundinamarca, se puede observar en la entrega de los datos de secciones transversales, que en la mayoría del tramo de estudio se tiene información de perfiles de secciones transversales cada 50 metros, lo que permite una relativa eficiencia alta para poder utilizar estas entradas en el modelo. El problema radicó en la falta de información a ciertas zonas que no poseían fácil acceso, por tanto en ciertos tramos, se omitió información durante 100 metros en incluso hasta 250 metros, debido a que no se tenía forma de ingresar a ese tramo del canal a realizar mediciones. Se realizó verificación en campo de estas secciones donde se evidencia que los datos de batimetría en algunos tramos no se encuentran con un ancho suficiente para evaluar las condiciones del flujo en los bordes derechos e izquierdos del río.

Imagen 9. Perfil de sección transversal modelada.



Fuente: Autor.

Imagen 10. Sección sin modelar.



Fuente: Autor.

Por tanto el siguiente apoyo para determinar las condiciones de terreno fue basarse en el modelo de elevación digital. Así mismo dentro del modelo de elevación digital, se evidencian varias limitantes que dificultan la semejanza de las condiciones reales de campo con las herramientas disponibles para realizar la simulación. Debido a que el ancho promedio del canal del tramo de estudio es aproximadamente de 20, en algunos tramos más, en otros menos, un modelo de elevación digital convencional no sirve para realizar una adecuada modelación del terreno.

Con la colaboración de la alcaldía de Villapinzón se pudo obtener un modelo de elevación digital enfocado especialmente para la parte urbana del municipio que cuenta con una resolución de 50 centímetros. Incluso con este nivel de resolución, debido a que el modelo de elevación digital se realiza a partir de tomas aéreas, en el municipio sobre varios tramos del río y sobre puentes no se puede realizar la evaluación de la profundidad real, ya que se toma el punto más alto que puede evaluar el vuelo, se toman sobre el río copas de los árboles y la altura de los puentes

que pasan encima del río, lo cual hace necesario un ajuste empleando las secciones transversales y editando la geometría del terreno.

Imagen 11. Ortofoto del Municipio.



Fuente: [17].

Imagen 12. Modelo de Elevación Digital Sin Editar.

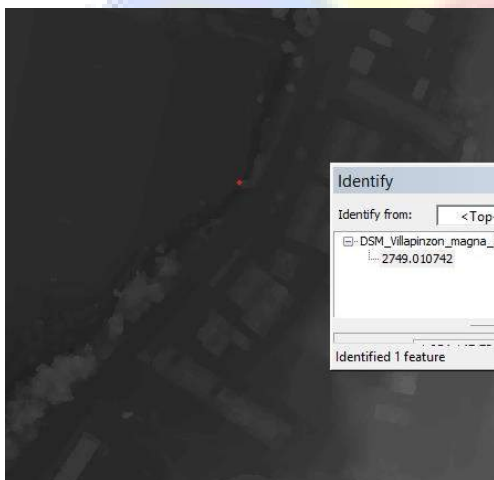
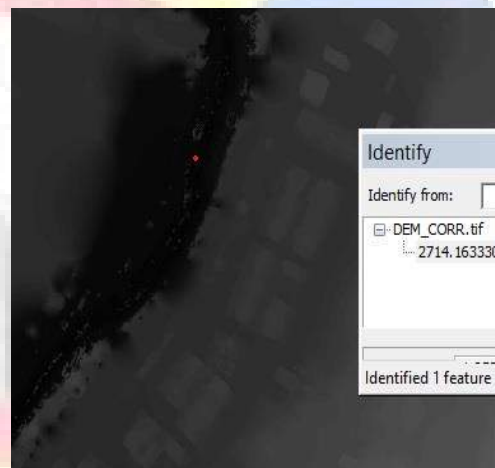


Imagen 13. Modelo de Elevación Digital Editado.



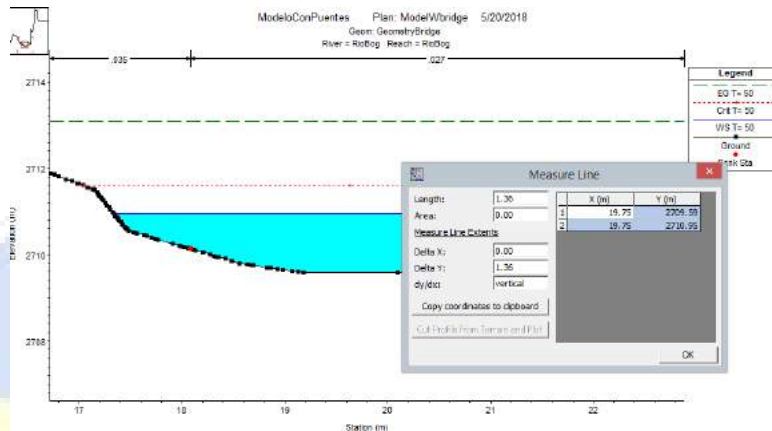
Fuente: [17].

Era necesario la edición del DEM para el análisis de adecuación del terreno para mostrar las llanuras de inundación.

2. Rugosidades del canal: Una forma especial para hacer la calibración de las condiciones de flujo es mediante el ajuste de las rugosidades en el canal, haciendo referencia específica al ajuste de los coeficientes de rugosidad de Manning para evaluar el flujo del canal. Con varios supuestos de diferentes números de Manning se plantearon diferentes iteraciones para el flujo en los canales para poder ajustar lo mejor posible a las condiciones de flujo. Se partió desde la evaluación en varios tramos, dónde hubo variaciones en la rugosidad y desde este aspecto se analizó la rugosidad para el canal principal, el borde izquierdo y el borde derecho. A partir de la iteración de las consideraciones en las

variaciones del número de Manning se ajusta el error del modelo sobre el modelo de un caudal. Se analiza sobre la sección transversal situada en la estación de Villapinzón la elevación sobre el periodo de retorno de 50 años.

Imagen 14. Sección Transversal Estación Villapinzón.



Fuente: Autor.

Sobre esta sección se tienen coeficientes de rugosidad asociados de 0.027 en fondo y 0.035 en los bancos. Contrastando estos resultados de elevación se procede a evaluar una evaluación del error de estos índices de Manning evaluando una elevación empírica de lámina de agua y comparando resultados a partir de los datos de hec ras de elevación de lámina de agua y cálculo empírico de elevación a partir de la ecuación de Manning despejada se tiene que:

$$Q = A * \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * \sqrt{S}$$

Dónde:

Q= Caudal de flujo, expresado en m³/s

A= Área de flujo expresada en m²

R= Radio hidráulico

S= pendiente media del canal

n= Coeficiente de Manning

Despejando de esta ecuación se obtiene la altura media de flujo para cada sección.

Dentro de los resultados arrojados, para la sección específica se obtuvo una altura de 1.3662m. Para este tramo en específico se tiene un error relativo de 0.6% sobre la superficie de elevación de agua.

Siendo así el cálculo del error cuadrático medio sobre la configuración que dependerá en los datos de flujo sobre el número de Manning se da por:

$$RMSE \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_o - O_i)^2}{n}} [32]$$

Teniendo una sumatoria de datos para el número total de 103 secciones transversales se tiene un Error de: 7.123%. Es un error relativamente alto para todas las secciones pero se debe evaluar el hecho de las condiciones del mismo modelo y la forma como se realizó la edición de la topografía ya que no se contaba con suficientes herramientas para poder adaptar por completo la geometría del río y en algunas zonas se obtuvieron errores porque se hizo un ajuste con promediación de secciones transversales.

9. ZONIFICACIÓN DEL RIESGO

9.2. INTRODUCCIÓN

El riesgo se puede entender como el resultado de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un evento, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, o factor interno de selectividad de la severidad de los efectos sobre dichos elementos; en este caso un fenómeno natural de origen hidrológico como es el caso de una inundación, genera un riesgo latente en zonas aledañas a un cuerpo de agua que no preserva su ronda hídrica por causa de los asentamientos humanos ilegales o desvió de éste por actividades socioeconómicas propias del municipio; por ende se establecen medidas estructurales, como el desarrollo de obras de protección y la intervención de la vulnerabilidad de los elementos bajo riesgo, y medidas no estructurales, como la regulación de usos del suelo, la incorporación de aspectos preventivos en los presupuestos de inversión y la realización de preparativos para la atención de emergencias, pueden reducir las consecuencias de un evento sobre una región o una población [33].

En este capítulo se describe de manera conceptual y metodológica, la manera de evaluar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo en el municipio de Villapinzón, por tal motivo se desarrollarán matrices de riesgo de los elementos estructurales, obteniendo así una zonificación del riesgo del municipio.

9.3. ANTECEDENTES DE INUNDACIÓN

Tomando como referencia los datos de la base de datos DesInventar y los consolidados anuales de la UNGRD, para el municipio de Villapinzón, se encuentra el histórico de 32 eventos generadores de desastres a partir del año 1936 hasta el año 2016 (Tabla 13).

A continuación, se presentarán los antecedentes históricos ocurridos en el municipio, con respecto al fenómeno de inundación:

Tabla 14. Históricos de inundación ocurridas en el municipio de Villapinzón.

FECHA	EVENTO	SITIO
15/08/1936	Inundación	Sin dato
30/11/1993		Sin dato
13/05/2011		Zona urbana
12/06/2012		Sin dato
26/06/2015		Quebrada Quinchía – Río Bogotá

Fuente: [34], [35].

Con respecto a otros eventos, solo el 17% corresponde a eventos que se materializaron en inundación, según los informes de los eventos ocurridos entre el año 1936 – 2016, proporcionados por UNGRD.

Gráfica 8. Porcentaje de incidencia de los eventos materializados entre los años 1936-2016 en el municipio de Villapinzón.



Fuente: [35].

En el año 1993, el 30 de noviembre, se presentó un evento de inundación el cual dejó afectadas 150 fábricas de curtiembre [36].

La UNGRD en el consolidado anual de emergencias del año 2013, registra un evento de inundación el cual deja la necesidad de reubicar a aproximadamente 500 personas que quedaron sin vivienda; y para el año 2015, el 26 de Junio, se registra el desbordamiento de la Quebrada Quinchía y el Río Bogotá, el cual dejó en afectación la bocatoma del acueducto municipal, dejando sin servicio de agua a más 6500 habitantes del sector urbano [36].

9.4. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

La amenaza está relacionada con el peligro que significa la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural o tecnológico, que puede manifestarse en un sitio y durante un tiempo de exposición prefijado [33].

La evaluación de la amenaza, se debe realizar combinando el análisis probabilístico con el análisis del comportamiento físico de la fuente generadora, utilizando información de eventos que han ocurrido en el pasado y modelando con algún grado de aproximación los sistemas físicos involucrados; es decir, este busca “pronosticar” la ocurrencia de un fenómeno con base en el estudio de su mecanismo generador, el monitoreo del sistema perturbador y/o registro de eventos en el tiempo [33].

9.5. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD

El análisis de vulnerabilidad, es un proceso mediante el cual se determina el nivel de exposición y la predisposición a la pérdida de un elemento o grupo de elementos ante una amenaza específica, contribuyendo al conocimiento del riesgo a través de interacciones de dichos elementos con el ambiente peligroso [33]. Los elementos bajo riesgo son los contextos social, material y ambiental, representados por las personas, por los recursos y servicios que pueden ser afectados por la ocurrencia de un evento, es decir, las actividades humanas, los sistemas realizados por el hombre tales como edificaciones, líneas vitales o infraestructura, centros de producción, utilidades, servicios y la gente que los utiliza [33] [37]. En este caso en el análisis de vulnerabilidad del municipio de Villapinzón se unifica el contexto social y material generando una matriz que evalúa que tan vulnerable se encuentra el sector de la cuenca alta del río Bogotá frente a una inundación, en la cual debe servir de alerta para mitigar y/o disminuir cualquier impacto que se pueda producir.

9.6. ESTIMACIÓN DEL RIESGO

El riesgo se obtiene de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Por lo tanto, el riesgo puede ser de carácter geológico, hidrológico, atmosférico, entre otros [33]. En este caso se habla de un riesgo específico, que es la inundación (riesgo de carácter hidrológico), en donde es la pérdida esperada en un periodo de tiempo, que puede ser expresada como una proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos bajo riesgo; usualmente el riesgo específico representa pérdidas de vidas, heridos y pérdidas de inversiones de capital como lo son los bienes raíces, los cultivos, el ganado y demás actividades económicas que generan una entrada al municipio; teniendo en cuenta el riesgo contemplado se pueden tomar unas medidas de reducción del riesgo a su mínima expresión, mediante acciones sociales e infraestructura civil [33]. Se debe tener en cuenta que existen riesgos que no se pueden reducir a cero, en especial con los de carácter hidrológico, debido a que las variables que afectan a éste residen bajo una probabilidad calculada de datos tomados en una consecución de años, contemplando el retorno de ellos; por tal motivo para efectos de la planificación y el diseño de obras de infraestructura y de protección es necesario definir un nivel de “riesgo aceptable”, es decir un valor admisible de probabilidad de consecuencias sociales y económicas [33].

9.7. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO ANTE INUNDACIONES

La metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo de las edificaciones en centros urbanos, se aplica después de contar con la evaluación de amenazas y un diagnóstico físico del centro urbano en estudio. Para el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones, se tienen dos metodologías [38]:

- Cualitativa: Identificación de cuadras y/o lotes con indicadores críticos de las variables seleccionadas para el análisis, comparándolas con las zonas de amenaza a inundaciones, obteniendo niveles de vulnerabilidad y riesgo a la vez [38].
- Heurística: Asignación de una ponderación a cada variable seleccionada, según su importancia ante inundaciones y asignación de un valor, a cada indicador de cada variable, según su nivel de criticidad. Los niveles de vulnerabilidad de cada cuadra quedan establecidos mediante rangos [38]. En resumen, se tiene una metodología fácil de implementar, con cuadros y matrices que combinan lo cuantitativo con lo cualitativo, donde lo fundamental es la asignación de las ponderaciones y valores a las variables e indicadores y los criterios técnicos de los especialistas, así como una buena base de datos, a nivel de cuadra o lote y la utilización del sistema de información geográfica (SIG o GIS), para el procesamiento [38].

De acuerdo con la anterior, en este trabajo se utilizó la metodología Heurística, la cual combina aspectos cualitativos y cuantitativos, y se procede de la siguiente manera:

Paso 1

- Elección de las variables más representativas de vulnerabilidad ante inundaciones.
- Asignación de un peso (ponderación), de acuerdo a su incidencia; a mayor peso, mayor incidencia.
- Asignación de un valor a cada uno de los indicadores de cada variable. Mayor valor al que tienen mayor incidencia.

Las variables se eligieron de acuerdo a las zonas establecidas en el recorrido in situ, debido a que las condiciones del terreno no dejaban entrarnos en algunos tramos del recorrido del Río Bogotá, por ende se establecieron los siguientes criterios:

- Características de los materiales constructivos (Artesanal-tejas de zinc, polietileno, polisombra-, adobe, mampostería convencional, mampostería estructural, concreto – sistema aporticado o industrializado-).
- Estado de conservación de las edificaciones.

- Emplazamiento del borde del río (si se encuentran dentro o fuera de la ronda hídrica).
- Ubicación respecto al nivel de la vía (superior o inferior).

Con los anteriores criterios, se establecieron las siguientes zonas, las cuales evaluaremos con la amenaza latente en estudio que es la inundación:

Zona 1: En esta zona encontramos viviendas de carácter artesanal, es decir, asentamientos humanos donde los materiales constructivos son varas limatón, tejas de zinc y polisombra, en la cual se encuentra en muy mal estado, cerca al borde del río y por debajo del nivel de la vía; por lo que su vulnerabilidad a una amenaza de inundación es bastante alta. Ver Anexo 13.

Zona 2: En esta zona encontramos viviendas construidas con adobe, en donde combinan la mampostería de bloque con mampostería de ladrillo prensado, en condiciones deterioradas y sin ningún patrón de construcción, al igual se encuentran cerca al borde del río y por debajo del nivel de la vía, aumentando así la vulnerabilidad a ser inundadas. Ver Anexo 14.

Zona 3: En esta zona encontramos viviendas con sistema constructivo aporticado con mampostería convencional, en donde tienen cimentación, columnas y placa en concreto, junto con mampostería convencional que cierran sus fachadas y generan los espacios de la edificación, en condiciones de buen estado; estas se encuentran al borde del cauce del río. Ver Anexo 15.

Zona 4: En esta zona encontramos edificaciones construidas en concreto, en donde se aglomeran gran cantidad de personas, las cuales se encuentran por encima del nivel de la vía y no se presentan en la ronda hídrica del río, aunque necesitan mantenimiento y tratamiento para evitar su deterioro; sin embargo pueden servir como lugar de encuentro y/o refugio en caso de una emergencia de inundación. Ver Anexo 16.

De acuerdo a lo anterior, se determina las variables de capacidad, material, estado de conservación, emplazamiento al borde del río y nivel con respecto a la vía; la capacidad de personas en una edificación se determinó, de acuerdo a la conglomeración que esta puede albergar correspondiente al espacio que esta tenga y las demás variables con respecto a cómo se observaban éstas edificaciones.




Las zonas descritas anteriormente se encuentran distribuidas de la siguiente manera.

Imagen 15. Zonificación urbana de las zonas de estudio del municipio de Villapinzón.



Fuente: [39]

ZONA	COLOR
Zona 1	Blue

Zona 2	
Zona 3	
Zona 4	

Fuente: Autor.

Paso 2.

- Luego de definir las zonas, según el material constructivo, el estado de conservación, el emplazamiento respecto al borde del río y al nivel que se encuentra con respecto a la vía, las cuales se determinaron mediante una visita técnica, se realizó una matriz cualitativa, identificando las zonas con mayor vulnerabilidad, en el recorrido del río dentro de Villapinzón y en el lugar de estudio que se seleccionó para este proyecto. Ver Anexo 18.

Paso 3.

- Establecer los rangos de los niveles de vulnerabilidad. Ver Anexo 19.

Paso 4.

- Con los niveles de vulnerabilidad, se establecen los niveles de peligros, descritos en el siguiente cuadro. Ver Anexo 20.

Con los peligros establecidos en un rango, se prosigue a llenar la matriz de riesgo, la cual se observa en el Anexo 21; en donde se puede contemplar que dentro de las cuatro zonas seleccionadas dos presentan muy alto riesgo y una un alto riesgo, lo que indica que el municipio de Villapinzón, el riesgo a una amenaza de inundación es muy alto, debido a las condiciones de las edificaciones y a que estas se encuentran al borde del cauce, aumentando así su vulnerabilidad. Esta matriz se llena de acuerdo a los valores de vulnerabilidad establecidos, los cuales se multiplican por los valores de las variables establecidas: capacidad (4), material (6), estado de conservación (4), emplazamiento al borde del río (10) y nivel con respecto a la vía (10); obteniendo un valor de peligro y así obteniendo el nivel de riesgo de la zona. Según la visita de campo al municipio, la caracterización de las zonas de vulnerabilidad y la matriz de vulnerabilidad se tiene como resultado un análisis de la evaluación de las áreas expuestas. Ver Anexo 22.

Teniendo en cuenta que el riesgo está definido como la resultante de la interacción del Peligro con la Vulnerabilidad:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad}$$

La formulación de escenarios de riesgo comprende la estimación de pérdidas y daños que podrían sufrir diversos tipos de zonas ante la ocurrencia de algún desastre asociado a los principales peligros identificados [38]. Por lo tanto identificar los peligros, como las condiciones de vulnerabilidad que el municipio presenta en el

territorio, es posible determinar una distribución espacial del riesgo, con la finalidad de determinar y priorizar acciones, intervenciones y proyectos de manera específica, orientados a disminuir los niveles de vulnerabilidad y riesgo.

Del análisis desarrollado de la asociación de niveles de peligro Muy Alto con zonas de Vulnerabilidad Muy Altas, se identifican Zonas de Riesgo Muy Alto. Conforme disminuyen los niveles de Peligro y Vulnerabilidad, disminuye el Nivel de Riesgo y por lo tanto el nivel de pérdidas esperadas [38]; de acuerdo a lo anterior el peligro y la vulnerabilidad disminuyen conforme a los siguientes criterios:

- Cuando se tienen pendientes pronunciadas en el tramo, como en sistemas acanalados profundos cerca de estructuras o caídas, el nivel de exposición ante crecientes sobre estas estructuras disminuye.
- El flujo puede presentar empozamientos en los meandros de los ríos y en zonas que el flujo pueda ser obstruido o ralentizado por un factor externo.
- Mayor susceptibilidad tienen las edificaciones que son de materiales artesanales, sumadas a un mal estado de conservación.

De acuerdo al Anexo 20, se establece la siguiente matriz la cual relaciona la vulnerabilidad y el peligro, para así obtener el nivel de riesgo que presentan las zonas establecidas en el municipio de Villapinzón.

Tabla 15. Matriz de relación de los niveles de vulnerabilidad y peligro para obtener el nivel del riesgo de las zonas estudiadas en el municipio de Villapinzón.

N°	NOMBRE	NIVELES DE VULNERABILIDAD				NIVELES DE PELIGRO				NIVELES DE RIESGO			
		MA	A	M	B	MA	A	M	B	MA	A	M	B
1	zona 1	4					3			4			
2	zona 2	4					3			4			
3	zona 3		3					2				2	
4	zona 4				1								1

Fuente: Autor.

Dónde: MA (Muy Alta), A (Alta), M (Medio), B (Bajo).

De acuerdo a la tabla 14, el municipio de Villapinzón, presenta dos zonas con muy alto riesgo de inundación (Zona 1 y Zona 2), una zona con un nivel medio de riesgo (Zona 3) y por ultimo una zona que presenta un bajo riesgo (Zona 1); lo que significa que se debe atacar con planes de acciones y de contingencia a la zona 1 y zona 2; ya que si se presenta el fenómeno de inundación, estas zonas serán las más afectadas y las que mayores pérdidas tendrán.

Como resultado se obtiene un mapa, que representa un evento con un periodo de retorno de 50 años; Debido a que este flujo representa un nivel de amenaza alta sobre las zonas que tienen así mismo un nivel de vulnerabilidad medio o alto. Ver Anexo 23.

10. ANALISIS MANCHAS DE INUNDACIÓN

En este capítulo se realizara un análisis de la mancha de inundación en los diferentes periodos de retorno (2,5,10, 20, 50, 100, 200 y 500) respecto a las diferentes zonas que se clasifico Villapinzón en el proyecto para el análisis de riesgo.

10.1. Periodo de Retorno T = 2 años

El caudal de flujo de este periodo fue de 9,42 m³/s

Entrada a la zona urbana:

Entrando a la zona urbana no se presentan altas velocidades, la velocidad sobre el canal principal no supera los 2 m/s, el ancho del canal no presenta ningún desbordamiento y el flujo se da sobre el canal principal sin presentar desbordamientos. Ver Anexo 24.

10.1.1 Zona 3

En la zona 3 se puede determinar que la altura de lámina de agua sobre el canal principal puede llegar a una profundidad no mayor a 1,6m en promedio a lo largo de esta zona. El ancho promedio del flujo en este tramo es de 10 m, lo cual no representa ninguna amenaza para las estructuras presentes. Ver Anexo 25.

5.1.2 Zona 1

En esta zona predomina la presencia de estructuras realizadas con materiales artesanales; sobre el centro del canal se tiene una profundidad de 1,3m y la mancha golpea débilmente los bordes de las estructuras que puede amenazar, las velocidades así mismo son bajas, sin superar 1,8 m/s, el caudal no eleva notoriamente la mancha hacia los bordes del canal, el flujo queda predominante sobre el eje principal del canal. Ver Anexo 26.

5.1.3 Zona 2

En la zona 2 se presenta una altura de lámina de agua promedio de 1,4 metros respecto al eje central del canal. No presenta grandes variaciones de velocidad la cual no supera los 1,6 m/s y en general no se evidencia amenaza sobre las estructuras circundantes. Ver Anexo 27.

5.1.4 Zona 4

Este tramo corresponde a el sistema acanalado de va por toda la cuadra de la plaza principal de Villapinzón. La lámina de agua varía entre 1 y 1.5m, ya que el canal en este punto presenta una altura de hasta 4 metros, y a parte de la plazoleta no se encuentran más estructuras cercanas a esta área, por tanto la amenaza es bastante

baja para este periodo de retorno. Aunque se evidencian velocidades altas en este tramo que pueden llegar hasta 2 m/s. Ver Anexo 28.

Salida de la zona urbana:

Corresponde a la parte final del tramo que no tiene presencia de puentes y no presenta una cercanía significativa a estructuras en su borde derecho. Así mismo en este punto de salida de la parte urbana del municipio, el río se conduce por una zona acanalada donde se encuentra a un nivel inferior de las estructuras presentes en la zona exceptuando por una zona de vivienda terminando el último puente que por la calidad de materiales de la vivienda puede tener un riesgo relativamente alto debido a que tiene materiales presentes en las zonas tipo 1 de zonificación de vulnerabilidad. Con una barrera de tipo artesanal.

1.1. Periodo de Retorno 5 años

El caudal para este periodo de retorno fue de 15,52 m³/s

Entrada al municipio

Esta zona no presenta grandes cambios respecto al periodo de retorno anterior, la profundidad sobre el segundo puente entrando a la zona urbana del municipio puede llegar a 1,7m y además tiene unos picos de velocidad de hasta 3 m/s pero solo en un pequeño tramo de 5 metros, luego de esto la velocidad se estabiliza hasta el orden de 2 m/s. Ver Anexo 29.

5.2.1 Zona 3

La lámina de agua varía entre 2m a 1.16 m sobre el centro del eje del canal., el cual no generaría gran impacto, ya que alrededor no encontramos viviendas que puedan ser afectadas por el aumento de ésta; al contrario encontramos zonas llanas y gran sección de matorrales y arbustos. Debido al curso que toma el agua en este tramo, las velocidades pueden variar entre 2m/s y 4 m/s en esta zona. Ver Anexo 30.

5.2.2 Zona 1

Para este tramo la lámina de agua varía entre 1,3 y 1,7m, las velocidades se mantienen constantes cercanas a 3 m/s. Ver Anexo 31.

5.2.3 Zona 2

En este tramo sobre la salida desde el puente el agua presenta una profundidad de hasta 2 m, luego avanzando por la zona abierta de este canal, en la curva su profundidad baja considerablemente hasta casi 1m, así mismo las velocidades se reducen respecto a los tramos anteriores, bajando hasta 2 m/s. Ver Anexo 32.

5.2.4 Zona 4

Entrando a la plazoleta cuando se presenta la reducción por el canal en concreto, la lámina de agua se vuelve a elevar hasta los 2 metros y en este tramo la velocidad se mantiene constante con un valor cercano a 3 m/s. Ver Anexo 33.

Salida del municipio

En este punto no se presenta gran afectación, Por lo amplio del canal en esta zona, la lámina de agua no supera 1,5m de profundidad y las velocidades no sobrepasan los 3 m/s. Ver Anexo 34.

1.2. Periodo de Retorno 10 Años

El caudal para este periodo de retorno fue de 23.31 m³/s

Entrada al municipio

Sobre la entrada al municipio el tramo entra con mayor velocidad, alcanzando valores de hasta 3m/s y 4 m/s, sobre este periodo de retorno se evidencia una ampliación del ancho del canal principal, donde puede llegar hasta 10 metros, y profundidades sobre el eje central del canal de hasta 2 metros. Ver Anexo 35.

5.3.1 Zona 3

La zona derecha de la margen empieza a presentar mayores presiones hacia los bordes, pero las profundidades de flujo no han aumentado significativamente, aunque llegan a alcanzar a los 2 m, pasando la estructura alargada de color blanco apreciable en la siguiente imagen, se determina un pico de velocidad que alcanza hasta los 5 m/s aunque en general la velocidad se mantiene sobre un promedio de 3 m/s. Ver Anexo 36.

5.3.2 Zona 1

Sobre esta zona la mancha de inundación alcanza profundidades en el eje central del canal de más de 2 metros, y las velocidades en el estrechamiento del canal superan los 4 m/s, pero oscila entre 2 m/s y más de 4 m/s. Ver Anexo 37.

5.3.3 Zona 2

Para esta zona, sobre el eje central del canal, se presentan profundidades de más de 2 metros hacia la reducción que está acanalada, y se genera presión sobre los bordes de las estructuras más hacia el sur de esta zona. Las velocidades se acercan a los 4 m/s. y sobre los bordes del canal se chocan hasta un nivel de 30cm en las paredes de las estructuras cercanas al tramo. Ver Anexo 38.

5.3.4 Zona 4

Sobre la plazoleta de Villapinzón en la zona 4, las profundidades en el canal empiezan a superar los 2,2 metros. Y las velocidades mantienen una constante entre 3 m/s y 3,5 m/s. Ver Anexo 39.

Salida del municipio

La salida del municipio para este periodo de retorno aunque se presentan profundidades que llegan a los 2 metros sobre el eje central del canal, no existe una amenaza sobre las estructuras cercanas, así mismo las velocidades se mantienen en el orden de entre 2,5 m/s y 3 m/s. Ver Anexo 40.

1.3. Periodo de Retorno 20 Años

El Caudal para este periodo de retorno es de 26,74 m³/s

Entrada al municipio

Para la entrada al municipio en este periodo de retorno sobre el eje central del canal, se presentan profundidades que superan los 2 metros, con velocidades cercanas a 3,8 m/s. Igualmente en general debido a la falta de estructuras en esta zona no se evidencia una amenaza latente sobre las pocas edificaciones presentes cerca al río en esta zona. Ver Anexo 41.

5.4.1 Zona 3

Sobre esta zona las velocidades se mantienen superiores a 2 m/s, y la profundidad de flujo en la reducción empieza a alcanzar valores altos de hasta 3 m sobre el eje central del canal. El ancho de la mancha se expande hasta 15 metros y aumenta la presión sobre las paredes de las estructuras pegadas al río en este tramo. Luego de la estructura blanca las velocidades alcanzan un pico de hasta 7 m/s y la presión sobre esta estructura ya golpea en las paredes, denotando una verdadera amenaza sobre esta edificación. Ver Anexo 42.

5.4.2 Zona 1

La zona 1 empieza también a tener mayores presiones sobre las paredes de las estructuras más cercanas y el flujo hace que la mancha se expanda hasta lograr un ancho de 12 metros en este tramo. Las velocidades se mantienen superiores a 2,4 m/s y superando los 5,2 m/s. Sobre el eje principal del canal se puede llegar a superar los 2 metros de profundidad, empezando a chocar con los límites de los puentes que pasan por esta zona. Ver Anexo 43.

5.4.2 Zona 2

Esta zona empieza a aumentar considerablemente su mancha de inundación, en especial en la zona abierta antes de entrar al canal estructurado, en esta curva el agua entra con velocidades de 3,5 m/s, luego se expande la mancha hasta un ancho de 20 metros, cuando el flujo entra en la reducción, vuelven a aumentar las velocidades, acercándose a los 4 m/s y la profundidad puede acercarse a los 3 metros. Ver Anexo 44.

5.4.4 Zona 4

Sobre la plazoleta de Villapinzón, las velocidades en este punto tienen un promedio superior a 3 m/s y la profundidad de la mancha en el canal puede llegar a los 2,5 metros, lo cual no presenta mayor amenaza sobre los puentes de esta zona ni a las estructuras cercanas. Ver Anexo 45.

Salida del municipio

A la salida del municipio, pasando el último puente, se presenta una presión sobre una vivienda que no está realizada con elementos estructurales sino con de una forma más artesanal. Pasando el último puente la estructura choca con sus paredes con la mancha de inundación de hasta 15 cm. Luego de esto no se presenta mayor amenaza sobre las demás estructuras. El flujo tiene una salida a una velocidad superior a 3 m/s y una altura promedio de 2m sobre el eje central del canal. Ver Anexo 46.

1.4. Periodo de Retorno T= 50 años

El caudal de flujo de este tramo fue de 31.19 m³/s.

Entrada la zona urbana:

El tramo cuenta con una velocidad máxima en el canal de 2,58 m/s pero debido a que el río presenta una curva esta velocidad es disminuida hasta 1,49m/s, donde se presenta hacia el final del puente una contracción del canal y se produce una acumulación de agua, formando una mancha que puede llegar hasta un ancho de hasta 18 metros. La elevación de la columna de agua identificada sobre el centro del canal puede llegar hasta 3m. Así mismo como no se evidencia una alta presencia de infraestructuras, no se nota una afectación directa en la zona; únicamente se evidencia que la mancha intenta invadir una propiedad sin causar mayor afectación que en la entrada de este mismo. Ver Anexo 47.

5.5.1 Zona 3

Este tramo debido a que luego del segundo puente presenta una reducción del canal, aumenta abruptamente la velocidad hasta 5.45 m/s inmediatamente después de la reducción. Más adelante la velocidad se estabiliza y se presenta un ancho de

canal uniforme de hasta 15 metros, así mismo esta zona hasta la llegada al siguiente puente, no se presenta presencia de infraestructuras. Con una altura máxima de lámina de agua de 2.33 metros en el eje central del canal y en los tramos laterales presenta una altura de cerca 40 cm hasta 17 cm. Ver Anexo 48.

Luego de esto entrando a la zona urbana, está la presencia del puente 3, con la estructura de puente de madera que conduce a la entrada a una vivienda cercana. La contracción del canal en esta zona para el caudal planteado de 50 años de periodo de retorno, el puente puede llegar a ser inundado y puede presentar una altura de hasta 20 cm sobre el centro del puente. Ver Anexo 49.

Luego de esto avanza en un pequeño tramo donde se evidencia una limitada presencia de infraestructuras pero la mancha de inundación choca con las estructuras sin tener que inundarlas o pasar a través de ellas, la velocidad del canal es de 2.55 m/s máximo, con un ancho de la mancha de hasta 16 metros aproximadamente. Así mismo la mancha que sale más allá del canal se inclina más hacia el lado derecho del canal, que no tiene infraestructura pegada al canal a diferencia del borde izquierdo. Ver Anexo 50.

El choque con el cuarto puente para este periodo de retorno no interviene con el puente. Todo el flujo pasa por debajo de este. Ver Anexo 51.

Avanzando por este tramo el ancho del canal se mantiene constante de 10 metros, con elevaciones de columna de agua de hasta 2 metros.

5.5.2 Zona 1

Este tramo presenta una reducción y una formación de una estructura acanalada que está por debajo del nivel de las cuadras y de las estructuras. Se plantea un sistema en canal trapezoidal que conduce por toda la cuadra, en una zona de barrios que no presentan amenaza sobre la cuadra concretamente por el sistema acanalado. Representa un canal con velocidades de hasta 5,3m/s, con anchos de canal de 10 metros. La profundidad desde el centro del canal puede llegar hasta 2.11 metros y menor a 30 cm en los bordes del canal. Ver Anexo 52.

Adicional a esto no se presenta un riesgo mayor de amenaza sobre las estructuras presentes en ese tramo.

5.5.3 Zona 2

Esa mancha de este tramo corresponde a una zona con curvatura donde el agua tiene unas variaciones duras de velocidad desde 2.12 m/s, perdiendo velocidad hasta 0.68 m/s y luego del tramo amplio se presenta una reducción en el canal y

este aumenta su velocidad hasta 6 m/s. El ancho de la mancha en este tramo no corresponde a la invasión de estructuras a pesar de llegar hasta un ancho de 27 metros. Se tiene la presencia al inicio del tramo sobre el borde derecho del tramo de estructuras. Ver Anexo 53.

Este tramo corresponde a la zona de una de las últimas cuadras de la zona urbana que atraviesa el municipio, contiene al final de su tramo, al inicio del tramo hasta más allá de la mitad de esta zona la mancha no presenta invasión en otras zonas que no sean maleza y tierra. Con las estructuras choca en la pared, pero por la calidad de materiales en esa cuadra no presentan una amenaza alta. Ver Anexo 54.

Las velocidades sobre este tramo son en promedio altas, con un tope de hasta 6.81 m/s con variaciones de 4m/s y 2 m/s. el ancho de la mancha de inundación llega hasta 22 metros pero en general en el canal no supera los 10 metros de ancho.

5.5.4 Zona 4

Este tramo corresponde a el sistema acanalado de va por toda la cuadra de la plaza principal de Villapinzón. El sistema acanalado de concreto le da una importante altura en ese tramo. Las alturas de la lámina pueden llegar hasta los 2,5 metros sobre el eje principal del canal. Por lo cual no presenta riesgo de sobrepasar la altura de los puentes presentes en ese tramo de la cuadra. Ver Anexo 55.

Las velocidades de flujo tienen un máximo de 3.07 m/s con un ancho que no supera los 10 metros debido a la geometría del mismo canal.

Salida de la zona urbana

Las velocidades en este último tramo varían desde 2 m/s hasta 5.59 m/s, así mismo la geometría natural acanalada no permite generar una mancha de inundación superior a 13 metros. Debido a la falta de presencia de infraestructura y como es similar a la entrada del río al municipio esta zona se puede excluir de una amenaza alta debido a la falta de cercanía con viviendas o infraestructuras. Ver Anexo 56.

1.5. Periodo de retorno 100 años

El caudal de flujo de este tramo fue de 34.53 m³/s

Entrada a la zona urbana

Se evidencia en el tramo una velocidad máxima de 4.11 m/s en el canal, con profundidades máximas en el tramo de hasta 3 metros sobre el eje central del canal, sobre el trayecto no tiene presencia de viviendas o similares. El ancho del canal puede llegar en promedio hasta 19m.

El caudal no aumenta significativamente respecto al periodo de retorno de 50 años, por tanto las variaciones de las condiciones, las velocidades aumentan mínimamente, y hacia los bordes no presentan aumentos significativos de velocidad. Ver Anexo 57.

Luego de esto el tramo continua con una velocidad máxima en el canal de 2,69 m/s pero debido a que el río presenta una curva esta velocidad es disminuida hasta 1,59m/s, donde se presenta hacia el final del puente una contracción del canal y se produce una acumulación de agua, formando una mancha que puede llegar hasta un ancho de hasta 20 metros. Las elevación de la columna de agua identificada sobre el centro del canal puede llegar hasta 3.2 metros sobre su eje central. Ver Anexo 58.

La infraestructura de casa identificada aumenta en una pequeña proporción su riesgo a ser inundada debido a que el nivel de agua de la mancha aledaña a esta estructura aumenta con este caudal.

5.6.2 Zona 3

El tramo arranca con una velocidad de hasta 5.61 m/s inmediatamente después de la reducción. Más adelante la velocidad se estabiliza y se presenta un ancho de canal uniforme de hasta 15 metros, con una altura máxima de lámina de agua de 2.5 metros en el eje central del canal y en los tramos laterales presenta una altura de cerca 40 cm hasta 18 cm. Ver Anexo 59.

Más adelante avanza con una velocidad en el canal de 2.65 m/s máximo, con un ancho de la mancha de hasta 17.4 metros aproximadamente. Así mismo la mancha que sale más allá del canal se inclina más hacia el lado derecho del canal, que no tiene infraestructura pegada al canal a diferencia del borde izquierdo. El puente cercano sobre este tramo no presenta afectaciones. Ver Anexo 60.

Avanzando por esta zona El ancho del canal se mantiene constante de 10.6 metros, con elevaciones de columna de agua de hasta 2.36 metros. El nivel de agua sobre la estructura del borde izquierdo está aumentando la presión sobre el borde de la estructura alcanzando un nivel de agua de 50 cm. Ver Anexo 61.

Luego este tramo presenta una reducción y una formación de una estructura acanalada que está por debajo del nivel de las cuadras y de las estructuras. Las velocidades se acercan a los 2.26 m/s con un ancho de canal no superior a 10 metros por la geometría del canal. Ver Anexo 62.

Se plantea un sistema en canal trapezoidal que conduce por toda la cuadra, en una zona de barrios que no presentan amenaza sobre la cuadra concretamente por el sistema acanalado.

5.6.2 Zona 1

Representa un canal con velocidades de hasta 5,87 m/s, con anchos de canal de 10 metros. La profundidad desde el centro del canal puede llegar hasta 2.17 metros y menor a 32 cm en los bordes del canal. Ver Anexo 63.

5.6.3 Zona 2

Esa mancha de este tramo corresponde a una zona con curvatura donde el agua tiene unas variaciones duras de velocidad desde 2.23 m/s, perdiendo velocidad hasta 0.71 m/s y luego del tramo amplio se presenta una reducción en el canal y este aumenta su velocidad hasta 6,75 m/s. Ver Anexo 64.

El ancho de la mancha en este tramo no corresponde a la invasión de estructuras a pesar de llegar hasta un ancho de 29 metros.

Luego de esto las velocidades sobre este tramo son en promedio altas, con un tope de hasta 6.85 m/s con variaciones de 4.36m/s y 2.38 m/s. el ancho de la mancha de inundación llega hasta 23 metros pero en general en el canal no supera los 10 metros de ancho. Ver Anexo 65.

5.6.4 Zona 4

El sistema acanalado de concreto le da una importante altura en ese tramo. Las alturas de la lámina pueden llegar hasta los 2,68 metros sobre el eje principal del canal y no sobrepasa los puentes presentes en este canal. Las velocidades de flujo tienen un máximo de 3.12 m/s con un ancho que no supera los 10 metros debido a la geometría del mismo canal. Ver Anexo 66.

Salida del municipio

Las velocidades en este último tramo varían desde 2.41 m/s hasta 5.71 m/s, así mismo la geometría natural acanalada no permite generar una mancha de inundación superior a 13 metros. Ver Anexo 67.

Debido a la falta de presencia de infraestructura y como es similar a la entrada del río al municipio esta zona se puede excluir de una amenaza alta debido a la falta de cercanía con viviendas o infraestructuras.

La estructura evaluada después del último puente presenta presión de cerca de 30 cm sobre el borde.

1.6. Periodo de Retorno 200 años

El caudal de flujo de este tramo fue de 37.85 m³/s

Entrada al municipio

Se evidencia en el tramo una velocidad máxima de 4.26 m/s en el canal, con profundidades máximas en el tramo de hasta 3.1 metros sobre el eje central del canal, el ancho de la mancha llega a un valor máximo de 21 metros aproximadamente, y fuera del canal principal se evidencia una altura de lámina de agua general de 81 cm en promedio. Ver Anexo 68.

Más adelante el tramo cuenta con una velocidad máxima en el canal de 2,81 m/s pero debido a que el río presenta una curva esta velocidad es disminuida hasta 1,69m/s, donde se presenta hacia el final del puente una contracción del canal y se produce una acumulación de agua, formando una mancha que puede llegar hasta un ancho de hasta 22 metros. Las elevación de la columna de agua identificada sobre el centro del canal puede llegar hasta 3.3 metros. Ver Anexo 69.

5.7.1 Zona 3

Este tramo debido a que luego del segundo puente presenta una reducción del canal, aumenta abruptamente la velocidad hasta 5.61 m/s inmediatamente después de la reducción. Más adelante la velocidad se estabiliza y se presenta un ancho de canal uniforme de hasta 15 metros, así mismo esta zona hasta la llegada al siguiente puente, no se presenta presencia de infraestructuras con una altura máxima de lámina de agua de 2.8 metros en el eje central del canal. Ver Anexo 70.

Luego de esto entrando a la zona urbana, está la presencia del puente 3, con la estructura de puente de madera que conduce a la entrada a una vivienda cercana. La contracción del canal en esta zona para el caudal planteado de 200 años de periodo de retorno, el puente puede llegar a ser inundado y puede presentar una altura de hasta 60 cm sobre el centro del puente. Esto implica un severo riesgo sobre la estructura de puente artesanal, que pertenece a un taller cercano. Siendo esta la única estructura que podría presentar un riesgo claro de ser afectada. Ver Anexo 71.

Más adelante, la velocidad del canal es de 2.6 m/s máximo, con un ancho de la mancha de hasta 20.1 metros aproximadamente. Así mismo la mancha que sale más allá del canal se inclina más hacia el lado derecho del canal, que no tiene

infraestructura pegada al canal a diferencia del borde izquierdo. El choque con el puente para este periodo de retorno no interviene con el puente. Todo el flujo pasa por debajo de este. Ver Anexo 72.

Este tramo presenta unas velocidades de hasta 2.96 m/s, pasando el quinto puente esta velocidad aumenta por una reducción de tramo, el ancho del canal se mantiene constante de 11 metros, con elevaciones de columna de agua de hasta 2.61 metros. El nivel de agua sobre la estructura del borde izquierdo está aumentando la presión sobre el borde de la estructura blanca alcanzando un nivel de agua de 90 cm. Ver Anexo 73.

A este nivel el puente al final del tramo sobre el kilómetro 1.206 el nivel de agua sobre ese tramo puede elevarse hasta 30 cm por encima de la estructura. Ver Anexo 74.

Luego de esto el tramo presenta una reducción y una formación de una estructura acanalada que está por debajo del nivel de las cuadras y de las estructuras. Las velocidades se acercan a los 2.26 m/s con un ancho de canal no superior a 10 metros por la geometría del canal. A este punto el sistema acanalado presenta una columna de agua alta que supera los 3 metros, sin embargo no presenta riesgo para las estructuras aledañas debido a la profundidad del canal. Ver Anexo 75.

5.7.2 Zona 1

Representa un canal con velocidades de hasta 6,12 m/s, con anchos de canal de 10 metros. La profundidad desde el centro del canal puede llegar hasta 2.30 metros y menor a 45 cm en los bordes del canal. Adicional a esto no se presenta un riesgo mayor de amenaza sobre las estructuras presentes en ese tramo. Ver Anexo 76.

5.7.3 Zona 2

Esa mancha de este tramo corresponde a una zona con curvatura donde el agua tiene unas variaciones duras de velocidad desde 2.32 m/s, perdiendo velocidad hasta 0.75 m/s y luego del tramo amplio se presenta una reducción en el canal y este aumenta su velocidad hasta 6,9 m/s. El ancho de la mancha en este tramo no corresponde a la invasión de estructuras a pesar de llegar hasta un ancho de 30 metros. Ver Anexo 77.

Por el siguiente puente en este tramo las velocidades por la contracción anterior crecen desde una entrada de 6.77 m/s, luego de la contracción este tramo la velocidad disminuye y se estabiliza en el orden de 3m/s a 4 m/s. Acabando el tramo, acercándose hasta el siguiente puente, las estructuras sobre el lado izquierdo,

tienen una presión de agua con una velocidad en los bordes de 1,1 m/s y alcanzando una altura de lámina de agua de hasta 70 cm sobre sus paredes. Ver Anexo 78.

5.7.4 Zona 4

Este tramo presenta una velocidad máxima de hasta 3,2 m/s, así mismo, la altura de la lámina de agua sobre el eje del canal principal sube hasta 2,78 metros, chocando sobre el borde de los puentes pero no alcanza a presentar suficiente elevación para sobrepasar el nivel de los puentes. Ver Anexo 79.

Salida de la zona urbana

Las velocidades en este último tramo alcanzan un máximo de 5,8 m/s, después del primer puente la vivienda de construcción artesanal presenta sobre su borde una lámina de agua que supera los 50 cm de altura sobre sus paredes y así mismo con una velocidad 1,7 m/s en los bordes y hasta 4,13 m/s sobre el canal principal lo más seguro es que los materiales no soporten esta carga de agua y sea inevitable su inundación. Después de esto no se presenta amenaza mayor sobre las demás estructuras cercanas. Ver Anexo 80.

1.7. Periodo de Retorno 500 años

El caudal de flujo de este tramo fue de 42.23 m³/s

Entrada a la zona urbana

Se evidencia en el tramo una velocidad máxima de 4.5m/s en el canal, el tramo llega hasta profundidades máximas de más de 3 metros y en los bordes hasta de 80 cm. Así mismo en el ancho del canal se aprecia un valor de hasta 24 metros de ancho, la llegada al primer puente evidencia que supera el nivel del puente y que este se puede inundar. Ver Anexo 81.

Luego el tramo cuenta con una velocidad máxima en el canal de 4.68 m/s pero debido a que el río presenta una curva esta velocidad es disminuida hasta 1.82 m/s, donde se presenta hacia el final del puente una contracción del canal y se produce una acumulación de agua, formando una mancha que puede llegar hasta un ancho de hasta 24 metros con profundidades de 3,4 metros sobre el eje central del canal.

La mancha alcanza a afectar una de las primeras estructuras presentes al final del tramo donde se puede dar un resultado de recibir una altura de lámina de agua de hasta 20 cm sobre la entrada de la vivienda. Ver Anexo 82.

5.8.1 Zona 3

Este tramo debido a que luego del segundo puente presenta una reducción del canal, aumenta abruptamente la velocidad hasta 6 m/s inmediatamente después de la reducción. Más adelante la velocidad se estabiliza y se presenta un ancho de canal uniforme de hasta 16 metros, así mismo esta zona hasta la llegada al siguiente puente, no se presenta presencia de infraestructuras. Con una altura máxima de lámina de agua de 2.6 metros en el eje central del canal. Ver Anexo 83.

Luego de esto entrando a la zona urbana, el puente mencionado anteriormente para este tramo queda totalmente afectado y supera un nivel de agua de 70cm por encima de su nivel. Ver Anexo 84.

En este pequeño tramo se evidencia una limitada presencia de infraestructuras pero la mancha de inundación choca con las estructuras sin tener que inundarlas o pasar a través de ellas, la velocidad del canal es de 1.58 m/s máximo, con un ancho de la mancha de hasta 26 metros aproximadamente. La mancha alcanzaría a poder infiltrarse en las vías con una lámina de 2 cm de agua. Ver Anexo 85

Más adelante por ese tramo se presentan unas velocidades de hasta 2.09 m/s, pasando el quinto puente esta velocidad aumenta por una reducción de tramo. Ver Anexo 86.

El ancho del canal se mantiene constante de 12 metros, con elevaciones de columna de agua más de 3 metros, el nivel de agua sobre la estructura del borde izquierdo presenta una amenaza alta debido a que la presión de la columna de agua sobre esta pared supera 1 metro de elevación y entra sobre esa pared con una velocidad de 1.11 m/s. Ver Anexo 87.

A este nivel el puente al final del tramo sobre el kilómetro 1.206 el nivel de agua sobre ese tramo puede elevarse hasta 40 cm por encima.

Avanzando, el canal presenta velocidades relativamente bajas por el orden de 1.55 m/s pero el nivel del agua puede llegar a hacer presión sobre el borde izquierdo del canal, incluso denotando un posible desbordamiento con una lámina de hasta 10 centímetros. Ver Anexo 88.

5.8.2 Zona 1

Representa un canal con velocidades de hasta 7,89 m/s, con anchos de canal de 10 metros. La profundidad desde el centro del canal puede llegar hasta 2.40 metros y menor a 45 cm en los bordes del canal. El puente de entrada de este tramo alcanza a inundarse superando el nivel de este. Ver Anexo 89.

5.8.3 Zona 2

Esa mancha de este tramo corresponde a una zona con curvatura donde el agua tiene unas variaciones duras de velocidad desde 2.47 m/s, perdiendo velocidad hasta 0.81 m/s y luego del tramo amplio se presenta una reducción en el canal y este aumenta su velocidad hasta 7,75 m/s. El ancho de la mancha en este tramo no corresponde a la invasión de estructuras a pesar de llegar hasta un ancho de 35 metros. La profundidad de lámina de agua en este tramo supera los 4 metros aunque respecto al fondo sobre las estructuras se presenta una presión superior a un metro sobre las paredes. Ver Anexo 90.

Las velocidades por la contracción anterior crecen desde una entrada de 6.94 m/s, luego de la contracción este tramo la velocidad disminuye y se estabiliza en el orden de 4m/s a 5 m/s. Acabando el tramo, acercándose hasta el siguiente puente, las estructuras sobre el lado izquierdo, tienen una presión de agua con una velocidad en los bordes de 1,3 m/s y alcanzando una altura de lámina de agua de hasta 90 cm. Ver Anexo 91.

5.8.4 Zona 4

Este tramo presenta una velocidad máxima de hasta 3,3 m/s, así mismo, la altura de la lámina de agua sobre el eje del canal principal sube hasta 3 metros, chocando sobre el borde de los puentes pero no alcanza a presentar suficiente elevación para sobrepasar el nivel de los puentes. Ver Anexo 92.

Salida del municipio

Las velocidades en este último tramo alcanzan un máximo de 6 m/s, después del primer puente la vivienda de construcción artesanal presenta sobre su borde una lámina de agua que supera 1 metro de altura sobre sus paredes y así mismo con una velocidad 2 m/s en los bordes y hasta 4,2 m/s sobre el canal principal lo más seguro es que los materiales no soporten esta carga de agua y sea inevitable su inundación. Después de esto no se presentan más amenazas sobre las estructuras cercanas. Ver Anexo 93.

SELECCIÓN DE PERIODO DE RETORNO PARA DELIMITACIÓN

Según lo establecido en el decreto 2245 de 2017, sobre el acotamiento de rondas hídricas, determina un límite no menor a 30 metros sobre el borde del río para estructuras o asentamientos humanos. En el caso de este municipio, su crecimiento estuvo planteado sobre el mismo río, por tanto existen tramos, cercanos a la zona central de Villapinzón, en donde el río prácticamente atraviesa cuerdas y vías principales. Por este motivo es recomendado realizar una evaluación de otras opciones donde se considere en cambio un periodo de retorno importante para

tomar decisiones de elaborar obras de refuerzo sobre las márgenes del río en beneficio de las estructuras aledañas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente, se plantea evaluar la delimitación de la ronda sobre un periodo de retorno de 50 años. Ya que este caudal presenta desde la entrada al municipio una invasión clara sobre estructuras aledañas.

Imagen 9. Mancha Inundación Entrada al municipio T= 50



Fuente: Autor

Cuando entra a la zona 3 empieza a tener una presión alta sobre los primeros puentes convencionales que atraviesan el río, y así mismo se presentan velocidades que superan los 5 m/s en este tramo.

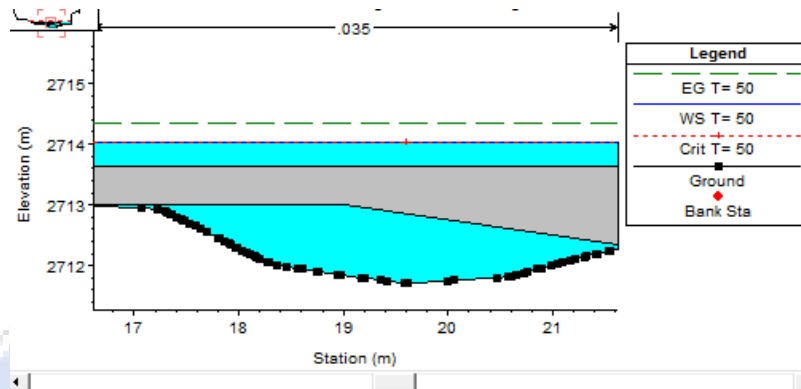
Imagen 10. Mancha de inundación en zona 3 T=50



Fuente: Autor.

Cuando se entra a la zona urbana el puente puede llegar a inundarse hasta 20 cm presentando una amenaza clara sobre ese punto.

Imagen 11 Puente Inundado T=50.



Fuente: Autor.

Sobre la estructura blanca para este periodo de retorno se evidencia una fuerte presión sobre sus paredes. Dadas las velocidades en este tramo y la reducción, en esta zona se debe considerar una forma de contención sobre esta estructura.

Imagen 12. Presión sobre estructura zona 3 T=50



Fuente: Autor.

Sobre la zona 1 cuando pasa la reducción se pasa por un canal de forma trapezoidal que también indica velocidades superiores a 5 m/s.

Imagen 13. Mancha de inundación zona 1 $T=50$.



Fuente: Autor.

En la zona 2 por la curvatura del río se reduce considerablemente la velocidad, y aunque sobre la ronda hay presencia de estructuras como casas. Estas no se alcanzan a ver afectadas.

Imagen 14. Mancha de inundación zona 2 $T=50$.



Fuente: Autor.

En la zona 4 sobre la plazoleta de Villapinzón, el canal por el que se conduce el río en esa cuadra la lámina de agua no supera los niveles del canal.

Imagen 15. Mancha de inundación zona 2 $T=50$.



Fuente: Autor.

Saliendo de la zona urbana del municipio, sólo existe una estructura que tiene una amenaza latente debido a su cercanía al río. Más adelante no se evidencia presencia de estructuras que puedan tener riesgo de inundación.

Imagen 16. Mancha de inundación Salida Municipio T=50.



Fuente: Autor.

CONCLUSIONES

La zona de estudio presenta dos temporadas lluviosas, la primera entre los meses de Mayo y Julio y la segunda entre los meses de Octubre y Noviembre; igualmente se tienen dos temporadas relativamente secas en los meses de Enero y Agosto; lo que indica que la distribución temporal de las precipitaciones es de tipo bimodal; además que presenta características morfométricas, donde muestra que la cuenca está catalogada como pobremente drenada, por lo que corresponde a suelos que no tienen una gran facilidad de evacuación de agua y se mantienen húmedos con un nivel freático alto, lo que indicaría que ante eventos de precipitaciones altas tienen la tendencia a saturarse rápido; por lo tanto se debe tener en cuenta para planes de gestión al riesgo por inundaciones.

Teniendo en cuenta el análisis cualitativo y cuantitativo, evaluando los aspectos de vulnerabilidad, amenaza y finalmente riesgo, se obtiene que para el tramo de estudio por el que pasa el Río Bogotá en el Municipio de Villapinzón; Las áreas catalogadas como zonas 1 y 2 presentan un riesgo alto de inundación, la zona 3 presenta un nivel medio de riesgo y la zona 4 presenta un riesgo bajo de inundación; Donde se debe prestar mayor atención a las zonas 1 y 2 ya que serían las más afectadas en caso de un evento de inundación. En especial la zona 1 por la estructuración de las viviendas ya que la calidad de estas estructuras aumenta considerablemente su vulnerabilidad.

El error en la ejecución de la modelación hidráulica del proyecto tiene un factor principal basado en la información de terreno disponible, al ser este un río con un

ancho relativamente angosto, que atraviesa una zona urbana, los modelos de elevación digital y la información de batimetría del terreno tenían información poco precisa que no lograba satisfacer el nivel de detalle necesario para cumplir con un buen modelamiento.

El Río no presenta uniformidad tanto en geometría como en materiales y rugosidad en el canal durante su recorrido a través del municipio, esta información influyó en la realización del modelo ya que provoca modelar con diferentes y variables condiciones hidráulicas sobre el canal a evaluar.

Para verificar la calidad del modelo, se evaluaron los ajustes de caudales de datos reales contrastados con los caudales simulados, para esto se aplicó el criterio de distribución de Nash-Sutcliffe (NSE); en se obtuvo un valor para el acumulado de los diversos periodos de retorno comparado con los datos observados de: **NSE = 0.9747**; mostrando desde la parte hidrológica un ajuste excelente sobre datos que llegan hasta el 50 años de periodo de retorno. Para 100, 200 y 500 años se obtuvo: **NSE= 0.4494**; este dato indica un ajuste bueno de datos para simulación sobre periodos de retorno altos. A esto se le complementa con las condiciones geográficas que fueron corroboradas con el levantamiento digital proporcionado por la alcaldía del municipio.

Según la información de los diferentes periodos de retorno, se determinó que el periodo de retorno más adecuado para realizar la delimitación es 50 años, con un caudal de 31,19 m³/s ya que para la mancha de inundación sobre este flujo se encontró una amenaza directa sobre estructuras de las zonas 1 y 2. Involucrando las viviendas e incluso puentes cercanos a estas áreas.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio en campo, ayuda a establecer los criterios de zonificación de la zona de estudio, los alcances y las debilidades del proyecto, junto con los medios de la obtención de la información.
- Al momento de tomar datos de estaciones se debe escoger la que mayor cantidad de datos tenga de forma completa, para realizar una trazabilidad en ellos y determinar el comportamiento de los fenómenos climáticos, en especial el de la precipitación, ya que estos datos en una metodología como es el de análisis de frecuencia, es de vital importancia, ya que ayuda a determinar el caudal máximo en un periodo de retorno determinado.
- Para un análisis de riesgo, es necesario realizar varias visitas de campo para determinar de manera cualitativa las posibles amenazas que tenga la población y en este caso la infraestructura como tal, ya que al momento de

contrarrestarlo con la información cuantitativa, se tienen más claridad sobre las condiciones que presenta el terreno y los riesgos que puede presentar la población.

- Aunque se dispuso de un modelo de elevación digital de resolución de 50cm es necesario realizar un levantamiento topográfico completo y real en el tramo urbano para comparar los grandes huecos de información que no pudo brindar el DEM, con una batimetría de secciones transversales mínimo cada 20 metros para poder tener datos bastante confiables al momento de implementar el modelo.
- Para el caso del municipio de Villapinzón en específico, para poder cumplir con legalmente con los criterios de delimitación de ronda, requiere una renovación estructural completa, que resulta bastante difícil por el crecimiento que tuvo el municipio y su ordenamiento, por lo cual es recomendable relacionar alternativas que permitan protegerse de un posible evento de crecientes con estructuras de contención o de conducción que alivien la amenaza latente que tiene el municipio en temas de inundación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MAAMA, «Mapas de peligrosidad y riesgo de inundación y delimitación de cauces,» Gobierno de España, España, 2014.
- [2] R. K. Sedano Cruz, «Gestión Integrada del Riesgo d Inundaciones en Colombia,» Universitat Politecnica de Valencia, Valencia, 2012.
- [3] A. P. A. Pérez, La construcción de asentamientos precarios en zonas de inundación y la conservación de cauces de rios, Bogotá , 2010.
- [4] L. Timbe Castro y P. Willems, «Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para simulación de inundaciones,» *Maskana*, vol. 2, nº 1, pp. 91-98, 2011.
- [5] US Army Corps of Engineers (USACE), HEC-RAS River Analysis system, Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, 2010.
- [6] O. Cardona, «La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo "una crítica y una revisión necesaria para la gestión",» *Work conf. on vulnerability in disasters theory and practice*, vol. 2, nº 2, p. 22, 2001.
- [7] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, «Decreto 2245 del 2017,» Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá D.C., 2017.

- [8] J. C. Bertoni, «Voces en el Fenix,» 21 03 2014. [En línea]. Available: <http://www.vocesenelfenix.com/content/la-problem%C3%A1tica-de-las-inundaciones-urbanas-el-caso-de-la-cuenca-matanza-riachuelo>. [Último acceso: 07 08 2017].
- [9] CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, GUÍA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA EN LA JURISDICCIÓN DE LA CAR, Bogotá: Subdirección de administración de recursos naturales y áreas protegidas de la república de Colombia, 2010.
- [10] IDEAM, «IDEAM,» MINAMBIENTE, 08 11 2011. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion..> [Último acceso: 2017 08 07].
- [11] L. A. Robayo, Análisis de amenaza por inundación para la localidad de Tunjuelito, desarrollado a través de sistemas de información geográfica, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2014.
- [12] IDIGER, «IDIGER,» Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático, 28 07 2017. [En línea]. Available: <http://www.idiger.gov.co/rinundacion..> [Último acceso: 07 08 2017].
- [13] COLOMBIA, Congreso de la república. Ley 1523, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de desastres, Bogotá: Congreso de la República, 2012.
- [14] P. Blaikie, «Vulnerabilidad: El entorno social, político y económico de los desastres,» de *Vulnerabilidad*, Bogotá, La Red, 1996, p. 158.
- [15] L. Hernandez, «Una metodología de evaluación de riesgo público por inundación por falta de sistema de alcantarillado pluvial, caso de la cuenca del río salitre,» de *Metodología del Riesgo Público*, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2012, p. 15.
- [16] L. E. P. R., Modelación de crecientes y zonas inundables, Ibagué: Modelación de crecientes y zonas inundables, 2011.
- [17] Alcaldía de Villapinzón - Cundinamarca, «Alcaldía de Villapinzón,» 05 09 2010. [En línea]. Available: http://www.villapinzon-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml#geografia. [Último acceso: 07 08 2017].
- [18] P. Boada, CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ, BOGOTÁ: UNIVERSIDAD DE LA SALLE, 2011.

- [19 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, «CAR,» Gobierno de Colombia, 5 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=10571>. [Último acceso: 15 Mayo 2017].
- [20 Google maps, «Google maps,» 22 Junio 2017. [En línea]. Available: <https://www.google.com.co/maps/@4.5629956,-74.1181233,15z>.
- [21 Alcaldía de Villapinzón, «Sitio Oficial de Villapinzón en Cundinamarca, Colombia,» Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 24 Agosto 2017. [En línea]. Available: http://www.villapinzon-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml#geografia. [Último acceso: 24 Agosto 2017].
- [22 Centro Agronómico tropical de investigación y enseñanza., Manejo de Cuencas Hidrográficas, Turrialba, Costa Rica, 2000.
- [23 A. R. Trujillo, Guía Básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas, Cali: Universidad del Valle, 2010.
- [24 A. Moreno, «Universidad de los andes,» Ingeniería universidad de los andes, 30 Enero 2016. [En línea]. Available: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/PRECIPITACION%20DATOS.pdf>. [Último acceso: 09 Septiembre 2017].
- [25 F. M. R. Gutiérrez, «Análisis de eventos extremos de precipitación y su efecto en el diseño de drenaje superficial de tierras agrícolas del sur de Chile,» Valdivia, Universidad Austral de Chile, 2004, p. 107.
- [26 A. Cahuana y W. Yugar, MATERIAL DE APOYO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA ASIGNATURA DE HIDROLOGIA CIV-233, Cochabamba-Bolivia: Universidad Mayor de San Simón, 2009.
- [27 M. V. Bejar, «Hidroesta, Software para cálculos hidrológicos,» *Tecnología en Marcha*, vol. 12, nº 2, pp. 67 - 75, 2011.
- [28 Universidad de Guayaquil, «Software hidroesta,» Escuela de ingeniería civil, Ecuador, 2014.
- [29 Hidroesta, HidriEsta, Bogota: HidroEsta, 2013.

- [30 CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca), Guía Metodológica para la Delimitación de Zonas de Ronda, Bogotá: Subdirección de Administración de Recursos Naturales y Áreas Protegidas, 2016.
- [31 S. O. Yepes, «Implementación del Modelo,» de *Simulación de sedimentos mediante un modelo hidrológico distribuido utilizando información indirecta*, Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 2016, pp. 53-74.
- [32 C. Tianfeng y D. R. Roland, «Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)?,» *Geosci Model Dev, Discussion Paper*, pp. 1-11, 2014.
- [33 A. Maskrey y O. Cardona, «Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo,» de *Los desastres no son naturales*, Bogotá, La Red - La Red de estudios Sociales en Prevención de Desastres de América Latina, 2010, pp. 51-73.
- [34 DESINVENTAR, «Sistema de inventario de efectos de desastres,» La Red, Bogotá, 2015.
- [35 UNGRD, «Consolidados anuales de emergencias,» UNGRD, Bogotá, 2016.
- [36 Cideter, «Revisión general del esquema de ordenamiento territorial del municipio de Villapinzón, Cundinamarca,» Alcaldía municipal de Villapinzón, Villapinzón, 2016.
- [37 ICONTEC, «NTC 5254,» de *Gestión del riesgo*, Bogotá, ICONTEC, 2004, pp. 5-30.
- [38 O. Cortijo Lozano, «Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones y sismos, de las edificaciones en centros urbanos,» Centro de Estudios y Prevención de Desastres, Perú, 2008.
- [39 Google maps, «Google earth,» Google, 15 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.google.com.co/maps?source=tldsi&hl=es>. [Último acceso: 15 Enero 2018].
- [40 A. G. Barrios y C. A. Guzman, Estado del arte de las metodologías para delimitación de rondas hídricas en el contexto internacional y local, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2015.
- [41 V. T. Chow, *Hidraulica de Canales Abierto*, Bogotá: McGraw-Hill, 2004.

- [42 M. Villon, Hidrología, Costa Rica: Editorial Villón, 2002.
]
- [43 ArcGis, Software ArcGis, Bogota: ArcGis, 2014.
]
- [44 Irbin Barrientos Andia, «Ingeniería Civil,» Irbin Barrientos Andia, 20 Febrero
] 2016. [En línea]. Available:
<https://irbinbarrientosandia.wordpress.com/2016/06/28/nomenclatura-de-taludes-grado-pendiente-y-porcentaje/>. [Último acceso: 20 Junio 2017].
- [45 Instituto Nacional de Ecología, Análisis morfométrico de cuencas: Caso de
] estudio del parque nacional pico de tancitaro, Mexico D.F., 2004.
- [46 M. V. Bejar, «Caudales Máximos,» de *Hidrología*, Lima, Editorial Villón, 202,
] pp. 282-288.
- [47 Cideter, «Revisión general del esquema de ordenamiento territorial - EOT
] Municipio de Villapinzón, Cundinamarca,» Cideter, Villapinzón, 2016.
- [48 Cideter, «Revisión general del esquema de ordenamiento territorial - EOT
] Municipio de Villapinzón, Cundinamarca,» Cideter, Villapinzón, 2016.
- [49 G. E. Amaris Castro, T. E. Guerrero Barbosa y E. A. Sánchez Ortiz,
] *TECNURA*, vol. 19, nº 45, pp. 75-88, 2015.
- [50 Universidad de Salamanca, Departamento de Geología, Tránsito
] Hidrogramas, Salamanca, 2013.
- [51 A. N. Menéndez, «Modelación Numérica de inundaciones en grandes
] cuencas de llanura,» Buenos Aires , 2015.
- [52 J. C. G. Velandia, La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de
] Colombia: una mirada crítica, Bogotá DC.: creative commons, 2014.
- [53 UNISDR. GAR, «Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo
] de desastre. Revelar el riesgo, replantear el desarrollo,» Green Ink, Reino Unido, 2011.
- [54 J. C. González Valandia, «La Gestión del riesgo de desastres en las
] inundaciones de Colombia: Una mirada Crítica,» Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2014.

ANEXOS

ANEXO 1

Programas de modelación hidráulica.

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MODELOS	DATOS DE ENTRADA	DATOS DE SALIDA	TIEMPO COMPUTACIONAL (AÑO 2006)
0D	No es físicamente basado	Evalúa la extensión de la inundación y las profundidades de inundación	AgcGIS Delta mapper	MDE (DEM) Altura de lámina de agua aguas arriba Altura de lámina de agua aguas abajo	Extensión de la inundación y profundidad del agua a través de la intersección entre la lámina de agua y el MDE.	Segundos
1D	Soluciona las ecuaciones de Saint Venant 1D	Diseño a escala del modelo, la cual puede ser del orden de 10s a 100s de km dependiendo del tamaño de la cuenca	Mike 11 HEC-RAS SOBEK-CF Infoworks RS (ISIS)	Secciones transversales del cauce principal y la llanura de inundación. Hidrogramas de caudal aguas arriba. Hidrógrafas de altura aguas abajo.	Profundidad del agua y velocidad media en cada sección transversal. Extensión de la inundación por la intersección de la profundidad del agua simulada con el MDE. Hidrograma de salida aguas abajo.	Minutos

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MODELOS	DATOS DE ENTRADA	DATOS DE SALIDA	TIEMPO COMPUTACIONAL (AÑO 2006)
1D+	Enfoque 1D+ con celdas de almacenamiento para la simulación del flujo en las llanuras de inundación	El diseño de la escala del modelo puede ser del orden de 10s a 100s de km dependiendo del tamaño de la cuenca, con potencial de aplicación en escalas mayores si se utilizan datos escasos de secciones transversales	Mike 11 HEC-RAS SOBEK-CF Infoworks RS (ISIS)	Igual a los modelos 1D	Igual a los modelos 1D	Minutos a horas
2D-	Ley de conservación de momentum 2D- para la llanura de inundación	Gran escala de modelación para inundaciones urbanas dependiendo de las dimensiones de las celdas	LISFLOOD-FP	MDE (DEM) Hidrograma de caudal aguas arriba. Hidrógrafas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación y profundidad del agua. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Horas
2D NC	Soluciona las ecuaciones de onda poco profunda bidimensionales en la forma no conservativa	Diseño de la escala del modelo del orden de 10s km. Podría tener el potencial para ser usado en modelación de escalas amplias su se aplica con mallas secundarias. No es adecuado para simulaciones de modelos transcíticos y flujos de rompimiento de presas.	TUFLOW	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Hidrógrafas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades Velocidades promedio en la vertical en cada nodo computacional Hidrograma de caudal de salida aguas abajo	Horas a días

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MODELOS	DATOS DE ENTRADA	DATOS DE SALIDA	TIEMPO COMPUTACIONAL (AÑO 2006)
2D C	Soluciona las ecuaciones de onda poco profunda bidimensionales en la forma conservativa	La misma que 2D NC más la capacidad de modelar exactamente flujos transcríticos, rompimiento de presas y flujos de transientes rápidos	Mike 21 TELEMAC SOBEK-OF Delft-FLS Infoworks	Igual que 2D NC	Igual que 2D NC	Horas a días
2D+	Solución 2D plus para las velocidades en la vertical usando sólo la ecuación de continuidad	Modelación de costas donde los perfiles de velocidad 3D son importantes. Ha sido también aplicado para modelación de ríos en proyectos de investigación	TELEMAC 3D Delft-3D	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Distribución de velocidades de entrada. Hidrografas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades de la lámina de agua Velocidades u, v y w para cada celda computacional. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Días
3D	Solución 3D de las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes y Reynolds promedio	Predicciones tridimensionales de campos de velocidades en los cauces principales y llanuras de inundación	CFX FLUENT PHEONIX	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Distribución de velocidades de entrada y distribución de energía cinética turbulenta Hidrografas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades de la lámina de agua Velocidades u, v y w, energía cinética turbulenta para cada celda computacional. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Días

Fuente: [9]

ANEXO 2
Marco normativo.

NORMA	DESCRIPCIÓN
<p>Código nacional de recursos naturales renovables y de protección del medio ambiente decreto 2811 de 1974</p>	<p>Artículo 83: En el literal D, consagra que la faja paralela a las líneas de mareas máximas o al cauce permanente de los ríos y lagos de hasta 30m es un bien inembargable e imprescriptible del Estado, excepto si existen derechos adquiridos.</p> <p>Artículo 99: La explotación y extracción de material de arrastre requiere de permisos de la autoridad correspondiente.</p> <p>Artículo 100: La explotación y extracción de minerales requiere de permisos de la autoridad correspondiente.</p> <p>Artículo 101: Ordena la suspensión provisional o definitiva de las explotaciones de que se derive peligro grave o perjuicio para las poblaciones y las obras o servicios públicos.</p>

	<p>Artículo 118: Los dueños de predios ribereños están obligados a dejar libre de edificaciones y cultivos el espacio necesario para los usos autorizados por ministerio de la ley, o para la navegación o la administración del respectivo curso o lago, o la pesca o actividades similares.</p> <p>Artículo 120: Para autorización de las obras hidráulicas se obliga a la realización de estudios para captar, controlar, conducir, almacenar o distribuir caudal.</p>
Ley 2 de 1959	Artículo 204: Se entiende por área forestal protectora la zona que debe ser conservada permanentemente con bosques naturales o artificiales, para proteger éstos mismos recursos otros naturales renovables.
Decreto 877 de 1976	Establece que para considerar áreas forestales protectoras se deben tener en cuenta varios criterios, algunos de los cuales son: áreas de influencia sobre nacimientos de agua de ríos y quebradas, áreas en las que sea necesario controlar deslizamientos, cauces torrenciales, entre otras amenazas y áreas con abundancia y variedad de fauna silvestre acuática y terrestre.
Decreto 1449 de 1977	Artículo 3 literal b: Los propietarios de predios rurales tienen la obligación de mantener cobertura boscosa en áreas forestales protegidas, dentro de las cuales definen como tal una faja de terreno no inferior a 30 metros de ancha paralela a las líneas máximas de marea, a los lados de los cauces y alrededor de lagos o depósitos de agua.
Decreto 1541 de 1978	Artículo 11: El terreno que ocupa un cauce natural alcanza a llegar hasta los niveles máximos de las crecientes ordinarias, y que los lechos de depósito natural son hasta donde llegan los niveles ordinarios por lluvias y deshielos.

Decreto 1640 de 2012	<p>Artículo 19: La ordenación de las cuencas se hará teniendo en cuenta las rondas hídricas.</p> <p>Artículo 28: Para la armonización de los instrumentos de planificación y de los planes de manejo ambientales deben ser delimitadas las rondas hídricas.</p> <p>Artículo 46: Establece que las comisiones conjuntas tienen la función de hacer recomendaciones para el acotamiento de las rondas.</p>
Ley 79 de 1986	<p>Artículo 1: Define áreas de reserva forestal a los bosques y vegetación que se encuentran en los nacimientos de agua permanente o no a una extensión no inferior a 200 metros a la ronda; así como los que se encuentran en una franja no inferior a 100 metros a cuerpos de agua que presten servicios hidroeléctricos, acueductos, agrícolas etc.</p>
Ley 388 de 1997	<p>Artículo 35: Define la categoría del suelo clasificado como de protección como las zonas y áreas de terreno con características geográficas, paisajísticas o ambientales, o por formar parte de las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructura para la provisión de servicios públicos domiciliarios o de las áreas de amenaza y riesgo no mitigables para la localización de asentamientos humanos, tiene restringida la posibilidad de urbanizarse.</p> <p>Artículo 104: Establece que quienes parcelen, construyan o urbanicen en terrenos de protección ambiental o en zonas calificadas como de riesgo, como son las rondas de cuerpos de agua, incurrirán en una infracción urbanística y por lo tanto deberán pagar una multa.</p>
Decreto 1600 de 2005	<p>Artículo 58-67: No procede al reconocimiento de edificaciones o legalización de asentamientos en zonas de protección.</p>

Decreto 3600 de 2007	Artículo 4: Señala que las rondas hidráulicas hacen parte de la categoría de áreas de conservación y protección ambiental, en tanto áreas de especial importancia ecosistémica.
Decreto 1469 de 2010	Exige que dentro de la información entregada para obtener licencias de parcelación en el suelo rural, los planos deben identificar las áreas de especial importancia ecosistémica como las rondas hídricas.
Decreto 3930 de 2010	<p>Artículo 9: Tiene como objeto reglamentar el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos, define los siguientes usos del agua: consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, estético, pesca, maricultura, acuicultura, navegación y transporte acuático.</p> <p>Artículo 24 y 25: En cuanto a los vertimientos, el decreto establece unas prohibiciones y actividades no permitidas. En las prohibiciones se destaca que no se admiten vertimientos en cabeceras de fuentes de agua, en cuerpos de agua destinados para la recreación y en cuerpo de agua protegidos; y tampoco se permite vertimientos que ocasionen riesgo o alteren las característica existentes en un cuerpo de agua que lo hacen apto para todos los usos mencionados en el artículo 9.</p>
Ley 1450 de 2011	Artículo 206: Corresponde a las CAR y de Desarrollo sostenible, los grandes centros urbanos y los establecimientos públicos ambientales efectuar el acotamiento de las rondas hídricas y el área de conservación aferente, con base en estudios conforme a criterios definidos por el Gobierno Nacional.
Decreto 1640 de 2012	Artículo 23: El plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica se constituye en norma de superior jerarquía y determinante ambiental.

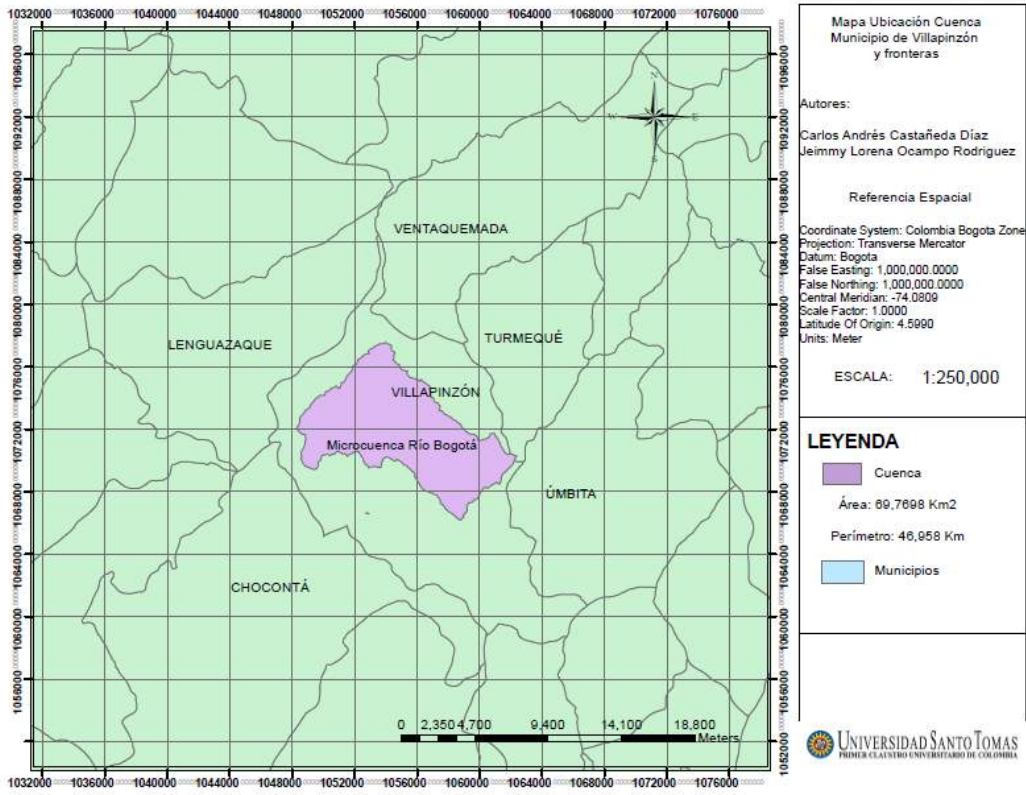
Decreto 2245 de 2017

Tiene por objeto establecer los criterios técnicos con base en los cuales las Autoridades Ambientales competentes realizaran los estudios para el acotamiento de las rondas hídricas en el área de su jurisdicción.

Fuente: [40] [7] [9]

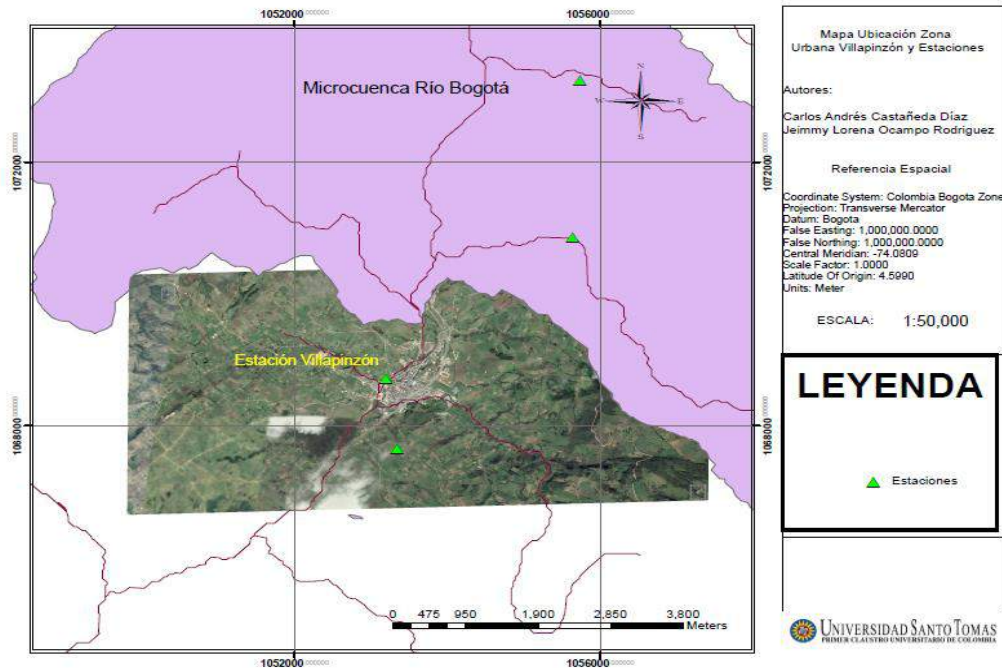


Fuente: Google Earth [20]



Fuente: Autor.

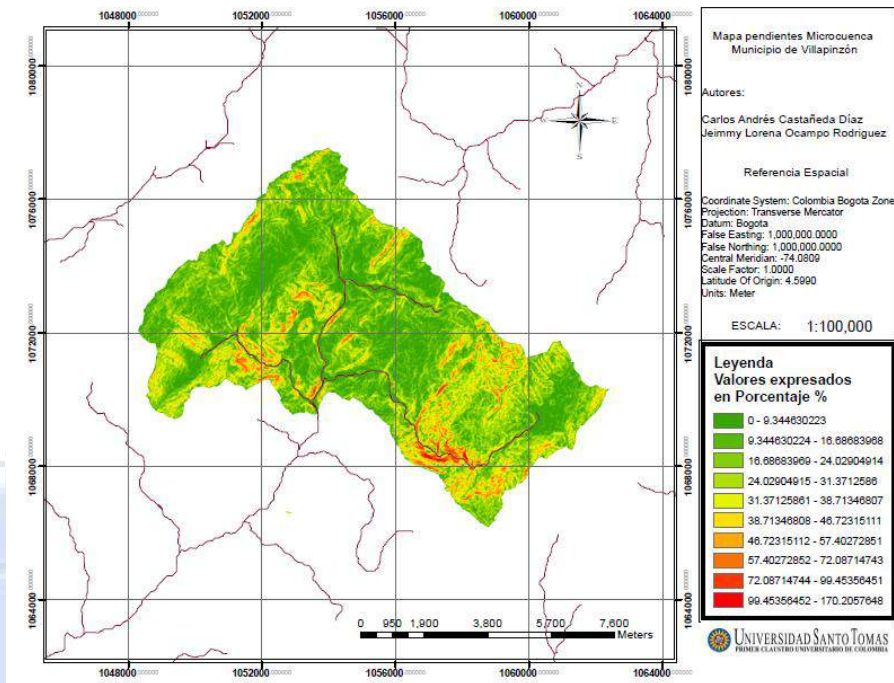
Ubicación de la Estación limnográfica.



Fuente: Autor.

ANEXO 4.

Pendientes de la Microcuenca del Municipio de Villapinzón.



Fuente: Autor.

ANEXO 5

Caudales máximos mensuales

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE
1973	0.35	0.18	0.14	1.16	4.85	1.05	2.32	4.43	7.18	1.71	3.3	0.63
1974	0.26	0.52	0.9	3.8	1.85	1.16	3	1.71	2.32	1.57	1.85	0.63
1976	1.16	0.54	1.45	4.72	10.25	9.14	4.92	2.47	3.64	6.12	5.73	1.75
1978	1.03	0.65	0.72	6.12	4.18	9.14	8.1	9.14	4.72	3.26	2.23	3.82
1979	0.22	1.06	1.55	6.22	5.34	14.88	1.67	3.51	3.32	24.59	24.59	20.78
1980	0.86	0.67	0.22	1.67	3.32	13.21	5.34	2.88	2.13	6.44	1.36	0.57
1981	0.36	0.36	0.4	1.75	8.95	7.56	1.55	1.06	1.36	10.15	1.67	0.4
1982	0.26	0.46	0.96	10.15	11.6	2.79	4.82	10.15	7	3.32	1.06	1.4
1983	0.22	0.4	0.96	3.32	1.36	1.06	3.32	3.8	0.67	1.67	1.06	1.18
1984	0.42115986	0.46307395	0.92770636	2.04947784	0.86	6.22	0.1	5.34	9.88	1.24	2.12	0.42
1985	0.91	0.17	0.49	0.91	1.6	4.6	1.54	2.27	7.33	9.88	10.82	2.51
1986	0.32	2.69	10.58	0.96	0.71	14.37	13.71	1.74	9.48	4.92	3.32	0.71
1987	0.86	1.05	1.18	1.05	8.19	7.33	16.41	5.13	1.05	10.01	7.33	2.05
1988	0.9	1.6	1.18	2.96	1.48	6.22	4.92	1.54	2.12	5.23	6.33	5.45
1989	1.01	1.01	9.21	3.9	5.13	5.02	12.72	3.23	1.67	1.89	1.82	4.92
1990	0.4	0.58	0.88	2.73	6.16	2.73	9.2	4.67	1.07	1.81	1.02	1.68
1991	0.33	0.146	0.962	0.786	1.472	4.172	3.82	7.39	1.88	1.472	3	0.516
1993	0.146	0.552	0.128	1.94	6.26	4.456	3.078	4.75	0.87	1.256	3.648	3.648
1994	0.39	0.39	0.55	0.96	3.23	5.32	11.59	2.62	11.88	9.65	1.94	0.42
1995	0.068	0.04	0.226	0.916	0.252	1.64	0.916	0.786	0.164	0.11	0.164	0.39
1996	0.42	0.916	2.772	0.516	3	1.88	6.15	1.472	0.786	3.39	0.828	2.204
1997	1.05	0.2	0.15	0.33	0.79	0.96	22.14	2.01	0.96	0.83	0.66	0.18
1998	0.1	0.2	0.42	0.42	12.77	5.22	9.25	3.73	0.39	2.27	0.25	1.82
1999	0.074	0.252	0.2	1.256	2.772	1.256	1.054	2.772	6.484	6.26	3.562	0.66
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2001	0.188	0.105	0.188	0.123	0.725	3.908	3.82	3.908	3.067	0.787	0.787	0.559
2002	0.143	0.123	0.164	2.292	3.645	3.908	4.38	4.38	1.068	0.787	0.787	0.164
2003	0.143	0.097	0.306	0.42	4.78	1.501	2.843	1.489	0.886	5.432	3.471	2.843
2004	0.342	0.123	0.164	1.604	5.432	5.432	3.067	4.88	1.604	3.309	1.456	0.993
2005	0.342	0.289	0.306	1.76	4.38	0.725	1.927	1.76	2.559	2.695	6.016	0.584
2006	0.584	0.38	0.611	5.432	4.58	5.432	5.432	3.908	0.725	1.504	3.733	0.666
2007	0.273	0.273	0.38	1.604	1.489	3.471	3.471	3.309	1.068	3.471	3.067	0.725
2008	0.463	0.996	0.236	1.411	1.389	1.999	1.672	1.52	1.127	1.258	2.284	2.284
2009	1.494	0.82	0.673	0.896	1.494	1.826	4.099	3.179	1.494	7.902	1.058	0.146
2010	0.127	0.108	0.108	1.826	5.793	2.5	5.439	1.058	1.357	2.181	7.124	2.5
2011	0.409	1.14	3.179	13.261	30.95	1.583	1.927	4.449	5.9	9.729	25.335	12.17
2012	1.067	1.165	1.263	3.811	1.263	3.052	6.166	4.552	1.023	7.153	12.494	0.665
2013	0.245	0.426	2.11	0.665	4.552	0.851	2.249	1.067	0.665	0.98	5.763	1.313
2014	0.149	0.09	0.285	0.851	0.665	4.443	3.236	1.165	4.011	1.067	1.99051484	0.98415947

Fuente: [19]

ANEXO 6

Caudales máximos mensuales ordenados de menor a mayor.

AÑO	MAX	Ordenados
1973	7.18	1.64
1974	3.8	2.28
1976	10.25	3.47
1978	9.14	3.80
1979	24.59	3.80
1980	13.21	3.91
1981	10.15	4.38
1982	11.6	4.44
1983	3.8	5.16
1984	9.88	5.43
1985	10.82	5.43
1986	14.37	5.43
1987	16.41	5.76
1988	6.33	6.02
1989	12.72	6.15
1990	9.2	6.26
1991	7.39	6.33
1993	6.26	6.48
1994	11.88	7.12
1995	1.64	7.18
1996	6.15	7.39
1997	22.14	7.90
1998	12.77	9.14
1999	6.484	9.20
2000	5.16323077	9.88
2001	3.908	10.15
2002	4.38	10.25
2003	5.432	10.82
2004	5.432	11.60
2005	6.016	11.88
2006	5.432	12.49
2007	3.471	12.72
2008	2.284	12.77
2009	7.902	13.21
2010	7.124	14.37
2011	30.95	16.41
2012	12.494	22.14
2013	5.763	24.59
2014	4.443	30.95

Fuente: Autor.

ANEXO 7

Función acumulada de las distribuciones probabilísticas.

DISTRIBUCIÓN	FUNCIÓN ACUMULADA
Normal	$F(x) = F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi}} \int_{-\infty}^z e^{\left[-\frac{z^2}{2}\right]} dZ$ <p>Donde: Z= Variable estandarizada estadística</p>
Log-Normal	$F(y) = \int_{-\infty}^y f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi}\sigma_y} \int_{-\infty}^y e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} dy$ <p>Donde: y= ln x, x es variable independiente μ= media aritmética de los logaritmos naturales de x σ= Desviación estándar de los logaritmos naturales de x</p>
Gama-3	$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{(x-x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$ <p>Donde: X0= origen de la variable X, parámetro de posición X= Variable aleatoria Y= Parámetro de forma B= parámetro de escala</p>
Gumbel	$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}}$ <p>Donde: μ= Parámetro de posición, es decir moda α= parámetro de escala X= Variable Independiente</p>

Fuente: [26]

ANEXO 8

**Aplicación de las funciones acumuladas de las distribuciones Normal – Log Normal
– Gamma – Gumbel de los caudales máximos mensuales multianuales de la
estación de Villapinzón.**

	NORMAL	LOGNORMAL	GAMMA	GUMBEL
1	0.1087574	0.006508195	0.00756332	0.06531421
2	0.12966872	0.025683509	0.01830274	0.09215674
3	0.17513949	0.101593252	0.05245983	0.15575623
4	0.18934778	0.130023682	0.06509636	0.17628536
5	0.18934778	0.130023682	0.06509636	0.17628536
6	0.19416242	0.139843875	0.06952211	0.18326305
7	0.21606483	0.184891253	0.09037646	0.21500002
8	0.21909279	0.191108762	0.09333696	0.21937587
9	0.25539673	0.263954533	0.12982286	0.27129026
10	0.26970807	0.291416554	0.14455032	0.29137041
11	0.26970807	0.291416554	0.14455032	0.29137041
12	0.26970807	0.291416554	0.14455032	0.29137041
13	0.28786816	0.325012946	0.16339248	0.31645689
14	0.30212695	0.350362751	0.17825869	0.33581689
15	0.30980523	0.363632871	0.18627782	0.34611262
16	0.31617113	0.374432926	0.19292969	0.35457791
17	0.32025087	0.381258576	0.19719327	0.35996895
18	0.3293026	0.396137295	0.20665163	0.37183364
19	0.3679498	0.455672971	0.24692156	0.42096537
20	0.3714029	0.460689822	0.25050484	0.42523369
21	0.38444235	0.479208586	0.26400686	0.44117142
22	0.41675855	0.522345766	0.2972435	0.47945158
23	0.49682795	0.614507755	0.37798938	0.56710238
24	0.50073823	0.618542115	0.38187272	0.57113354
25	0.56239492	0.677369119	0.44243159	0.63186982
26	0.56882369	0.683029563	0.4486796	0.63791058
27	0.60507149	0.713481908	0.483717	0.6710116
28	0.65317934	0.750479562	0.52984678	0.71259797
29	0.66990817	0.762546505	0.54583446	0.72648392
30	0.70538895	0.786954418	0.57974964	0.75504329
31	0.71799088	0.795271434	0.59182252	0.76491512
32	0.72074344	0.797065416	0.59446295	0.76705353
33	0.74438722	0.812162061	0.61721452	0.78517226
34	0.80134356	0.846566683	0.67294255	0.82721751
35	0.88093779	0.891807732	0.75596434	0.88361584
36	0.98281696	0.957271551	0.90161	0.96342112
37	0.994065	0.970578177	0.93522901	0.97793948
38	0.99981099	0.988115704	0.9793877	0.99412941

Fuente: Autor.

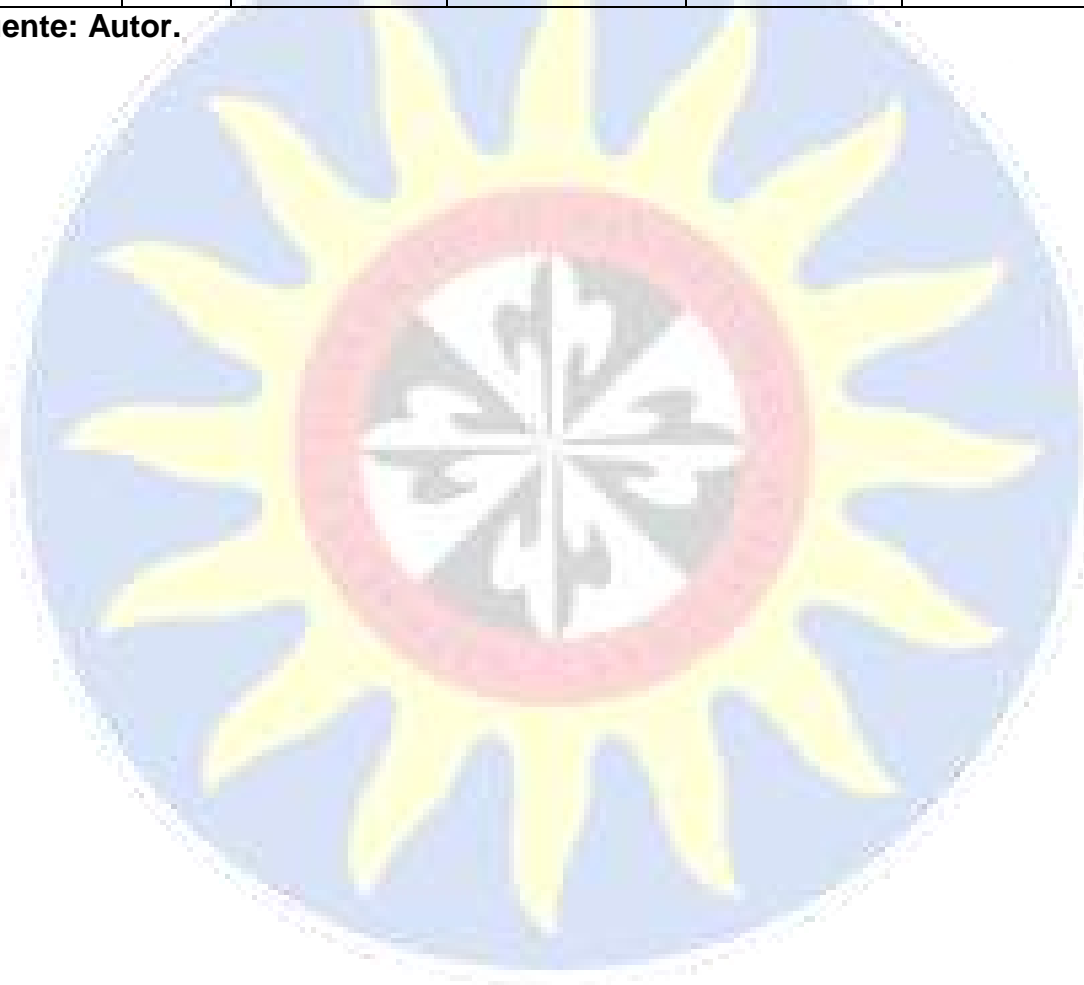
ANEXO 9

Diferencias entre la probabilidad teórica (normal-lognormal-gamma-gumbel) y empírica $P(x)$ para obtener la máxima diferencia (D) para así determinar en que función se ajustan los datos.

PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE					
	P(x)	P(x)- NORMAL	P(x)- LOGNORMAL	P(x)- GAMMA	P(x)- GUMBEL
1	0.025	0.083757401	0.018491805	0.017436681	0.04031421
2	0.05	0.079668717	0.024316491	0.031697259	0.042156739
3	0.075	0.100139494	0.026593252	0.022540166	0.080756232
4	0.1	0.089347782	0.030023682	0.034903641	0.076285358
5	0.125	0.064347782	0.005023682	0.059903641	0.051285358
6	0.15	0.044162421	0.010156125	0.080477892	0.033263054
7	0.175	0.041064832	0.009891253	0.084623539	0.040000025
8	0.2	0.019092789	0.008891238	0.106663036	0.01937587
9	0.225	0.030396725	0.038954533	0.095177141	0.046290255
10	0.25	0.019708071	0.041416554	0.105449681	0.041370414
11	0.275	0.005291929	0.016416554	0.130449681	0.016370414
12	0.3	0.030291929	0.008583446	0.155449681	0.008629586
13	0.325	0.037131843	1.29455E-05	0.161607519	0.008543107
14	0.35	0.047873053	0.000362751	0.171741311	0.014183107
15	0.375	0.065194765	0.011367129	0.188722185	0.028887383
16	0.4	0.083828872	0.025567074	0.207070314	0.045422092
17	0.425	0.10474913	0.043741424	0.22780673	0.06503105
18	0.45	0.120697398	0.053862705	0.243348366	0.078166358
19	0.475	0.107050198	0.019327029	0.228078443	0.054034631
20	0.5	0.128597101	0.039310178	0.249495165	0.074766312
21	0.525	0.140557652	0.045791414	0.260993139	0.083828583
22	0.55	0.133241449	0.027654234	0.252756498	0.070548425
23	0.575	0.078172049	0.039507755	0.197010617	0.007897618
24	0.6	0.099261772	0.018542115	0.218127284	0.028866464
25	0.625	0.062605082	0.052369119	0.182568408	0.006869822
26	0.65	0.081176305	0.033029563	0.201320401	0.012089418
27	0.675	0.069928506	0.038481908	0.191282996	0.003988401
28	0.7	0.046820656	0.050479562	0.170153215	0.012597973
29	0.725	0.055091827	0.037546505	0.179165536	0.001483923
30	0.75	0.044611048	0.036954418	0.170250361	0.00504329

31	0.775	0.057009118	0.020271434	0.18317748	0.010084884
32	0.8	0.079256556	0.002934584	0.205537046	0.032946467
33	0.825	0.080612777	0.012837939	0.20778548	0.039827743
34	0.85	0.048656437	0.003433317	0.177057449	0.022782487
35	0.875	0.005937791	0.016807732	0.119035664	0.00861584
36	0.9	0.082816957	0.057271551	0.00161	0.063421122
37	0.925	0.069065003	0.045578177	0.010229011	0.052939485
38	0.95	0.049810986	0.038115704	0.029387697	0.044129415
MAXIMO		0.140557652	0.057271551	0.260993139	0.083828583

Fuente: Autor.



ANEXO 10

Nivel de significancia.

Tamaño Muestral N	Nivel de Significancia α				
	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
>35	$\frac{1.07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

Fuente: [26]

ANEXO 11

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n).

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad n (continuación)
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
C. Excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala o dragado			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150

Fuente: [41]

Planteamiento Ecuación para caudales máximos de Gumbel

Por lo anterior considera:

$P(x)$ = probabilidad de ocurrencia de un evento.
- y =coeficiente de ayuda – variable estocástica.

$$P(x) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (1)$$

$$e^{-e^{-y}} = 1 - P$$

$$-e^{-y} = \text{Ln}(1 - P)$$

$$e^{-y} = -\text{Ln}(1 - P)$$

$$-y = \text{Ln}(-\text{Ln}(1 - P))$$

$$y = -\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - P))$$

Para obtener el caudal máximo, se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$Q_{max} = \bar{Q} * (1 + Cv (0.78y - 0.45)) \quad (2)$$

Donde:

Cv = Coeficiente de variación

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad \begin{array}{l} \longrightarrow \text{Desviación estándar} \\ \longrightarrow \text{Promedio} \end{array} \quad (3)$$

Para calcular el intervalo de confianza, es decir, aquel dentro del cual puede variar Q_{max} , dependiendo del registro disponible se realiza de la siguiente forma:

Si $\phi=1-1/T$ (T =periodo de retorno), varía entre 0.20 y 0.80, el intervalo de confianza se calcula con la fórmula [42]:

$$\Delta Q = \pm \sqrt{N \alpha \sigma_m} \frac{\sigma_Q}{\sigma_N \sqrt{N}} \quad (4)$$

Donde:

N = número de años de registro.

$\sqrt{N\alpha\sigma_m}$ = Constante en función ϕ , el cual se obtiene de la siguiente tabla.

Tabla 16. Constante $\sqrt{N\alpha\sigma_m}$ en función de ϕ .

ϕ	$\sqrt{N\alpha\sigma_m}$
0.01	(2.1607)
0.02	(1.7894)
0.05	(1.4550)
0.10	(1.3028)
0.15	1.2548
0.20	1.2427
0.25	1.2494
0.30	1.2687
0.35	1.2981
0.40	1.3366
0.45	1.3845
0.50	1.4427
0.55	1.5130
0.60	1.5984
0.65	1.7034
0.70	1.8355
0.75	2.0069
0.80	2.2408
0.85	2.5849
0.90	(3.1639)
0.95	(4.4721)
0.98	(7.0710)
0.99	(10.000)

Fuente: [42].

Σ_n = Constante en función de N, que se observa en la siguiente tabla.

Tabla 17. Constante σ_n en función de N.

N	\bar{Y}_N	σ_n	N	\bar{Y}_N	σ_n
8	0.4843	0.9043	49	0.5481	1.1690
9	0.4902	0.9288	50	0.54854	1.16066
10	0.4952	0.9497	51	0.5489	1.1623
11	0.4996	0.9676	52	0.5493	1.1638
12	0.5053	0.9833	53	0.5497	1.1653
13	0.5070	0.9972	54	0.5501	1.1667
14	0.5100	1.0095	55	0.5504	1.1681
15	0.5128	1.02057	56	0.5508	1.1696
16	0.5157	1.0316	57	0.5511	1.1708
17	0.5181	1.0411	58	0.5515	1.1721
18	0.5202	1.0493	59	0.5518	1.1734
19	0.5220	1.0566	60	0.55208	1.17487
20	0.52355	1.06283	62	0.5527	1.1770
21	0.5252	1.0696	64	0.5533	1.1793
22	0.5268	1.0754	66	0.5538	1.1814
23	0.5283	1.0811	68	0.5543	1.1834
24	0.5296	1.0864	70	0.55477	1.18536
25	0.53086	1.09145	72	0.5552	1.1873
26	0.5320	1.0961	74	0.5557	1.1890
27	0.5332	1.1004	76	0.5561	1.1906
28	0.5343	1.1047	78	0.5565	1.1923
29	0.5353	1.1086	80	0.55688	1.19382
30	0.53622	1.11238	82	0.5572	1.1953
31	0.5371	1.1159	84	0.5576	1.1967
32	0.5380	1.1193	86	0.5580	1.1980
33	0.5388	1.1226	88	0.5583	1.1994
34	0.5396	1.1255	90	0.55860	1.20073
35	0.54034	1.12847	92	0.5589	1.2020
36	0.5410	1.1313	94	0.5592	1.2032
37	0.5418	1.1339	96	0.5595	1.2044
38	0.5424	1.1363	98	0.5598	1.2055
39	0.5430	1.1386	100	0.56002	1.20649
40	0.54362	1.14132	150	0.56481	1.22534
41	0.5442	1.1436	200	0.56715	1.23589
42	0.5448	1.1458	250	0.56878	1.24292
43	0.5453	1.1480	300	0.56993	1.24756
44	0.5458	1.1499	400	0.57144	1.25450
45	0.5463	1.15185	500	0.57240	1.25880
46	0.5468	1.1538	750	0.57377	1.26506
47	0.5473	1.1557	1000	0.57450	1.26851
48	0.5477	1.1574		0.57722	1.28255

Fuente: [42]

σ_q = Desviación estándar de los caudales, obtenida de la siguiente formula [42]:

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Q_i^2 - NQ_m^2}{N-1}} \quad (5)$$

N = número de años de registro

Q_i = caudales máximos anuales registrados, en m^3/s

$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N}$, caudal promedio, en m^3/s

T = período de retorno.

σ_N, Y_N = constantes función de N , tabla 6.13
(variables reducidas)

σ_Q = desviación estándar de los caudales

1. Si $\phi > 0.90$, el intervalo se calcula como:

$$\Delta Q = \pm \frac{1.14 \sigma_Q}{\sigma_N} \quad (6)$$

La zona de ϕ comprendida entre 0.8 y 0.9 se considera de transición, donde ΔQ es proporcional al calculado con las ecuaciones presentadas tanto del primer y segundo paso, anteriormente descritos; dependiendo del valor de ϕ [42].

Por lo tanto, el caudal máximo de diseño para un cierto período de retorno será igual al caudal máximo más el intervalo de confianza.

Tabla 18. Intervalo de confianza calculado de acuerdo al periodo de retorno establecido para el municipio de Villapinzón.

Tr	ϕ	$\sqrt{N\alpha\sigma_m}$	ΔQ	FORMULA
2	0.5	1.4427	1.24178448	$\Delta Q = \pm \sqrt{N\alpha\sigma_m} \frac{\sigma_Q}{\sigma_N \sqrt{N}}$
5	0.8	2.2408	1.92873824	
10	0.9	-3.1639	6.12783905	$\Delta Q = \pm \frac{1.14 \sigma_Q}{\sigma_N}$
20	0.95	-4.4721	6.12783905	
50	0.98	-7.071	6.12783905	
100	0.99	-10	6.12783905	
200	0.995	-10	6.12783905	
500	0.998	-10	6.12783905	

Fuente: Autor.

Tabla 19. Caudal máximo para los periodos de retorno establecidos para el municipio de Villapinzón.

Probabilidad	Periodo de retorno	Coficiente	Caudal máx	
P	Tr	y	Qmax	Qm + dQ
50	2	0.36651292	8.1840307	9.4258152
20	5	1.49993999	13.595786	15.524524
10	10	2.25036733	17.178839	23.306678
5	20	2.97019525	20.615789	26.743628
2	50	3.90193866	25.064569	31.192408
1	100	4.60014923	28.398303	34.526142
0.5	200	5.29581214	31.719873	37.847712
0.2	500	6.21360726	36.102054	42.229893

Fuente: Autor.

ANEXO 13
Zona 1



Fuente: Autor.

ANEXO 14
Zona 2



Fuente: Autor.

ANEXO 15
Zona 3





Fuente: Autor.

ANEXO 16
Zona 4



Fuente. Autor.

ANEXO 17

Matriz cualitativa de los materiales, estado de conservación, emplazamiento del borde del río y nivel respecto a la vía de las edificaciones evaluadas en las zonas determinadas.

TIPO	N°	UBICACIÓN	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS										ORGANIZACIÓN						
			CAPACIDAD	MATERIALES				ESTADO DE CONSERVACIÓN				N° DE PISOS	TERRENO		ORGANIZACIÓN (COMERCIAL)	CAPACITACIÓN (SIMULACIÓN)	SEGURO		
				ADOBE	MAPOSTERIA CONVENCIONAL	CONCRETO	ARTESANALES	MUY BUENO	BUENO	REGULAR	MALO		EMPLAZAMIENTO O BORDE DEL RÍO	ZONAS BAJAS RESPECTO A LA VÍA			SI	NO	SI
Vivienda/parqueadero	Zona 1	sur de villapinzón	50				x				x	1	NO	SI	X			X	X
Vivienda/bodegas	Zona 2	sur de villapinzón	200	x							x	2	NO	SI	X			X	X
Colegio	Zona 3	sur de villapinzón	150		x						x	2	NO	SI	X			X	X
Vivienda	Zona 2	sur de villapinzón	100	x							x	2	NO	SI		X		X	X
Vivienda	Zona 3	sur de villapinzón	20		x					x		2	NO	SI		X		X	X
Vivienda/parqueadero	Zona 1	Centro de villapinzón	50					x			x	3	NO	SI	X			X	X
Vivienda	Zona 3	Centro de villapinzón	20		x					x		2	NO	SI		X		X	X
Vivienda	Zona 3	Centro de villapinzón	50		x					x		2	SI	SI		X		X	X
Vivienda	Zona 3	Centro de villapinzón	20		X					X		2	SI	NO		X		X	X
Vivienda/bodegas	Zona 2	Centro de villapinzón	50	x							X	1	SI	SI	X			X	X
Plaza de toros	Zona 4	Norte de villapinzón	200					x			x	3	SI	NO	X			X	X
Vivienda	Zona 1	Norte de villapinzón	50					x			x	1	NO	SI		X		X	X
Vivienda	Zona 1	Norte de villapinzón	10					x			x	1	SI	NO		X		X	X
Vivienda	Zona 3	Norte de villapinzón	20		x					x		2	SI	NO		X		X	X
Vivienda	Zona 3	Norte de villapinzón	20		x					x		2	SI	NO		X		X	X

Fuente: Autor.

ANEXO 18

Rangos de los niveles de vulnerabilidad de las edificaciones ante las inundaciones.

NIVELES DE VULNERABILIDAD DE LAS EDIFICACIONES ANTE INUNDACIONES		
NIVELES DE VULNERABILIDAD		RANGOS
Muy Alto	4	De 113 a 136
Alto	3	De 87 a 112
Medio	2	De 61 a 86
Bajo	1	De 34 a 60

Fuente: Autor.

Valoración de variables de vulnerabilidad de las edificaciones ante inundaciones.

PONDERACIÓN Y VALORACIÓN DE VARIABLES DE VULNERABILIDAD DE LAS EDIFICACIONES ANTE INUNDACIONES							
VARIABLES DE VULNERABILIDAD		CAPACIDAD	MATERIALES	ESTADO DE CONSERVACIÓN	EMPLAZAMIENTO O BORDE DEL RÍO	ZONAS BAJAS RESPECTO A LA VÍA	
PONDERACIÓN		4	6	4	10	10	
VALOR (V) (De los indicadores)	4	Muy Alto	>500	Artesanal	Muy malo	SI	SI
	3	Alto	300<500	Adobe	Malo	-	-
	2	Medio	100<300	Mampostería convencional-Aporticado	Regular	-	-
	1	Bajo	50<100	Concreto	Bueno	NO	NO

Fuente: [33].

ANEXO 19

Niveles de vulnerabilidad Vs Niveles de peligro obteniendo el nivel de riesgo ante inundaciones.

		NIVELES DE VULNERABILIDAD								
		MUY ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO					
		4	3	2	1					
NIVELES DE PELIGRO	MUY ALTO	4	4	3	3	Muy Alto	Muy Alto	Alto	Alto	Alto
	ALTO	3	4	2	2	Muy Alto	Alto	Medio	Medio	Medio
	MEDIO	2	3	2	2	Alto	Medio	Medio	Bajo	Bajo
	BAJO	1	3	2	1	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
NIVELES DE RIESGO ANTE INUNDACIONES										

Fuente: [38].

ANEXO 20

Matriz del análisis de vulnerabilidad ante inundaciones del municipio de Villapinzón.

Ver en [matriz vulnerabilidad.pdf](#)

ANEXO 21

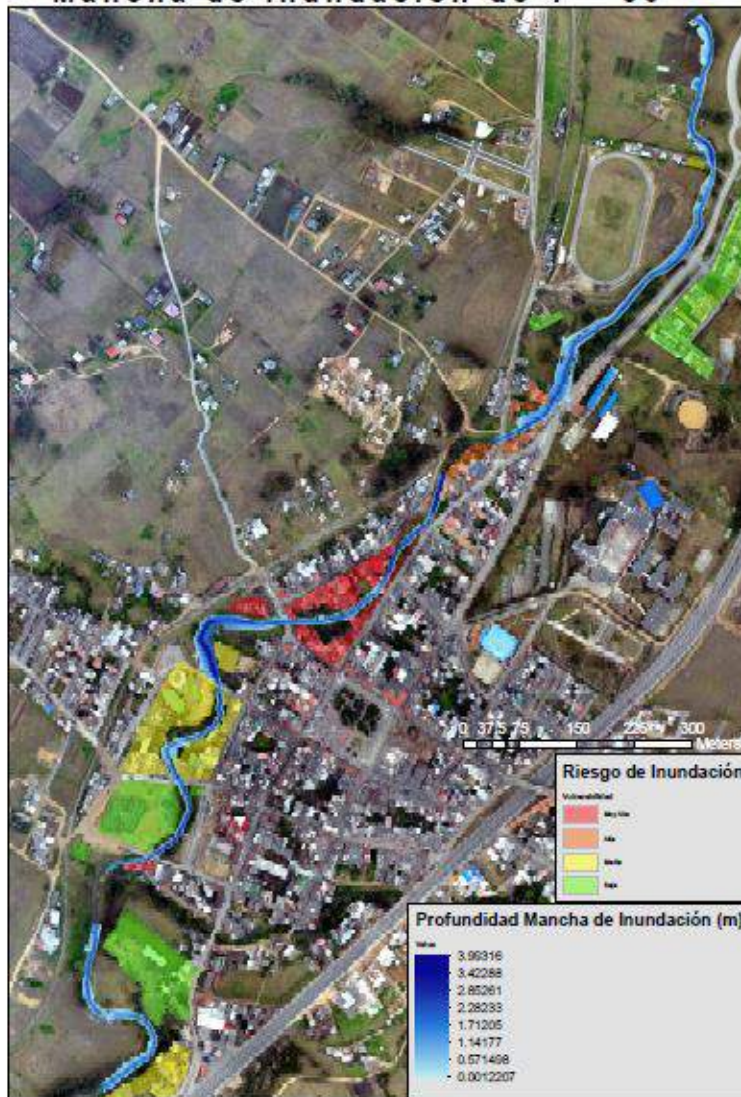
Posibles Escenarios de peligros asociados a las zonas amenazadas por el fenómeno de la inundación.

Ver en [matriz peligro.pdf](#)

ANEXO 22

Zonificación del riesgo para un periodo de retorno de 50 años.

Riesgo Para una
Mancha de Inundación de T = 50



Fuente: Autor.

ANEXO 23
Mancha de inundación Entrada al municipio del flujo T= 2



ANEXO 24
Mancha de inundación zona 3 T=2



ANEXO 25
Mancha de Inundación zona 1



Fuente: Autor.

ANEXO 26
Mancha de inundación Zona 2 T = 2



Fuente: Autor.

ANEXO 27
Mancha de inundación en la zona 4 T=2.



Fuente: Autor

ANEXO 28
Mancha de inundación entrada al municipio para T= 5



Fuente: autor.

ANEXO 29
Mancha de inundación zona 3 T=5.



Fuente: Autor.

ANEXO 30

Mancha de inundación de la zona 1 T=5.



Fuente: Autor.

ANEXO 31
Mancha de inundación de la zona 2 T=5.



Fuente: Autor.

ANEXO 32
Mancha de inundación zona 4 T=5.



Fuente: Autor.

ANEXO 33
Mancha de inundación salida del municipio T= 5



ANEXO 34
Mancha de inundación entrada al municipio T= 10



Fuente: Autor

ANEXO 35
Mancha de inundación de la zona 3 T=10.



Fuente: Autor.

ANEXO 36
Mancha de inundación de la zona 1 T=10.



Fuente: Autor.

ANEXO 37
Mancha de inundación de la zona 2 T=10.



Fuente: Autor.

ANEXO 38
Mancha de inundación de la zona 4 T=10.



Fuente: Autor.

ANEXO 39
Mancha de inundación salida del municipio T = 10



Fuente: autor

ANEXO 40
Mancha de inundación entrada al municipio T = 20



Fuente: autor

ANEXO 41
Mancha de inundación zona 3 T=20.



Fuente: Autor.

ANEXO 42
Mancha de inundación zona 1 T=20.



Fuente: Autor.

ANEXO 43
Mancha de inundación zona 2 T=20.



Fuente: Autor.

ANEXO 44
Imagen 39. Mancha de inundación zona 4 T=20.



Fuente: Autor.

ANEXO 45
Mancha de inundación salida del municipio T = 20



Fuente: autor.

ANEXO 46
Mancha de inundación entrada al municipio T=50



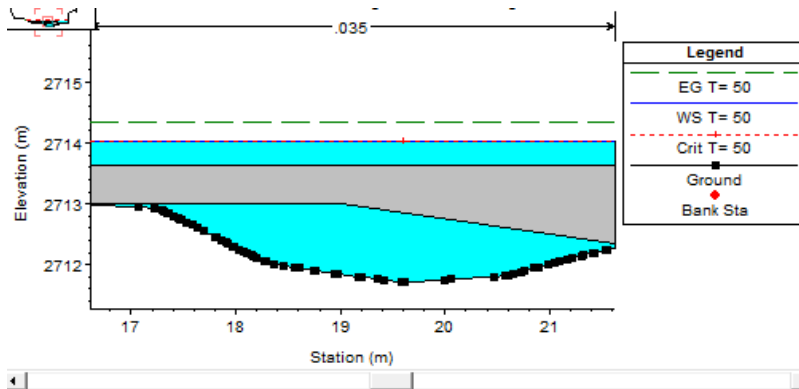
Fuente: Autor.

ANEXO 47
Mancha de inundación en zona 3 T=50



Fuente: Autor.

ANEXO 48
Puente Inundado T=50.



Fuente: Autor.

ANEXO 49
Mancha de inundación zona 3 T=50.



Fuente: Autor.

ANEXO 50
Mancha de inundación zona 3 T=50.



Fuente: Autor.

ANEXO 51
Mancha de inundación zona 1 T=50.



Fuente: Autor.

ANEXO 52
Imagen 46. Mancha de inundación zona 2 T=50.



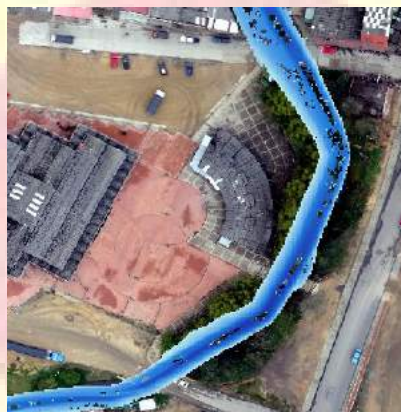
Fuente: Autor.

ANEXO 53
Mancha de agua zona 2 T=50



Fuente: Autor.

ANEXO 54
Mancha de inundación zona 4 T=50



Fuente: Autor.

ANEXO 55
Mancha de inundación salida del municipio de Villapinzón T=50



Fuente: Autor.

ANEXO 56

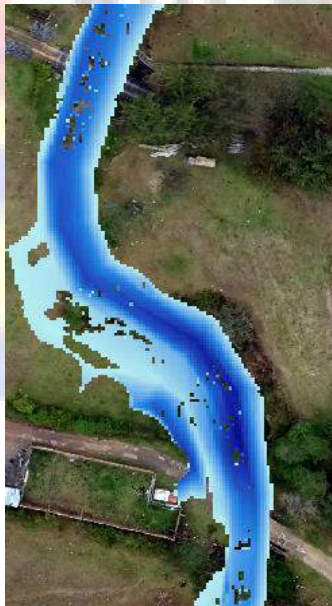
Mancha de inundación entrada del municipio de Villapinzón T=100



Fuente: Autor.

ANEXO 57

Mancha de inundación de la entrada del municipio con riesgo a una vivienda aledaña T=100



Fuente: Autor.

ANEXO 58
Mancha de Inundación zona 3 T=100



Fuente: Autor.

ANEXO 59
Mancha de inundación zona 3 - puente T=100



Fuente: Autor.

ANEXO 60
Mancha de inundación zona 3 – después del puente T=100



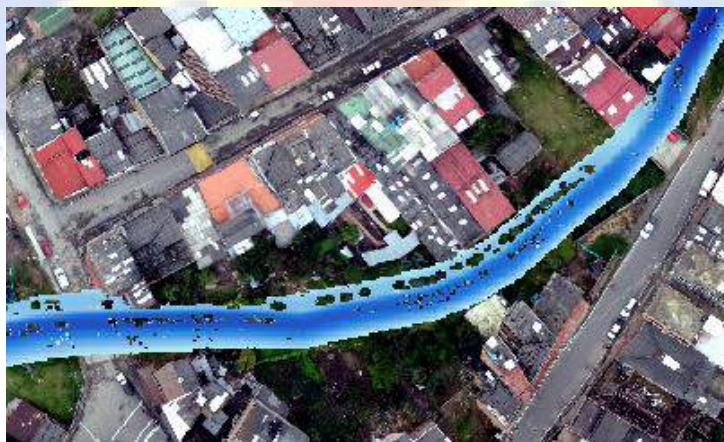
Fuente: Autor.

ANEXO 61
Mancha de inundación zona 3 T=100



Fuente: Autor.

ANEXO 62
Mancha de inundación zona 1 T=100



Fuente: Autor.

ANEXO 63
Mancha de inundación zona 2 T=100.



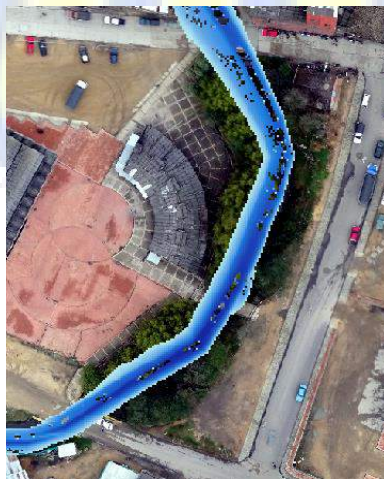
Fuente: Autor.

ANEXO 64
Mancha de inundación zona 2 T=100



Fuente: Autor.

ANEXO 65
Mancha de inundación zona 4 T=100



Fuente: Autor.

ANEXO 66
Mancha de inundación salida del municipio T=100.



Fuente: Autor.

ANEXO 67
Mancha de inundación de la entrada del municipio de Villapinzón T=200



Fuente: Autor.

ANEXO 68
Mancha de inundación entrada del municipio T=200



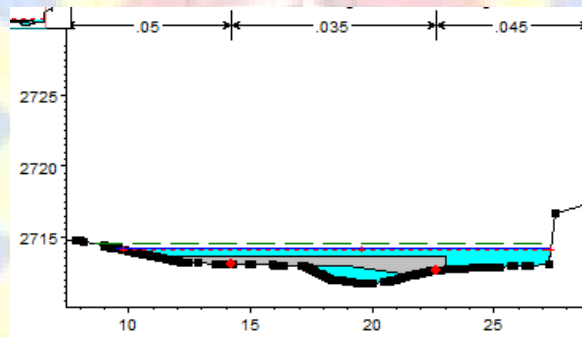
Fuente: Autor.

ANEXO 69
Mancha de inundación zona 3 T=200



Fuente: Autor.

ANEXO 70
Puente 3 inundado zona 3 T=200



Fuente: Autor.

ANEXO 71
Mancha de inundación zona 3 T=200



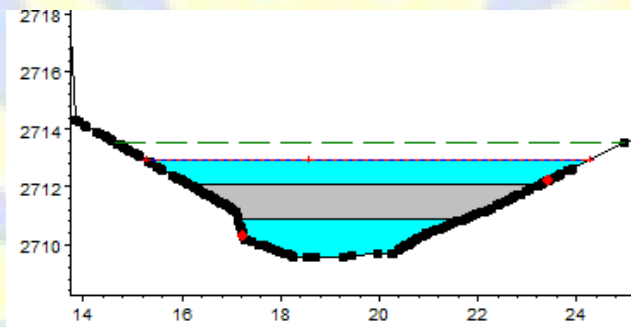
Fuente: Autor.

ANEXO 72
Mancha de inundación zona 3 T=200.



Fuente: Autor.

ANEXO 73
Puente 4 inundado zona 3 T=200



Fuente: Autor.

ANEXO 74
Mancha de inundación zona 3 T=200



Fuente: Autor.

ANEXO 75
Mancha de inundación zona 1 T=200



Fuente: Autor.

ANEXO 76
Mancha de inundación zona 2 T=200.



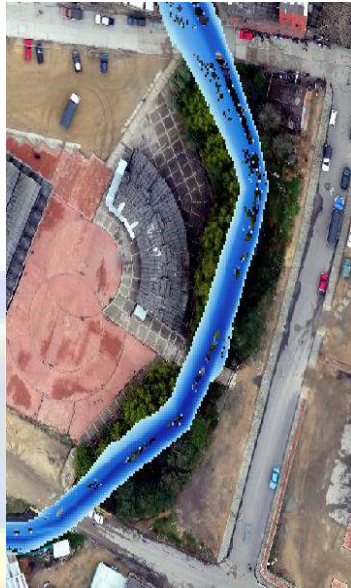
Fuente: Autor.

ANEXO 77
Mancha de inundación zona 2 T=200.



Fuente: Autor.

ANEXO 78
Mancha de inundación zona 4 T=200.



Fuente: Autor.

ANEXO 79
Mancha de inundación salida del municipio de Villapinzón T= 200



Fuente: Autor.

ANEXO 80

Mancha de inundación entrada zona urbana municipio de Villapinzón T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 81

Mancha de inundación entrada del municipio T=500.



Fuente: Autor.

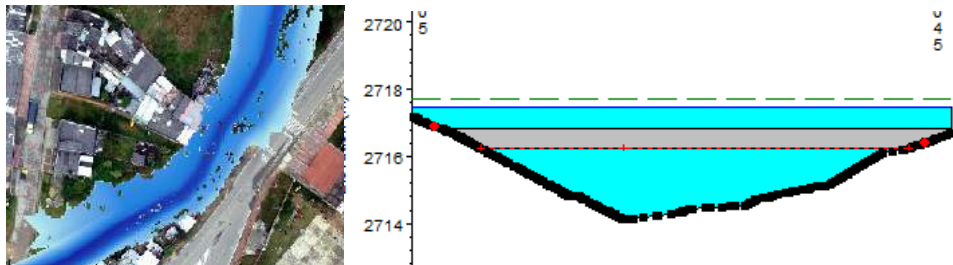
ANEXO 82

Mancha de inundación zona 3 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 83
Inundación puente zona 3 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 84
Mancha de inundación zona 3 T=500.



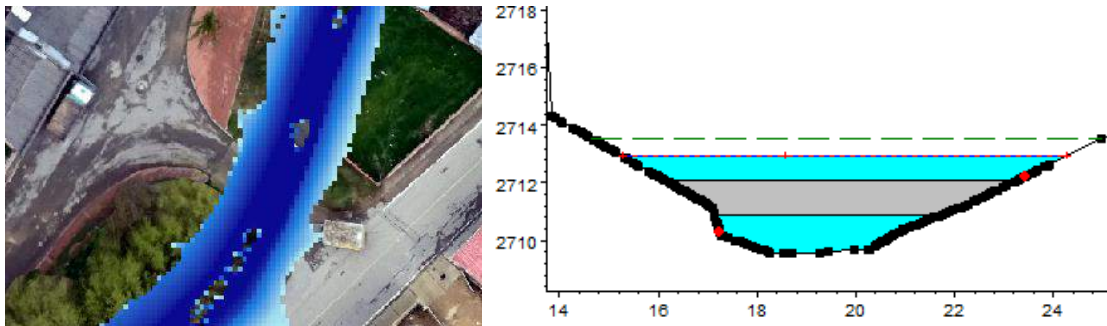
Fuente: Autor.

ANEXO 85
Mancha de inundación zona 3 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 86
Inundación puente zona 3 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 87
Mancha de inundación zona 3 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 88
Mancha de inundación de la zona 1 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 89
Mancha de inundación zona 2 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 90
Mancha de inundación zona 2 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 91
Mancha de inundación zona 4 T=500.



Fuente: Autor.

ANEXO 92
Mancha de inundación salida del municipio de Villapinzón T=500.



Fuente: Autor.