

10. MODELO HIDRÁULICO

Para la realización del modelo hidráulico de la cuenca del río Chicú se empleó el software HEC – RAS, en cuanto a los parámetros de entrada que requiere la modelación se obtuvieron tanto en campo como en información secundaria como cartografía y datos hidrológicos suministrados por las entidades de la CAR, IDEAM e IGAC.

10.1 LEVANTAMIENTO Y PREPROCESO DE DATOS PARA MODELO HIDRÁULICO

10.1.1 Topografía

La información cartográfica se obtuvo de los archivos del IGAC, el cual abarca la cuenca en su totalidad. Las siguientes tablas relacionan las planchas que fueron recopiladas que cubrían el área de estudio.

Tabla 10-1. Información Cartográfica IGAC de la cuenca del río Chicú.

PLANCHA	ESCALA
227	1:100.000
227IIB	1:25.000
227IID	1:25.000

Fuente: IGAC, 2017.

Para complementar esta información se utilizó imágenes de radar del satélite ALOS PALSAR, lanzado en enero del 2006 por la agencia japonesa de exploración aeroespacial. La resolución espacial del DEM (Modelo de Elevación Digital) es de 12.5 m de precisión en formato Tiff como se puede ver en la ilustración 10-1, , en donde por medio de herramientas SIG se construyen la curva de nivel cada 25 m y así generar un TIN el cual es una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos) (ESRI, 2016)².

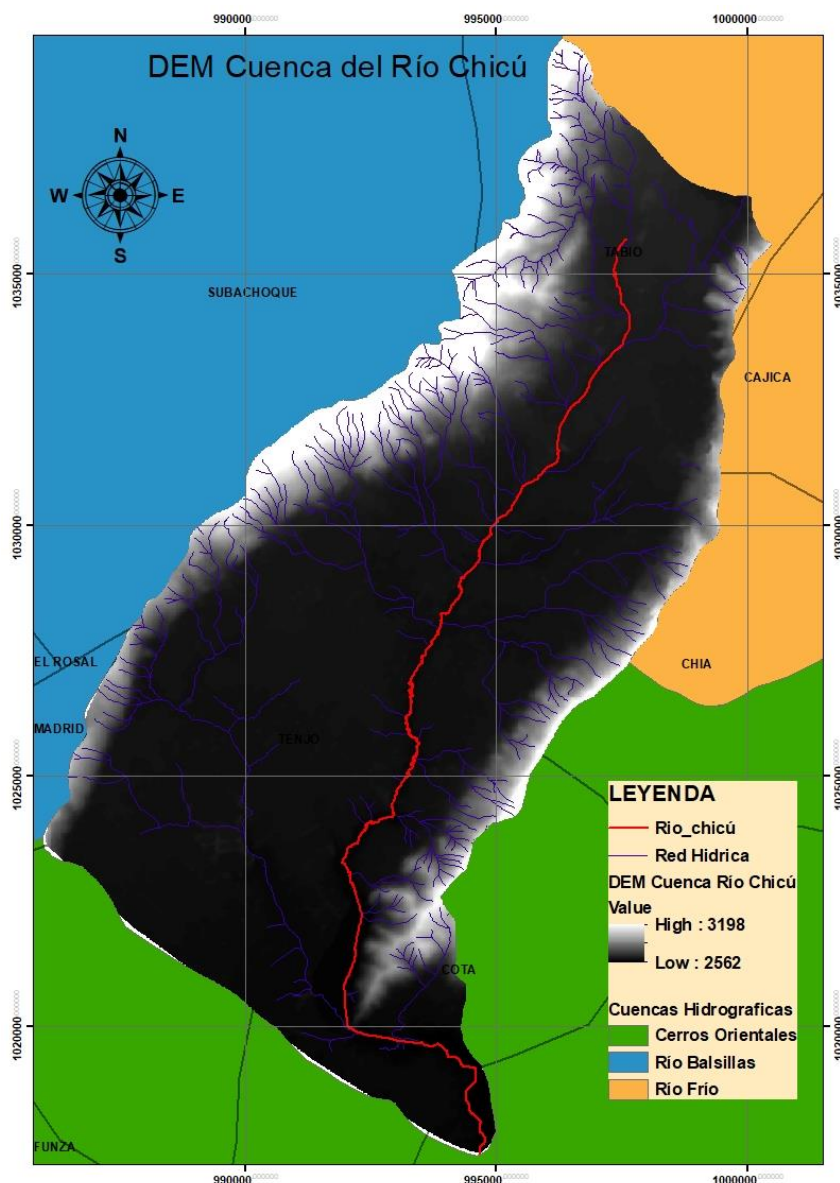


Ilustración 10-1. DEM cuenca del río Chicú con información secundaria.
 Fuente: Elaboración propia.

- Levantamiento Hidrotopográfico**

Consistió en el levantamiento planimétrico y altimétrico de las secciones de control, con el objetivo de crear una nube de puntos, tanto del cauce como del terreno aledaño en donde probablemente se tuviera problemas con el DEM, para final mente generar las secciones topográficas que serán utilizadas como principal insumo para el programa. Cabe resaltar que también se realizó la toma de velocidades por medio de un molinete con el objetivo de obtener los caudales para

cada sección y así utilizar esta información para realizar la calibración del modelo por medio de la altura de lámina de agua, ver Ilustración 10-2 – (a).

EL levantamiento se realizó con una estación total TOPCON - GTS - 100N SERIES suministrada por la universidad Santo Tomás. Esto se llevó a cabo en 7 puntos de muestreo donde fuera posible el ingreso y la facilidad de la toma de datos dentro del cauce en la Ilustración 10-2 – (b) se puede observar una de las secciones levantadas ubicada sobre la parte baja de la cuenca.



(a)



(b)

Ilustración 10-2. Levantamiento de sección del río Chicú parte baja de la cuenca.
Fuente: Elaboración propia.

- **Integración Topográfica**

A partir del levantamiento topográfico se da un tratamiento al DEM dando una mejor precisión sobre las curvas de nivel obtenidas por el IGAC, corrigiendo dicha información de las zonas de control con el objetivo de que la información secundaria no genere incoherencias en el modelo.

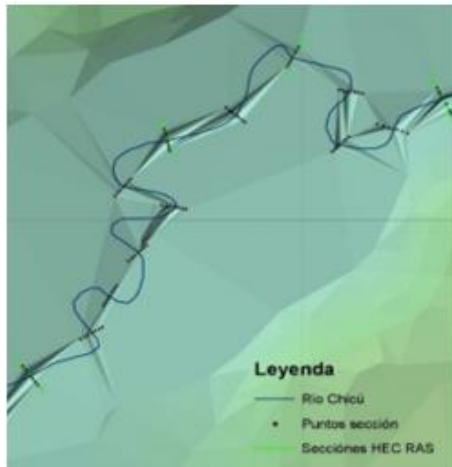
Para la integración de la información primaria y secundaria se hace uso del software ArcGIS y la última actualización de HEC-RAS 5.0.5 que viene con la herramienta llamada RASMapper. Esta herramienta le permite visualizar los resultados y especializarlos sin utilizar ArcGIS, con la gran ventaja que permite modificar y crear un modelo de terreno de la región del canal a partir de las secciones transversales (XSCutLines) y la superficie de interpolación (Interpolation Surface) entre secciones que crea automáticamente la herramienta.

El río Chicú se caracteriza por ser muy sinusoidal, es decir que cuenta con demasiadas curvas debido a las características morfológicas del terreno lo cual el

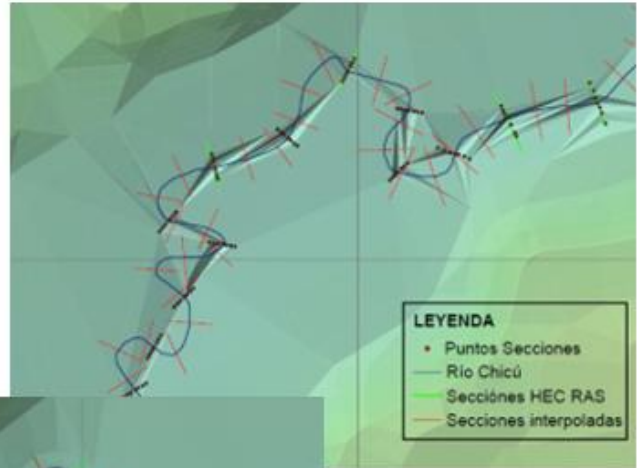
levantamiento total realizado en campo no es el suficiente para completar el modelo de terreno ya que al realizar la integración de la curvas de nivel y los puntos en campo levantados utilizando la herramienta de ArcGIS llamada EDIT TIN en donde se encarga de crear nodos al Tin con la información de cada shape point que representa un punto levantado en campo de la sección del río, no crea un vínculo entre secciones si no se encuentran lo suficientemente cercanos los puntos, quedan espacios entre secciones levantadas sin una información como se muestra en la Ilustración 10-3 (a) .

Para completar el modelo del terreno se exparto las secciones levantadas en campo al HEC RAS con el objetivo de interpolar entre secciones y definir la geometría por todo el eje del cauce ver Ilustración 10-3 (b). Una vez interpolada las secciones se procede a interpolar la superficie de terreno con la herramienta Interpolation Surface para luego ser exportada como archivo raster para así integrar la superficie creada dentro del cauce con la información secundaria recopilada.

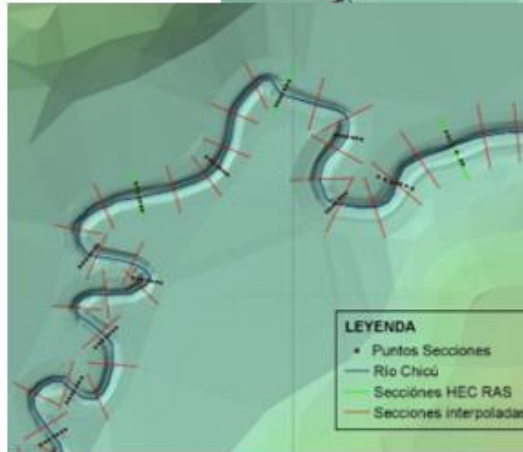
Para realizar la integración de información se deberá convertir el raster a un shape de puntos por medio de la herramienta en ArcGIS llamada Raster to Point esta atribuirá cada celda del raster en un punto con su respectiva cota, una vez realizado este procedimiento se realizara la unión de la información por medio de la herramienta de ArcGIS llamada Editing esta integrara las dos informaciones y generara un archivo TIN, en la Ilustración 10-3 (c) se puede observar el producto de la integración.



(a)



(b)



(c)

Ilustración 10-3. Integración geometría de cauce e información secundaria.
Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 10-4 se presenta el modelo de elevación digital final de la cuenca del río Chicú final con el tratamiento anteriormente descrito, donde la resolución del DEM es de 0.5 m pasando de tener 12.5 m con la información secundaria suministrada.

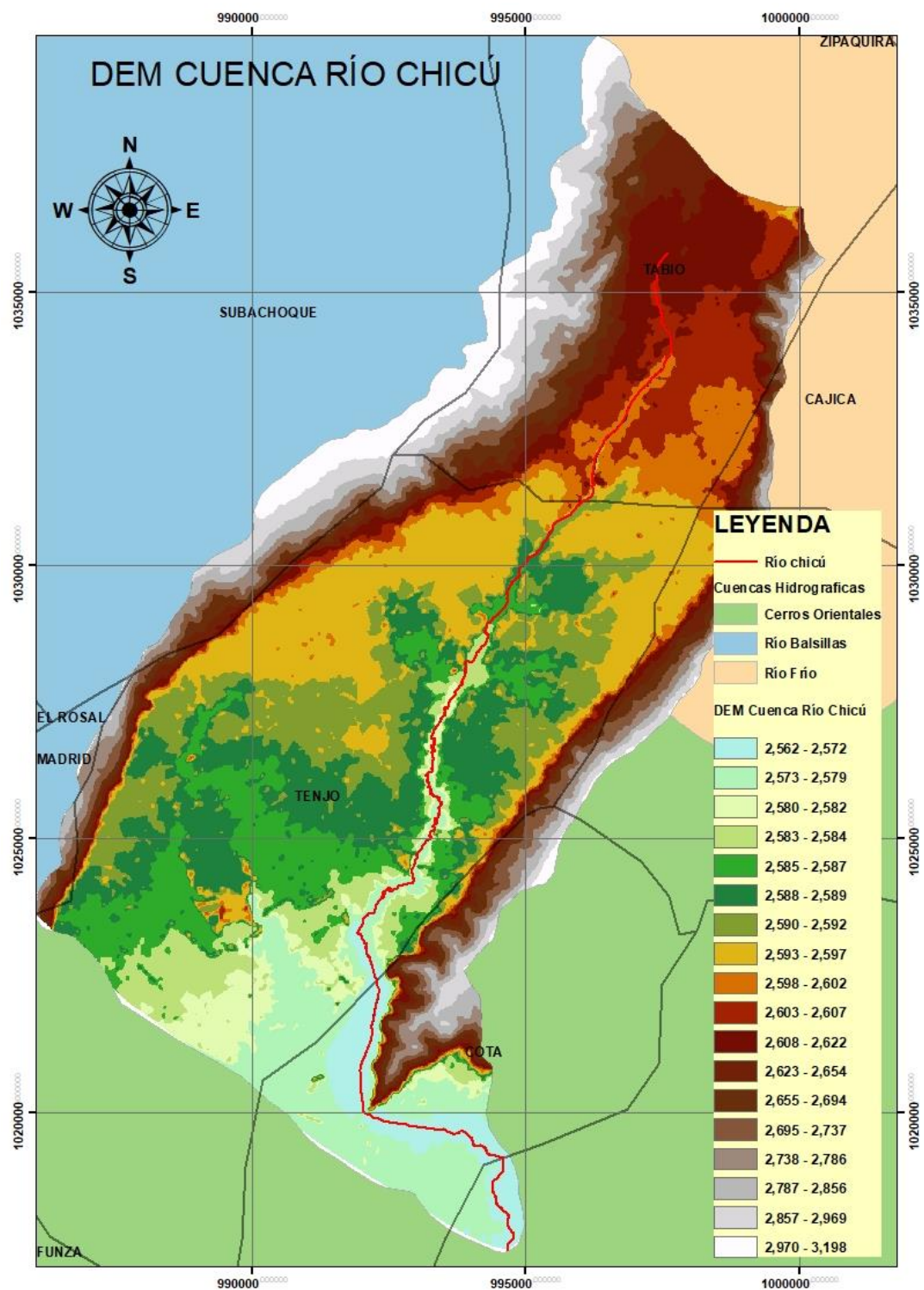


Ilustración 10-4. Modelo de elevación digital del terreno – Cuenca del Río Chicú.
Fuente: Elaboración propia.

10.1.2 Cálculo de caudales pico

La obtención se fundamentó en el análisis y tránsito de las crecientes probables obtenidos del cálculo de los caudales máximos anuales de una serie de 25 años, comenzando desde 1991 hasta el 2014.

Es importante mencionar que no se dispone de una estación limnigráfica o limnimétrica a la salida de la cuenca, por lo que se tuvo que realizar una transposición de caudales tomando como estación piloto la Estación de Las Mercedes la cual se encuentra localizada en la parte alta de la cuenca del río Chicú, como se puede observar en la gráfica Gráfico 10-1.

De acuerdo a lo anterior se presenta el comportamiento de los caudales máximos registrados en la estación de Las Mercedes y los obtenidos mediante el proceso de transposición de caudales.

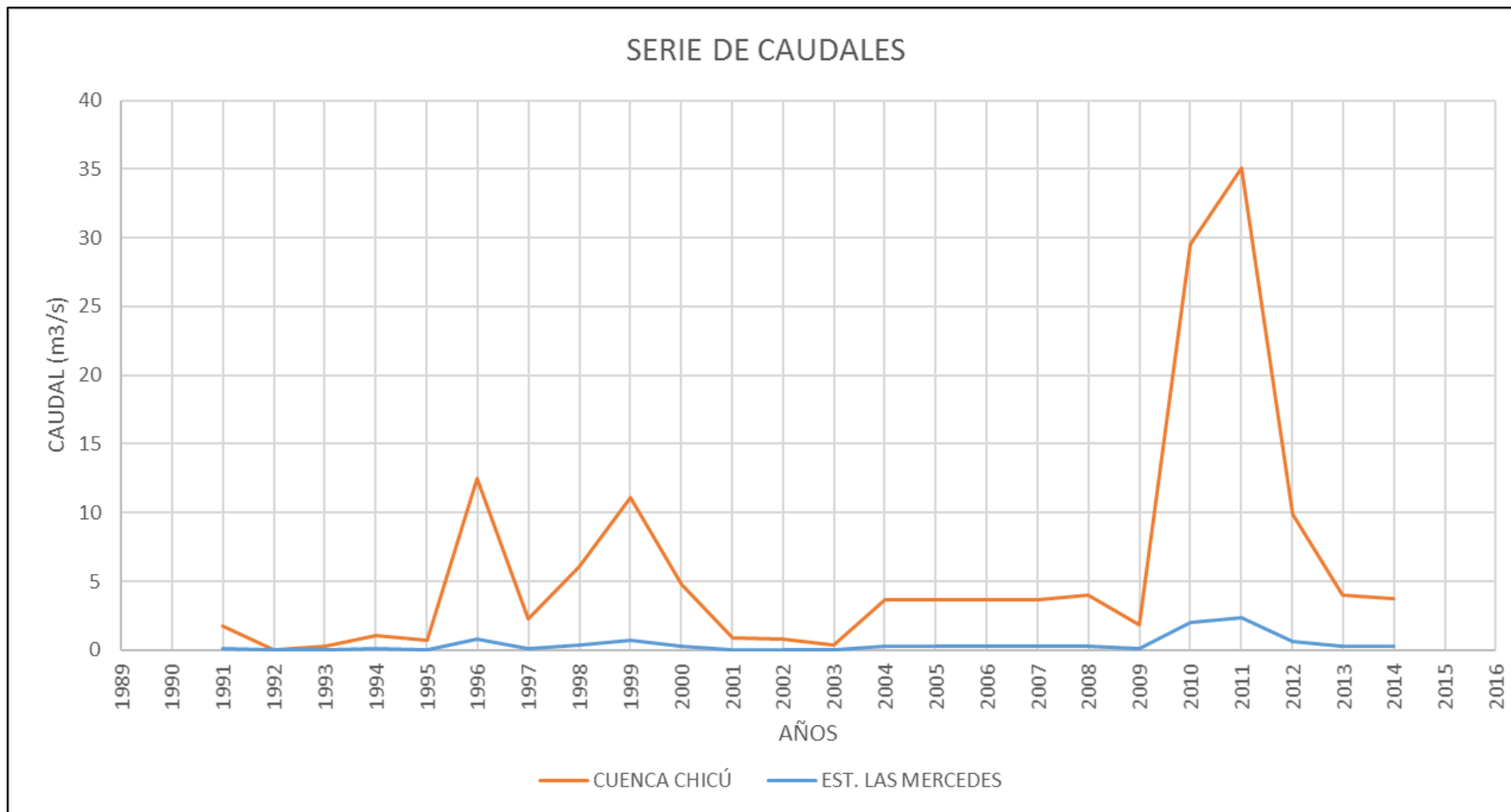


Gráfico 10-1 Comportamiento caudal para la estación de Las Mercedes y los calculados para la Cuenca del río Chicú

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la gráfica anterior, el comportamiento del caudal es similar para la estación Las Mercedes como para la serie obtenida para toda la cuenca, donde el mayor caudal observado es de 2,38 m³/s, mientras que el mayor calculado es de 35.1 m³/s.

Teniendo la serie de datos a utilizar para calcular los caudales para diferentes periodos de retorno, se utilizó la Distribución de Gumbel para el cálculo de los caudales.

Con base en lo anterior se presenta a continuación los diferentes caudales para los periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años.

Tabla 10-2 Caudal para un periodo de retorno de 5 Años

DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL	
PERIODO DE RETORNO (T) años	5
PROBABILIDAD DE SER SUPERADO	0.2
PROBABILIDAD DE SER INFERIOR	0.8
α	8.04
β	1.79
CAUDAL PARA 5 AÑOS (m³/s)	13.86

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10-3 Caudal para un periodo de retorno de 25 años

DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL	
PERIODO DE RETORNO (T) años	25
PROBABILIDAD DE SER SUPERADO	0.04
PROBABILIDAD DE SER INFERIOR	0.96
α	8.04
β	1.79
CAUDAL PARA 25 AÑOS (m³/s)	27.52

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10-4 Caudal para un periodo de retorno de 50 años

DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL	
PERIODO DE RETORNO (T) años	50
PROBABILIDAD DE SER SUPERADO	0.02
PROBABILIDAD DE SER INFERIOR	0.98
α	8.04
β	1.79
CAUDAL PARA 50 AÑOS (m³/s)	33.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10-5 Caudal para un periodo de retorno de 100 años

DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL	
PERIODO DE RETORNO (T) años	100
PROBABILIDAD DE SER SUPERADO	0.01
PROBABILIDAD DE SER INFERIOR	0.99
α	8.04
β	1.79
CAUDAL PARA 100 AÑOS (m³/s)	38.8

Fuente: Elaboración propia.

10.2 GEOMETRÍA DEL RIO CHICÚ

10.2.1 Secciones de análisis

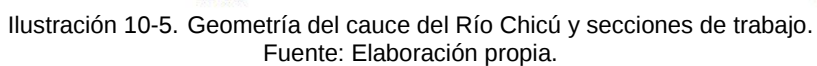
A partir del modelo de elevación digital (Ilustración 10-4) se extrajeron las secciones de análisis y geometría del río Chicú, por medio de la extensión HEC-GeoRAS del software ArcGis 10.2 esta herramienta permite procesar datos

georreferenciados y así preparar los datos geométricos del cauce para luego ser exportados a HEC – RAS.

Para la digitalización de las secciones transversales de análisis se toman 4 criterios para trazarlos:

1. Dadas las características morfológicas (Aumento o estrechamiento de la sección natural del cauce, Cambios de dirección)
2. Existencia de estructuras hidráulicas (antes y después de ellas).
3. Confluencias o bifurcaciones de los drenajes.
4. Área de estudio (Hasta donde quiere que el programa modele las manchas de inundación).

Finalmente, se trazó la geometría del río Chicú como se muestra en la Ilustración 10-5, en esta se puede observar las orillas (color rojo), y las secciones de trabajo (color verde) éstas inician desde la parte más baja en la abscisa 0 m hasta el punto más alto en la abscisa 20407.88 m estas se encuentran separadas de acuerdo a los 4 criterios anteriormente mencionados, se crearon 979 secciones de análisis ya que el río tiene la característica morfológica de tener varios cambios de dirección y anchos de sección, el ancho de las secciones de análisis fue definido de acuerdo a la superficie que se encontraba aledaña al cauce entre más plana y prolongada que fuera, la sección debía extenderse hasta donde probablemente podría llegar la mancha de inundación en caso de que el cauce superara su carga hidráulica.



10.2.2 Estructuras hidráulicas

El modelo permite la simulación de estructuras que existan sobre el cauce, para de esta manera identificar las propiedades hidráulicas que generan sobre el flujo, y si tienen la capacidad hidráulica en caso de un evento máximo de crecientes.

En el presente trabajo se modelaron 2 Box Culvert localizados en la parte alta de la cuenca y 2 puente localizado en la parte baja uno con una tubería de 36" en concreto por donde fluye las aguas del río, identificados en la salida de campo:

- A) **Box Culvert 1:** Este se encuentra ubicado en el municipio de Tabio en la parte alta de la cuenca, el box culvert cuenta con unas dimensiones de 1.2 m de ancho con una altura de 0.95 m y una largo de 8 m, la vía es conocida como la variante Tenjo -Tabio. Este Box culvert se implanta sobre el modelo entre las secciones 14021.44 y la sección 14013.34 como se muestra en la Ilustración 10-6

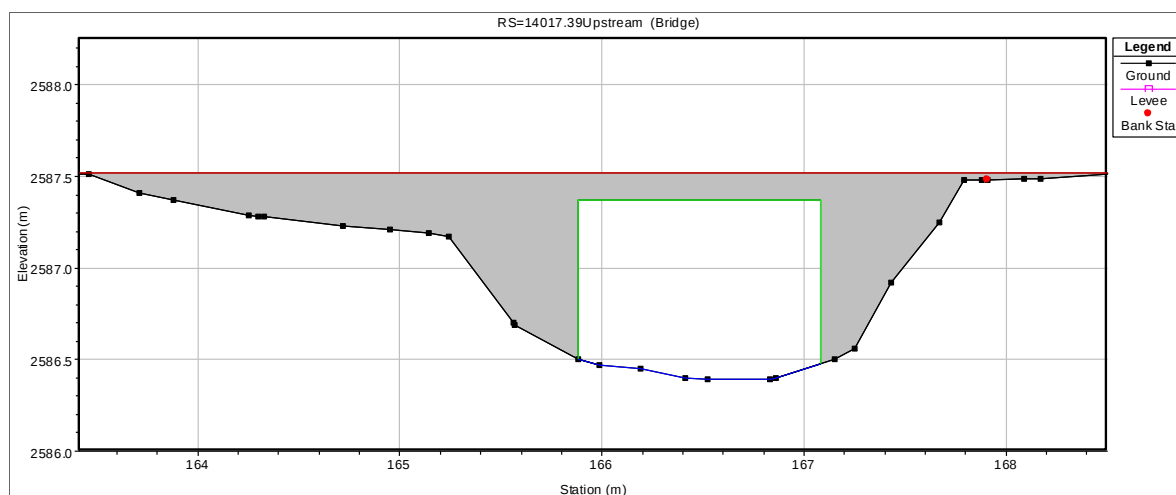


Ilustración 10-6. Geometría Box Culvert 1 implantado sobre el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

- B) **Box Culvert 2:** Este se encuentra ubicado sobre la vía que lleva a Martin y Espino en el municipio de Tabio, cuenta con unas dimensiones de 2.7 m de ancho con una altura de 1.95 m y una longitud de 7.70 m. En la Ilustración 10-7 se puede observar el Box Culvert real y el implementado sobre el modelo entre las secciones 13453.39 y la sección 13445.61.

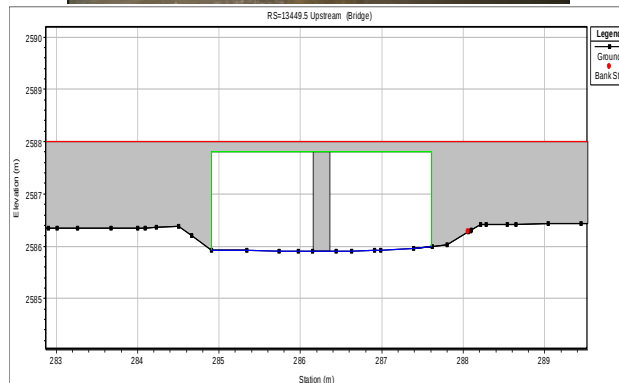


Ilustración 10-7. Geometría Box Culvert 2 implementado sobre el modelo.
Fuente: Elaboración propia.

- C) **Puente 1:** El puente 1 visitado se encuentra ubicado sobre la parte media de la cuenca km + 7.9 desde la última sección de análisis del modelo, implementado sobre el modelo entre las secciones 7978.359 y la 7971.159 este tiene un ancho de 1.50 con una altura de 1.00 m y una longitud de 7.20m.

En la Ilustración 10-8 se puede identificar la geometría del puente dibujada sobre la sección de análisis

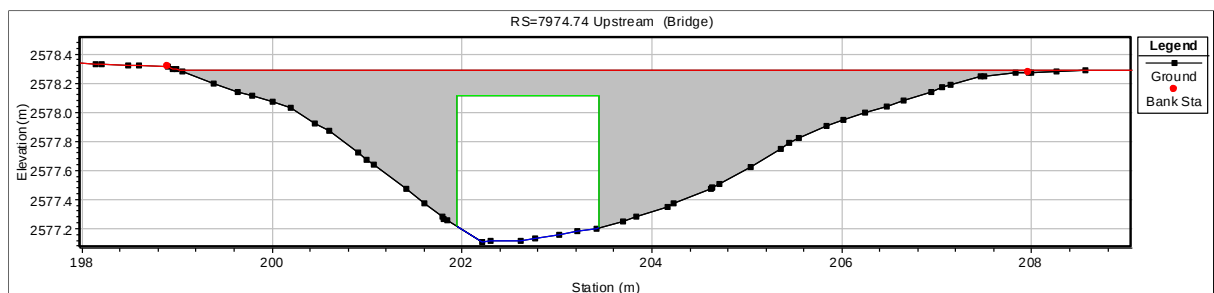


Ilustración 10-8. Geometría Puente 1 implementado sobre el modelo.
Fuente: Elaboración propia.

- D) **Puente 2:** El puente 2 se encuentra ubicado sobre la parte baja de la cuenca, la vía que atraviesa el río comunica a Tenjo con Bogotá, el río es encausado por una alcantarilla circular esta cuenta con un diámetro de 36" pulgadas con una longitud de 8 m como se puede observar en la Ilustración 10-9. La estructura es dibujada entre las secciones 2638.19 y la sección 2628.203

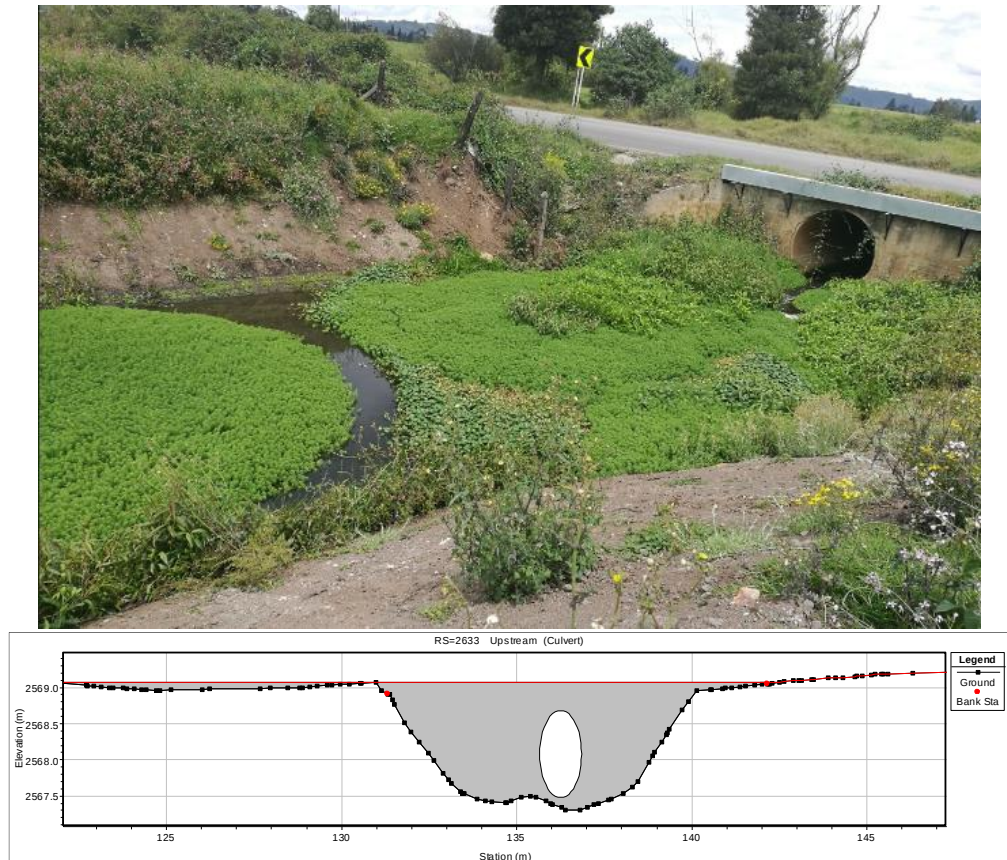


Ilustración 10-9. Puente 2 implementado sobre el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

El producto final del ingreso de la geometría y las estructuras hidráulicas en campo se puede visualizar el modelo hidráulico en HEC -RAS con que se va a correr el programa (Ver Ilustración 10-10)

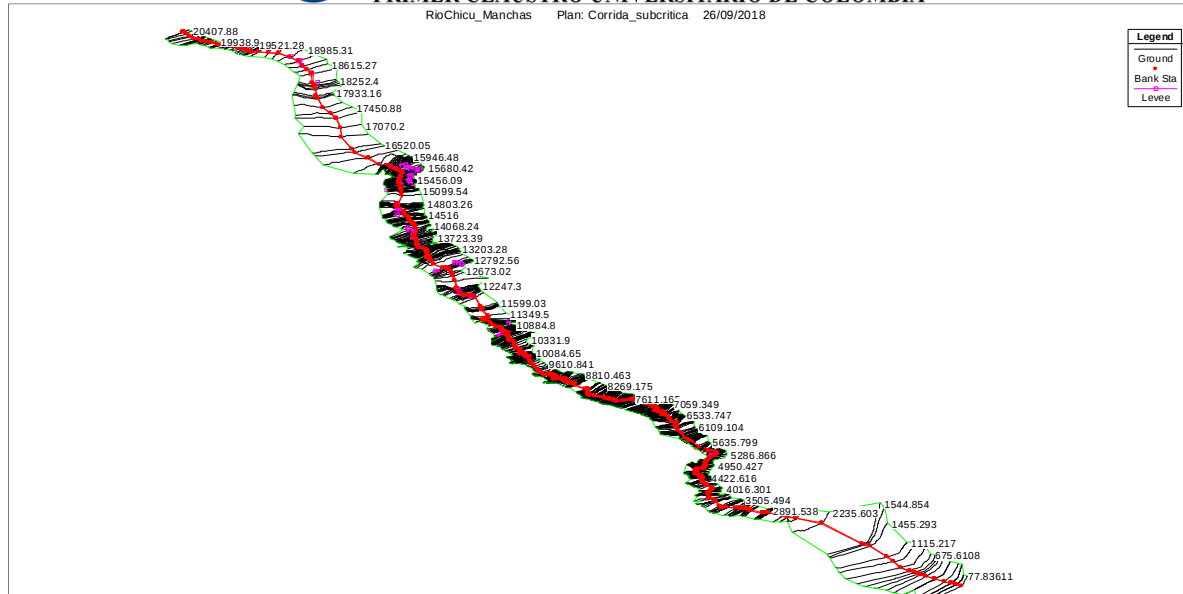


Ilustración 10-10. Modelo Hidráulico HEC – RAS del Río Chicú.

Fuente: Elaboración propia.

10.3 ASIGNACIÓN COEFICIENTE DE MANNING

El coeficiente de rugosidad de manning se determina en función de las características y/o de los materiales que conforman las paredes y el fondo del canal o cauce. De acuerdo a observaciones en campo y con ayuda de tablas se trabajó con los siguientes coeficientes de rugosidad de manning (Tabla 10-6).

Tabla 10-6. Coeficiente de Manning fondo del río Chicú.

ZONA		RUGOCIDAD DE MANNING MINIMA ZONA DE TRANCISION
Tramo 1	Limpios con meandros	0.03
Tramo 2	Rectos con rocas y pastos	0.035
Tramo 3	Tramos muy llenos de malezas	0.09

Fuente: Elaboración propia.

En las demás áreas aledañas a los cauces; se adoptaron valores teóricos de rugosidad de Manning, acorde con las características de la zona, respecto de sus coberturas, utilizando el ortofoto se generó la caracterización del tipo de cobertura para así definir su valor teórico de rugosidad, en la Tabla 10-7 se relaciona el tipo de cobertura observado y su coeficiente.



Tabla 10-7. Coeficiente de Manning de áreas aledañas al río Chicú.

TIPO DE COBERTURA	COEFICIENTE DE MANNING
Bosque Fragmentado	0.05
Bosque Denso	0.08
Tierra Desnuda y Degradadas	0.025
Tejido Urbano Discontinuo	0.02
Tejido Urbano Continuo	0.025
Pastos Limpios	0.030

Fuente: Elaboración propia.

10.4 SIMULACIÓN DE FLUJO PERMANENTE EN HEC-RAS

Para la simulación del flujo se ingresó los 4 tipos de crecientes, con caudales picos de periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años para la obtención de un mapa, donde se ilustre las áreas de posible inundación para sus diferentes periodos de retorno, lo cual se relaciona con una situación de máxima precipitación, tal como se indica a continuación:

En la Tabla 10-8 se relaciona los cuatro caudales a modelar dentro del programa HEC-RAS para el análisis de las crecientes máximas.

Tabla 10-8 Caudales ingresados al programa HEC RAS.

Crecientes	Sección	AÑOS			
		5	25	50	100
		Caudales (m ³ /s)			
Río Chicú	20407.88	13.86	27.52	33.18	38.8

Fuente: Elaboración propia.

10.4.1 Condiciones de contorno

El modelo del río Chicú se le asigna la condición de borde solo a la casilla de aguas abajo ya que la cuenca del río Chicú tiene la característica de tener velocidades bajas, debido a su baja pendiente lo cual el tipo de flujo que se desarrolla sobre cauce es de tipo subcrítico.

Por falta de información de campo y el ingreso de una cota de lámina inicial se definirá este parámetro con la opción Critical Depth esta ingresa la altura critica como borde esta opción no requiere de otros valores numéricos que se deba ingresar.

Finalmente, luego de realizado todos los pasos anteriores se corre el modelo por medio de la herramienta Steady Flow Analysis en donde se le asigna cada uno de los insumos como lo son la Geometría, caudales, y régimen a modelar definidos anteriormente.

10.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La modelación matemática de un cauce es utilizada para intentar conocer el comportamiento de un río ante un escenario, está será una aproximación a la realidad el cual tendrá un porcentaje de error, de acuerdo a esto se realiza la calibración del modelo para minimizar este porcentaje de error y así conseguir variables hidráulicas que describen el comportamiento del flujo que ayudan a tomar decisiones frente al impacto que puede ocasionar ante diferentes escenarios.

La calibración del modelo se realizó comparando la altura de la lámina de agua medidas en campo con las del modelo hidráulico, utilizando dos secciones de control una ubicada en la parte alta de la cuenca (Sección 19696.22) y otra en la parte baja (Sección 2628.20), los aforos se realizaron en 3 épocas lluvia, sequía y una en la transición de las dos, con el objetivo de sacar un caudal y una altura promedio de aforo.

En las Tabla 10-9 y Tabla 10-10 se presentan la comparación de las alturas tomadas en campo y la lámina de agua obtenida en el modelo, variando el coeficiente de rugosidad hasta encontrar la representación del comportamiento del río.

Tabla 10-9. Niveles de lámina de agua y de aforo sección de control parte alta de la cuenca (Sección 19696.22).

Seccion 19696,22						
Caudal Prom. Q (m ³ /s)	Coeficiente de rugosidad				Aforo Prom. (m)	Diferencia de Nivel
	n = 0,025	n = 0,03	n = 0,045	n = 0,055		
	H (m)	H (m)	H (m)	H (m)		
0.09	0.23	0.25	0.30	0.34	0.27	0.02
Error (%)	14%	6%	13%	28%		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10-10. Niveles de lámina de agua y de aforos sección de control parte baja de la cuenca (sección 2628.22).

Seccion 2628,20						
Caudal Prom. Q (m ³ /s)	Coeficiente de rugosidad				Aforo Prom. (m)	Diferencia de Nivel
	n = 0,080	n = 0,085	n = 0,09	n = 0,12		
	H (m)	H (m)	H (m)	H (m)		
0.62	0.57	0.59	0.61	0.72	0.61	0.003
Error (%)	14%	6%	1%	42%		

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a esto los coeficientes de rugosidad que representa mejor las características del río Chicú son $n = 0.03$ para la parte alta de la cuenca y $n = 0.09$

para la parte baja de la cuenca.

En la Ilustración 10-11 se presenta los resultados de la parte alta de la cuenca (Sección 19696.22) en HEC-RAS luego de a ver realizado la calibración con un caudal $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$

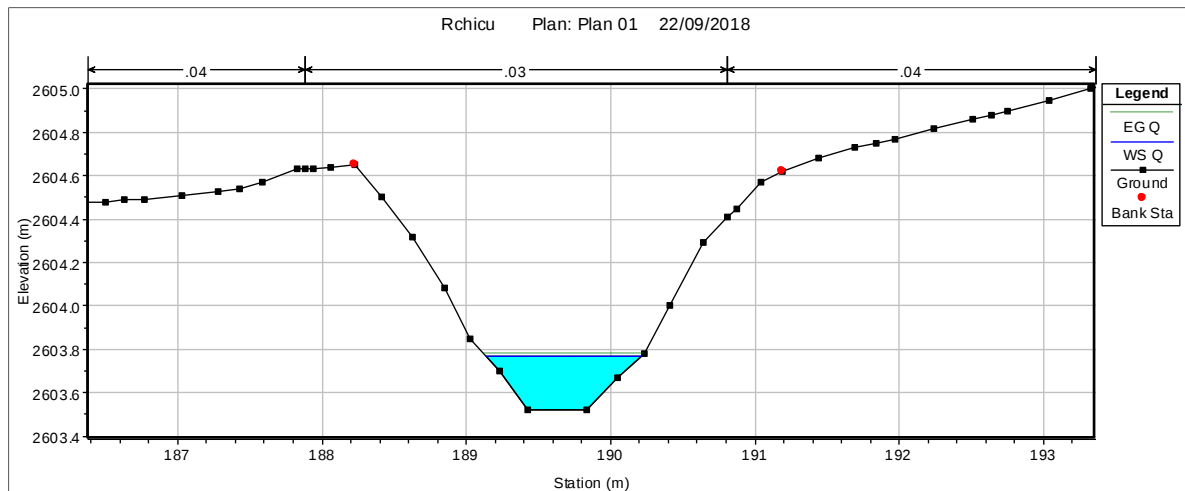


Ilustración 10-11. Resultado calibración sección de aforo 19696.22.
Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 10-12 se presenta los resultados de la parte baja de la cuenca (Sección 2628.22) en HEC-RAS luego de a ver realizado la calibración con un caudal $0.62 \text{ m}^3/\text{s}$

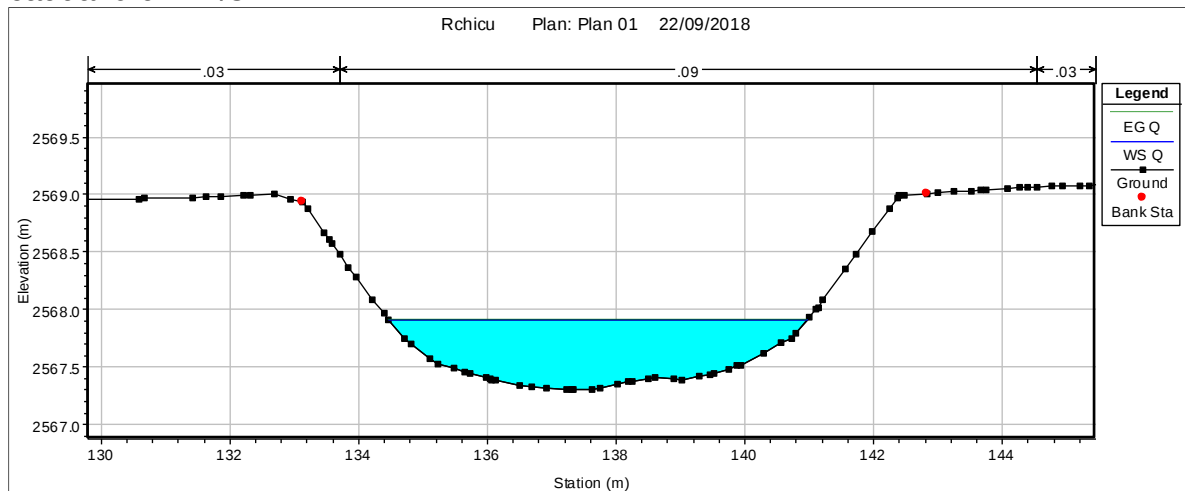


Ilustración 10-12. Resultado calibración sección de aforo 19696.22.
Fuente: Elaboración propia.

10.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

El modelo hidráulico Hec-Ras, permitió transitar los caudales picos de las crecientes del río Chicú para los periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años, con los valores ilustrados en la Tabla 10-8, permitiendo calcular las manchas de inundación que atraviesa por los municipios de Tabio, Tenjo y Cota, para las diferentes crecientes.

De acuerdo a las Tabla 10-11 a la Tabla 10-14, las áreas más afectadas por una inundación son las agrícolas representando perdidas económicas a este sector, el cual es una de las actividades económicas que predomina sobre esta región siendo una fuente de ingreso para la población, pues el área que ocupan la mancha de inundación para esta actividad va desde 99.23 hectáreas para un periodo de retorno de 5 años hasta 138.74 hectáreas para un periodo de retorno de 100 años. Cabe resaltar que el río Chicú no atraviesa por centros poblados representativos ya representa las menores áreas que se encuentran en vulnerabilidad alta por inundación.

TIPO DE COBERTURA	Área (ha)
AREAS AGRICOLAS	99.23
AREAS CON VEGETACION	46.46
BOSQUE MANGLE	12.91
CUERPOS DE AGUA	1.96
PASTOS	37.27
TEJIDO URBANO	0.15

Tabla 10-11 Áreas con vulnerabilidad alta por manchas de inundación de 5 años.

Fuente: Elaboración propia.

TIPO DE COBERTURA	Área (ha)
AREAS AGRICOLAS	121.67
AREAS CON VEGETACION	56.62
BOSQUE MANGLE	17.05
CUERPOS DE AGUA	2.11
PASTOS	59.73
TEJIDO URBANO	0.60

Tabla 10-12 Áreas con vulnerabilidad alta por manchas de inundación de 25 años.

Fuente: Elaboración propia.

TIPO DE COBERTURA	Área (ha)
AREAS AGRICOLAS	128.79
AREAS CON VEGETACION	57.00
BOSQUE MANGLE	17.98
CUERPOS DE AGUA	2.15
PASTOS	67.96
TEJIDO URBANO	0.85

Tabla 10-13 Áreas con vulnerabilidad alta por manchas de inundación de 50 años.

Fuente: Elaboración propia.

TIPO DE COBERTURA	Área (ha)
AREAS AGRICOLAS	138.74
AREAS CON VEGETACION	57.13
BOSQUE MANGLE	18.76
BOSQUE	0.46
CUERPOS DE AGUA	2.23
PASTOS	76.38
TEJIDO URBANO	0.89

Tabla 10-14 Áreas con vulnerabilidad alta por manchas de inundación de 100 años.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados de forma gráfica de la modelación de 3 secciones de control sacadas en campo estas ubicadas en la parte alta, media y baja de la cuenca para los caudales picos de periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años.

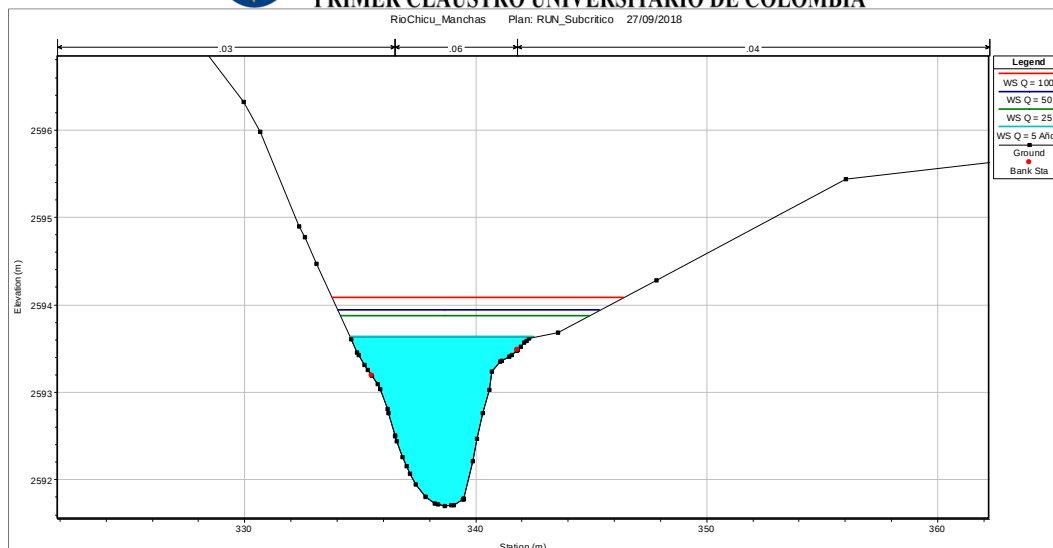


Ilustración 10-13. Resultado grafico de la simulación hidráulica de sección 15946.48 parte alta de la cuenca del Río Chicú.

Fuente: Elaboración propia.

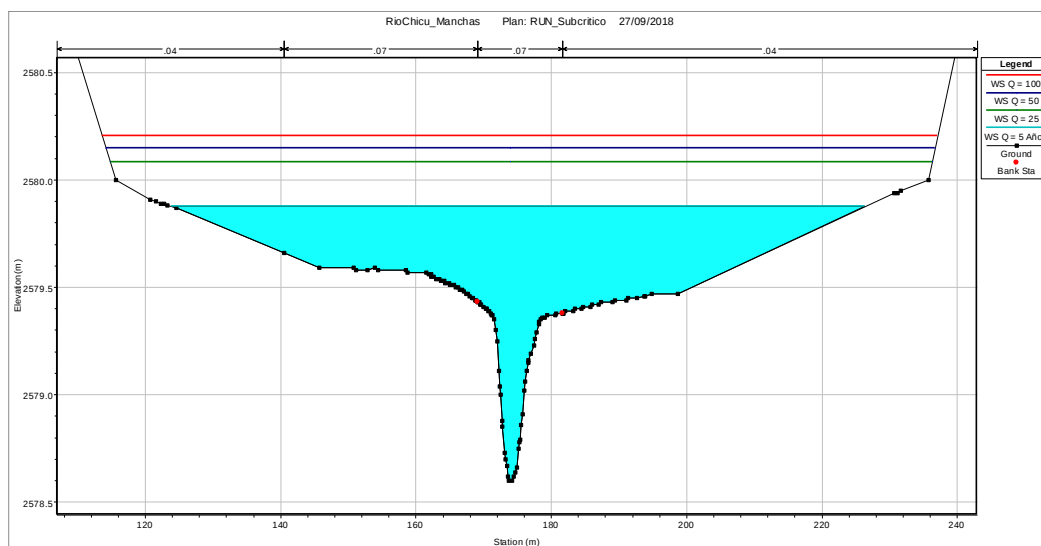


Ilustración 10-14. Resultado grafico de la simulación hidráulica de sección 8886.558 parte media de la cuenca del Río Chicú.

Fuente: Elaboración propia.

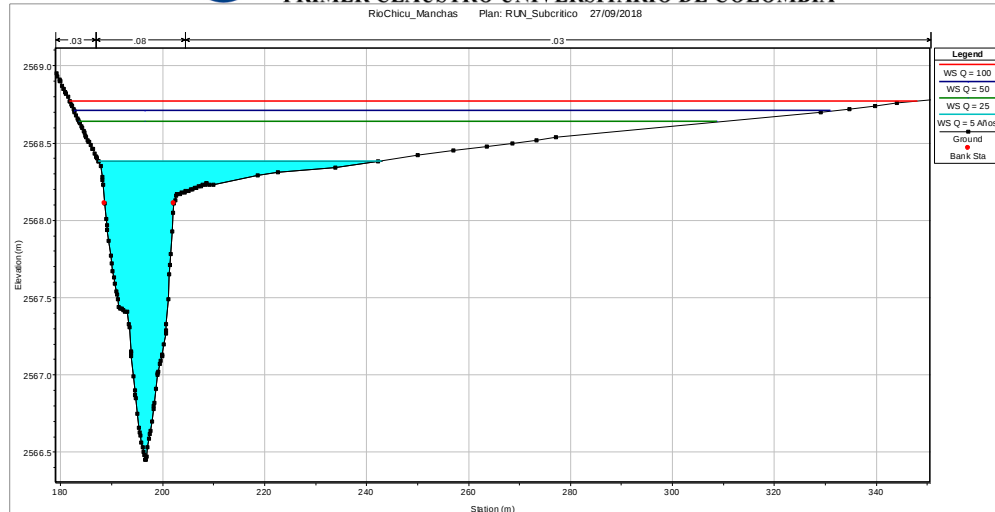
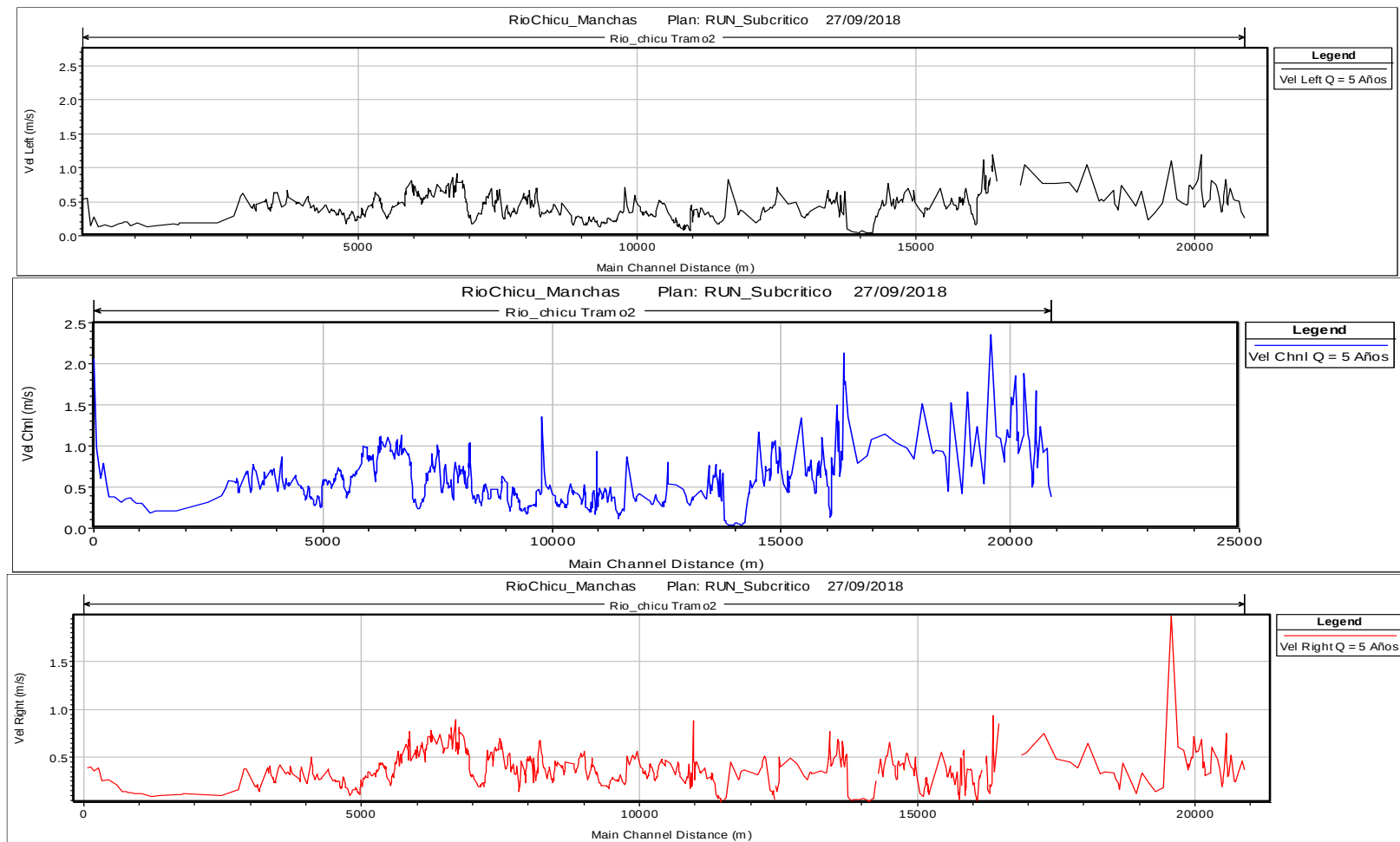


Ilustración 10-15. Resultado grafico de la simulación hidráulica de sección 138.90 parte baja de la cuenca del Río Chicú.

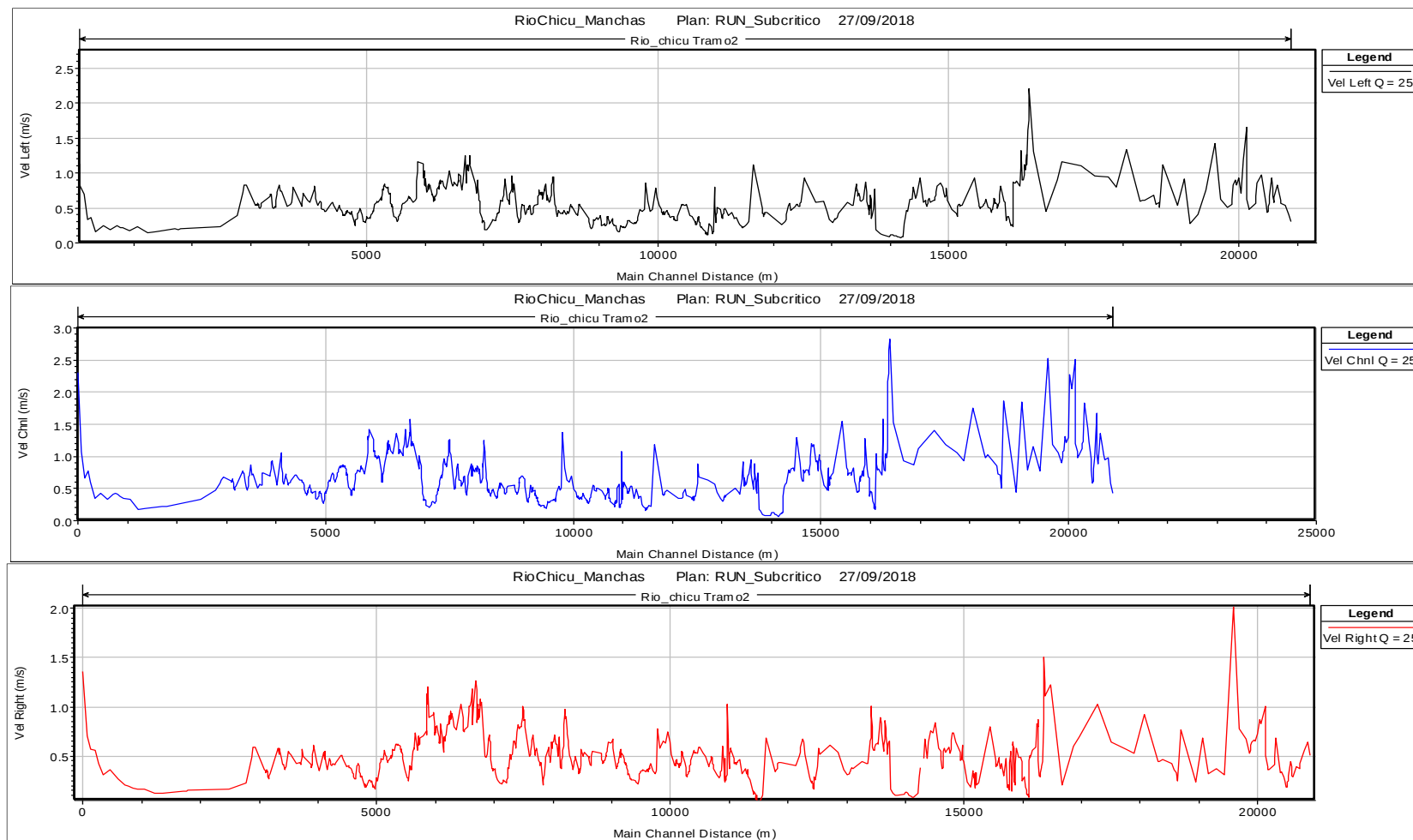
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para cada mancha de inundación obtenidos con el programa HEC-RAS que se puede presentar para los diferentes periodos de retorno se pueden consultar en el **Anexo 2**. en este se encuentra la tabla con todos los valores numéricos usados en el programa estos se encuentran organizados por los perfiles analizados, algunos de los datos que se encuentran en ella son: Cota de fondo del cauce, cota de la lámina de agua (W.S.), cota de elevación de la energía del flujo (E.G.), Pendiente del tramo(E.G. Slope), velocidad del flujo (Vel Chnl), área húmeda de la sección (Flow área), el perímetro de la sección y por último El Numero de Froude.

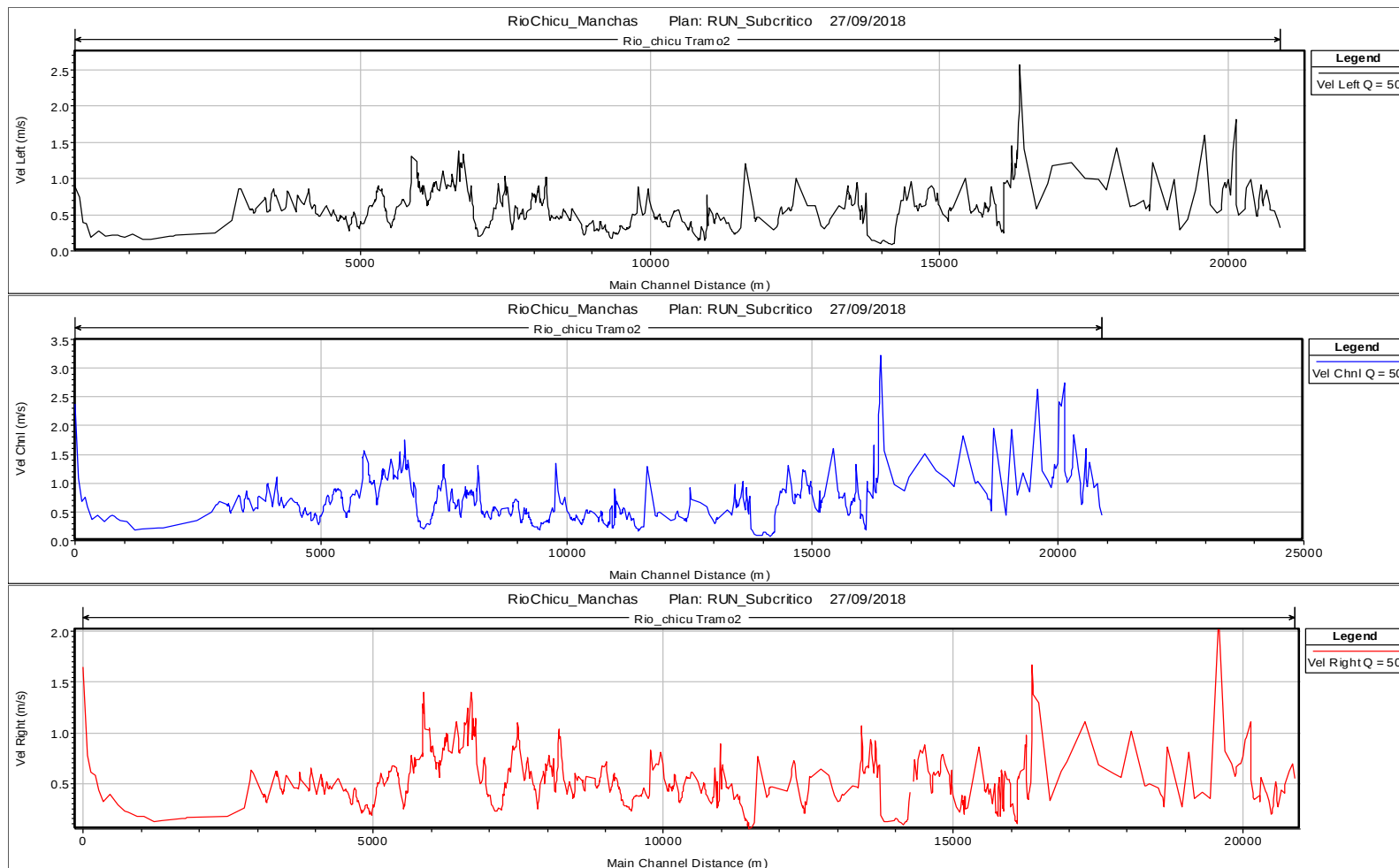
De acuerdo con las tablas anteriormente mencionadas, el río Chicú presentan velocidades bajas en periodos de lluvias, que no superan velocidades de 2.39 m/s, esto conlleva a que dentro del cauce no se presenten procesos erosivos, las velocidades máximas se presentan por los tramos del cauce que se encuentra contraídos por obras hidráulicas como los son los box culvert y puentes sobre los kilómetros km 14+017 (Box Culvert 1), km 13+449 (Box culvert 2), km 7+974 (Puente 1) y km 2+623 (Puente 2), a continuación se presentan las gráficas de las velocidades vs abscisas para las crecientes de 5, 25, 50 y 100 años proyectadas.



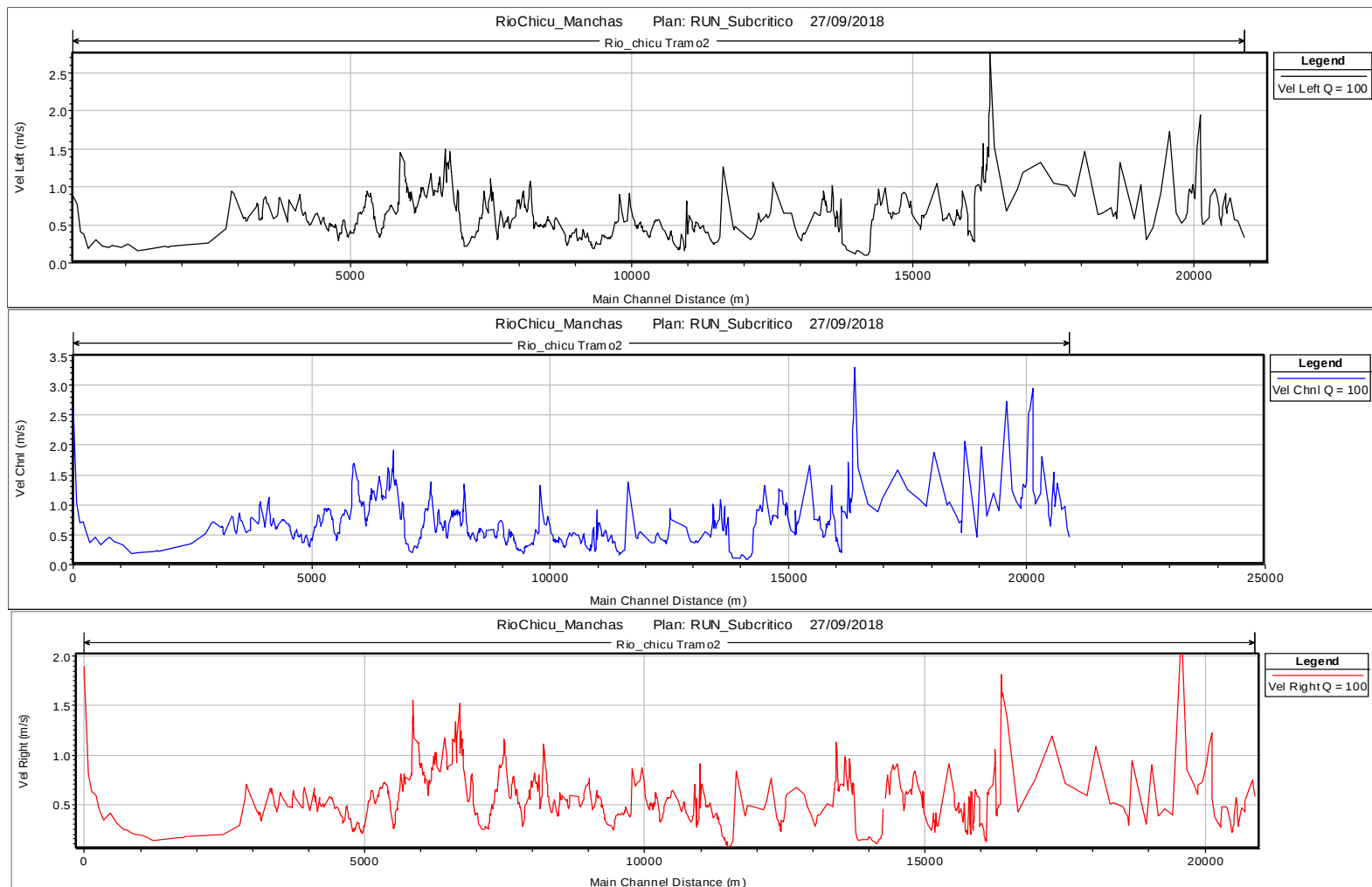
Grafica 10-1. Velocidades del río Chicú sobre el canal, margen izq y dere del canal para un periodo de retorno de 5 años.
Fuente: Elaboración propia.



Grafica 10-2. Velocidades del río Chicú sobre el canal, margen izq y dere del canal para un periodo de retorno de 25 años.
 Fuente: Elaboración propia.



Grafica 10-3. Velocidades del río Chicú sobre el canal, margen izq y dere del canal para un periodo de retorno de 50 años.
Fuente: Elaboración propia.



Grafica 10-4. Velocidades del río Chicú sobre el canal, margen izq y dere del canal para un periodo de retorno de 100 años.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los diferentes perfiles longitudinales y mapas de inundación que genera el programa HEC – RAS de los resultados obtenidos con la modelación para los periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años.

Como se observa en la Ilustración 10-16 en la en la abscisa K13+449, se denota un cambio de la velocidad al pasar el puente, ya que la estructura hidráulica (Ilustración 10-7), genera una menor área hidráulica por su encajonamiento del cauce, y está generando a su vez una mayor velocidad del caudal que puede llegar hasta 2.8 m/s; en la Ilustración 10-16 en la misma abscisa nos determina que hay un aumento de la lámina de agua que pasa de 1 m a 2.4 m, esto generando una insuficiencia en la capacidad hidráulica del puente generando inundaciones sobre las dos márgenes del río.

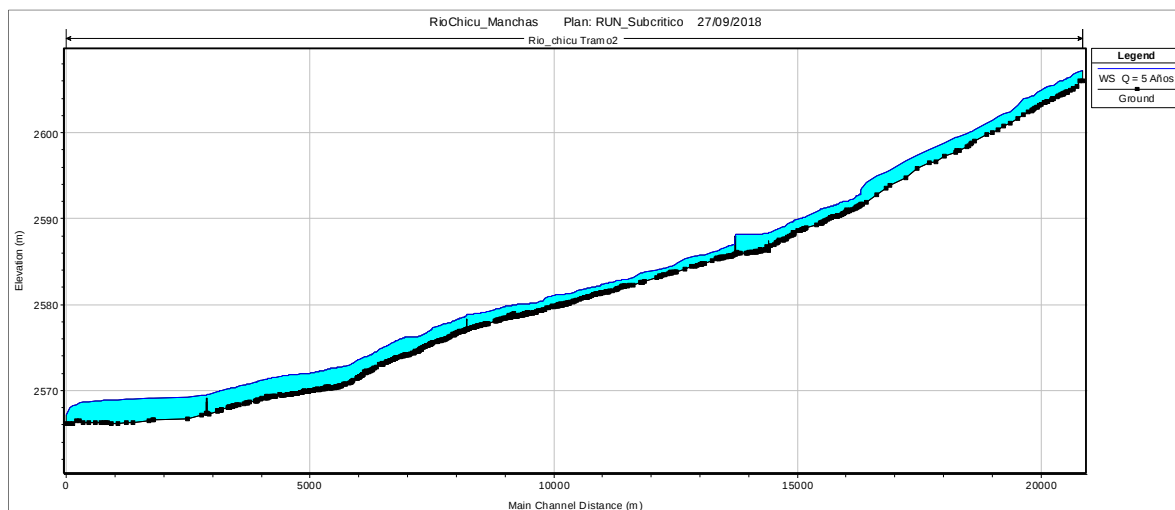


Ilustración 10-16. Perfil longitudinal de la lámina de agua de la creciente con período de retorno de 5 años en el río Chicú.

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 10-17 se visualiza la mancha de inundación de un periodo de retorno de 5 años esta mancha abarca un área de 198.28 hectáreas, se identifica 3 zonas críticas ubicadas en la parte alta, media y baja de la cuenca, una de las razones por las que se presentan estas grandes manchas es por los valles que se encuentran sobre esta zonas ya que son puntos en los que confluyen diferentes tributarios, generando que el terreno sobre estas zonas tengas una misma altura.

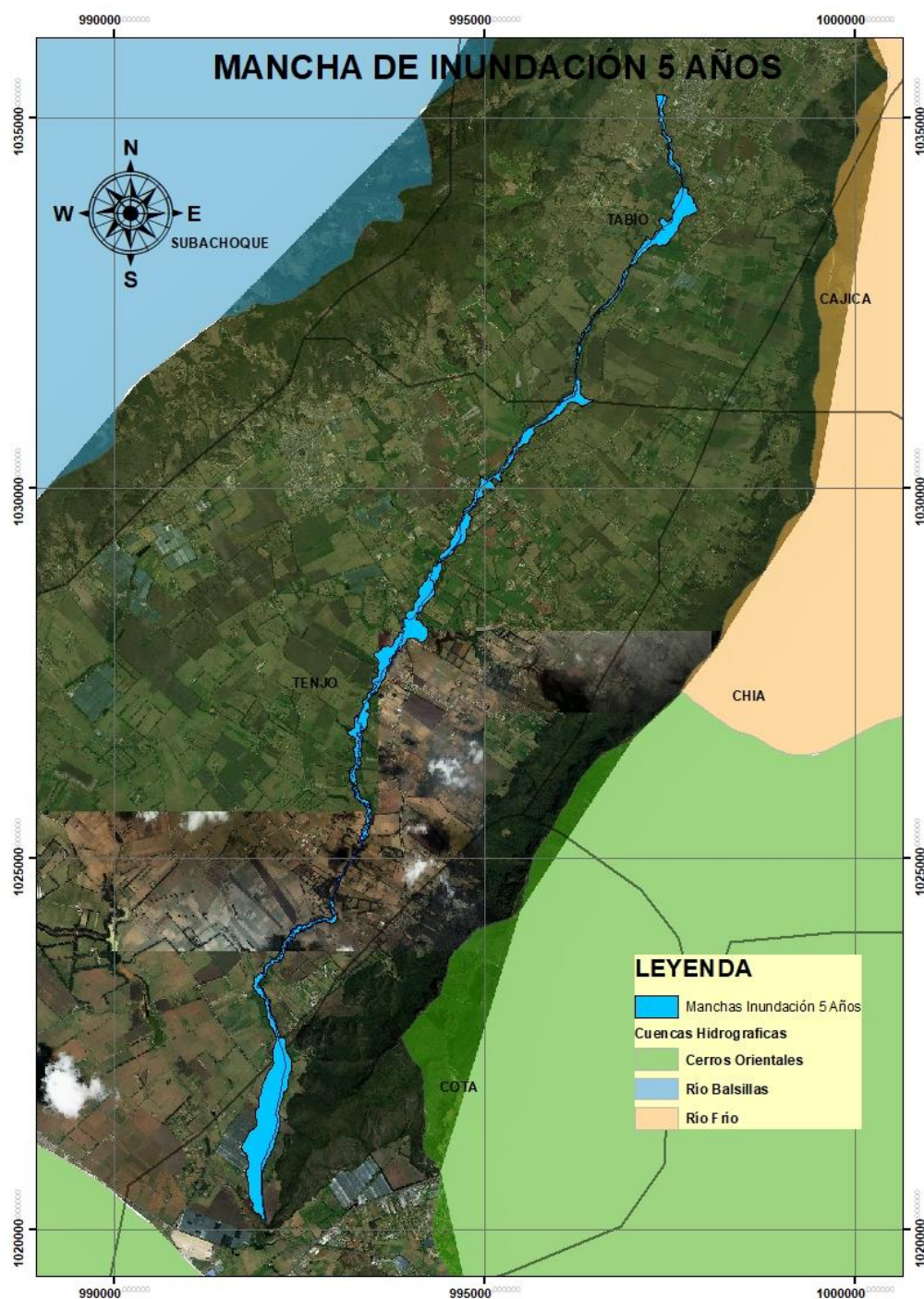


Ilustración 10-17. Mancha de inundación para un periodo de retorno de 5 años del Río Chicú.
 Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al perfil longitudinal de las manchas de inundación para una creciente de 25 años ver Ilustración 10-18 se identifica varios resaltos hidráulicos ocasionado por las estructuras hidráulicas, pues estas retienen sus aguas hasta

llegar a un desbordamiento del río sobre pasando la cota máxima de la estructura, estos casos se presentan para el box culvert 1, puente 1 y puente 2 anteriormente identificados, otro caso en particular se encuentra sobre el km 15+922 aguas arriba de este tramo el río se encuentra encañonado a ambas orillas aumentando sus velocidades, en cambio aguas abajo llega el río a una planicie disminuyendo radicalmente sus velocidades, produciéndose un resalto hidráulico que puede producir una socavación al lecho del río.

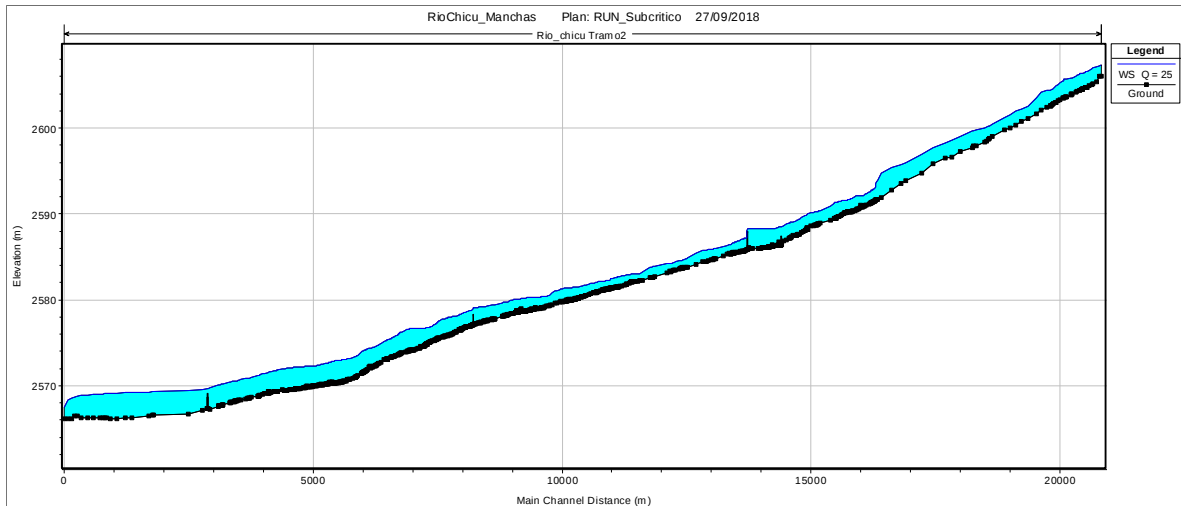


Ilustración 10-18. Perfil longitudinal de la lámina de agua de la creciente con período de retorno de 25 años en el río Chicú.

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 10-19 se presenta el mapa de las manchas de inundación para un periodo de retorno de 25 años este abarca un área de 258.30 hectáreas sobre los municipios de Tabio, Tenjo y Cota las zonas más afectadas se encuentran en las partes bajas de la cuenca, que abarcan una gran extensión.

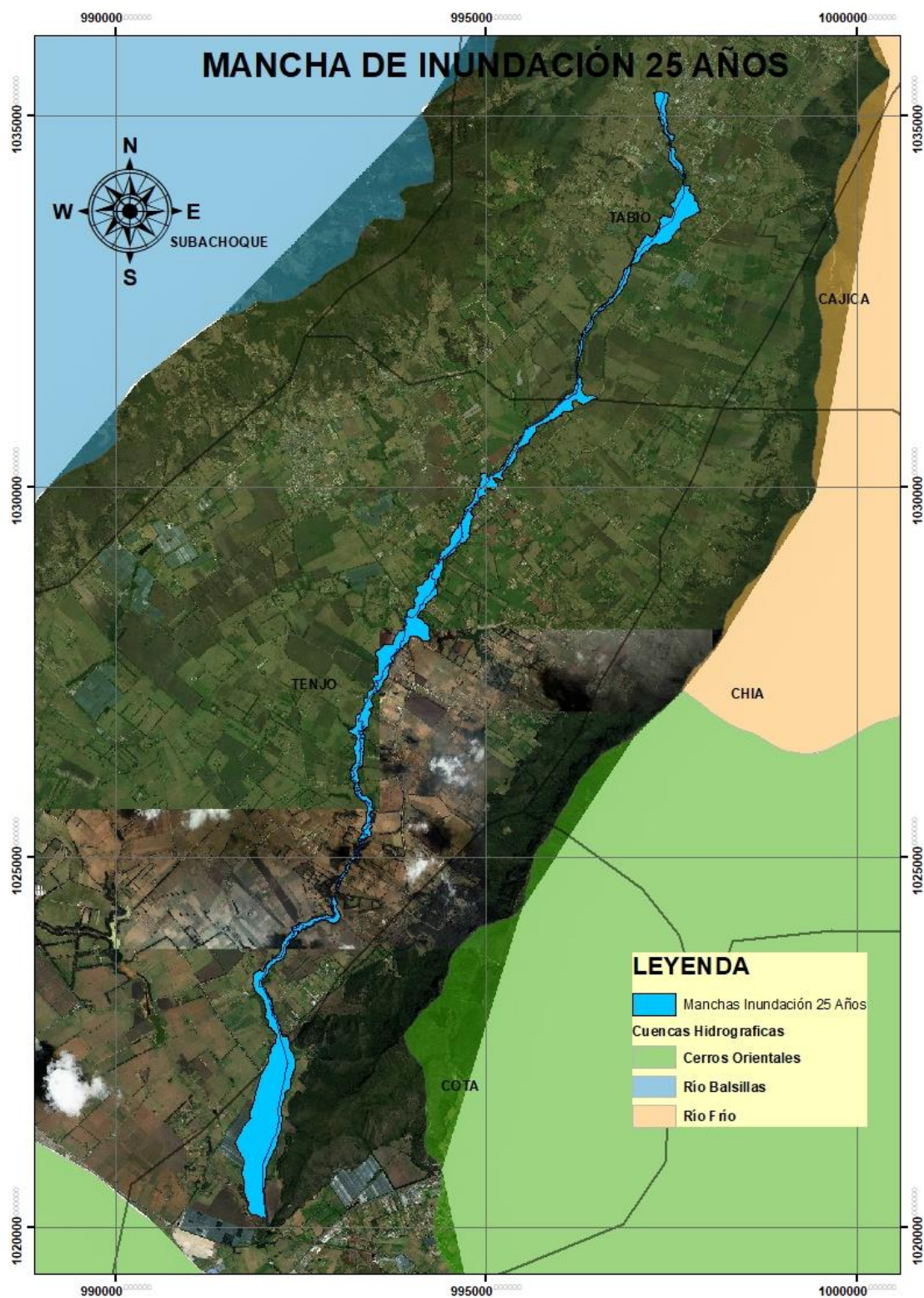


Ilustración 10-19. Mancha de inundación para un periodo de retorno de 25 años del Río Chicú.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la mancha de inundación para un periodo de retorno de 50 años como se muestra en la Ilustración 10-21, se identificó sobre el km 13+802 en donde se encuentra uno de los afluentes principales del río Chicú un valle en donde se produce un resalto hidráulico ocasionando que las aguas provenientes del río Chicú se empocen aumentando la lámina de agua hacia estas pequeñas quebradas, tomando alturas 1.3 m por encima de la lámina de agua base del río.

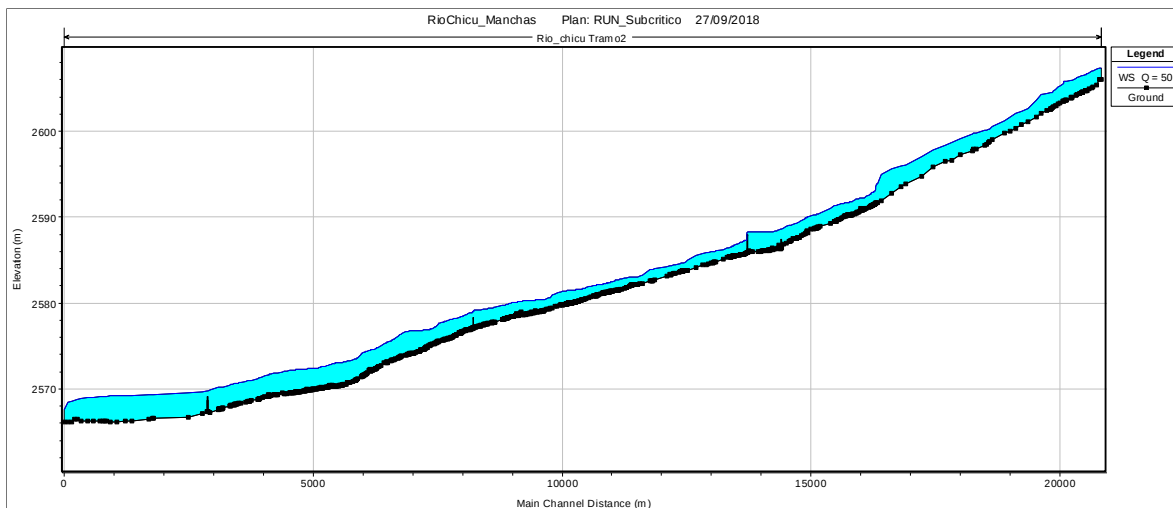


Ilustración 10-20. Perfil longitudinal de la lámina de agua de la creciente con período de retorno de 50 años en el río Chicú.

Fuente: Elaboración propia.

El área que abarca la mancha de inundación es de 275.24 hectáreas para crecientes con un periodo de retorno de 50 años estas se encuentran distribuidas principalmente sobre la parte media y baja de la cuenca. Los anchos promedios de las manchas de inundación son de 55 m hasta 461 m en la parte baja de la cuenca.

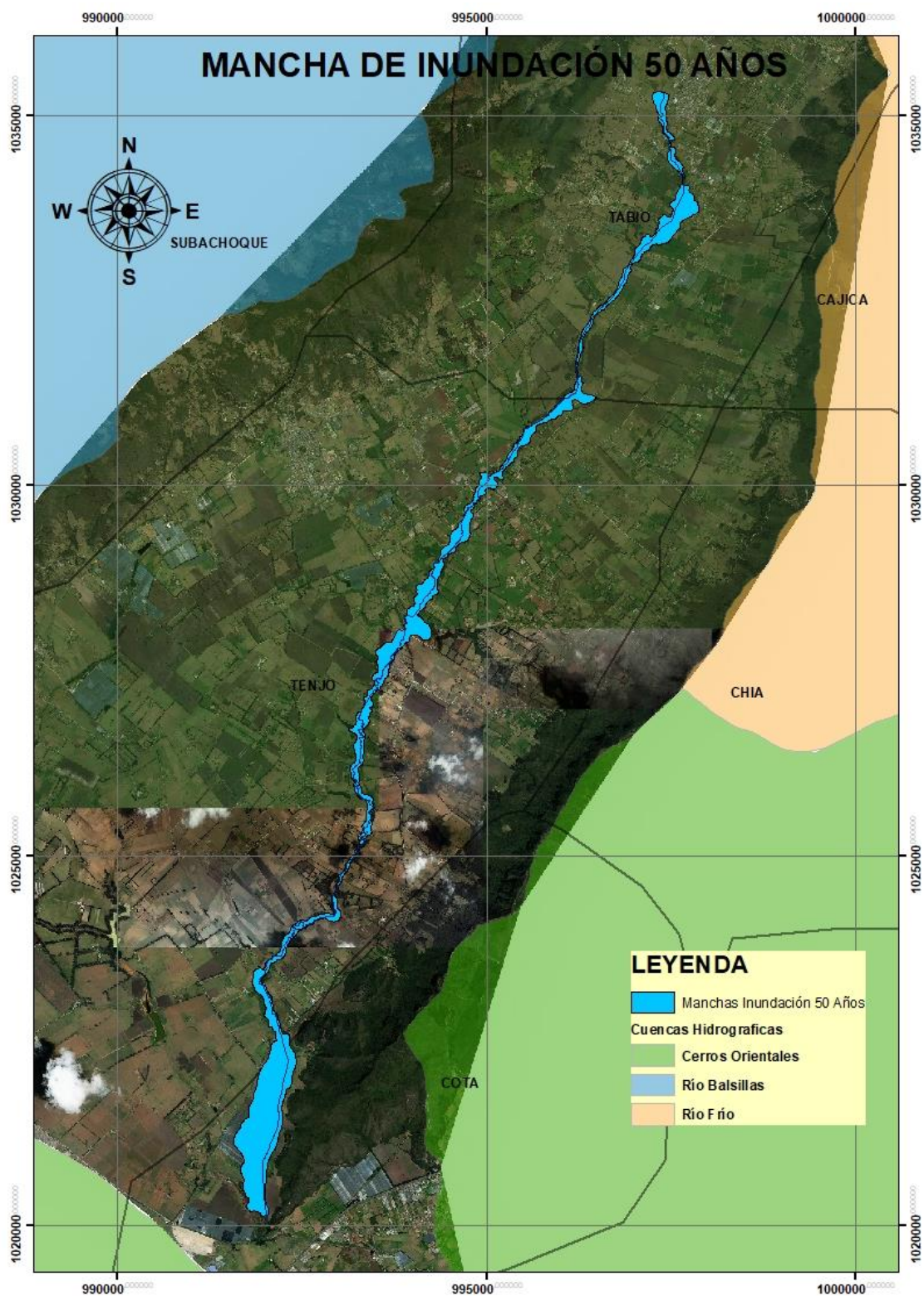


Ilustración 10-21. Mancha de inundación para un periodo de retorno de 50 años del Río Chicú.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, para un caudal de 100 años en este caso es de 38.8 m³/s la mancha de inundación cubre 295.27 hectáreas de terrenos principalmente utilizados para la siembra, aunque sobre los últimos tramos afecta en gran medida una zona empresarial ubicada sobre la parte baja de la cuenca, alcanzando una altura de lámina de 2.86 m desde el fondo del cauce teniendo en cuenta que el ancho del canal sobre este tramo abarca una longitud de 11 m.

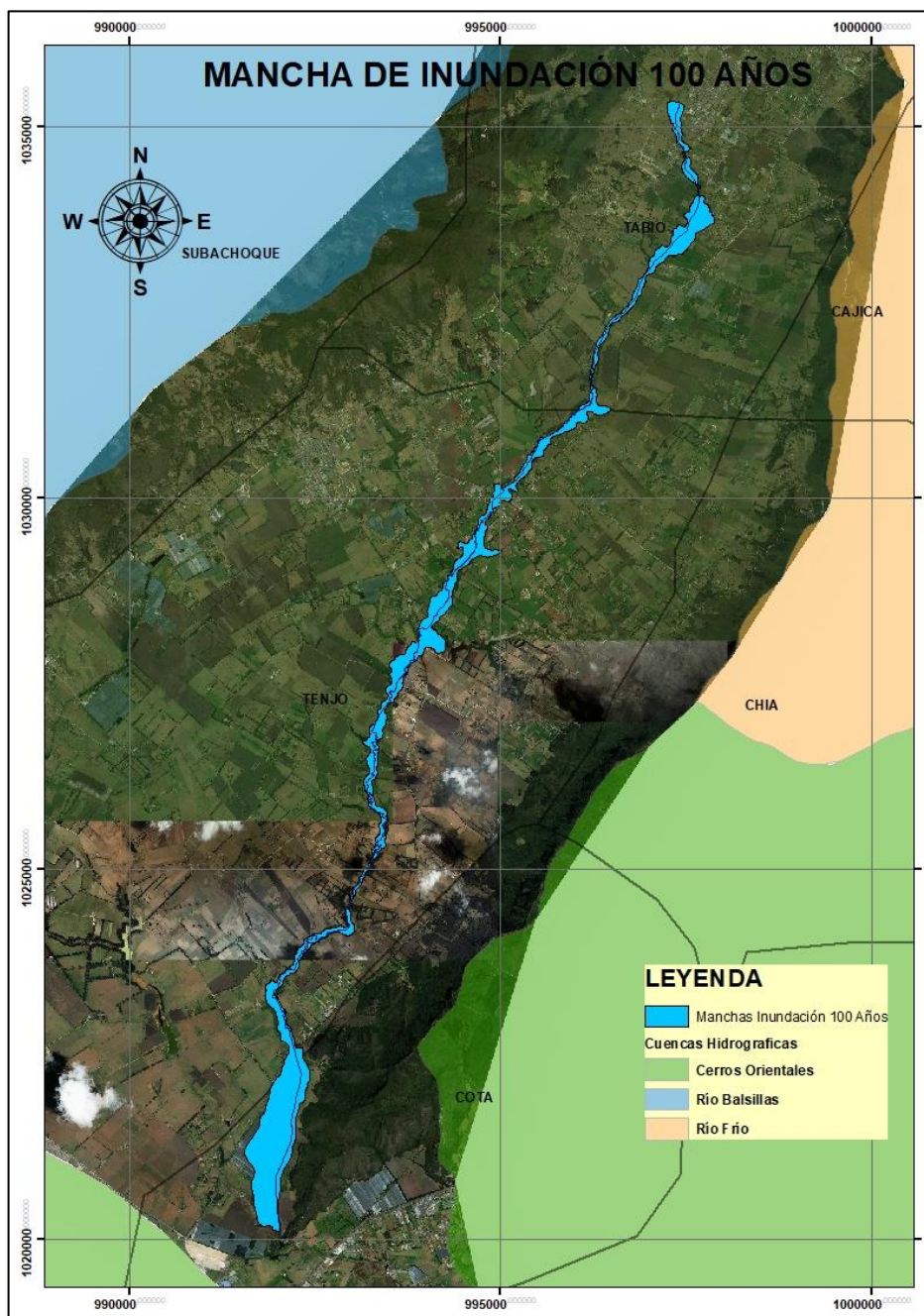


Ilustración 10-22. Mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años del Río Chicú.

10.6.1 Zonas críticas

Dentro de la cuenca se identificaron 3 zonas críticas ubicadas en la parte alta media y baja de la cuenca como se puede observar en la Ilustración 10-23.

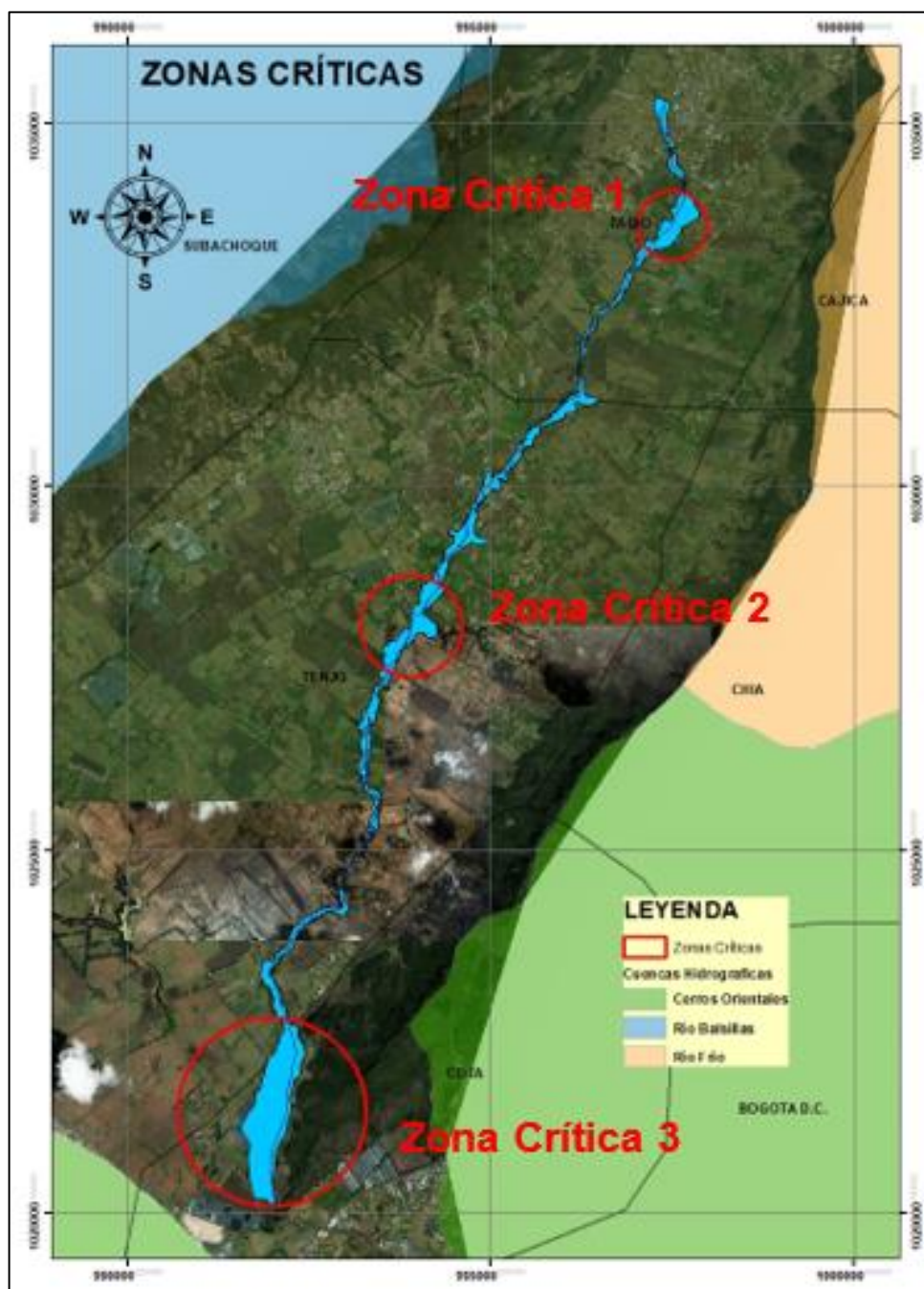


Ilustración 10-23. Localización Zonas Críticas del Río Chicú.

Fuente: Elaboración propia.

- **Zona crítica 1**

La zona crítica 1 se encuentra ubicada sobre el municipio de Tabio sobre un valle inundable, este compromete algunas de las casas aledañas al cauce, aunque no se presenta aledaño al casco urbano de Tabio, en la Tabla 10-15 se identifican las diferentes cotas de la lámina de agua para cada periodo de retorno, lo mismo que el ancho que abarca cada una.

Tabla 10-15. Características de mancha de inundación zona critica 1 para los diferentes periodos de retorno.

PUNTO CRITICO 1							
COTA DE CORONA	Caudal (m ³ /s)	PERIODOS DE RETORNO	COTA DE LÁMINA DE AGUA (M.S.N.M)	LÁMINA DE AGUA (m)	LÁMINA INUNDABLE	ANCHO DE MANCHA DESDE EJE RÍO (m)	
2601.5	13.86	5	2601.87	1.11	0.37	IZ	DER
						255	73.23
COTA DE VASO	27.52	25	2602.01	1.25	0.51	304	101.1
2600.76	33.18	50	2602.05	1.29	0.55	304.5	104.52
						304.82	110.6
	38.8	100	2602.08	1.32	0.58		

Fuente: Elaboración propia.

- **Zona crítica 2**

La zona critica 2 se encuentra ubicada en la parte media de la cuenca del río Chicú sobre el municipio de Tenjo, está mancha compromete una gran extensión de área agrícola pero sin afectar viviendas, en la Tabla 10-16 se identifica las alturas y cota de las láminas de agua para cada caudal, de acuerdo a su periodo de retorno está sacada a partir de los datos arrojados con el modelo matemática Hec-Ras.

Tabla 10-16. Características de mancha de inundación zona critica 2 para los diferentes periodos de retorno.

PUNTO CRITICO 2							
COTA DE CORONA	Caudal (m ³ /s)	PERIODOS DE RETORNO	COTA DE LÁMINA DE AGUA (M.S.N.M)	LÁMINA DE AGUA (m)	LÁMINA INUNDABLE	ANCHO DE MANCHA DESDE EJE RÍO (m)	
2582.85	13.86	5	2582.98	1.33	0.13	IZ	DER
						330.8	74.46
COTA DE VASO	27.52	25	2583.07	1.42	0.22	367.4	98.37
2581.65	33.18	50	2583.11	1.46	0.26	375.35	109.07
						380.6	122.84
	38.8	100	2583.14	1.49	0.29		

Fuente: Elaboración propia.

- **Zona crítica 3**

La zona critica 3 se encuentra ubicada sobre la jurisdicción del municipio de Cota es considerada la mancha de inundación mas crítica ya que es la que mayor área abarca, sobre esta zona se encuentra ubicada una zona industrial y áreas agrícolas, en la Tabla 10-17 se identifican las cotas de la lámina de agua con el objetivo de caracterizar esta zona, en esta tabla se identifican el ancho que alcanza la mancha para cada uno de los periodos de retorno.

Tabla 10-17. Características de mancha de inundación zona crítica 3 para los diferentes periodos de retorno.

PUNTO CRITICO 3							
COTA DE CORONA	Caudal (m ³ /s)	PERIODOS DE RETORNO	COTA DE LÁMINA DE AGUA (M.S.N.M)	LÁMINA DE AGUA (m)	LÁMINA INUNDABLE	ANCHO DE MANCHA DESDE EJE RÍO (m)	
2568.22	13.86	5	2568.99	2.77	0.77	IZ	DER
COTA DE VASO	27.52	25	2569.19	2.97	0.97	60.2	438.56
2566.22	33.18	50	2569.25	3.03	1.03	67	466.5
	38.8	100	2569.3	3.08	1.08	73.38	503.45

Fuente: Elaboración propia.

11. MEDIDAS DE MITIGACIÓN

A continuación, se presentan algunas estructuras hidráulicas que permiten el control del exceso de agua en los cauces naturales, protegiendo zonas de cultivos, centros poblados y demás de las inundaciones en un evento extremo de precipitación, el cual es el que se está estudiando en el presente documento.

1. Diques

Son obras geotécnicas lineales de material suelto a modo de pequeñas presas que defienden contra inundación y definen un cauce de avenidas. Emplea material del lugar y realiza básicamente movimientos de tierra, pero ocupa mucho espacio porque se construye con taludes suaves, donde la relación es 1:3 o 1:4, (V:H), y por tanto la base es bastante ancha (Rojas Rubio, 2006).

Esta obra hidráulica permite la contención del empuje del agua, manteniéndola en el cauce, de tal manera que se previene que el exceso de agua invada o inunde las áreas cercanas al río, como pueblos, campos de cultivos. Estos se construyen generalmente con bolsas rellenas de tierra o concreto y se colocan paralelamente en el curso del río.

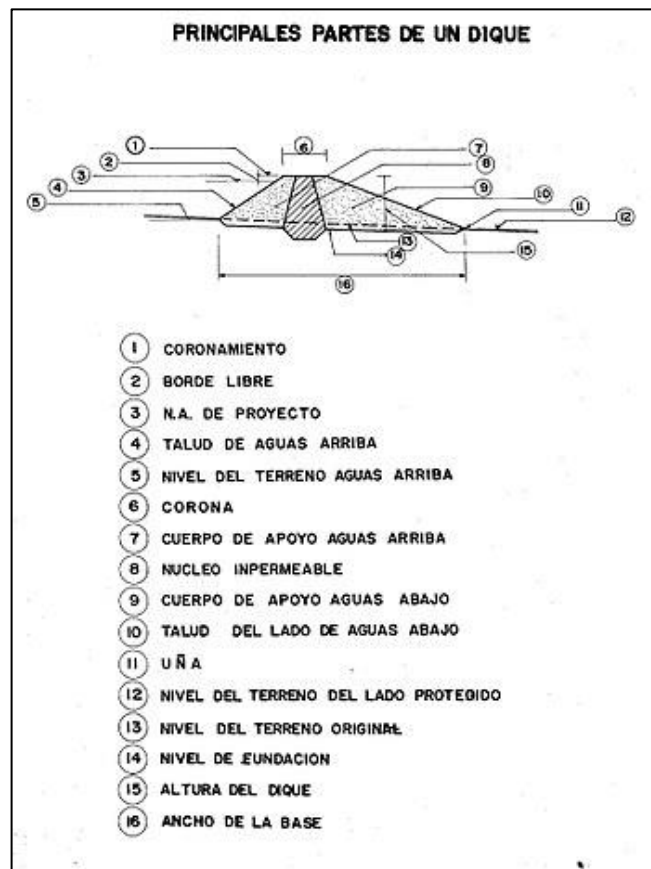


Ilustración 11-1 Principales partes de un dique artificial



Existen diferentes clases de diques:

- a. Diques en talud: es una estructura compacta de concreto reforzado, que se construye sobre una superficie de terreno estable. Donde las partes más importantes son: francobordo F_c , la cota de coronación de la berma A_c , la profundidad a pie de dique h , la anchura del espaldón B , la pendiente de fondo β , la anchura superior de la berma B_c , y la inclinación de los taludes del dique α .

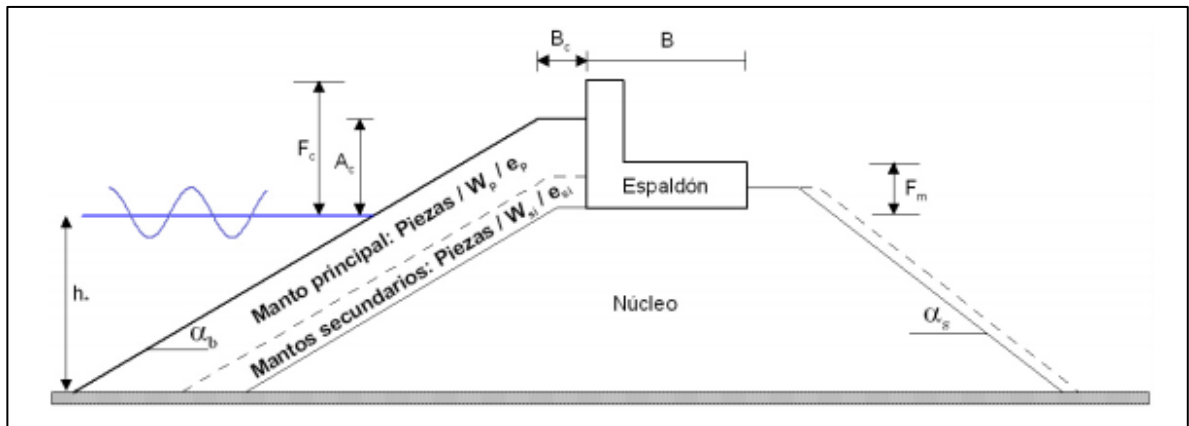


Ilustración 11-2 Partes de un Dique en talud

Fuente: Clavero y Ortega, s.f.

- b. Diques verticales: son contruidos por cajones de hormigón armado que se trasladan flotando y se hunden, para luego ser rellenos con áridos y así formar una estructura rígida (Obras hidráulicas, 2013).
- c. Diques naturales: son el resultado de la acumulación de sedimentos, durante los periodos de desborde, a lo largo de cauces mientras las cubetas de inundación y ciénagas fluviales reciben el excedente de los caudales pico, y constituyen sistemas naturales de amortiguación (IDEAM, 2013).

2. Gaviones

Los gaviones son estructuras armadas, capaces de resistir todos los tipos de esfuerzos y, fundamentalmente, soportar el trabajo a tracción. Básicamente están compuestos por rocas o cualquier otro material similar que se pueda obtener del entorno cercano, además de cestas de forma rectangular, las cuales se elaboran en alambre galvanizado de gran diámetro, los cuales sirven como contenedores para llenarlos de la roca recolectada.



Ilustración 11-3 Gavión.
Fuente: Bianchini Ingeniero – Gaviones

Estas estructuras presentan características importantes que hacen una de las opciones más viables para el control del exceso de caudal en los ríos y lagos. Una de las ventajas de esta estructura es su capacidad de deformabilidad, ya que le permite a la estructura adaptarse a los movimientos imprevistos sin perjudicar su capacidad portante, además de esto, la gran cantidad de masa requerida para su construcción y la presencia de una estructura metálica favorece su resistencia a los esfuerzos de tracción.

Así mismo, los gaviones presentan dos desventajas importantes, las cuales son: su vida media es de 10 años, y la máxima altura que se pueden construir es de 4.5 m (UNAL, s.f.).

La norma para la construcción de gaviones en el territorio colombiano es artículo 681-13, en el cual se describe el procedimiento y requisitos tanto del material utilizado para la elaboración, como del equipo para obras de gaviones.

Tabla 11-1 Características del material granular para llenado de gaviones

Tabla 681 – 8. Características del material granular para llenado de gaviones (piedras)		
CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO	REQUISITO
Granulometría (F)		
- Tamaño máximo (mm)	Nota 1	200
- Tamaño mínimo (mm)		100
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación 1), máximo (%)	INV E-219	50
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220	
- Sulfato de sodio		12
- Sulfato de magnesio		18
Resistencia mecánica (O)		
$\text{Relación} \frac{\text{Resistencia a la compresión simple}}{\text{Máximo esfuerzo de trabajo}}$	ASTM D7012 Método C	≥ 250
- La muestra para el ensayo se obtendrá tomando núcleos de piedras representativas		
Geometría de las partículas <i>Nota 3</i>		
Partículas con relación largo / espesor mayor que 3, máximo (%)	-	10 %
Masa unitaria (F)		
Masa unitaria de las canastas llenas con agregado compactado, mínimo (kg/m³) <i>Nota 3</i>	Nota 2	1250
Absorción (O)		
Absorción de agua, máximo (%)	E-223	2.0
- La muestra para el ensayo se obtendrá fragmentando una muestra representativa de las piedras		

Fuente: ANI – Gaviones de Malla de Alambre de Acero Entrelazado

Como se puede observar en la tabla anterior, el material utilizado como relleno para las estructuras de gaviones, deben cumplir los requisitos establecidos por la Agencia Nacional de Infraestructura, por lo que no todo el material es apto para su uso en estas obras hidráulicas.

3. Terraplenes

Los terraplenes son estructuras construidas principalmente con tierra de la zona, la cual se acumula y se compacta para aumentar el nivel del terreno e impedir el paso del agua, esto con el fin de proteger centros poblados, zonas de cultivos, campos para pastoreo, etc.

Los terraplenes se componen de tres partes:

- Corona: Parte superior del terraplén.



- b. Núcleo: Parte central del terraplén, entre el cimiento y la Corona.
- c. Cimiento: superficie de apoyo del terraplén.

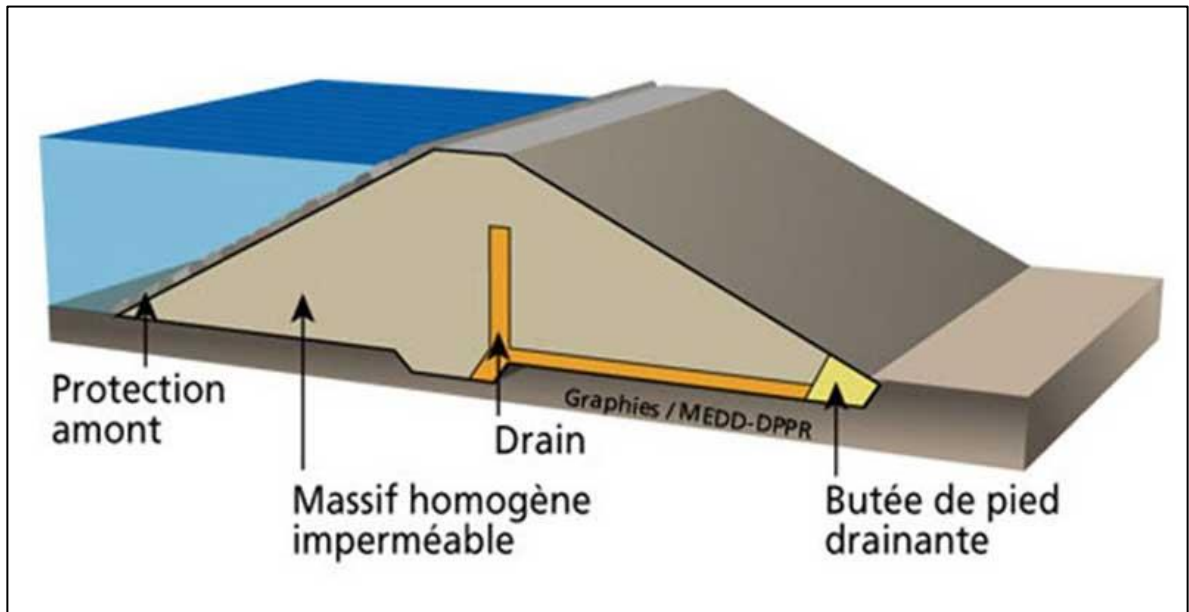


Ilustración 11-4 Terraplén
Fuente: Wiki Water

Estas estructuras presentan varias ventajas; una de ellas es la facilidad para encontrar materiales que se adapten esta estructura, ya que pueden utilizar desde rocas hasta suelos blandos y compresibles o permeables. Lo que disminuye el costo de materiales para su construcción, además, se pueden construir en cualquier zona, y no es invasivo con el entorno del cauce. Una de las principales desventajas es su probabilidad de erosión, ya que el agua puede arrastrar poco a poco las partículas debilitando la estructura del terraplén hasta provocar un deslizamiento de tierra que disminuirá la altura de este, generando desbordamientos de agua hacia zonas vulnerables, como control a esta situación se realiza la plantación de vegetación en los taludes del terraplén, la cual consolida el terreno, volviéndolo menos vulnerable a la erosión.

Tabla 11-2. Requisitos de los materiales para terraplenes

Tabla 220 - 1. Requisitos de los materiales para terraplenes				
CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUELOS SELECCIONADOS	SUELOS ADECUADOS	SUELOS TOLERABLES
Partes del terraplén a las que se aplican		Todas	Todas	Cimiento y Núcleo
Tamaño máximo, mm	E-123	75	100	150
Porcentaje que pasa el tamiz de 2 mm (No. 10) en masa, máximo	E-123	80	80	-
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 μ m (No. 200) en masa, máximo	E-123	25	35	35
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	0	1.0	1.0
Límite líquido, máximo (%)	E-125	30	40	40
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-126	10	15	-
CBR de laboratorio, mínimo (%) (Nota 1)	E-148	10	5	3
Expansión en prueba CBR, máximo (%)	E-148	0.0	2.0	2.0
Índice de colapso, máximo (%) (Nota 2)	E-157	2.0	2.0	2.0
Contenido de sales Solubles, máximo (%)	E-158	0.2	0.2	-

Fuente: ANI – Terraplenes

La tabla anterior expone los requerimientos mínimos de la ANI para la elaboración de terraplenes en el territorio colombiano. Siendo el Artículo 220 – 13 el establecido para llevar control de calidad al proceso de construcción y los materiales empleados.

Las anteriores estructuras hidráulicas permiten controlar el exceso de caudal que se produce en eventos máximos de precipitación, en la cuenca del río Chicú, debido a su baja pendiente en la zona media, se presentan inundaciones durante eventos de variabilidad climática como La Niña. Para controlar este aumento repentino del nivel del agua en el cauce, es recomendable realizar obras hidráulicas que garanticen el control del agua en las zonas de baja pendiente, de tal manera que se eviten las inundaciones en los centros poblados, zonas agropecuarias, ganaderas, entre otras, para disminuir las pérdidas económicas y de vidas humanas que dejan las olas invernales, en municipios que ejercen un control estricto en el respeto del área para la ronda hidráulica del río, en la cual muchas veces los habitantes construyen a las orillas de los cauces, poniendo en riesgo su vida y la de su familia.

11.1 PROPUESTAS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA LA CUENCA DEL RÍO CHICÚ



Ilustración 11-5 Zonas Críticas del Río Chicú.

Fuente: Elaboración propia.

Analizando detalladamente las manchas de inundación que se presentan en las ilustraciones anteriormente, se observa que el área mayor de inundación se presenta en la parte baja de la cuenca, donde el uso de suelo está relacionado con campos agrícolas, por lo que se recomienda para esta área la elaboración de terraplenes a una altura mayor de 1.50 m, con el fin de evitar que la lámina de agua pueda superar esta altura y se produzca la inundación, lo cual genera pérdidas económicas e incluso pérdidas de vidas humanas. Se propone esta alternativa debido a su bajo costo y bajo impacto para el ecosistema alrededor del cauce del río.

Además de esto, en la parte media se observa un área de inundación que afecta

en centro poblado, por lo que la construcción de terraplenes controlaría el exceso de agua en eventos de máxima precipitación. De igual manera en la parte alta de la cuenca, donde el polígono de inundación se puede mitigar con elevando el nivel del terreno a las orillas del cauce, evitando el desbordamiento del río.

Se recomiendan los terraplenes debido a su bajo costo de construcción y al bajo impacto que este produce en el ecosistema de la zona, además, que se construye con suelo de la zona, lo cual evita la contaminación por químicos, y su vida útil depende del control de la erosión ocasionada por el flujo del río, la cual se controla revegetalizando las paredes del talud, lo cual compacta el suelo evitando la erosión por arrastre de finos.

12. CONCLUSIONES

Durante el periodo entre abril de 2010 y comienzos de 2011 se presentó un evento climático extremo de precipitación en el cual la mayoría de los afluentes del río Bogotá presentaron un exceso de agua, colmatando las llanuras de inundación natural, por lo que una gran cantidad de habitantes aledañas a estos sufrieron bastas pérdidas económicas. Según el Reporte Final de Áreas Afectadas por Inundaciones 2010 – 2011, publicado el 30 de agosto de 2011 por IGAR, IDEAM y DANE; el departamento de Cundinamarca posee un área de 2.415.600 Ha, de las cuales el 8 % son zonas inundables periódicamente, pero en el periodo de tiempo entre abril de 2010 y comienzos de 2011, el área de inundación presentada fue de 69.2 %, lo cual presenta un importante cambio en las zonas inundación de la cuenca, dejando alrededor de 30.154 Ha inundadas, las cuales se componen de 25.341 Ha de zonas agropecuarias y 4.812 Ha de zonas de usos diversos.

Con el modelo hidrológico e hidráulico anteriormente presentado se busca representar el comportamiento hidrológico de la cuenca cuando se evidencia influencia en eventos climáticos extremos, y así poder evitar la pérdida económica y de vidas humanas del municipio. Complementándose con otro software (HEC-RAS), donde a partir de los caudales para diferentes periodos de retorno poder predecir las áreas de inundación, para dar una herramienta que permita crear planes de contingencia contra estos eventos de variabilidad climática.

La cuenca del Río Chicú tiene características morfométricas asociadas a ser una cuenca con una susceptibilidad media a inundaciones de acuerdo con los parámetros de forma, relieve y de cauce, ya que esta se caracteriza por ser una cuenca con forma alargada, lo cual ocasiona que se dé un mayor amortiguamiento a crecidas aumentando su tiempo de concentración, su alto tiempo de concentración también se asocia a que la cuenca posee una baja pendiente media y una baja variabilidad de altitud según la curva hipsométrica que la caracteriza por ser una cuenca madura indicando problemas de sedimentación, lo cual se vio reflejada en las salida de campo en las zonas media y baja de la misma.

Esta cuenca presenta una gran diversidad de suelos y cobertura, ya que se encuentra localizada en una zona de relieve bajo donde la limitan formaciones montañosas importantes como la Cordillera Oriental. Además, posee en toda su extensión la influencia de formaciones acuíferas que captan el agua de la superficie gracias a la composición física del suelo, que la mayoría de los tipos de suelo permiten un buen drenaje hacia las capas subterráneas siendo una zona importante de recarga hídrica de acuíferos. Esto influye significativamente en la capacidad de la cuenca para generar escorrentía, equilibrando en cierta medida la susceptibilidad a inundación de la cuenca, pero cabe resaltar que en eventos las avenidas extremas de precipitación se generan áreas de inundación de gran

importancia afectando a la población cercana a la zona inundable del río.

Para el uso de estos modelos es de vital importancia tener un amplio registro de las variables en las estaciones meteorológicas, ya que con los datos que estas monitorean se realizan las simulaciones que permiten predecir la ocurrencia de posibles eventos naturales que ponen en riesgo la vida de las personas, implementando así un sistema de alertas tempranas en la cuenca. Por otra parte, mientras en Colombia no se cuente con suficiente presupuesto para el desarrollo y mantenimiento de las estaciones, los profesionales relacionados con el área de la hidrología no podrán contribuir de forma excepcional en la prevención de desastres naturales relacionados con los eventos de variabilidad climática.

Después de realizar el modelo hidrológico de la cuenca del río Chicú, mediante este software (Hec-Hms), se puede concluir que el programa a pesar de ser diseñado para eventos puntuales de tormenta también se una buena herramienta para el análisis e interpretación de los eventos extremos durante un evento continuo. Aunque cabe resaltar que posee dificultades en el proceso de calibración. A pesar de esto, se logró un modelo bueno, que permite el análisis hidrológico de varios meses en la cuenca del río Chicú cuando se tienen valores extremos, logrando un porcentaje de calibración de 65% (Índice de Nash).

El comportamiento hidrológico de la cuenca es variado, y depende de las características del suelo, pero de forma general, la cuenca presenta suelos bien drenados, los cuales permiten la constante recarga de los cuerpos de agua subterráneos, de tal manera que el evento presentado en el periodo de 2010 a 2011, excedió la capacidad de infiltración del suelo, el cual según estudios del POMCA es de 50 mm, lo cual aumento el caudal en los cauces de los ríos provocando las inundaciones.

En cuanto a los resultados obtenidos para toda la cuenca, se observa la influencia de los cuerpos de agua subterráneos en el comportamiento hidrológico de la cuenca, donde el suelo permite la constante recarga, debido a su capacidad drenante. A pesar de la capacidad de almacenamiento de los acuíferos y del suelo, el evento climático estudiado excede los límites de capacidad del suelo y de los acuíferos, por lo que se produce el aumento de caudal, y con esto, las inundaciones que se produjeron en el periodo 2010 – 2011. Además de esto, se encontró que la parte central y sur de la cuenca presenta la máxima capacidad de infiltración, donde los acuíferos son de alta capacidad de recarga, por lo que el agua en el medio poroso puede fluir con rapidez. Mientras que la parte norte de la cuenca presenta los más bajos niveles de infiltración, debido a las diferentes formas de recarga, ya que algunos se abastecen por el flujo entre acuíferos, mientras que otros lo hacen por la infiltración, así mismo, en la zona norte los cuerpos de agua subterráneos son de baja a mediana productividad.

Para la realización de un buen modelo hidráulico se debe tener un buen modelo de elevación digital con el fin de sacar las secciones de análisis ya que el software HEC RAS especializa las manchas de inundación con este insumo, sin este el modelo no representará una aproximación de la realidad para conseguir variables hidráulicas que describen el comportamiento del flujo que ayudan a tomar decisiones frente al impacto que puede ocasionar ante diferentes escenarios.

El modelo hidráulico de la cuenca del río Chicú se calibro mediante la variación del coeficiente de rugosidad de Manning hasta obtener un 7% de error en la variación de los niveles de la lámina de agua, consiguiendo una representación buena del comportamiento hidráulico ante crecientes máximas en épocas de lluvia.

Dentro de la jurisdicción del municipio de Tabío se identificaron unas manchas de inundación ubicadas desde el km 20+407 hasta km 16+025 estas abarcan áreas de 30.71 ha, 41.68 ha, 45.52 ha y 48.78 ha para los periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años respectivamente. Para el municipio de Tenjo las manchas de inundación ubicadas desde el km 16+025 hasta el km 2+638 cubren un área de 98.43 ha, 122.83 ha, 130.05 ha y 137.97 ha respectivamente de los periodos de retorno anteriormente mencionados, siendo el municipio que se encontraría más afectado por el aumento de los niveles de agua en épocas de lluvia. Afectado 197.98 ha para un periodo de 5 años, 257.28 ha en un periodo de retorno de 25 años, 274.73 ha para un periodo de 50 años y 332.21 ha para un periodo de 100 años, en las cuales la principal actividad que se afecta es el área agrícola, por lo que si no se realizan medidas de mitigación las pérdidas económicas podrían ser elevadas.

Para el diseño de estructuras de mitigación de la amenaza se identificaron las láminas de agua máximas para un periodo de retorno de 25 años en diferentes tramos críticos dentro de la cuenca, uno de ellos se encuentra sobre el casco urbano del municipio de Tabío donde la mancha de inundación alcanza una altura de 1.40 m, el segundo tramo identificado se encuentra en el municipio de Tenjo km 13+449 la altura de lámina es de 1.60 m por encima de la sección hidráulica del río, y por ultimo sobre el municipio de Cota se identifica una altura de 0.80 m sobre la parte baja de la cuenca.

El terraplén es la estructura recomendada para llevar a cabo el control de los eventos máximos de precipitación, los cuales aumentan el caudal en el cauce, por lo que, se recomienda esta obra civil, debido a su bajo impacto con el ecosistema, y su bajo costo de implementación debido a que se realiza con suelo de la misma zona. Además, de la facilidad de construcción.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, M. N. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas Hidrográficas. Ecuador. Universidad Nacional de Loja.
- Arango, I. M. (2006). HADAS: Asistente para el diseño óptimo de redes hidráulicas exteriores de evacuación. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 27(2/3), 39-43.
- Agua y Sig (2017). Método del Número de Curva del SCS. Tabla 1. Disponible en: <https://www.aguaysig.com/2017/01/metodo-del-numero-de-curva-del-scs.html>
- Breñas A., Jacobo M. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. México D.F., Universidad Autónoma Metropolitana.
- Briñez A., K. J., Guarnizo G., J. C., & Arias V., S. A. (2012). Calidad del agua para consumo humano en el departamento del Tolima. Revista Facultad Nacional De Salud Pública, 30(2), 175-182.
- Caballero, I. 2013. Análisis de la Homogeneidad de las Series de Precipitación de Guipúzcoa. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Agencia Estatal de Meteorología. España.
- Cabrera J. Calibración de Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. (Archivo PDF).
- CAR (2011). Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá: Subcuenca del río Chicú. (Archivo PDF).
- Carrera, D V. 2016. Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media. Idesia, Arica, v. 34, n. 3, p. 81-90, jun. 2016. Disponible en <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292016000300010&lng=es&nrm=iso
- Espinoza P., Vintimilla G. (2013). Caracterización del comportamiento hidráulico de un tramo del río Calabí en el sector de toma utilizando un modelo matemático. Cuenca, Ecuador. Universidad de Cuenca.
- Esquivel, J.R, (2015) Estudio morfométrico de la cuenca del Río Azul, afluente del Río Calima, departamento del Valle del Cauca. Bogotá Colombia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- ESRI (2016)¹. ArcGIS for Desktop. Glosario. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/exploring-digital-elevation-models.htm>

- ESRI (2016)². ArcGIS for Desktop. ¿Qué es una superficies TIN?. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>
- Farías M (2007). Métodos de Abstracciones o del Número de Curva del SCS. Universidad de Piura. (Archivo PDF).
- Gonzales, J. (2017). Formulación del plan de recuperación socio ambiental del Río Chicú en el municipio de Tenjo Cundinamarca. Bogotá Colombia, Universidad Militar Nueva Granada.
- Guevara, J.M. 2003. Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos. Segunda edición. Caracas: Universidad Central de Venezuela. (Archivo PDF)
- Hermelin, M (2005), Desastres de origen natural en Colombia 1974 – 2004, Medellín, Colombia, Universidad Eafit, 179 – 211 p.
- Hermelin, M, (2007), Entorno natural de 17 ciudades de Colombia. Medellín, Colombia, Universidad Eafit, 45 p.
- HidroJING. Como seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales. Tabla. Disponible en: <http://www.hidrojing.com/como-seleccionar-el-coeficiente-de-rugosidad-de-manning-en-cauces-naturales/>
- Hurtado G. Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de las temperaturas mínimas medias para las regiones hidro climática del Colombia. IDEAM. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Analisis+del+Comportamiento+de+la+Temperatura+Minima.pdf/fc5b3bcb-ae84-413b-873d-fa7e3f06e8c6>
- Keller, E.A. and Pinter, N. (1996) Active Tectonics, Earthquake Uplift and Landscape. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- López J (2016). Evaluación de metodologías indirectas para la estimación de caudales medios mensuales en la zona del piedemonte del Departamento de Casanare. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. (Archivo PDF).
- López, F., M. BLANCO, (1976). Hidrología Forestal, 1a Parte. Madrid España, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 387 pp.
- Min. Educación. ¿Qué es un SIG? Sistema de información geográfico del sector educativo. Disponible en: <https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-190610.html>
- Molano, Batista. Calendario Climatológico Aeronáutico Colombiano. Sociedad Geográfica de Colombia. Academia de Ciencias Geográficas. Disponible en: www.sogeocol.edu.co

- Monsalve, G, (1999), Hidrología en la ingeniería. Bogotá Colombia, Escuela colombiana de ingenieros.
- Monsalve, G, (1999), Hidrología en la ingeniería. Bogotá Colombia, Escuela colombiana de ingenieros.
- Natural Resources Conservation Service. Unit Hydrograph Transformer. USDA: UHtransformerVer3.xmls. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1269480>
- NOHRSC (2005). Manual Técnico del Hidrograma Unitario (UHG). Estados Unidos. Disponible en: https://www.nohrsc.noaa.gov/technology/gis/uhg_manual.html
- Rodríguez T. (2010). Hidrometeorológico procesamiento de datos, Bogotá, Colombia, Universidad Distrital.
- Rojas, A., & Montaña, M. (2015). Análisis de vulnerabilidad del municipio de cota Cundinamarca, a través de una visión sistémica del territorio. Bogotá Colombia, Universidad Católica de Colombia.
- Rojas, P. (2015). INGENCIV. Obtenido de <http://www.ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>
- Romero, A., & López, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. España, Universidad de Murcia.
- Sánchez J. Calculo de la precipitación neta mediante el método SCS. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España. (Archivo PDF).
- Sánchez J. Conceptos fundamentales de Hidrogeología. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España. (Archivo PDF).
- US Army Corps of Engineers (2016). HEC-DSS. Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-dss/>
- US Army Corps of Engineers (2016). User's Manual. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. (Archivo PDF).
- US Army Corps of Engineers. HEC-HMS. Estados Unidos. Recuperado de: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/features.aspx>.
- Varas E. Modelos de Lluvia Escorrentía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en: http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_9/modulo9/cap91.pdf

- Villón M. (2002). Hidrología: Serie de ingeniería Agrícola. Segunda edición. Lima Perú, Villón.

14. BIBLIOGRAFÍA

- CAR (2011). Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá: Subcuenca del río Chicú. (Archivo PDF).
- Custodio E, Llamas R (1983). Hidrología Subterránea. Barcelona. España.
- Fernández de Córdova Webster, Carlos Javier, León Méndez, Alcides J. F., Rodríguez López, Yakelín, Martínez Ramírez, Paul Geovanny, & Meneses Meneses, Diego Martín. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 39(1), 17-31. Recuperado en 05 de septiembre de 2018, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100002&lng=es&tlng=es.
- Hernández A. Metodología para la estimación de la cota de inundación y cálculo de los caudales máximos en corrientes sin información hidrométrica. Centro de Documentación, IDEAM. Colombia. (Archivo PDF).
- IDEAM (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia. Colombia.
- IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. 2008. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 200p. + 164 hojas cartográficas.
- IGAC, IDEAM, DANE (2011). Reporte final de áreas afectadas por inundaciones 2010 – 2011. Colombia (Archivo PDF).
- León A. y Martínez Y. «Hidráulica de las conducciones libres», Editorial Poligráfica Félix Varela, ISBN 978-959-07-1867-0, La Habana, Cuba. (2013).
- Sánchez J (2013). Tránsito de hidrogramas: Método Muskingum – Cunge. Universidad de Salamanca. España.
- United States (2009). Department of Agriculture. Hydrology National Engineering Handbook: Chapter 7. Disponible en: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch7.pdf>
- US Army Corps of Engineers (2016). User's Manual. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. (Archivo PDF).