



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

PREDISEÑO DE UN BOX CULVERT ASOCIADO AL MANEJO DE LAS
AGUAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL PARA EL PROYECTO
CITADELA DI TERRA, UBICADO EN EL MUNICIPIO DE EL RETIRO –
ANTIOQUIA

Autor(es)

Daniela Ochoa Cadavid

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



PREDISEÑO DE UN BOX CULVERT ASOCIADO AL MANEJO DE LAS AGUAS DE
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL PARA EL PROYECTO CITADELA DI TERRA,
UBICADO EN EL MUNICIPIO DE EL RETIRO – ANTIOQUIA

Daniela Ochoa Cadavid

Informe de práctica como requisito para optar al título de:

Ingeniería Sanitaria

Asesores (a)

Diana Cristina Atehortúa

Luis Alberto Chávez Henao

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020

TABLA DE CONTENIDO

I.	RESUMEN	8
II.	INTRODUCCIÓN	9
III.	OBJETIVOS	10
	a. OBJETIVO GENERAL.....	10
	b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
II.	MARCO TEÓRICO	11
	A. PERIODO DE RETORNO	11
	B. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	11
	B. CALCULO DE LA TORMENTA DE DISEÑO	13
	C. CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN	13
	D. CÁLCULO DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA - CN	14
	E. DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS.....	18
	F. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA.....	19
	G. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA SEGÚN EL NÚMERO DE CURVA	21
	H. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.....	21
III.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	22
IV.	METODOLOGÍA	23
V.	RESULTADOS.....	28
	A. ESTUDIO HIDROLÓGICO	28
	B. ESTUDIO HIDRÁULICO.....	34
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
VII.	REFERENCIAS.....	48

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del box culvert asociado al caño de estudio	22
Figura 2. Curva IDF para la estación El Retiro	25
Figura 2.Subcuenca asociada a un tramo del Caño de estudio	28
Figura 4. Coberturas asociadas a la subcuenca del caño en estudio	31
Figura 5. Vista en planta del cauce actual	35
Figura 6. Esquema mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años del caño de estudio, para la condición actual, generado por el software HEC-RAS.....	36
Figura 7. Sección transversal 0+035.14 (condición actual).....	37
Figura 8. Sección transversal 0+060.10 (condición actual).....	37
Figura 9. Sección transversal 0+090.88 (condición actual).....	38
Figura 10. Sección transversal 0+100.88 (condición actual).....	38
Figura 11. Mancha de inundación de un tramo del caño para un periodo de retorno de 100 años, condición actual. Generado por HEC-RAS.....	39
Figura 12. Vista en planta del cauce a implementar	41
Figura 13. Esquema mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años del caño de estudio en condición a implementar, generado por el software HEC-RAS.....	42
Figura 14. Sección transversal 0+000.00, salida del box culvert a implementar (condición a implementar)	43
Figura 15. Sección transversal 0+081.81, box culvert a implementar (condición a implementar)	43
Figura 16. Sección transversal 0+158.74, inicio del box culvert a implementar (condición a implementar)	44
Figura 17. Sección transversal 0+198.22, box culvert existente aguas arriba (condición a implementar)	44
Figura 18. Mancha de inundación de un tramo del caño en estudio para un periodo de retorno de 100 años, condición a implementar. Generado por HEC-RAS.....	45

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Métodos para la determinación del tiempo de concentración.....	12
Tabla 2. Condición hidrológica de acuerdo con el tipo de cobertura.....	15
Tabla 3. Clasificación del suelo de acuerdo al potencial de escurrimiento.....	15
Tabla 4. Número de curva según el INVIAS para una condición de humedad AMCII	16
Tabla 5. Números de CN para condiciones de humedad I y III	18
Tabla 6. Valores del coeficiente de escorrentía en áreas urbanas.....	20
Tabla 7. Valores del coeficiente de escorrentía en áreas rurales.....	20
Tabla 11. Estación pluviográfica aferente a la subcuenca del caño de estudio.....	24
Tabla 12. Valores de intensidad para diferentes periodos de retorno y tiempos de concentración	24
Tabla 13. Variables asociadas a la estación pluviográfica	25
Tabla 8. Parámetros morfo-métricos de la subcuenca en estudio	29
Tabla 9. Tiempos de concentración (TC) asociado a la subcuenca estudiada.....	29
Tabla 10. Tiempos de concentración obtenidos para la subcuenca.....	30
Tabla 14. Resultados de intensidad obtenidos para los diferentes periodos de retorno.....	30
Tabla 15. Resultados de precipitación obtenidos para los diferentes periodos de retorno	30
Tabla 16. Distribución porcentual de los usos del suelo.	31
Tabla 17. CN ponderado a partir del uso del suelo.....	32
Tabla 18. CN ponderado de la zona de estudio.....	32
Tabla 19. Parámetros para calcular el coeficiente de escorrentía.....	32
Tabla 20. Coeficiente de escorrentía (C) ponderado para la subcuenca	32
Tabla 21. C ponderado de la zona de estudio	33
Tabla 22. Coeficientes de escorrentía por el número de curva	33
Tabla 23. Caudales máximos obtenidos por el método racional para la subcuenca del caño en estudio	33

Tabla 24. Coeficiente de rugosidad de Manning(n) utilizados en la modelación hidráulica para la condición actual y a implementar del caño	34
Tabla 25. Pendientes utilizadas en la modelación hidráulica en un tramo del caño	35
Tabla 26. Cotas de nivel de flujo y máxima altura de flujo para un tramo del caño en estudio, para un periodo de retorno de 100 años en condición actual.....	40
Tabla 27. Cotas de nivel de flujo y máxima altura de flujo para un tramo del caño de estudio, para un periodo de retorno de 100 años, para la condiciónimplementar.....	46

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. TC por Témez.....	12
Ecuación 2. TC por Williams.....	12
Ecuación 3. TC por Kirpich.....	12
Ecuación 4. TC por Cross	12
Ecuación 5. TC por Giandotti.....	12
Ecuación 6. TC por SCS-Ranser.....	12
Ecuación 7. TC por Ventura- Heras.....	12
Ecuación 8. TC por V.T. Chow	12
Ecuación 9. TC por ejercito EEUU	12
Ecuación 10. TC por Hathaway	12
Ecuación 11. TC por la FAA	13
Ecuación 12. Determinación de la curva IDF	13
Ecuación 13. Cálculo de la precipitación	14
Ecuación 14. Determinación de la infiltracion inicial del suelo	16
Ecuación 15. Determinacion de la capacidad de almacenamiento del suelo	16
Ecuación 16. Determinacion del CN ponderado	17
Ecuación 17. Caudal máximo de crecientes	19
Ecuación 18. Coeficiente de escorrentia ponderado.....	21
Ecuación 19. Determinación de coeficiente de escorrentia segun el numero de la curva	21

I. RESUMEN

El proyecto de apartamentos denominado Citadela Di Terra ubicado en el municipio de El Retiro- Antioquia cuenta con fuentes vivas que deben ser manejadas de manera adecuada para evitar afectaciones de cualquier tipo. En particular, se planteó la implementación de un box culvert como obra hidráulica para la intervención de las aguas provenientes de un caño que pasa por el predio del proyecto, el cual será la base de estudio en el presente informe.

Para encontrar el caudal máximo de lluvias para el punto de localización del box culvert a implementar, se utilizó el método racional, el cual relaciona la intensidad de las precipitaciones, el área de la subcuenca de influencia hasta dicha estructura, y el coeficiente de escorrentía.

La obra que se plantea en el presente trabajo es la continuación de un box culvert existente al interior del proyecto, por lo que se realizó la modelación hidráulica mediante el software HEC-RAS versión 4.1, tanto de la condición actual (Box culvert existente de 94.20 m de longitud), como a implementar (Box culvert ampliado en una longitud de 158.73m), obteniendo un resultado favorable para la implementación del box culvert, ya que se demuestra que la implementación de la obra evitaría posibles inundaciones en el futuro, además, se obtuvo que éste cumple con los parámetros mínimos de diseño al no exceder su máxima capacidad hidráulica.

Palabras claves: Obra hidráulica, precipitaciones, caudal máximo de lluvias, box culvert, capacidad hidráulica.

II. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la instauración de las diferentes formas de vida, la biodiversidad y el desarrollo. Sin embargo, debido a la alta concentración de la población en zonas urbanas y suburbanas, se ha visto en aumento la preocupación ante la preservación de los recursos naturales, la dotación de vivienda y la prestación de servicios públicos, lo que conlleva a la necesidad de realizar una adecuada gestión y uso del recurso hídrico en el territorio [1].

Las aguas lluvias, por su parte, se consideran “el reto de las ciudades de hoy”, esto, debido a que, aunque la idea es aprovechar y reutilizar de la mejor manera las aguas pluviales, dirigiéndolas a través del sistema de alcantarillado para su tratamiento, resulta una difícil labor, esto, debido a que por causa del cambio climático que se presenta, las precipitaciones han terminado por desbordar la capacidad de los alcantarillados, generando inundaciones [2].

A pesar de que las grandes ciudades, como Bogotá, han desarrollado una norma que establece soluciones para el diseño de un drenaje sostenible que mitigue este problema (NS-085 de la Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB)), el panorama no es el mismo para las zonas rurales y suburbanas del país, en las cuales, debido a los recursos presupuestales designados, no se cuenta con la solvencia económica que conlleva poner en práctica dichas soluciones [2]. Por lo cual, un importante número de ciudades y municipios en Colombia, optan por verter las aguas lluvias en ríos o canales, que, aunque no resulta una manera directa de reutilización del recurso, resulta de ayuda para evitar la erosión y las inundaciones que puede provocar no dirigir las y dejar que se filtren directamente en el suelo.

El Retiro, municipio ubicado al oriente del departamento de Antioquia-Colombia, es una zona sub urbana en exponencial crecimiento poblacional y territorial con servicio de agua potable bajo administración de las Empresas Públicas de Medellín (EPM). Éste atraviesa un acelerado crecimiento debido principalmente a la dinámica que le imprime la economía de la región y el crecimiento demográfico natural, creando la necesidad de implementar estrategias que busquen un desarrollo sostenible y que mantengan el equilibrio de los ecosistemas naturales [3].

El proyecto “Citadela Di Terra” es un conjunto residencial que será construido sobre el corredor sub urbano del municipio de El Retiro. Por medio del presente proyecto, se pretende llevar a cabo un prediseño de la obra hidráulica para el manejo de las aguas de escorrentía superficial en dicho lugar, siguiendo los lineamientos establecidos en la Resolución 0330 de 2017, el manual de drenajes para carreteras del INVIAS y las Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado pluvial de EPM.

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

- Realizar el prediseño de la obra hidráulica (box culvert) para el manejo de las aguas de escorrentía superficial de un caño en el proyecto Ciudadela Di Terra, ubicado en el municipio de El Retiro – Antioquia, Colombia.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar los caudales de diseño a partir de la metodología aceptada para este fin (método racional).
- Pre dimensionar los parámetros hidráulicos que permitan el adecuado funcionamiento del sistema de drenaje, cumpliendo con los parámetros mínimos y máximos de diseño, de acuerdo a la normativa colombiana de diseño definida.
- Plasmar el trazado de la obra transversal propuesta mediante el software de dibujo AutoCAD.

II. MARCO TEÓRICO

Se entiende como agua lluvia, aquella proveniente de eventos de precipitación pluvial, cuando el terreno llega a su capacidad de absorción, una porción de estas aguas corre libremente sobre la superficie, a esto se le conoce como escorrentía [4]. Dichas aguas, generalmente se conducen por medio de un alcantarillado colector, el cual se define como un sistema conformado por instalaciones dedicadas a la recolección y transporte de las aguas lluvias [4].

Las debidas disposiciones de las aguas lluvias en Colombia se encuentran normalizadas por la Resolución 0330 del 2017, por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2017, en donde se establecen los requisitos técnicos que se deben cumplir durante las etapas de diseño, operación y mantenimiento de la infraestructura asociada a la prestación de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo, donde se estipula que las tuberías a utilizar en el diseño pueden ser de diferentes materiales, tales como concreto simple y reforzado, PVC, polietileno, polipropileno, fibra de vidrio, hierro dúctil, arcilla vitrificada [4].

Para lograr un correcto diseño de un sistema de drenaje para aguas pluviales, es necesario tener en cuenta múltiples características y consideraciones, tales como el diámetro mínimo de la tubería y las precipitaciones máximas que se presentan en el lugar de interés. Un adecuado diámetro mínimo de la tubería será la clave para evitar posibles obstrucciones, mientras que conocer la velocidad mínima y máxima en la red, será de ayuda para evitar la sedimentación y el desgaste de la tubería debido a la erosión. Las medidas estándar para determinar el diámetro interno de la tubería en sistemas de alcantarillado para aguas lluvias debe ser como mínimo 215 mm (10 pul), mientras que las velocidades mínimas y máximas están entre los 0,75 m/s (mínima) y los 5 m/s (máxima) [5].

A. PERIODO DE RETORNO

Es el tiempo promedio expresado en años, en el que el valor del caudal pico de una creciente es igualado o superado, está ligado a la probabilidad de que el caudal de diseño sea superado durante la vida útil de la obra [6].

B. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Es el tiempo que tarda una gota de agua en llegar al sitio de interés desde el punto más alejado de la subcuenca, este parámetro, es importante debido a que la duración de la tormenta de estudio va a depender de este tiempo [6], en la literatura existen numerosos métodos para realizar este cálculo, a continuación, se muestran las expresiones utilizadas.

Tabla 1. Métodos para la determinación del tiempo de concentración

MÉTODO	ECUACIÓN	VARIABLES
Témez	$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$ Ecuación 1. TC por Témez	Tc: Tiempo de concentración, en horas. L: Longitud del cauce principal, en kilómetros. S: Pendiente total del cauce principal, en porcentaje (%).
Williams	$T_c = 0.683 \frac{LA^{0.4}}{DS^{0.25}}$ Ecuación 2. TC por Williams	Tc: Tiempo de concentración, en horas. L: Longitud de cauce principal, en kilómetros. A: Área de la subcuenca, en kilómetros cuadrados. D: Diámetro de una circular, con área A, en kilómetros. S: pendiente total del cauce principal, en porcentaje.
Kirpich	$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$ Ecuación 3. TC por Kirpich	Tc: Tiempo de concentración, en horas (h). L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (Km) S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima del cauce principal, en metros por metro (m/m).
Johnstone Cross	$T_c = 2.6 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$ Ecuación 4. TC por Cross	Tc: Tiempo de concentración, en horas L: Longitud del cauce principal, en kilómetros S: Pendiente del cauce principal, en metros por kilómetro.
Giandotti	$T_c = \left(\frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{LS}} \right)$ Ecuación 5. TC por Giandotti	Tc: Tiempo de concentración, en horas A: Área de la subcuenca, en kilómetros cuadrados. L: Longitud del cauce principal, en kilómetros. S: Pendiente del cauce principal, en metros por metros
SCS-Ranser	$T_c = 0.947 \frac{L^3}{H}^{0.385}$ Ecuación 6. TC por SCS-Ranser	Tc: Tiempo de concentración, en horas L: Longitud del cauce principal, en kilómetros. H: Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente principal, en metros
Ventura-Heras	$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$ Ecuación 7. TC por Ventura- Heras	Tc: Tiempo de concentración, en horas. L: Longitud del cauce principal, en kilómetros. S: Pendiente total del cauce principal, en porcentaje.
V.T.Chow	$T_c = 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64}$ Ecuación 8. TC por V.T. Chow	Tc: Tiempo de concentración, en horas. L: Longitud del cauce principal, en kilómetros. S: Pendiente total del cauce principal, en metros por metros.
Ejército de EEUU	$T_c = 0.28 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$ Ecuación 9. TC por ejercito EEUU	Tc: Tiempo de concentración, en horas. L: Longitud del cauce principal, en kilómetros. S: Pendiente total del cauce principal, en metros por metros.
Hathaway	$T_c = \left(\frac{36.36(Ln)^{0.467}}{S^{0.234}} \right)$ Ecuación 10. TC por Hathaway	Tc: Tiempo de concentración, en minutos. L: Longitud del cauce principal, en kilómetros. S: Pendiente total del cauce principal, en metros por metros. n: Factor de rugosidad, adimensional

MÉTODO	ECUACIÓN	VARIABLES
Federal Aviation Administration	$T_c = \left(\frac{3.261(1.1 - C)L^{0.50}}{S^{0.333}} \right)$ <p style="text-align: center;">Ecuación 11. TC por la FAA</p>	<p>T_c: Tiempo de concentración, en minutos.</p> <p>C: Coeficiente de escorrentía, del método racional, adimensional.</p> <p>L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.</p> <p>S: Pendiente total del cauce principal, en porcentaje.</p>

Fuente: Manual de drenaje para carreteras INVIAS (2009)

B. CALCULO DE LA TORMENTA DE DISEÑO

En el cálculo de la tormenta de diseño se deben tener en cuenta algunas variables climáticas, como son la duración y la frecuencia de la lluvia, las cuales permiten mediante la curva Intensidad–Frecuencia–Duración (IDF) calcular la intensidad de la precipitación asociada a la zona de interés.

La curva IDF se obtiene a partir del análisis estadístico de los registros pluviográficos de la estación más cercana a la zona de estudio, para cada año se escogen las tres tormentas máximas, y se obtienen las mayores intensidades, después, realizando un análisis de frecuencia de las intensidades obtenidas, se sacan las curvas. Para obtener esta curva se utiliza la siguiente ecuación:

$$i = \frac{k * Tr^m}{(c + d)^n}$$

Ecuación 12. Determinación de la icurva IDF

Donde:

- *i*: Intensidad en milímetros por hora
- *Tr*: Período de retorno en años
- *d*: Duración de la precipitación en minutos
- *k, m, c, n*: Parámetros

C. CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN

El valor de la precipitación en el sitio del proyecto parte de datos puntuales suministrados por un fluviógrafo o pluviómetro, los cuales deben tener el mismo periodo de registro. [6]

Algunos métodos para la obtención del valor de precipitación son:

- **Aritmético**: Consiste en calcular un promedio de los datos pluviométricos puntuales de estaciones ubicadas en un área geográfica puntual, en este método

no se consideran características que pueden influir en las precipitaciones, como la presencia de cordones montañosos, condiciones atmosféricas u otras [7]

- **Polígonos de Thiessen:** Para este método, además de la información pluviográfica, se requiere de la ubicación espacial de las estaciones, a cada una de estas se le asigna una superficie, la cual es obtenida representando las estaciones en un plano y uniéndolas con una recta, a las cuales se les trazan las mediatrices hasta que se intersectan entre sí, obteniendo la superficie de influencia para cada estación [7].

Conociendo que la intensidad de precipitación es la cantidad de agua lluvia que cae sobre una superficie durante un tiempo determinado [6], se despeja el valor de la precipitación de la siguiente manera:

$$P = ixtc$$

Ecuación 13. Cálculo de la precipitación

Dónde:

- P: Precipitación
- i: Intensidad
- tc: Tiempo de concentración

D. CÁLCULO DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA - CN

Mediante el método del número de la curva de escorrentía (CN), desarrollado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América (SCS), se puede determinar la escorrentía superficial, obteniendo una adecuada aproximación [8].

En este método, la profundidad de escorrentía, es decir, la profundidad efectiva de precipitación, está en función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, denominado número de curva o CN. De acuerdo con este método la capacidad de la infiltración del suelo en una subcuenca depende de:

- Tipo de suelo (Agricultura, pastos, bosques, unidad residencial, etc.)
- Tipo de tratamiento superficial del suelo.
- Condición hidrológica del suelo
- Condición hidrológica: Los prados son evaluados con una condición hidrología de pasto natural [9]

Tabla 2. Condición hidrológica de acuerdo con el tipo de cobertura

CONDICIÓN	COBERTURA
Mala	Menos del 50% de área cubierta y alta intensidad de pastoreo.
Aceptable	50 a 75% del área cubierta y alta densidad de pastoreo
Buena	Más del 75% de área cubierta y ligera intensidad de pastoreo.

Fuente: Monsalve Saenz (1995)

La condición hidrológica para los bosques se determina visualmente como:

- Bosque pobre: Densamente pastado o bosque regularmente quemado, con pocos arbustos y muy pequeña cantidad de humus vegetal.
- Bosque aceptable: Con pastos no quemados, con algunos arbustos y moderada cantidad de humus vegetal.
- Bosque bueno: Protegido con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubriendo la superficie.

Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos, son utilizados en el planteamiento de subcuencas para la estimación de la escorrentía superficial a partir de la precipitación. Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos A, B, C y D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento [9]:

Tabla 3. Clasificación del suelo de acuerdo al potencial de escurrimiento.

CLASIFICACIÓN	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
A	Bajo potencial de escorrentía	Suelos que tienen alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Son suelos con predominancia de arenas o gravas, en donde el agua corre libremente a través del perfil, por ende, tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están húmedos.
B	Moderadamente bajo potencial de escorrentía	Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos,
C	Moderadamente alto potencial de escorrentía	Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consiste en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados.
D	Alto potencial de escorrentía	Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable.

Fuente: Manual de drenaje para carretera del INVIAS (2009)

El método del número de curva de escorrentía tiene tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta que se analiza [9]. Dichos niveles se describen a continuación:

1. La condición de humedad antecedente seca (AMC I) tienen el menor potencial de escorrentía, con los suelos estando lo suficientemente secos para un arado satisfactorio o para que una siembra se lleve a cabo.
2. La condición de humedad antecedente promedio (AMC II) tiene un potencial de escorrentía promedio.
3. La condición de humedad antecedente húmeda (AMC III) tiene el mayor potencial de escorrentía, con la hoya hidrográfica prácticamente saturada de precipitaciones anteriores.

A partir del número de curva CN se calcula la capacidad de almacenamiento y la infiltración inicial del suelo mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_a = 0.2 \cdot S$$

Ecuación 14. Determinación de la infiltración inicial del suelo

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Ecuación 15. Determinación de la capacidad de almacenamiento del suelo

Dónde:

- *CN*: Número de curva de escorrentía (adimensional).
- *S*: Capacidad de almacenamiento del suelo (mm).
- *I_a*: Infiltración inicial de suelo (mm).

La Tabla 4 permite reconocer los valores del número de curva (CN) de acuerdo al tipo de suelo, uso de la tierra, condición hidrológica y práctica agrícola utilizada en los cultivos.

Tabla 4. Número de curva según el INVIAS para una condición de humedad AMCII

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE COBERTURA	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	NÚMERO DE LA CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS			
		A	B	C	D
Pastos, forraje para pastoreo	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno	----	30	58	71	78
Maleza mezclada con pasto de semilla, con la	Mala	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE COBERTURA	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	NÚMERO DE LA CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS			
		A	B	C	D
maleza como principal elemento	Buena	30	48	65	73
Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles)	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	----	59	74	82	86

Para realizar el cálculo del CN ponderado, se utiliza la siguiente ecuación:

$$CN_{ponderado} = \frac{\sum A * CN}{\sum A}$$

Ecuación 16. Determinación del CN ponderado

Dónde:

- *A*: Área
- *CN*: Número de curva de escorrentía

En el caso que se tenga una condición de humedad diferente a AMCII, en la Tabla 5 se encuentran los números de CN para las condiciones de humedad I y III

Tabla 5. Números de CN para condiciones de humedad I y III

AMC II	AMC I	AMC III	AMC II	AMC I	AMC III
100	100	100	60	40	78
99	97	100	59	39	77
98	94	99	58	38	76
97	91	99	57	37	75
96	89	99	56	36	75
95	87	98	55	35	74
94	85	98	54	34	73
93	83	98	53	33	72
92	81	97	52	32	71
91	80	97	51	31	70
90	78	96	50	31	70
89	76	96	49	30	69
88	75	95	48	29	68
87	73	95	47	28	67
86	72	94	46	27	66
85	70	94	45	26	65
84	68	93	44	25	64
83	67	93	43	25	63
82	66	92	42	24	62
81	64	92	41	23	61
80	63	91	40	22	60
79	62	91	39	21	59
78	60	90	38	21	58
77	59	89	37	20	57
76	58	89	36	19	56
75	57	88	35	18	55
74	55	88	34	18	54
73	54	87	33	17	53
72	53	86	32	16	52
71	52	86	31	16	51
70	51	85	30	15	50
69	50	84			
68	48	84	25	15	43
67	47	83	20	9	37
66	46	82	15	6	30
65	45	82	10	4	22
64	44	81	5	2	13
63	43	80	0	0	0
62	42	79			
61	41	78			

E. DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS.

1. Método racional

Es uno de los métodos más simples que pueden utilizarse para el diseño de sistemas de recolección y evaluación de aguas lluvias, este solo puede ser usado en cuencas con áreas menores a 80 ha. El método racional calcula un caudal pico de aguas lluvias, mediante la intensidad media de precipitación, una duración igual al tiempo de concentración y un coeficiente de escorrentía [6].

Para realizar el cálculo del caudal máximo de crecientes se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3.6}$$

Ecuación 17. Caudal máximo de crecientes

Dónde:

- Q: Caudal máximo de crecientes. (m³/s)
- I: Intensidad de la lluvia (mm/h).
- A: Área de la subcuenca (Km²).
- C: Coeficiente de escorrentía. (adimensional)

En este estudio se aplicará este método utilizando dos modalidades en la obtención de los valores del coeficiente de escorrentía (C)

F. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

El coeficiente de escorrentía C, es un valor adimensional, que relaciona el volumen de escorrentía superficial y el volumen total de precipitación [6], este puede ser cambiante a lo largo de subcuenca, dependiendo de si el sector es rural o urbano, y del uso del suelo. Para determinar el valor del coeficiente de escorrentía, se presentan las Tabla 6 y Tabla 7 generadas por el Manual De Drenaje Para Carreteras, del INVIAS.

Tabla 6. Valores del coeficiente de escorrentía en áreas urbanas.

TIPO DE ÁREA DE DRENAJE	COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA C
PRADOS	
Suelos arenosos, planos, 2%	0.05 - 0.10
Suelos arenosos, promedio, 2 -7 %	0.15 - 0.20
Suelos pesados (arcillosos), planos, 2%	0.13 - 0.17
Suelos pesados (arcillosos), promedio, 2 -7 %	0.18 - 0.22
Suelos pesados (arcillosos), pendientes, 7%	0.25 - 0.35
DISTRITOS COMERCIALES	
Áreas de centro de ciudad	0.70 - 0.95
Áreas vecinas	0.50 - 0.70
RESIDENCIAL	
Casas individuales separadas	0.30 - 0.50
Casas multifamiliares separadas	0.40 - 0.60
Casas multifamiliares unidas	0.60 - 0.75
Suburbana	0.25 - 0.40
Áreas de apartamentos de vivienda	0.50 - 0.70
INDUSTRIAL	
Áreas livianas	0.50 - 0.80
Áreas pesadas	0.60 - 0.90
PARQUES CEMENTERIOS	0.10 - 0.25
CAMPOS DE JUEGOS	0.20 - 0.35
ÁREAS DE PATIOS DE FERROCARRILES	0.20 - 0.40
ÁREAS NO DESARROLLADAS	0.10 - 0.30
CALLES	
Asfaltadas	0.70 - 0.95
Concreto	0.80 - 0.95
Ladrillo	0.70 - 0.85
CALZADAS Y ALAMEDAS	0.75 - 0.85
TECHOS	0.75 - 0.95

Fuente: (INVIAS, 2009)

Tabla 7. Valores del coeficiente de escorrentía en áreas rurales.

VEGETACIÓN Y TOPOGRAFÍA Y	TEXTURA DEL SUELO		
	FRANCO ARENOSO	FRANCO LIMO ARCILLOSO	ARCILLOSO
BOSQUES			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.25	0.35	0.50
Montañoso	0.30	0.50	0.60
PASTOS			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.16	0.36	0.55
Montañoso	0.22	0.42	0.60
TIERRAS CULTIVADAS			
Plano	0.30	0.50	0.60
Ondulado	0.40	0.60	0.70
Montañoso	0.52	0.72	0.82

Nota: Plano (pendiente 0 - 5%); Ondulado (pendiente 5 - 10%); Montañoso (pendiente 10 - 30%). Para valores mayores al 30 %, a falta de datos, utilizar los valores para pendientes entre el 10 y el 30 %.

Fuente: (INVIAS, 2009)

Para calcular el coeficiente de escorrentía ponderado, se utiliza la siguiente ecuación:

$$c = \frac{\sum A * C}{\text{Área}}$$

Ecuación 18. Coeficiente de escorrentia ponderado

De dónde:

- A: Área de cobertura
- C: Coeficiente de escorrentía sacado de tablas

G. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA SEGÚN EL NÚMERO DE CURVA

Este segundo método trata de relacionar los coeficientes de escorrentía, es decir, los deducidos en Texas, con el valor del Número de Curva del modelo de infiltración propuesto por el antiguo Soil Conservation Service (SCS) a través de las siguientes expresiones:

$$C = \frac{(P - I_a)^2}{(P^2 + 4PI_a)}$$

Ecuación 19. Determinación de coeficiente de escorrentia segun el numero de la curva

Donde:

- C: Coeficiente de escorrentía asociado a un período de retorno.
- P: Precipitación total asociada a un período de retorno en mm.
- I_a : Infiltración inicial de suelo en mm.(Ver Ecuación 14)
- S: Capacidad de almacenamiento del suelo en mm.(Ver Ecuación 15)
- CN: Número de curva para la condición de humedad determinada (saturada).

H. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING

Es un parámetro que representa el efecto friccional del contorno del conducto sobre el flujo, en general este valor depende del tipo de material que se tenga [4].

Los coeficientes de resistencia al flujo uniforme en canales de lecho rígido se encuentran tabulados en muchos libros clásicos de hidráulica [10]. En canales de lecho móvil, además de la rugosidad que ofrecen las paredes y el lecho, es necesario considerar la rugosidad que ofrecen las formas del lecho (rizos, dunas, etc). El coeficiente de rugosidad(n) es un parámetro que depende básicamente de:

- La profundidad de flujo (controlada por el caudal).
- El sedimento transportado.
- Los escombros flotantes.
- El tamaño del material del lecho.
- El tipo, extensión y distribución de la vegetación de las bancas.

La rugosidad de Manning es muy variable y depende de un cierto número de factores, como lo es la rugosidad del material superficial, las macro rugosidades del canal, la vegetación, el alineamiento del canal y las posibles [7].

III. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El proyecto Ciudadela Di Terra, se encuentra localizado en el casco urbano del municipio de El Retiro, a 33 km de la ciudad de Medellín.

Para el manejo de las aguas de escorrentía superficial generadas en el área de influencia del proyecto de apartamentos Ciudadela Di Terra, se tiene identificado un caño localizado en la parte inferior del lote. Adicionalmente, este caño actualmente presenta un tramo canalizado en concreto y cuenta con un box culvert en otro tramo, tal como lo muestra la Figura 1.

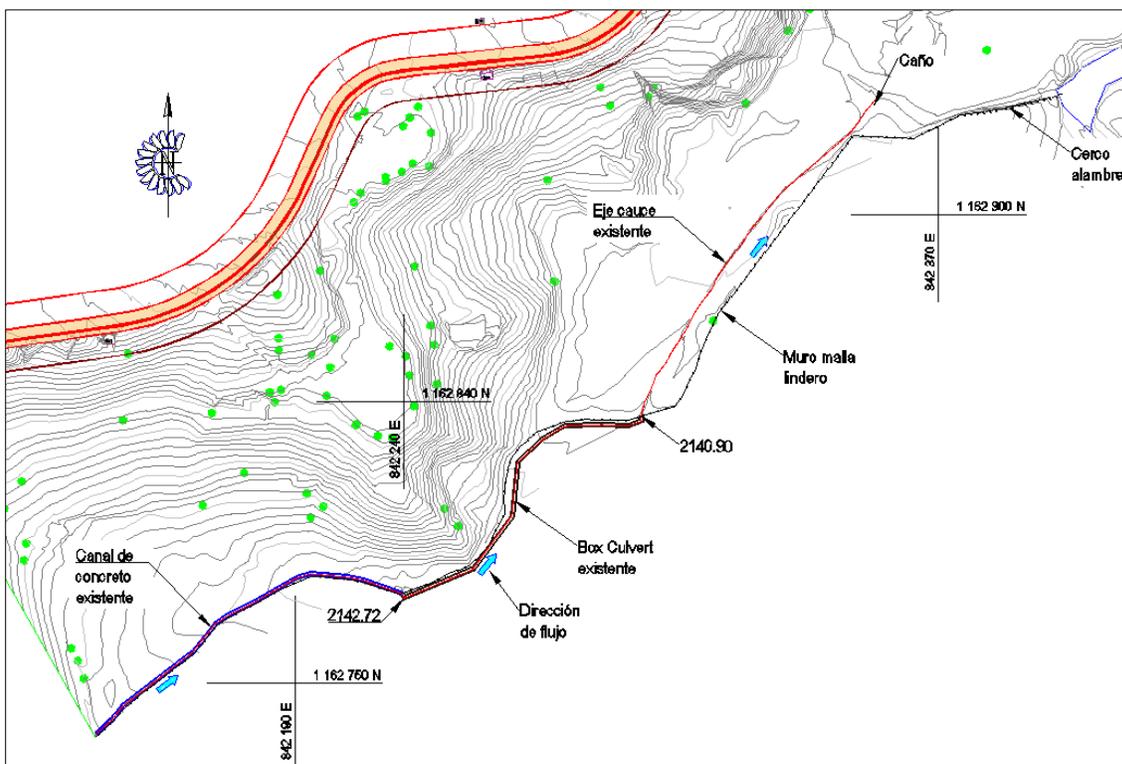


Figura 1. Ubicación del box culvert asociado al caño de estudio

IV. METODOLOGÍA

En la presente sección se detalla minuciosamente, y en orden cronológico, el paso a paso de las actividades, procedimientos y consideraciones que conlleva la realización del pre-diseño de la obra hidráulica (box culvert) requerida en el proyecto de vivienda Ciudadela Di Terra.

Los caudales de crecientes asociados a períodos de retorno (T_r) de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años se determinarán por el método racional, debido a que el área de la subcuenca es menor a 2.5 km^2 y su uso ha dado buenos resultados. En primer lugar, se expondrá el procedimiento llevado a cabo para la realización del estudio hidrológico, posteriormente, se mostrará el procedimiento para el estudio hidráulico, y, por último, se hará referencia a la manera en la cual se mostrarán los resultados.

A. ESTUDIO HIDROLÓGICO

Un adecuado estudio hidrológico permite conocer los caudales máximos de avenida, esto, partiendo del conocimiento del régimen de lluvias máximas y la caracterización del territorio. El estudio hidrológico llevado a cabo para el caso en particular a tratar, constará de:

1. Delimitación de la subcuenca

En la delimitación de la subcuenca asociada al caño de estudio se utilizó las curvas de nivel del departamento de Antioquia en escala la 1:25000 del IGAC (IGAC, 2009-2013), el software Google Earth, programa informático que permite visualizar información geográfica (SIG) por medio de imágenes digitalizadas y el software ArcGIS 10.3.

El software ArcGIS delimita la subcuenca de forma automática, para lo que se procede a realizar las respectivas correcciones teniendo en cuenta la red de drenaje y el modelo digital del terreno.

2. Determinación de los parámetros morfométricos

Una vez se delimita la subcuenca, se procede a calcular los parámetros morfométricos, los cuales resultan de utilidad al momento de realizar la evaluación hidrológica. Los parámetros de interés son el área, el perímetro, la longitud del cauce principal, la longitud de la subcuenca, la pendiente del cauce principal, la cota máxima y mínima del cauce principal y de la subcuenca, entre otros. Dichos factores se calculan directamente en el software ArcGIS 10.3.

3. Cálculo del tiempo de concentración

Como se mencionó en la sección de marco teórico, el tiempo de concentración es el tiempo que tarda una gota de agua en llegar al sitio de interés desde el punto más alejado de la subcuenca. Este es uno de los parámetros más importantes en los modelos lluvia-escorrentía, debido a que la duración de la tormenta de diseño se define con base en este tiempo, y existen diversos métodos para su cálculo, obteniendo un resultado definitivo mediante el promedio de algunos de ellos.

4. Cálculo de la tormenta de diseño

Para el cálculo de la tormenta de diseño, se deben considerar algunos factores climáticos, tales como son la duración y la frecuencia de la lluvia, lo que permite calcular la intensidad correspondiente, con ayuda de la curva IDF asociada a la zona de interés.

En la zona cercana a la subcuenca se encuentra la estación pluviográfica El Retiro perteneciente a EPM, en la Tabla 8 se muestran su código, coordenadas y fecha de instalación.

Tabla 8. Estación pluviográfica aferente a la subcuenca del caño de estudio

CÓDIGO	NOMBRE	COORDENADAS ORIGEN BOGOTÁ		FECHA DE INSTALACIÓN	FUENTE
		ESTE	NORTE		
2308025	El Retiro	840610	1160790	06/10/1949	Hidrología de Antioquia

A partir de los datos de precipitación de la estación El Retiro, se tienen los siguientes valores de intensidad con la que se construye la curva IDF para los diferentes periodos de retorno.

Tabla 9. Valores de intensidad para diferentes periodos de retorno y tiempos de concentración

DURACIÓN (MIN)	PERIODO DE RETORNO - TR (AÑOS)					
	2.330	5	10	25	50	100
5	149.080	173.545	199.212	239.060	274.417	315.004
10	92.523	107.706	123.636	148.366	170.310	195.499
15	69.698	81.136	93.136	111.766	128.296	147.271
20	56.939	66.283	76.087	91.306	104.810	120.312
25	48.650	56.633	65.010	78.013	89.551	102.796
30	42.770	49.788	57.152	68.584	78.728	90.372
35	38.350	44.644	51.247	61.497	70.593	81.034
40	34.890	40.615	46.622	55.948	64.222	73.721
45	32.095	37.362	42.888	51.466	59.078	67.816
50	29.784	34.672	39.800	47.761	54.825	62.933
55	27.836	32.404	37.197	44.637	51.239	58.818
60	26.169	30.463	34.969	41.963	48.170	55.294

PERIODO DE RETORNO - TR (AÑOS)						
DURACIÓN (MIN)	2.330	5	10	25	50	100
65	24.723	28.780	33.037	39.645	45.508	52.239
70	23.455	27.304	31.342	37.612	43.174	49.560
75	22.333	25.998	29.843	35.812	41.109	47.189
80	21.332	24.832	28.505	34.207	39.266	45.073
85	20.432	23.785	27.303	32.764	37.610	43.172
90	19.618	22.838	26.215	31.459	36.112	41.453
95	18.878	21.976	25.227	30.273	34.750	39.890
100	18.202	21.189	24.323	29.188	33.505	38.461
105	17.581	20.466	23.493	28.193	32.362	37.149
110	17.009	19.800	22.729	27.275	31.309	35.940
115	16.479	19.184	22.021	26.426	30.334	34.821
120	15.988	18.612	21.364	25.638	29.430	33.782

De acuerdo al tiempo de concentración y diferentes períodos de retorno, se obtiene la intensidad de lluvia en la curva IDF de esta estación.

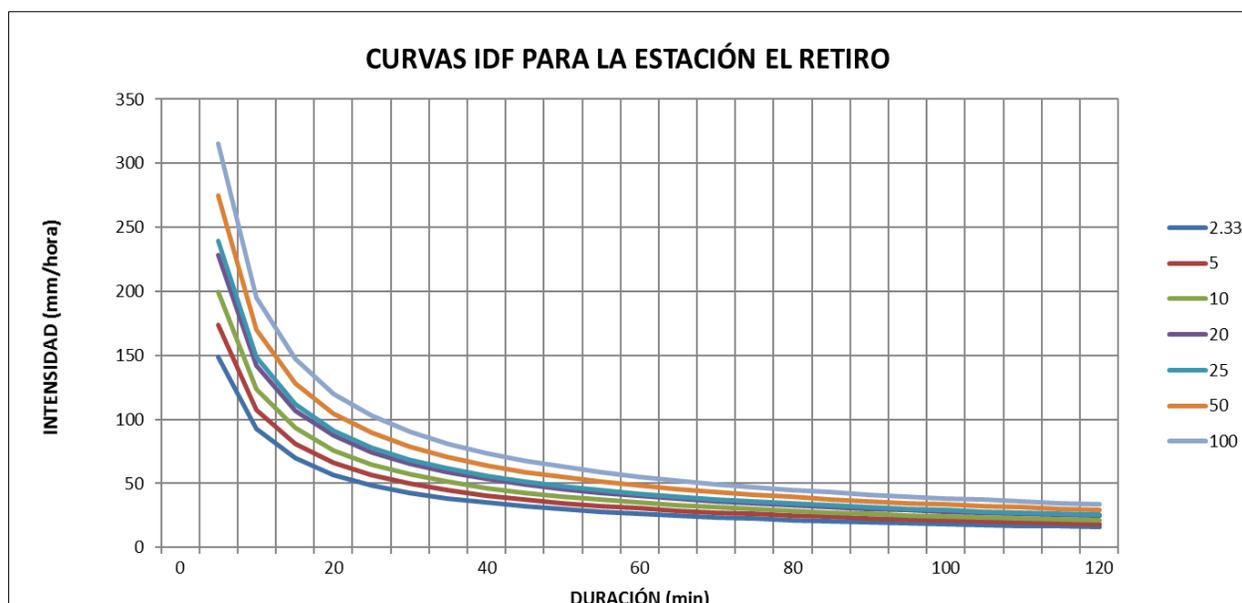


Figura 2. Curva IDF para la estación El Retiro

En la Tabla 10 se muestran las variables de la curva IDF pertenecientes a la estación El Retiro, con las que se calculará la intensidad mediante la Ecuación 12

Tabla 10. Variables asociadas a la estación pluviográfica

Variables para la curva IDF ESTACIÓN EL RETIRO	
c=	0.25
n=	0.713
m=	0.199
K	410.951

5. Cálculo del número de curva de escorrentía (CN)

Para realizar este cálculo, es necesario conocer de antemano la intensidad de las lluvias en el sitio de interés y la distribución de la lluvia en el tiempo asociada a la subcuenca de un tramo del caño de estudio.

6. Determinación de caudales máximos asociados a la subcuenca

Para determinar los caudales máximos asociados a la subcuenca, es común que se recurra al llamado “método racional”, el cual indica que, para llegar a dichas determinaciones, se requiere calcular el coeficiente de escorrentía y el coeficiente de escorrentía según el número de curva de escorrentía.

B. ESTUDIO HIDRÁULICO

Por su parte, el estudio hidráulico tiene como fin el determinar el comportamiento hidráulico de los cauces a su paso por la zona de estudio, de modo tal que se pueda comprobar la idoneidad de la sección del cauce o de una estructura a implementar en caso de avenida. El estudio hidráulico a realizarse durante el desarrollo de este proyecto, constará de:

1. Consideraciones topográficas

Para la modelación hidráulica de un tramo del caño, se realizó levantamiento topográfico altiplanimétrico de aproximadamente 308.00 m lineales de cauce natural actual.

2. Evaluación a condiciones existentes

Para realizar una evaluación hidráulica a condiciones reales de la fuente hídrica, se suele recurrir a la utilización de softwares desarrollados para facilitar esta tarea; en este caso se utilizó el programa HEC-RAS versión 4.1.0 desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers–Hydrologic Engineering Center, este software requiere como datos de entrada el régimen de flujo, las condiciones de borde, y el valor de rugosidad de Manning(n).

Con el fin de realizar la evaluación hidráulica de las condiciones reales de la fuente hídrica (que la situación modelada, represente las condiciones y evidencias del tránsito del flujo), se realiza la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning(n) y se evalúa el comportamiento de los caudales de diseño calculados en el estudio hidrológico y que los mismos representen el flujo de crecientes de la fuente hídrica.

3. Calibración del modelo hidráulico

La calibración del modelo se realiza con el fin de evaluar la capacidad del mismo para representar las condiciones actuales de la corriente que se analiza. Para esto, se verifican las alturas alcanzadas de la lámina o mancha de inundación.

4. Modelación hidráulica de un tramo del caño

Con el fin de evaluar su capacidad hidráulica, se analizan dos casos diferentes por medio de una modelación hidráulica. El primer caso consiste en una modelación hidráulica a condiciones actuales, y el segundo obedece a la condición a implementar, donde se analizan los posibles cambios generados en la dinámica de la corriente del flujo después de implementar la estructura (box culvert) para el encauzamiento de un tramo del caño.

Para llevar a cabo dicho modelo para los dos casos mencionados, se deben tener en cuenta diversas consideraciones que obedecen a factores tales como las consideraciones hidrológicas, las consideraciones topográficas y las condiciones hidráulicas, entre otros.

V. RESULTADOS

En esta sección se muestra, siguiendo el paso a paso detallado en la metodología, los resultados obtenidos para el pre-diseño y la modelación del box culvert en el proyecto Ciudadela Di Terra en el municipio de El Retiro.

A. ESTUDIO HIDROLÓGICO

1. Delimitación de las subcuencas

En las inmediaciones del proyecto Ciudadela Di Terra, se cuenta con la presencia de fuentes vivas que atraviesan el lote, por lo que se eligió uno de los caños presentes, al cual se le delimitó la subcuenca para posteriormente encontrar el caudal de diseño.

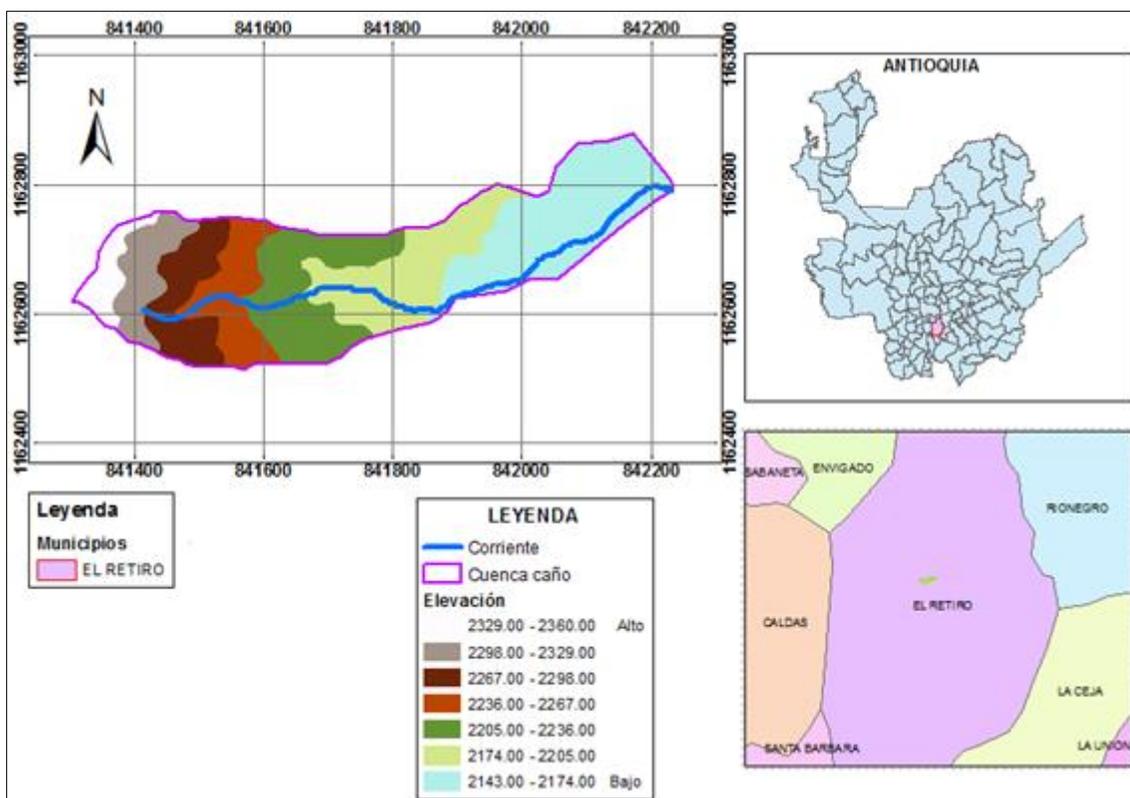


Figura 3. Subcuenca asociada a un tramo del Caño de estudio

2. Cálculo de los parámetros morfo-métricos

Las variables morfométricas de la subcuenca que se obtuvieron fueron el área, perímetro, longitud del cauce principal, longitud de la subcuenca, pendiente del cauce principal, cota máxima y mínima del cauce principal y de la subcuenca, entre otros.

En la Tabla 11 se muestran los parámetros morfométricos calculados mediante el software ArcGIS para el caño en estudio

Tabla 11. Parámetros morfo-métricos de la subcuenca en estudio

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Área de la subcuenca	153847.65	m ²
Longitud del cauce principal	0.94	km
Longitud de la subcuenca	0.94	km
Cota máxima de la subcuenca	2360	m.s.n.m.
Cota menor de la subcuenca	2143	m.s.n.m.
Cota mayor del cauce ppal	2297.36	m.s.n.m.
Pendiente del cauce principal	16.41	%
Ancho de la subcuenca	0.16	km
Diámetro de una subcuenca circular	0.28	millas

3. Cálculo del tiempo de concentración asociado a la subcuenca en estudio

Teniendo en cuenta la variabilidad que se puede presentar en el cálculo del tiempo de concentración mediante las ecuaciones descritas, se debe considerar un criterio apropiado para la selección de dicho parámetro, el INVIAS recomienda utilizar menores tiempos de concentración, desde el punto de vista de seguridad, por lo tanto, a la hora de determinar este valor se tendrá en cuenta el tiempo mínimo recomendado en el manual de drenaje INVIAS.

Para el cálculo del tiempo de concentración, se tomaron los valores que están resaltadas en color gris (Ver Tabla 12), a partir del promedio y la desviación estándar de todos los Tc hallados, con el fin de omitir los valores extremos.

Tabla 12. Tiempos de concentración (TC) asociado a la subcuenca estudiada

Método	Tc	
	H	Min
Williams	0.34	20.47
Témez	0.17	10.1
Kirpich	0.13	7.61
Johnstone and cross	0.70	42.27
Giandotti	0.30	17.99
V.T. Chow	0.47	28.08
Cuerpo de ing. Del ejército de los EU	0.38	22.61
Venture - Heras	0.17	10.17
Hathaway	0.58	34.85
S.C.S. Ranser	0.09	5.47
Federal Aviation Administration	0.44	26.46

Se realiza un promedio aritmético con los valores escogidos, a continuación, se muestran los tiempos de concentración para la subcuenca.

Tabla 13. Tiempos de concentración obtenidos para la subcuenca

Parámetro	Valor	
	H	Min
TC	0.36	21.34

4. Cálculo de la tormenta de diseño asociada al caño de estudio

Siguiendo los lineamientos descritos en la metodología, se determina los valores de intensidad en la subcuenca asociada al caño de estudio, A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los diferentes periodos de retorno.

Tabla 14. Resultados de intensidad obtenidos para los diferentes periodos de retorno

T (años)	i (mm/h)
2.33	54.394
5	63.321
10	72.686
25	87.225
50	100.126
100	114.935

Utilizando los resultados de la Tabla 14 y la Ecuación 13, encontramos la precipitación en el punto de estudio.

Tabla 15. Resultados de precipitación obtenidos para los diferentes periodos de retorno

T (años)	P (mm)
2.33	19.347
5	22.522
10	25.853
25	31.025
50	35.613
100	40.881

5. Cálculo del número de curva de escorrentía en los puntos de estudio

Para la estimación del CN de la subcuenca en estudio; se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Grupo hidrológico del suelo: De acuerdo a las características del suelo de la zona, éste se definió como un suelo Tipo B.
- Condición hidrológica del suelo: La subcuenca del caño en estudio, está conformada en su mayor parte por zonas de pastoreo y en menor medida por bosques
- Humedad antecedente del suelo: Se considera una condición AMC III.
- Distribución del área de acuerdo a los usos del suelo: Los porcentajes de usos del suelo de la subcuenca, son los siguientes:

Tabla 16. Distribución porcentual de los usos del suelo.

Uso del suelo	Porcentaje del área (%)
Bosque	10.24
Pastos	89.76
Total	100

La Figura 4 muestra las coberturas asociadas a la subcuenca del Caño de estudio, la cual fue tomada del mapa de coberturas del IGAC (plancha 147 IIID Escala 1:25000).

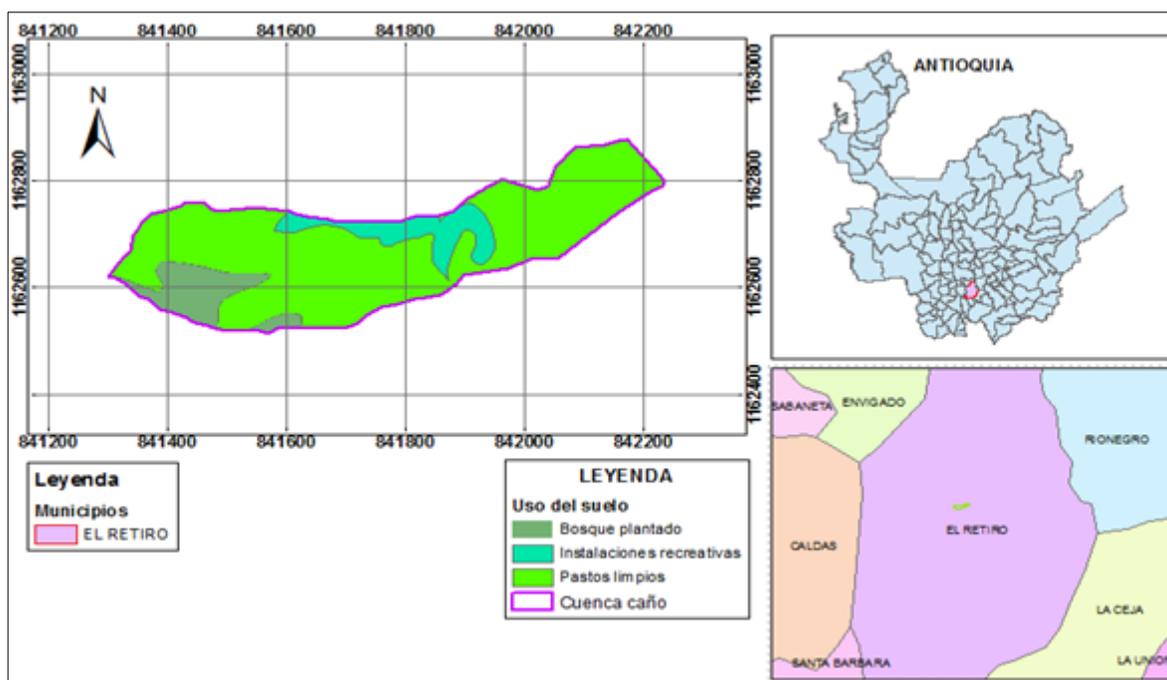


Figura 4. Coberturas asociadas a la subcuenca del caño en estudio

A partir de los porcentajes de área y los CN determinados para cada uso del suelo, se pondera el CN de la zona de estudio. El número de curva utilizado en la tabla para la ponderación se obtienen del INVIAS (ver Tabla 5). En la siguiente tabla se muestran los resultados de esta ponderación.

Tabla 17. CN ponderado a partir del uso del suelo.

Uso del suelo	Porcentaje del área (%)	Área (m ²)	CN III	A * CN
Bosques	10.244	15 760.847	78	1 229 346.057
Pastos	89.756	138 086.802	84	11 599 291.347
Total	100	153 847.649		12 828 637.404

Mediante la Ecuación 14, Ecuación 15 y Ecuación 16 se obtienen las siguientes variables, las cuales, posteriormente se tendrán en cuenta en el cálculo del caudal máximo.

Tabla 18. CN ponderado de la zona de estudio

Parámetro	Valor
CN	83.39
S	50.61
La	10.12

6. Determinación de los caudales máximos asociados a las subcuencas

En este estudio se aplicará este método utilizando dos modalidades en la obtención de los valores del coeficiente de escorrentía (C).

6.1. Obtención del coeficiente de escorrentía

El cálculo del coeficiente de escorrentía se obtiene ponderado, según los siguientes parámetros:

Tabla 19. Parámetros para calcular el coeficiente de escorrentía

ZONA DE ESTUDIO	CAÑO 1
Tipo de suelo	Permeable
Tipo de cobertura	Zona de bosques y pastos

La siguiente tabla muestra los coeficientes de escorrentía para la subcuenca por el método Racional del INVIAS, los coeficientes de escorrentía utilizados en la Tabla 20 para la ponderación se obtienen del INVIAS (ver Tabla 6 y Tabla 7)

Tabla 20. Coeficiente de escorrentía (C) ponderado para la subcuenca

Uso	Área [%]	Área [m ²]	C	A * C
Bosque	10.24	15 760.85	0.50	7 880.42
Pastos	89.76	138 086.80	0.42	57 996.46
Total	100.00	153 847.65		65 876.88

Mediante la Ecuación 18 se obtiene el C ponderado para la zona de estudio, obteniendo el siguiente resultado.

Tabla 21. C ponderado de la zona de estudio

Parámetro	Valor
C	0.43

Se debe tener en cuenta que el coeficiente de escorrentía C obtenido, es el mismo para cada uno de los periodos de retorno utilizados, por lo que únicamente es necesario un cálculo.

6.2. Coeficiente de escorrentía según el Número de Curva

El coeficiente de escorrentía CN, a diferencia del coeficiente de escorrentía C, se debe calcular para cada uno de los periodos de retorno utilizados, así que, mediante la Ecuación 19, y los resultados de **S** y **La** de la Tabla 18 obtenemos los coeficientes de escorrentía por el número de la curva CN.

Tabla 22. Coeficientes de escorrentía por el número de curva

PERIODO DE RETORNO TR (AÑOS)	COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA SEGÚN EL NÚMERO DE CURVA (CN III)
2.33	0.07
5	0.11
10	0.14
25	0.2
50	0.24
100	0.28

6.3. Caudales máximos

La siguiente tabla muestra los resultados de los caudales máximos hallados por el método Racional calculado por el número de curva CN (III) del INVIAS y por el coeficiente de escorrentía del INVIAS para cada periodo de retorno

Tabla 23. Caudales máximos obtenidos por el método racional para la subcuenca del caño en estudio

Periodo de retorno Tr (años)	Caudales Máximos (m3/s)	
	Con coeficientes de escorrentía (C)	Con coeficiente de escorrentía según el número de curva (CN)
2.33	0.995	0.171
5	1.159	0.293
10	1.330	0.448
25	1.596	0.734

Periodo de retorno Tr (años)	Caudales Máximos (m ³ /s)	
	Con coeficientes de escorrentía (C)	Con coeficiente de escorrentía según el número de curva (CN)
50	1.832	1.026
100	2.103	1.397

Para los caudales máximos de crecientes requeridos en el presente estudio, se escogieron los valores arrojados por el método Racional calculado por el número de la curva CN del INVIAS, ya que es el más adecuado para las condiciones de la subcuenca. Conociendo los caudales máximos, se procedió a realizar el prediseño del box culvert, las dimensiones utilizadas fueron las mismas del box culvert existente, 1 metro de altura por 0.90 de ancho.

B. ESTUDIO HIDRÁULICO

1. Consideraciones topográficas

Con ayuda de esta topografía se generaron 21 secciones transversales para la condición actual del caño, y de igual manera se generaron 23 secciones para la condición a implementar (Después de realizar el diseño del box culvert), además las secciones se ubicaron donde había mayor densidad de datos topográficos, con el fin de reducir el error causado por interpolaciones.

2. Evaluación hidráulica a condiciones existentes

El programa requiere, aparte de la información topográfica de la zona del proyecto y los caudales máximos de diseño (Ver Tabla 23), el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual se dispuso, según información recolectada en campo y bibliografía consultada.

Con base a la consulta bibliográfica para canales naturales se obtuvieron diferentes valores de rugosidad de Manning, los cuales fueron utilizados en la modelación hidráulica. La siguiente tabla presenta el resumen de los coeficientes de rugosidad de Manning utilizados:

Tabla 24. Coeficiente de rugosidad de Manning(n) utilizados en la modelación hidráulica para la condición actual y a implementar del caño

Descripción	n	Bibliografía
Canal de concreto	0.014	Literatura consultada en el libro de VEN TE CHOW
Box Culvert	0.014	<i>Literatura consultada en el libro de VEN TE CHOW</i>
Canal natural	0.038	<i>Literatura consultada en el libro de VEN TE CHOW</i>

La pendiente de la energía se aproximó a la pendiente longitudinal de los tramos a modelar, y esta se tomó como la diferencia entre las cotas más bajas de dos secciones transversales dividida entre su longitud.

En la siguiente tabla se presenta los resultados de las pendientes utilizadas en la modelación para la condición actual y a implementar.

Tabla 25. Pendientes utilizadas en la modelación hidráulica en un tramo del caño

Condición	Pendiente (m/m)	
	Aguas arriba	Aguas abajo
Actual	0.0280	0.0182
Implementar	0.0278	0.0164

Una vez ingresado el coeficiente de rugosidad de Manning para cada una de las secciones transversales en las que fue dividido el tramo del caño a evaluar, ingresado los valores de caudales de diseño para diferentes períodos de retorno, y las pendientes para el flujo del cauce, se procede a realizar la modelación hidráulica, bajo la hipótesis de flujo uniforme en régimen mixto para la condición actual, obteniendo los siguientes resultados.

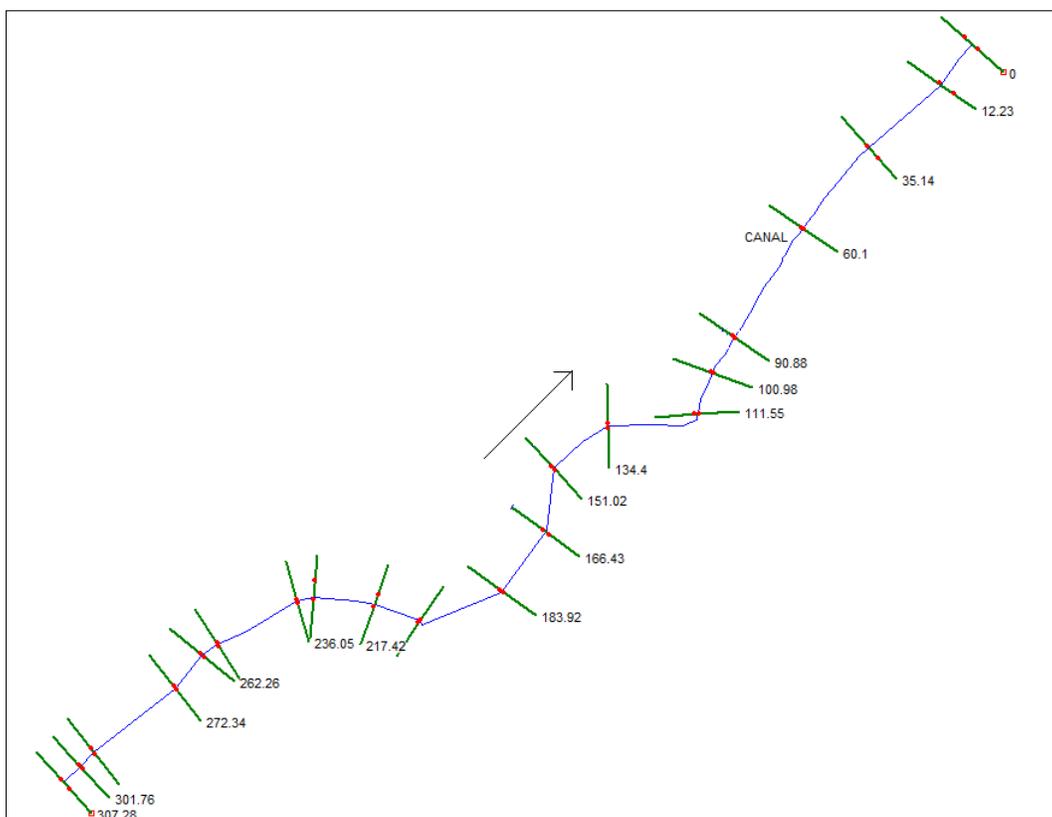


Figura 5. Vista en planta del cauce actual

La modelación hidráulica se realizó para los seis períodos de retorno, sin embargo, en este informe, para la condición actual, se van a presentar los resultados de la modelación hidráulica del caño para un período de retorno de 100 años por ser los más representativos.

Después de realizar la modelación hidráulica con las características propias del terreno, encontradas a partir del trabajo de campo y de oficina desarrollado en un tramo del Caño, se observa que en algunas de las secciones del tramo estudiado la mancha de inundación, para un período de retorno de 100 años, se sale de las márgenes del cauce, tal como se muestra en la Figura 6.

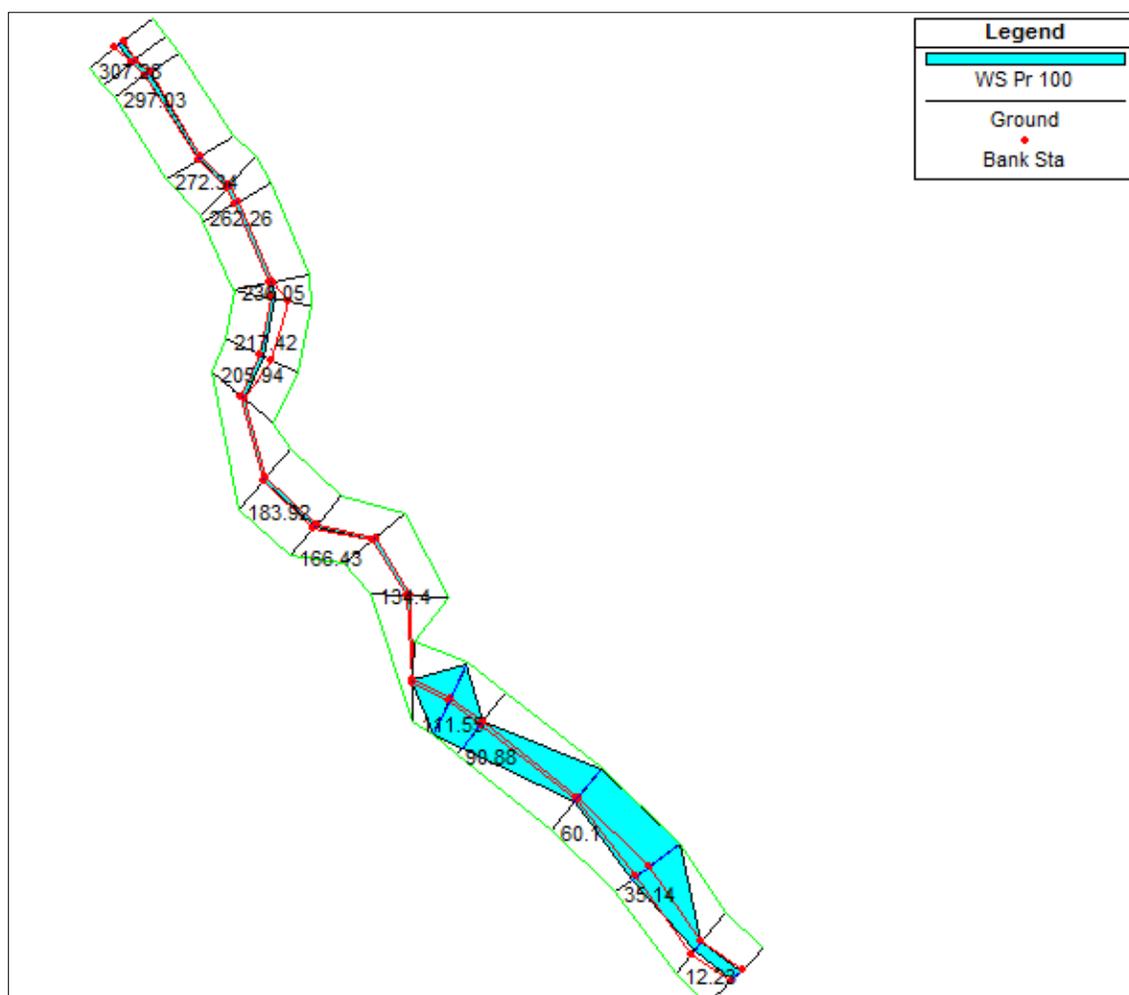


Figura 6. Esquema mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años del caño de estudio, para la condición actual, generado por el software HEC-RAS

A continuación, se analizarán las secciones 0+035.14, 0+060.10, 0+090.88 y la 100.98, dado que, según la Figura 6 en estas secciones son las que muestran la inundación. Las demás secciones se podrán visualizar en el Anexo 1.

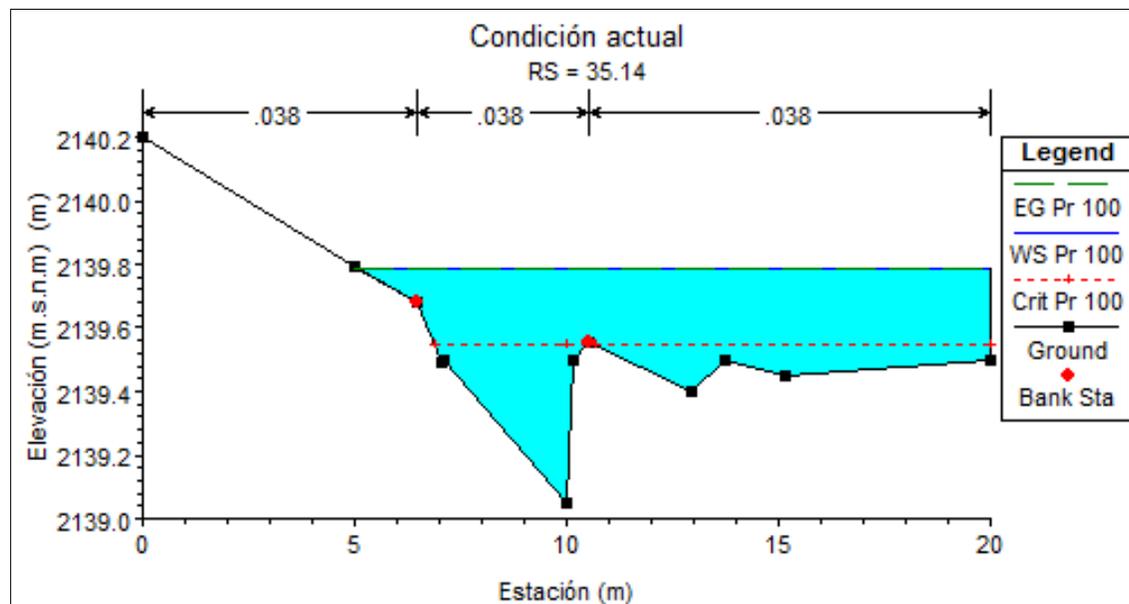


Figura 7. Sección transversal 0+035.14 (condición actual)

En la sección transversal 0+035.14, se evidencia la mayor inundación en todo el tramo del caño de estudio

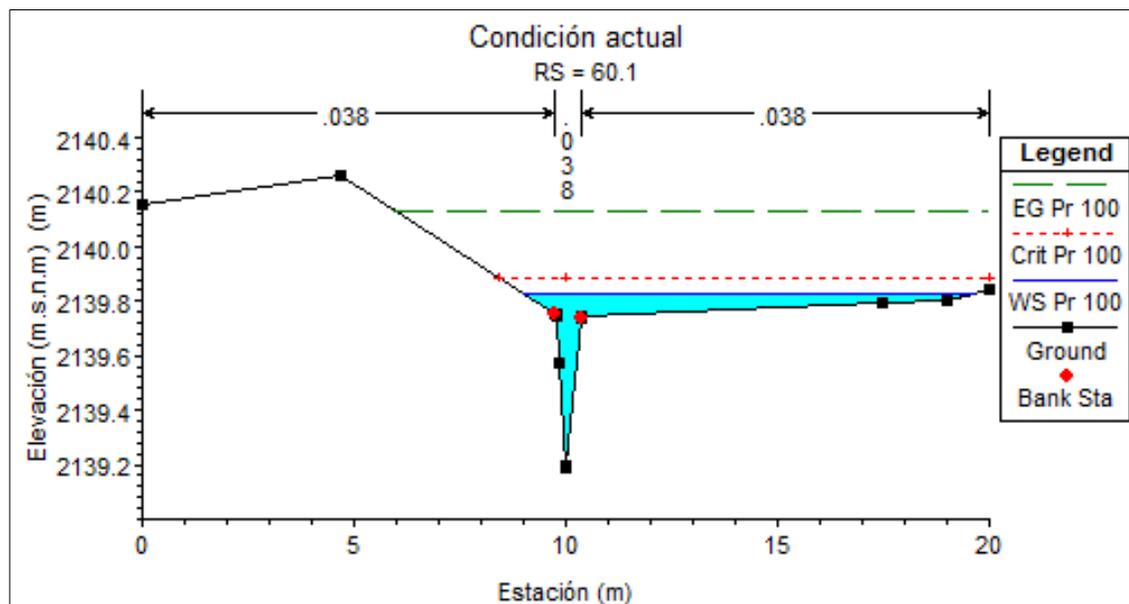


Figura 8. Sección transversal 0+060.10 (condición actual)

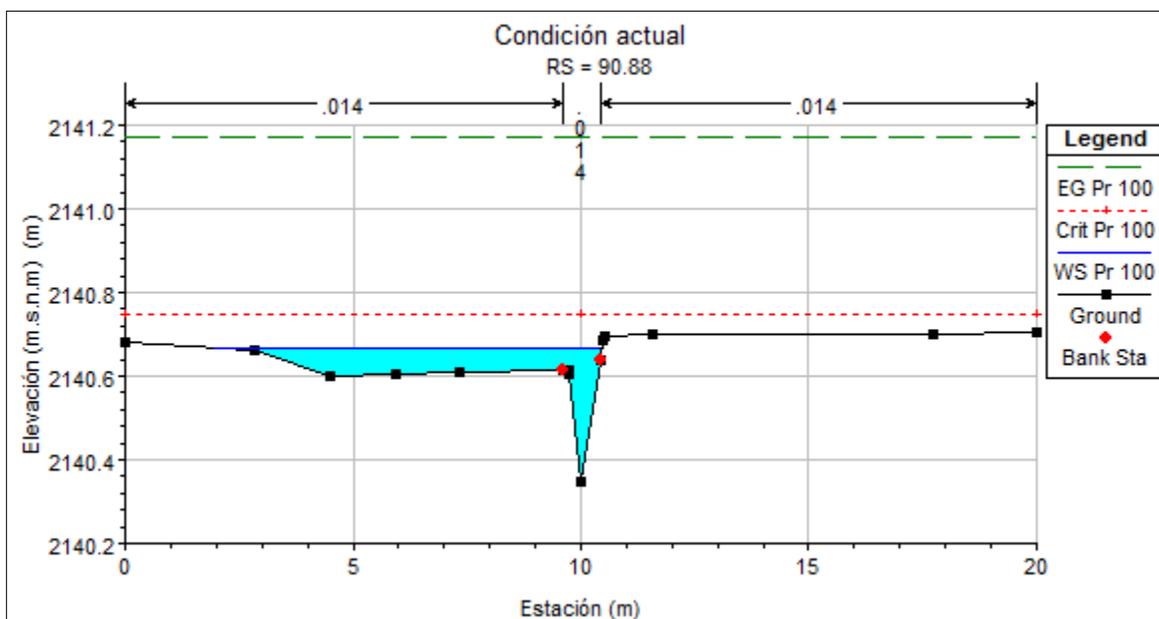


Figura 9. Sección transversal 0+090.88 (condición actual).

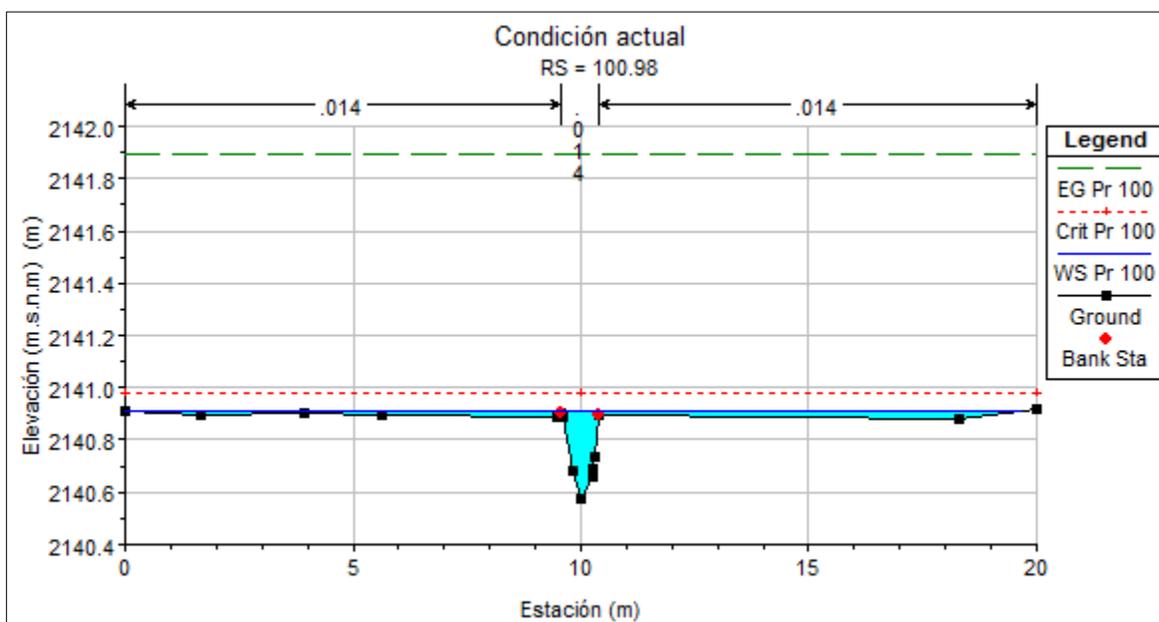


Figura 10. Sección transversal 0+100.88 (condición actual)

La Figura 11 muestra la vista en planta de la zona de análisis para la condición actual, se observa, la mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años y las secciones transversales de un tramo del Caño.

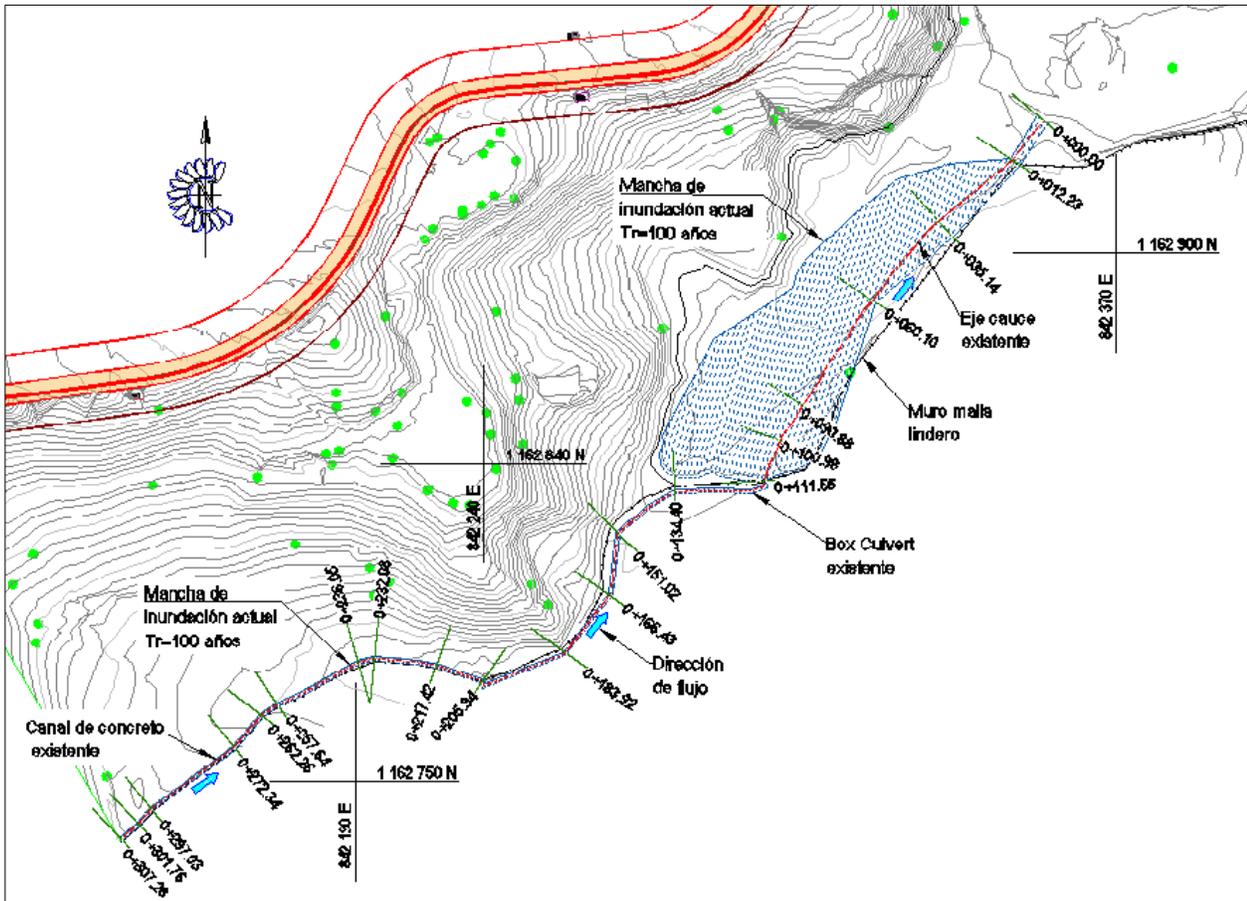


Figura 11. Mancha de inundación de un tramo del caño para un periodo de retorno de 100 años, condición actual. Generado por HEC-RAS

De acuerdo a la mancha de inundación que se presenta en la Figura 11 se puede decir, que en épocas de creciente se presenta desbordamiento sobre la margen izquierda del caño entre las secciones 0+100.98 y 0+035.14.

De las tablas de resultados entregados por el software para la modelación hidráulica de un tramo del caño, bajo la hipótesis de flujo uniforme en régimen mixto, presentada en el Anexo 2, se puede analizar lo siguiente:

- Los valores de velocidad máxima y mínima registrados por el software en el tramo en estudio son 5.30 m/s y 0.33 m/s respectivamente, de acuerdo al manual de drenaje INVIAS la velocidad máxima genera procesos de erosión y socavación y la mínima favorece los procesos de sedimentación.
- En general, los valores de número de Froude presentados (Ver Anexo 2), oscilan entre 3.67 y 0.16 para el tramo del caño en estudio, sin embargo, los números de Froude que predominan son mayores a la unidad (1), por tanto, se puede afirmar que el flujo

es supercrítico, la velocidad es relativamente alta, poca profundidad y prevalece la energía cinética

A continuación, se presentan la tabla de las alturas máximas de flujo condición actual.

Tabla 26. Cotas de nivel de flujo y máxima altura de flujo para un tramo del caño en estudio, para un periodo de retorno de 100 años en condición actual.

Sección	Cota de inundación actual Tr = 100 años (m.s.n.m)	Altura máxima de flujo (m)	Sección	Cota de inundación actual Tr = 100 años (m.s.n.m)	Altura máxima de flujo (m)
0+000.00	2139.05	0.33	0+205.94	2143.34	0.62
0+012.23	2139.61	0.63	0+217.42	2143.24	0.41
0+035.14	2139.79	0.76	0+232.08	2143.28	0.27
0+060.10	2139.83	0.68	0+236.05	2143.44	0.31
0+090.88	2140.67	0.4	0+257.64	2144.29	0.33
0+100.88	2140.91	0.37	0+262.26	2144.57	0.32
0+111.55	2141.32	0.62	0+272.34	2145.12	0.34
0+134.40	2141.79	0.41	0+297.03	2146.00	0.29
0+151.02	2142.11	0.41	0+301.76	2146.20	0.39
0+166.43	2142.40	0.42	0+307.28	2146.31	0.28
0+183.92	2142.74	0.43			

3. Evaluación a condición a implementar

Se procede a utilizar el programa HEC-RAS versión 4.1.0, para realizar el análisis computacional y numérico del viaje del flujo en el tramo a modelar del caño en la condición a implementar. Es importante tener en cuenta que en la modelación hidráulica para la condición a implementar se utilizaron los mismos valores de caudales máximos que en la condición actual.

Se debe aclarar que, aunque se realizó la modelación hidráulica para los seis periodos de retorno, en este informe para la condición a implementar se van a presentar los resultados de la modelación hidráulica de un tramo del caño en estudio para un periodo de retorno de 100 años.

Resulta obvio decir, que si para esta condición de caudal (100 años), el tramo del canal natural estudiado, presenta capacidad hidráulica suficiente, con mayor razón un caudal menor propiciará mejores condiciones en cuanto a capacidad hidráulica se refiere.

En la siguiente figura se muestra el tramo de la fuente viva de estudio en inmediaciones del proyecto Ciudadela Di Terra.

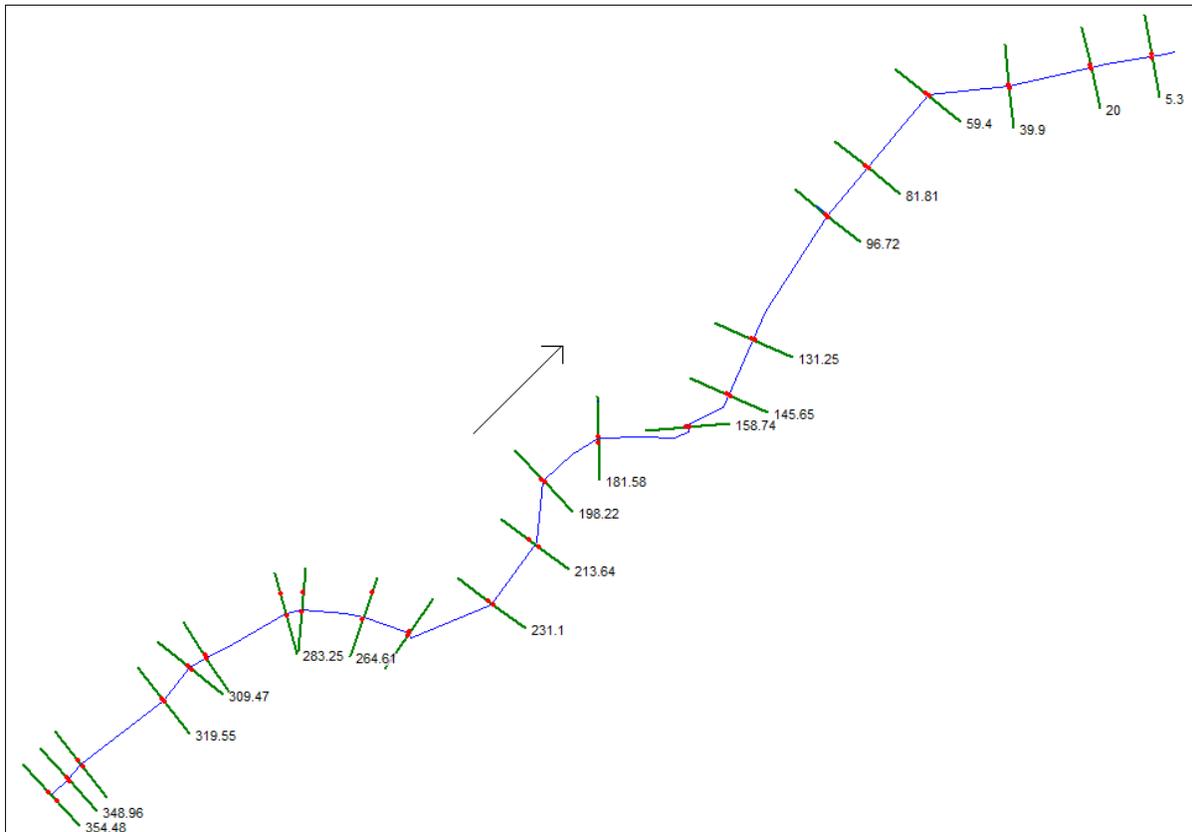


Figura 12. Vista en planta del cauce a implementar

En la Figura 13 se presenta el tramo del caño para la condición a implementar, en dicha imagen se puede observar la mancha de inundación después de la implementación del box culvert, para un periodo de retorno de 100 años.

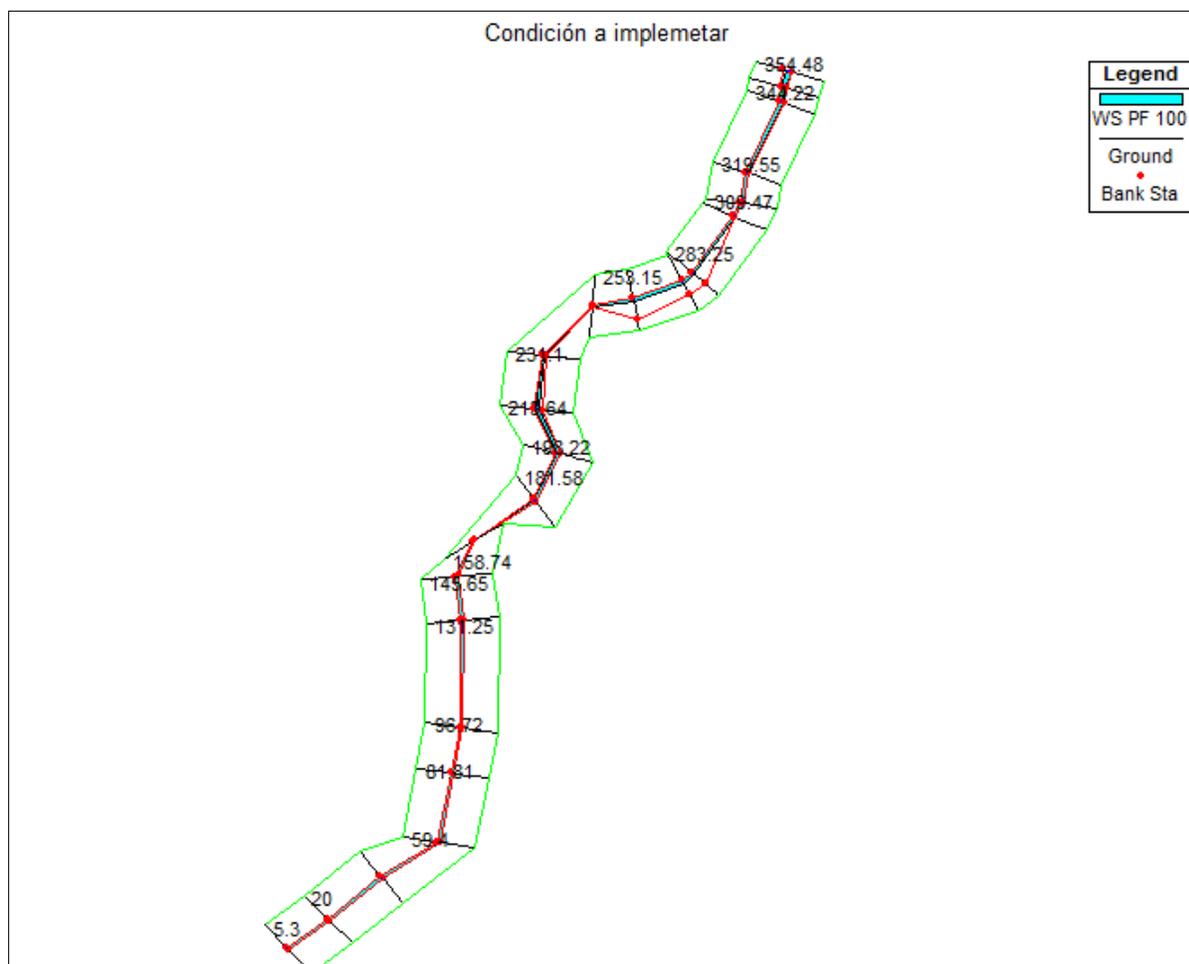


Figura 13. Esquema mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años del caño de estudio en condición a implementar, generado por el software HEC-RAS

En la segunda modelación hidráulica, como se había mencionado anteriormente se proyectaron unas obras hidráulicas (box culvert) en un tramo del caño en estudio, entre las secciones transversales 0+158.74 y 0+005.30.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por el HEC-RAS 4.1.0 para la nueva modelación hidráulica. Para poder analizar los resultados de la mejor manera, se presentan las secciones más representativas donde estarán ubicadas las obras hidráulicas a implementar. El resto de secciones analizadas se presentan en el Anexo 1 y plano adjunto.

Es importante notar que las dimensiones de los box culverts (implementar y existente) ocasionan que éstos se comporten como un canal abierto y, por tanto, la modelación en el HEC-RAS se realizó mediante la modificación del terreno.

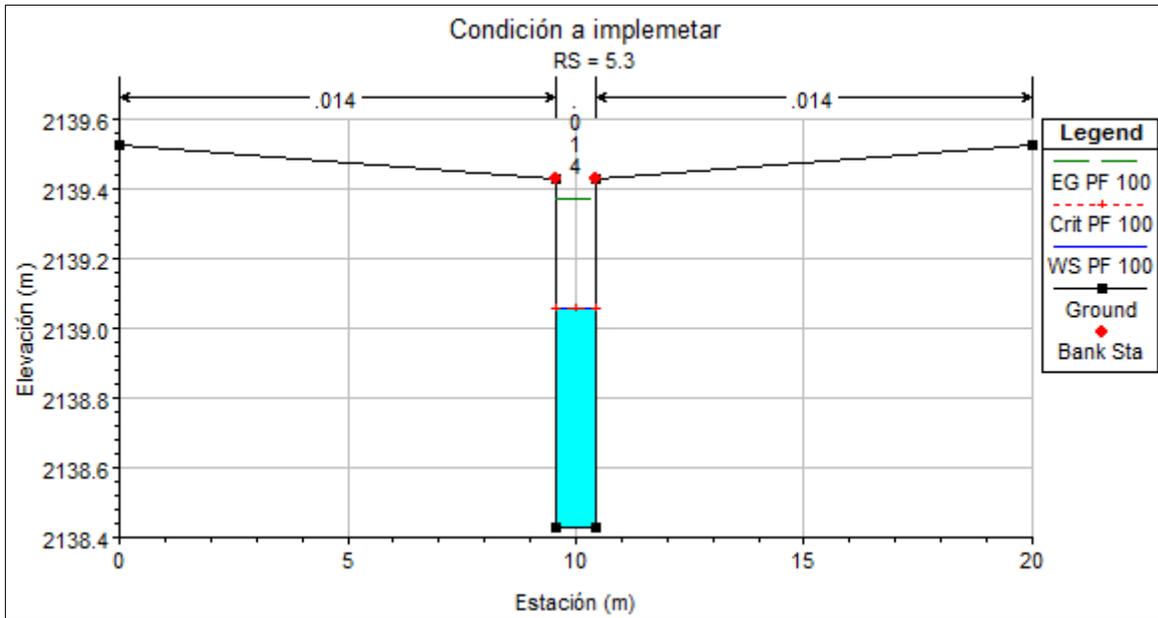


Figura 14. Sección transversal 0+000.00, salida del box culvert a implementar (condición a implementar)

En la Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17 se presentan algunas secciones transversales del box culvert a implementar y una sección transversal del box culvert ya existente.

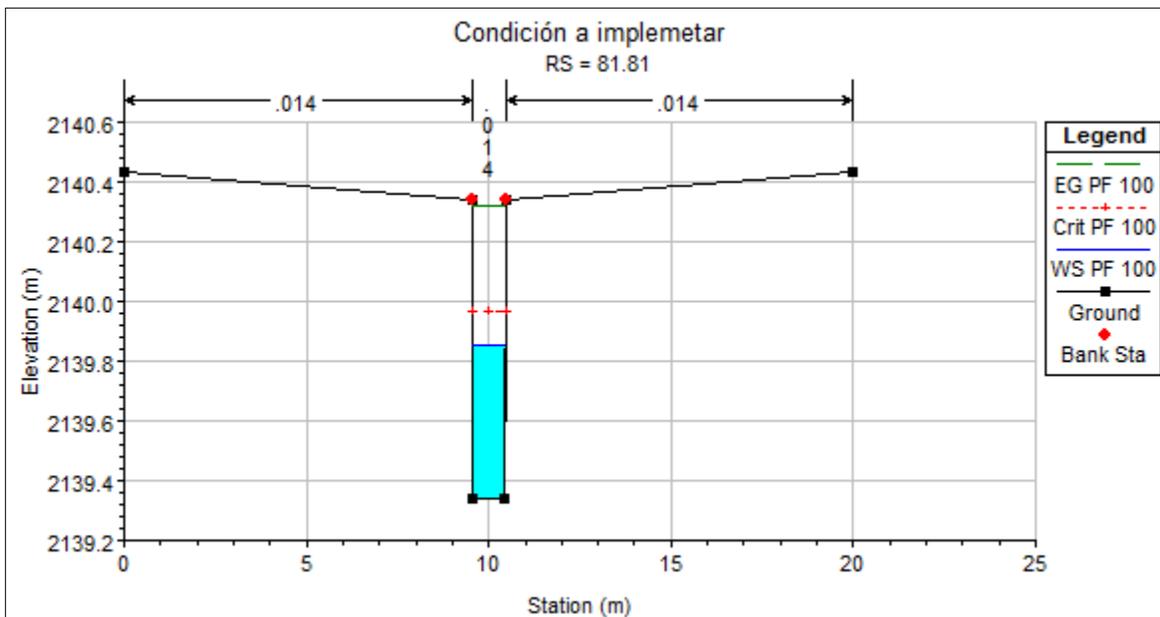


Figura 15. Sección transversal 0+081.81, box culvert a implementar (condición a implementar)

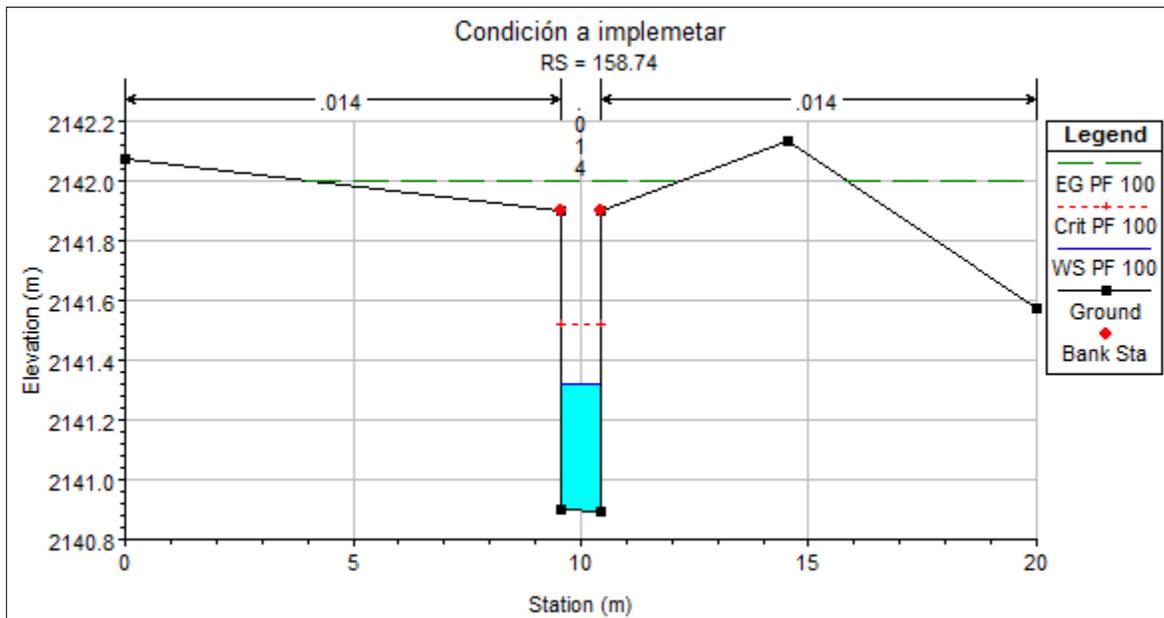


Figura 16. Sección transversal 0+158.74, inicio del box culvert a implementar (condición a implementar)

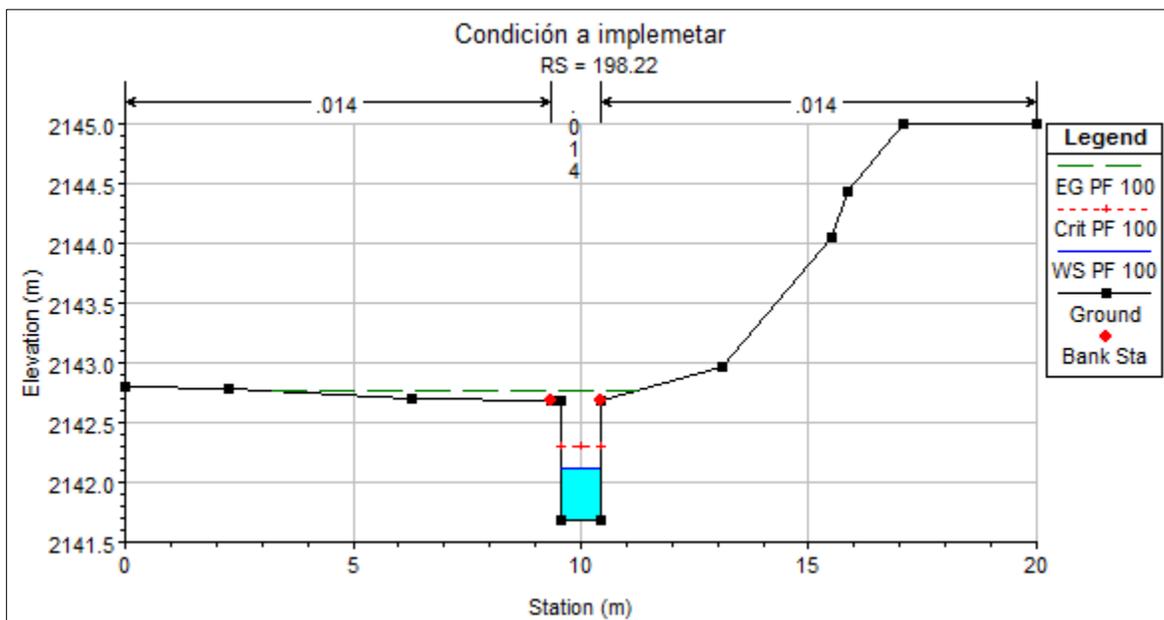


Figura 17. Sección transversal 0+198.22, box culvert existente aguas arriba (condición a implementar)

La Figura 18 muestra la vista en planta de la zona de análisis para la condición a implementar. Donde se observa, la mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años y la obra hidráulica a implementar (box culvert).

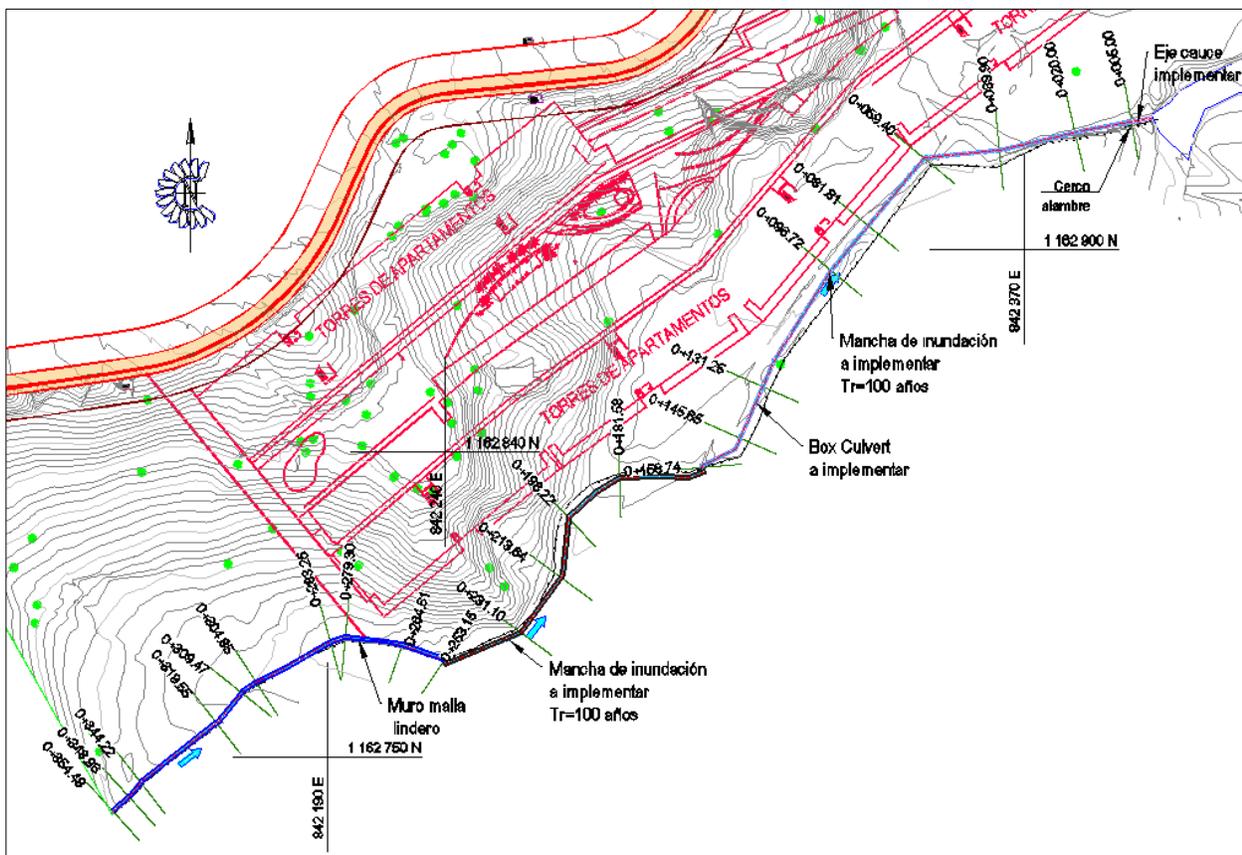


Figura 18. Mancha de inundación de un tramo del caño en estudio para un periodo de retorno de 100 años, condición a implementar. Generado por HEC-RAS

De las tablas de resultados entregados por el software para la modelación hidráulica del tramo del caño de estudio, bajo la hipótesis de flujo uniforme en régimen mixto, presentada en el Anexo 2, se puede analizar lo siguiente:

- Los valores de velocidad máxima y mínima registrados por el software en el tramo en estudio son 4.92 m/s y 2.49 m/s respectivamente. de acuerdo al manual de drenaje INVIAS la velocidad máxima NO genera procesos de erosión y socavación y la mínima no favorece los procesos de sedimentación en los tramos donde se encuentra el box culvert existente y el box culvert a implementar.
- En general, los valores de número de Froude presentados (Ver Anexo 2), oscilan entre 2.87 y 1.01 para el caño de estudio, por tanto, se puede afirmar que el flujo es supercrítico.

De acuerdo a lo analizado a partir de la modelación hidráulica realizada mediante el uso del software HEC-RAS versión 4.1.0, se puede avalar la implementación del box culvert en el caño, dado que no se generará afectación a los predios cercanos al mismo.

A continuación, se presenta la tabla de las alturas máximas de flujo condición a implementar.

Tabla 27. Cotas de nivel de flujo y máxima altura de flujo para un tramo del caño de estudio, para un periodo de retorno de 100 años, para la condición a implementar

Sección	Cota de inundación a implementar Tr = 100 años (m.s.n.m)	Altura máxima de flujo (m)	Sección	Cota de inundación a implementar Tr = 100 años (m.s.n.m)	Altura máxima de flujo (m)
0+005.30	2139.06	0.62	0+213.64	2142.40	0.43
0+020.00	2138.99	0.47	0+231.10	2142.74	0.44
0+039.90	2139.45	0.60	0+253.15	2143.34	0.62
0+059.40	2139.54	0.50	0+264.61	2143.24	0.41
0+081.81	2139.85	0.51	0+279.30	2143.29	0.28
0+096.72	2139.99	0.47	0+283.25	2143.44	0.31
0+131.25	2140.48	0.38	0+304.85	2144.29	0.33
0+145.65	2140.92	0.40	0+309.47	2144.54	0.30
0+158.74	2141.32	0.43	0+319.55	2145.12	0.34
0+181.58	2141.79	0.43	0+344.22	2146.02	0.32
0+198.22	2142.11	0.43	0+348.96	2146.19	0.38
			0+354.48	2146.33	0.30

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos por las diversas metodologías utilizadas para el cálculo del caudal de crecientes para diferentes períodos de retorno de la subcuenca del caño de estudio, que linda con el proyecto Citadela Di Terra en el Municipio de El Retiro - Antioquia, se puede concluir:

- Que los caudales máximos de creciente calculados por medio del método racional, mediante la utilización del número de curva CN (III), avalan y conllevan un correcto desempeño para el diseño a implementar.

Del análisis de la información hidráulica se puede concluir lo siguiente:

- Después del estudio realizado, se demuestra que la continuidad y extensión del box culvert existente resulta viable.
- Teniendo en cuenta las dimensiones establecidas para dar continuidad al box culvert existente, y después de realizar la debida modelación hidráulica en condiciones actuales, se corrobora que el pre diseño para la continuidad del box culvert existente cumple con los parámetros mínimos de diseño, al no exceder su máxima capacidad hidráulica ni la máxima establecida por el INVIAS.
- Luego de realizar la modelación hidráulica en condiciones a implementar, y teniendo en cuenta los valores de altura de flujo y caudal de diseño, se puede concluir que el pre diseño para el box culvert cumple también con los parámetros mínimos de diseño, al no exceder su capacidad hidráulica máxima ni la máxima establecida por el INVIAS.
- Basados en el manual de drenaje INVIAS, y después de haber obtenido valores propios del pre diseño para la velocidad máxima y mínima en el tramo estudiado, se puede concluir que dichas velocidades no generan procesos de erosión o socavación, así como tampoco generan procesos de sedimentación en los tramos donde se encuentra el box culvert existente y el que obedece a su continuidad o ampliación.
- Teniendo en cuenta los valores obtenidos para el número de Froude, se puede concluir, dada la clasificación de flujos dependientes de este valor, como un flujo supercrítico, en el cual prevalece la energía cinética por sobre la gravitacional.

VII. REFERENCIAS

- [1]. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2004). *Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia*. Bogotá, Colombia. Disponible en: <https://bit.ly/2CwkES1>
- [2]. Diario La República. (2018). *Aguas Lluvias: El reto de las ciudades de hoy*. Bogotá, Colombia. Disponible en: <https://bit.ly/37230IO>
- [3]. Alcaldía de El Retiro. (2016): *Plan de desarrollo municipal: El Retiro 2016-2019*. El Retiro-Antioquia, Colombia. Disponible en: <https://bit.ly/2sMibS9>
- [4]. Empresas Públicas de Medellín. E. S. P. "Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín. E. S. P. Medellín, Colombia. Disponible en <https://bit.ly/2QIsxBD>
- [5]. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS". Título D. Bogotá, Colombia. Disponible en <https://bit.ly/36gWqHR>
- [6]. Ministerio de transporte. Instituto nacional de vías. (2009): *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá, Colombia. Disponible en: <https://bit.ly/2HwT4Xw>
- [7] Chow, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill, New York, Estados Unidos
- [8] Soil Conservation Service SCS (1972). National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology, US Department of Agriculture. Washington DC
- [9]. German Monsalve Sáenz (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia
- [10]. Chow Ven Te (1994). *Hidráulica de los canales abiertos*. Editorial Diana. México