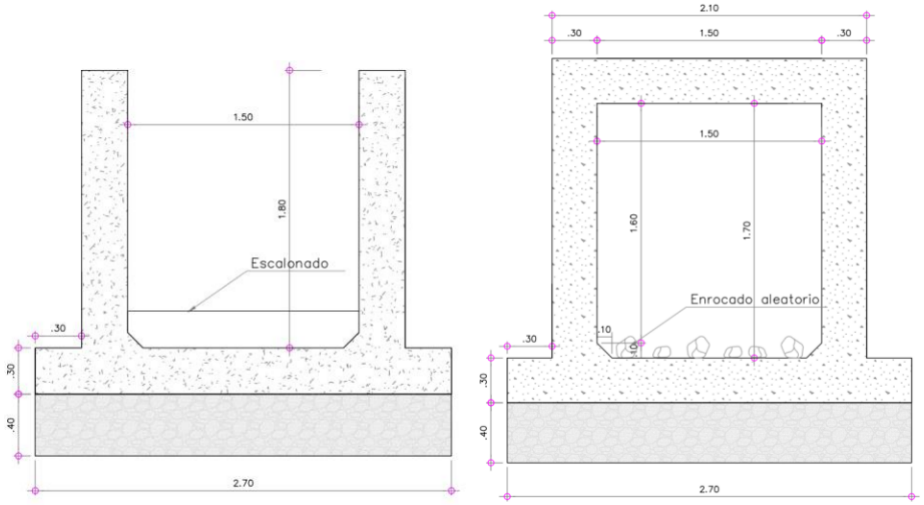
Estudio hidrológico e hidráulico de la obra con objeto contractual "CONTRATACIÓN QUE TIENE COMO OBJETO LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS QUEBRADA SAN JOSÉ, EN CONCORDANCIA CON EL CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CONTI-SI-025-2025, CELEBRADO ENTRE EN MUNICIPIO DE YARUMAL Y EDENORTE"



Marzo de 2026

MUNICIPIO DE YARUMAL

Diseñado por:

John Fredy Quintero Hernández
Ingeniero civil
MP 05202-316830 ANT.

PRODUCTO:

"REALIZACIÓN DE ESTUDIOS Y ANÁLISIS TÉCNICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TRAMO DE CANALIZACIÓN POR MEDIO DE CANAL ABIERTO Y BOX CULVERT ENTRE LAS CARRERAS 19 Y 23, ASÍ COMO LA COMPROBACIÓN DE OBRAS EXISTENTES EN LA QUEBRADA SAN JOSÉ DEL MUNICIPIO DE YARUMAL, ANTIOQUIA".

Control de versiones

Versión	Fecha	Descripción de Modificaciones	Folios
V0		Primera Emisión	

MUNICIPIO DE YARUMAL ANTIOQUIA

REALIZADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR
Formato: Carta		Folios:

TABLA DE CONTENIDO

1. CONTEXTO DEL PROYECTO 10
2. OBJETIVOS, ALCANCES Y METODOLOGÍA DE TRABAJO 11
2.1 OBJETIVO GENERAL 11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11
3. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS 13
3.1 INTRODUCCIÓN 13
3.2 CUENCA HIDROGRÁFICA 13
3.2.1 Localización 13
3.2.2 Cuencas hidrográficas de la quebrada San José 14
3.2.3 Tamaño de las cuencas 18
3.2.4 Índice de compacidad 19
3.2.5 Ancho medio (W) 20
3.2.6 Factor de forma (Kf) 20
3.2.7 Pendiente de las cuencas 22
3.3 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS 22
3.3.1 Estimación del tiempo de concentración 23
3.3.2 Intensidades de diseño y magnitud de la precipitación para diferentes periodos de retorno 29
3.3.2.1 Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) 32
3.4 CAUDALES MÁXIMOS 38
3.4.1 Método Racional 38
3.4.1.1 Coeficiente de escorrentía 39
3.4.1.2 Estimación de crecientes 44
3.5 CAUDAL MEDIO 46
3.6 CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO 47
4. MODELACIÓN HIDRÁULICA 50

4.1 INTRODUCCIÓN 50
4.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA 51
4.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS 51
4.4 EL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL FLUJO (MANNING) 53
4.5 CONDICIONES DE FRONTERA (“BOUNDARY CONDITIONS”) 58
4.6 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO 59
4.7 CONDICIONES DEL FLUJO PARA LOS CAUDALES SIMULADOS 61
4.7.1 Condiciones de flujo fuente SAN JOSÉ. 61
5. ÁNALISIS DE MODELACIONES EN HEC RAS 5.0.7 69
6. RESUMEN DE OBRAS A EJECUTAR 72
6.1 DESCRIPCIÓN DE OBRAS 72
6.2 OBRA PROVISIONAL 77
6.3 MEDIDAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL PARA LA ETAPA CONSTRUCTIVA 80
6.4 PROGRAMACIÓN DE OBRA 80
7. CAPACIDAD HIDRÁULICA 81
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 84
9. BIBLIOGRAFIA 86

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE LA OBRA PROYECTADA 14
TABLA 2. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ HASTA EL SITIO DE LA OBRA DE CANAL ABIERTO ... 17
TABLA 3. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ HASTA EL SITIO DE LA OBRA DE BOX CULVERT 17
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE TAMAÑO DE ACUERDO CON EL TAMAÑO DE LA CUENCA, EN KM^2 18
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE LA FORMA DE LAS CUENCAS SEGÚN SU COEFICIENTE DE COMPACIDAD 19
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE UNA CUENCA SEGÚN SU PORCENTAJE DE PENDIENTE 22
TABLA 7. ELECCIÓN DE TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE DISEÑO PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE LA OBRA DE CANAL ABIERTO 27
TABLA 8. ELECCIÓN DE TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE DISEÑO PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE LA OBRA DE BOX CULVERT 27
TABLA 9. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS CERCANAS A LAS CUENCAS DE ESTUDIO 30
TABLA 10. PARÁMETROS REGIONALES MÉTODO SIMPLIFICADO INVÍAS (VARGAS & DÍAZ-GRANADOS, 1998) 34
TABLA 11. REGISTRO DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA YARUMAL [27020190] 35
TABLA 12. ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA YARUMAL [27020190] – CURVA INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA (VALORES EN MM/H) 36
TABLA 13. INTENSIDADES DE DISEÑO MÉTODO SIMPLIFICADO INVÍAS PARA CANAL ABIERTO, CON DURACIÓN D=TC=22.86 MINUTOS 37
TABLA 14. INTENSIDADES DE DISEÑO MÉTODO SIMPLIFICADO INVÍAS PARA BOX CULVERT, CON DURACIÓN D=TC=26.23 MINUTOS 38
TABLA 15. VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PARA LA CUENCA DEL CANAL ABIERTO 41
TABLA 16. VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PARA LA CUENCA DEL BOX CULVERT 43
TABLA 17. CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PONDERADO SEGÚN EL USO DE SUELO PARA CADA PERIODO DE RETORNO, CUENCA SAN JOSÉ, CANAL ABIERTO 44

TABLA 18. CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PONDERADO SEGÚN EL USO DE SUELO PARA CADA PERIODO DE RETORNO, CUENCA SAN JOSÉ, BOX CULVERT 44
TABLA 19. CAUDALES DE CRECIENTE POR EL MÉTODO RACIONAL PARA LA CUENCA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL CANAL ABIERTO, EN M^3/S 45
TABLA 20. CAUDALES DE CRECIENTE POR EL MÉTODO RACIONAL PARA LA CUENCA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE BOX CULVERT, EN M^3/S .. 45
TABLA 21. CAUDAL MEDIO DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL CANALA ABIERTO 47
TABLA 22. CAUDAL MEDIO DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL BOX CULVERT 47
TABLA 23. CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO DE ACUERDO CON EL MES MÁS CRÍTICO DE PRECIPITACIÓN DE YARUMAL, ANTIOQUIA, CUENCA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL CANAL ABIERTO 48
TABLA 24. CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO DE ACUERDO CON EL MES MÁS CRÍTICO DE PRECIPITACIÓN DE YARUMAL, ANTIOQUIA, CUENCA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL BOX CULVERT 49
TABLA 25. VALORES DE RUGOSIDAD PARA LAS ZONAS NATURALES DE BANCAS Y LECHO DE LA QUEBRADA 54
TABLA 26. CAUDALES DE CRECIENTES SOBRE ESTRUCTURA HIDRÁULICA TIPO CANAL ABIERTO PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO EN M^3/S 60
TABLA 27. CAUDALES DE CRECIENTES SOBRE ESTRUCTURA HIDRÁULICA TIPO BOX CULVERT PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO EN M^3/S 60
TABLA 28. RESUMEN DE MODELACIÓN CANAL ABIERTO Q_{TR100}=10.05 M^3/S69
TABLA 29. RESUMEN DE MODELACIÓN BOX CULVERT Q_{TR100}=13.04 M^3/S .. 70
TABLA 30. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA CANAL ABIERTO75
TABLA 31. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA BOX CULVERT. 76
TABLA 32. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA PROVISIONAL (TUBERÍA Ø=24") 79
TABLA 33. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA PROVISIONAL (ATAGUÍA EN COSTALES RELLENOS) 80
TABLA 34. RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LA OBRA CANAL ABIERTO CON EL CAUDAL Q_{TR100}=10.05 M^3/S 82
TABLA 35. RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE BOX CULVERT CON EL CAUDAL Q_{TR100}=13.04 M^3/S 82
TABLA 36. RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE TUBERÍA PROVISIONAL CON EL CAUDAL Q_{MEDIO}=0.02245 M^3/S .. 83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CONTEXTUALIZACIÓN GRÁFICA DEL PROYECTO 10
FIGURA 2. CUENCAS DE DRENAJE TRIBUTARIO DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ DELIMITADAS HASTA LOS PUNTOS DE INTERÉS (CANAL Y BOX CULVERT) 16
FIGURA 3. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN OBTENIDOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE LA OBRA DE CANAL ABIERTO 28
FIGURA 4. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN OBTENIDOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE LA OBRA DE BOX CULVERT 29
FIGURA 5. POLÍGONOS DE THIESSEN SEGÚN LA INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DE LA ZONA DE INTERÉS CUENCA SAN JOSÉ 31
FIGURA 6. CURVAS IDF DE LA ESTACIÓN YARUMAL [27020190] 36
FIGURA 7. COBERTURAS DE SUELO PARA CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA DE LAS CUENCAS DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL CANAL ABIERTO Y EL BOX CULVERT 41
FIGURA 8. DATOS DE PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL DEL MUNICIPIO DE YARUMAL, ANTIOQUIA 46
FIGURA 9. CAUDALES DE INGRESO MODELACIÓN EN HEC RAS EN LA FUENTE SAN JOSÉ PARA MODELACIÓN DE CANAL ABIERTO 62
FIGURA 10. CAUDALES DE INGRESO MODELACIÓN EN HEC RAS EN LA FUENTE SAN JOSÉ PARA MODELACIÓN BOX CULVERT 62
FIGURA 11. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+045 REPRESENTANDO LECHO NATURAL AGUAS ABAJO DEL BOX CULVERT EXISTENTE Q_{TR100}=13.04 M^3/S 63
FIGURA 12. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+047.93 REPRESENTANDO SALIDA O DESCOLE DE BOX CULVERT EXISTENTE DE 1.20×1.70 M CON Q_{TR100}=13.04 M^3/S 64
FIGURA 13. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+180 (BOX CULVERT NUEVO SECCIÓN 1.20×1.70 M) EN LA MODELACIÓN HEC-RAS CON Q_{TR100}=13.04 M^3/S 65
FIGURA 14. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+389.67 REPRESENTANDO LA SALIDA O DESCOLE DE BOX CULVERT NUEVO DE 1.20×1.70 CON Q_{TR100}=13.04 M^3/S 66

FIGURA 15. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+430.69 REPRESENTANDO INICIO DE BOX CULVERT NUEVO DE 1.50×1.70 M CON Q_{TR100}=13.04 M^3/S 67

FIGURA 16. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+438 REPRESENTANDO CANAL ABIERTO DE SECCIÓN 1.50×1.80 M EN LA CON Q_{TR100}=10.05 M^3/S 68

FIGURA 17. CONDICIÓN EXISTENTE (AUSENCIA DE ALETA DERECHA EN SENTIDO DEL FLUJO) DESCOLE DE BOX CULVERT EN LA ABSCISA K0+047.93 72

FIGURA 18. ALETA PROYECTADA Y COMPLETACIÓN DE LOSA PARA MITIGAR LA SOCAVACIÓN LATERAL EN DESCOLE DE BOX CULVERT EXISTENTE (COLOR MAGENTA) 73

FIGURA 19. DISEÑO DE LLAVE VERTICAL DE CONFINAMIENTO PARA LA SOCAVACIÓN 73

FIGURA 20. VISTA EN PLANTA DEL DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS DE CANALIZACIÓN..... 74

FIGURA 21. IMPLEMENTACIÓN DE OBRA PROVISIONAL EN FUENTE “SAN JOSÉ” POR MEDIO DE TUBERÍA PROVISIONAL..... 78

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los temas de la hidrología e hidráulica juegan un papel muy importante en el planeamiento del uso de los Recursos Hidráulicos, y ha llegado a convertirse en parte fundamental de los proyectos de ingeniería que tienen que ver con suministro de agua, disposición de aguas servidas, drenaje, protección contra la acción de ríos y recreación, para así entender los mecanismos y procesos del ciclo hidrológico (reservorios y flujos) y su interacción con las diversas obras civiles a intervenir.

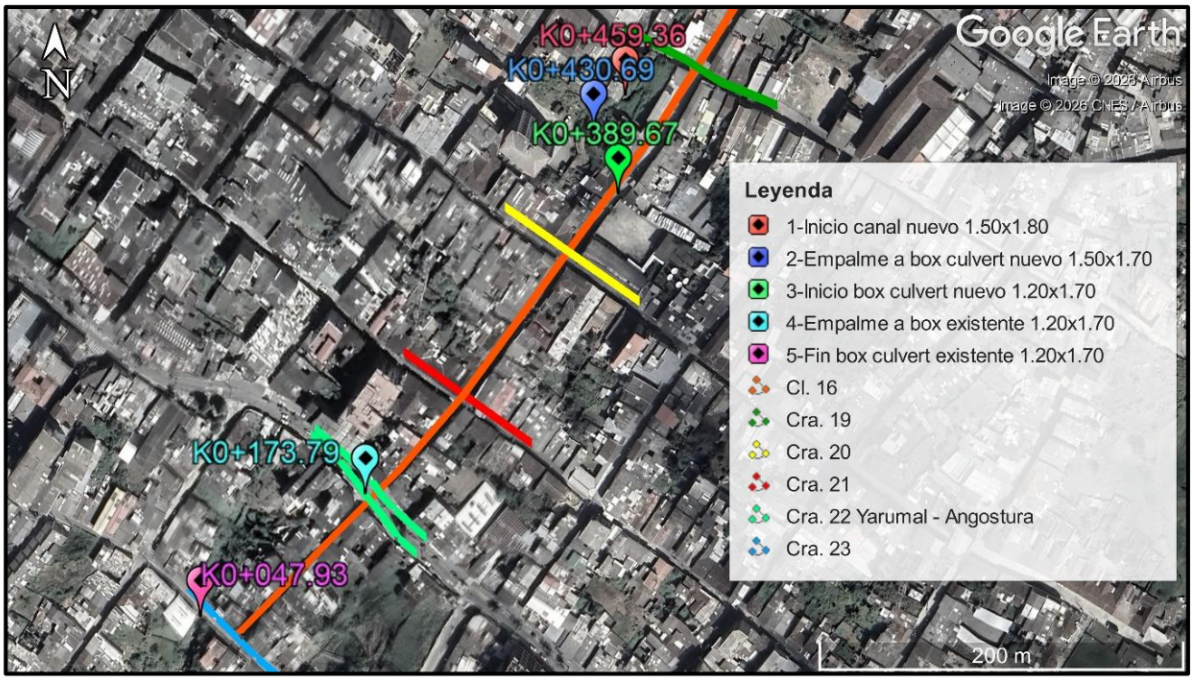
El alcance del presente estudio es, recopilar, revisar y analizar la información disponible tanto hidrológica como cartográfica de la zona. Igualmente, se revisará la información disponible en términos hidrológicos, climáticos y se adelantará el levantamiento topográfico del afluente “San José” del municipio de Yarumal – Antioquia, con el propósito de ubicar la estructura hidráulica de canalización que será objeto de diseño.

Finalmente, los productos resultantes de las actividades desarrolladas durante la ejecución de este estudio son, un informe hidrológico e hidráulico describiendo los diseños de la obra.

1. CONTEXTO DEL PROYECTO

En la zona urbana del municipio de Yarumal, Antioquia, se proyecta continuar una obra hidráulica de canalización de la quebrada “San José” por medio de un tramo de canal abierto de sección 1.50x1.80 m, en un predio entre las calles 16 y 17 y las carreras 19 y 20, el cual empalma con un box culvert o canal cerrado nuevo de sección 1.50x1.70, que baja por la calle 16 desde mediados de la carrera 19 y 20 hasta la carrera 22, en donde conecta con un box culvert existente de 1.20x1.70 (se proyecta una transición gradual de reducción de sección como se describe más adelante). Por consiguiente, teniendo en cuenta la longitud total de la obra de canalización a ejecutar, se toma la determinación en base a criterio de diseño ingenieril de hacer dos estudios diferentes de hidrología e hidráulica, uno de ellos correspondiente al inicio del canal abierto, y el segundo, al punto fin del box culvert existente de 1.20x1.70 aguas abajo. Por lo anteriormente descrito, es necesario realizar la entrega de los estudios y diseños ante la Corporación Ambiental “CORANTIOQUIA” que tiene como jurisdicción al municipio de Yarumal, con el fin de ser evaluadas. Más información se detallará en el apartado “resumen de obras a ejecutar”.

FIGURA 1. CONTEXTUALIZACIÓN GRÁFICA DEL PROYECTO



2. OBJETIVOS, ALCANCES Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

En este documento se presentan los estudios hidrológicos y modelación hidráulica de una estructura hidráulica de canalización sobre la quebrada San José. Para los estudios hidrológicos se contó con los datos proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). En este sentido, el IDEAM cuenta con algunas curvas IDF construidas a partir de los datos de precipitación de la zona de estudio. No obstante, para las estaciones que no cuentan con las curvas IDF oficiales, suministra los registros de precipitación para la construcción de estas. Tal es el caso de la estación meteorológica de Yarumal [27020190], cuyas intensidades que se desprenden de dicha curva serán el insumo para conocer los caudales de diseño.

Para los estudios de niveles de inundación de la fuente “San José”, se realizó el levantamiento topográfico de la zona de inundación de dicho afluente, tanto aguas arriba como aguas abajo de la estructura en consideración, y con base en los estimativos de crecientes con diferentes períodos de retorno, se calcularon los niveles de inundación asociados a caudales máximos con períodos de recurrencia de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, utilizando el modelo HEC-RAS, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center de los Estados Unidos. Los diseños de la estructura hidráulica de canalización en este sitio se adelantaron teniendo en consideración los niveles de inundación asociados a la creciente de diseño, con período de recurrencia de 100 años.

Como herramientas proporcionadas por el presente estudio, los datos obtenidos se resumen en tablas generales y específicas, además se presentan mapas y esquemas cartográficos. Al final se presentan las conclusiones y recomendaciones con respecto al tema central del presente estudio.

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar los pertinentes estudios hidrológicos y modelación hidráulica para una estructura hidráulica de canalización sobre la fuente San José, ubicada en la zona urbana del municipio de Yarumal (Antioquia).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los caudales máximos para el afluente “San José”, en los sitios de las estructuras hidráulica de canalización.
- Modelar el comportamiento hidráulico de la fuente cuando se presenta la creciente de diseño con base en los caudales máximos instantáneos.
- Determinar los niveles que alcanzaría la creciente de diseño de esta quebrada, con período de retorno de 100 años, para conocer las condiciones de flujo y determinar la capacidad hidráulica de las estructuras.

- Relacionar la información de la modelación hidráulica para evaluar el diseño de la obra en materia de socavación.
- Evaluar el diseño estructural de la obra, de acuerdo con la necesidad identificada.

3. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En este numeral se presenta el estudio hidrológico de la quebrada “San José” en dos puntos diferentes, uno para el diseño del canal abierto y el otro para el box culvert, con el fin de estimar los caudales máximos instantáneos.

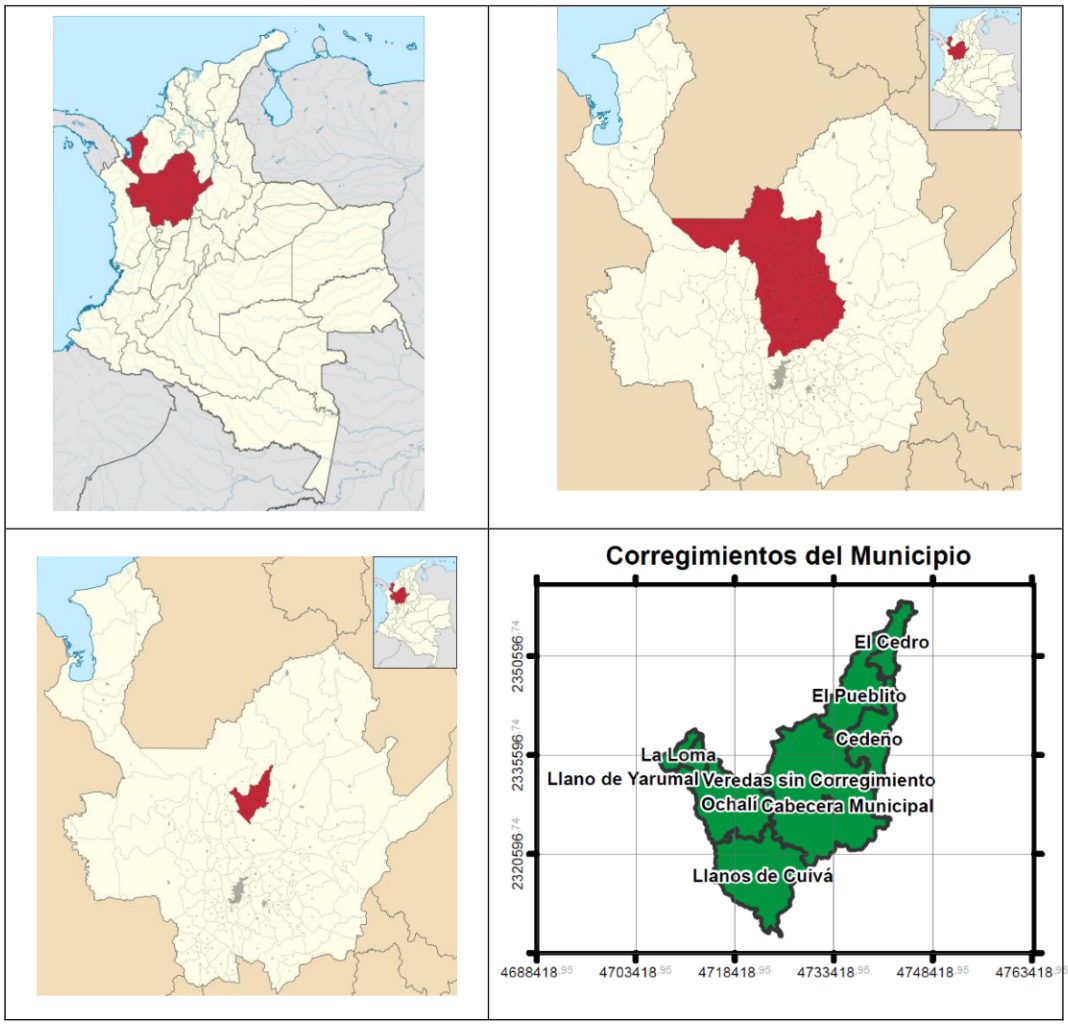
Para la estimación de caudales se cuenta con información cartográfica y los parámetros para el cálculo de intensidades en las estaciones pluviométricas de la zona. Para la estimación de los caudales máximos instantáneos asociados a diferentes períodos de retorno, se utilizó el modelo racional, debido a que en cuencas pequeñas (inferiores a 2.5 km^2) es posible utilizar este método simplificado sin obtener errores significativos. Para la aplicación de este método perteneciente a un modelo lluvia-escorrentía, deben tenerse en cuenta las características de usos del suelo, las intensidades de lluvia para los periodos de retorno, las características de su relieve, topografía, y otros parámetros morfométricos.

3.2 CUENCA HIDROGRÁFICA

3.2.1 Localización

El Municipio de Yarumal está localizado en la subregión Norte del departamento de Antioquia, a 123 km de la ciudad de Medellín, en las coordenadas 6°57′41″N - 75°24′58″O. Todo el territorio presenta un relieve bastante montañoso, pues está emplazado sobre las estribaciones del ramal occidental de la cordillera central de los Andes. La obra proyectada se ubica en la cabecera urbana del municipio, por la zona de la calle 16 y entre las carreras 19 y 22, donde empalma a un box culvert existente que desciende hasta la carrera 23.

TABLA 1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE LA OBRA PROYECTADA



3.2.2 Cuencas hidrográficas de la quebrada San José

La quebrada San José nace en zona montañosa del municipio de Yarumal, relativamente cerca de la cabecera municipal, y atraviesa la cabecera municipal por el noreste hasta el sureste de esta.

En el municipio de Yarumal ocurre un promedio anual de lluvias de entre 2000 a 4000 mm y brinda una temperatura media de 14 grados centígrados, variando en un rango de entre

10° y 19°, con una faja altimétrica que se puede señalar aproximadamente entre 1850 y 2700 msnm.

Como se mencionó anteriormente, y teniendo en cuenta la longitud total de la obra de canalización a ejecutar, se toma la determinación en base a criterio de diseño ingenieril de hacer dos estudios diferentes de hidrología e hidráulica, uno a la altura del canal abierto y el otro a la altura de la salida del box culvert.

En este orden de ideas, las cuencas de la quebrada “San José”, del municipio de Yarumal, cubren un área de drenaje de 390.546,32 m^2 y de 502.300 m^2 hasta los sitios de aforo objeto de estudio. En la siguiente figura se observan las cuencas hidrográficas del sitio de interés alimentada por sus tributarios. En la siguiente tabla se presentan los estimativos de los parámetros morfométricos de la quebrada “San José” para ambas cuencas hidrográficas.

FIGURA 2. CUENCAS DE DRENAJE TRIBUTARIO DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ DELIMITADAS HASTA LOS PUNTOS DE INTERÉS (CANAL Y BOX CULVERT)

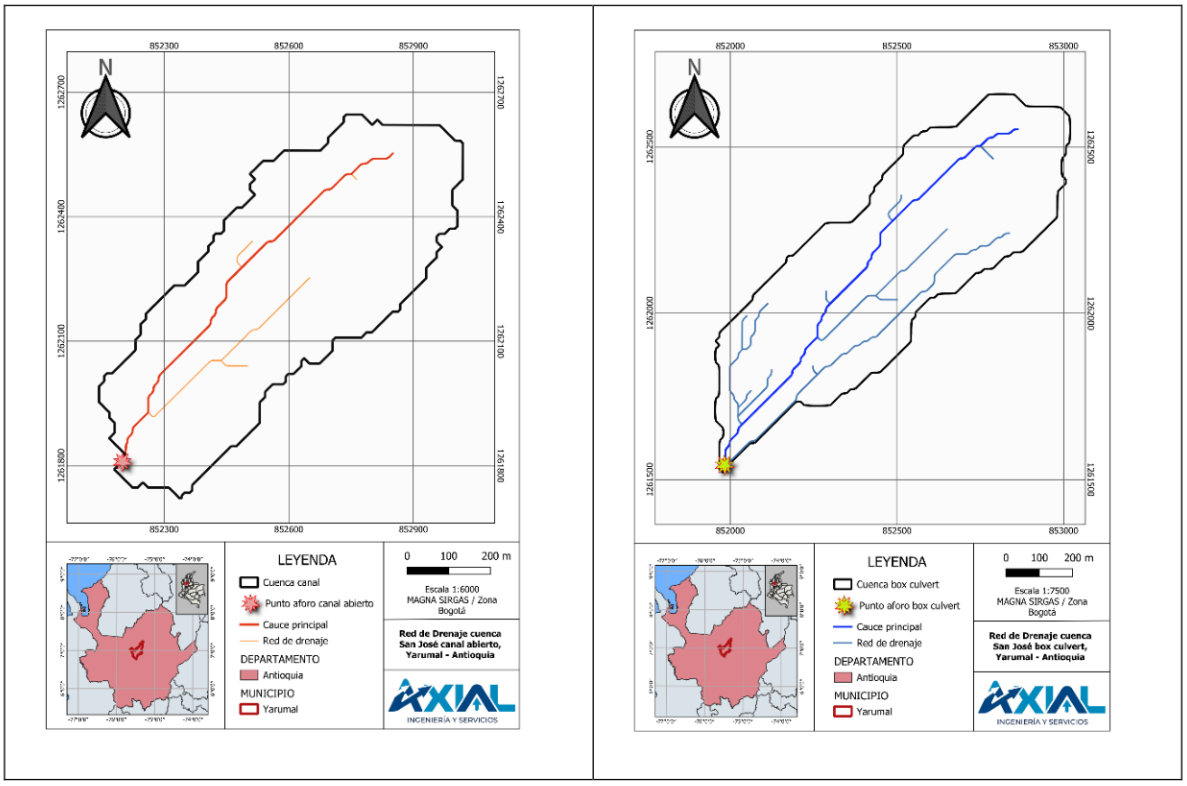


TABLA 2. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ HASTA EL SITIO DE LA OBRA DE CANAL ABIERTO

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS FUENTE		
Parámetro	**Magnitud**	**Unidad**
Nombre de la fuente	San José	
Área de drenaje	390546.32	m^2
Longitud de la cuenca	1149.26	m
Longitud de cauce principal	1020.02	m
Perímetro	3093.297	m
Cota máxima en el canal	2585	m s.n.m.
Cota en la salida	2285	m s.n.m.
Cota máxima en la cuenca	2665	m s.n.m.
Índice de compacidad (Kc)	1.39	N.A
Ancho medio (W)	0.34	km
Factor de forma (Kf)	0.30	N.A
Pendiente media de la cuenca QGIS	21.24%	porciento
Pendiente media del cauce principal	16.98%	porciento
Estación meteorológica referenciada	Est. Yarumal [27020190]	

TABLA 3. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ HASTA EL SITIO DE LA OBRA DE BOX CULVERT

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS FUENTE		
Parámetro	**Magnitud**	**Unidad**
Nombre de la fuente	San José	
Área de drenaje	502300	m^2
Longitud de la cuenca	1493	m
Longitud de cauce principal	1407.72	m
Perímetro	3552.9	m

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS FUENTE		
Parámetro	**Magnitud**	**Unidad**
Cota máxima en el canal	2580	m s.n.m.
Cota en la salida	2200	m s.n.m.
Cota máxima en la cuenca	2658	m s.n.m.
Índice de compacidad (Kc)	1.40	N.A
Ancho medio (W)	0.34	km
Factor de forma (Kf)	0.23	N.A
Pendiente media de la cuenca QGIS	36.56%	porciento
Pendiente media del cauce principal	27.58%	porciento
Estación meteorológica referenciada	Est. Yarumal [27020190]	

3.2.3 Tamaño de las cuencas

Se deduce que las superficies definidas por los contornos en las proyecciones horizontales de las superficies de las cuencas de estudio fueron de unas áreas (A) de 390.546,32 m^2 para el canal abierto y de 502.300 m^2 para el box culvert, por lo que se enmarca en la clasificación de cuencas muy pequeñas, como se observa en la siguiente tabla.

TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE TAMAÑO DE ACUERDO CON EL TAMAÑO DE LA CUENCA, EN KM^2

Tamaño de la cuenca (Km^2)	
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
500 a 2500	Intermedia - pequeña
2500 a 5000	Intermedia - grande
> 5000	Muy grande

3.2.4 Índice de compacidad

Para hallar el coeficiente de Gravelius (Kg) de las cuencas de estudio se lleva a cabo la siguiente ecuación:

$$Kg = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

En donde:

$\boldsymbol{P} = \ Perimetro\ de\ la\ cuenca$

$\boldsymbol{A} = Área\ de\ la\ cuenca$

$$Kg_{cnc_canal} = 0.28 * \frac{3{,}093297\ Km}{\sqrt{0{,}39054632\ Km^2}} = 1{,}39$$

$$Kg_{cnc_box} = 0.28 * \frac{3{,}553\ Km}{\sqrt{0{,}502\ Km^2}} = 1{,}40$$

TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE LA FORMA DE LAS CUENCAS SEGÚN SU COEFICIENTE DE COMPACIDAD

Coeficiente de Gravelius (Kc)	Clasificación
1 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
1.25 a 1.5	Oval redonda a oval-oblonga
1.5 a 1.75	Oval-oblonga a rectangular-oblonga
>1.75	Rectangular

La forma de las cuencas (las cuales son similares en forma) tiende a ser de forma oval–redonda a oval-oblonga, debido a que el valor del índice de compacidad es de 1.39 y 1.40. Esto quiere decir que, las cuencas tienen una respuesta intermedia (moderadamente rápida) ante eventos de precipitación, con crecidas y riesgos de crecientes moderados.

3.2.5 Ancho medio (W)

El ancho medio de la cuenca (W) se define como la relación entre el área de la cuenca (Ac) y la longitud de la cuenca (Lc)

$$W = \frac{Ac}{Lc}$$

En donde:

$$\boldsymbol{Ac} = Área\ de\ la\ cuenca$$

$$\boldsymbol{Lc} = Longitud\ de\ la\ cuenca$$

$$W_{cnc_canal} = \frac{0{,}39054632\ Km^2}{1{,}14926\ Km} = 0{,}34\ Km$$

$$W_{cnc_box} = \frac{0{,}502\ Km^2}{1{,}493\ Km} = 0{,}34\ Km$$

3.2.6 Factor de forma (Kf)

El Factor de forma (Kf) es la representación de una manera cuantitativa de la geometría de una cuenca y se analiza el valor por medio de la siguiente ecuación:

$$kf = \frac{W}{Lc}$$

En donde:

W= Ancho medio de la cuenca

Lc= Longitud de la cuenca

$$kf_{cnc_canal} = \frac{0{,}34\ Km}{1{,}14926\ Km} = 0{,}30$$

$$kf_{cnc_box} = \frac{0{,}34\ Km}{1{,}493\ Km} = 0{,}23$$

La cuenca cumple con el factor de forma **bajo,** que, para clasificarse de esta manera, debe ser menor a 1 $(k_f < 1)$ por lo cual es una cuenca menos propensa a eventos extremos o crecientes.

3.2.7 Pendiente de las cuencas

A partir de las delimitaciones de las cuencas en el software QGIS, se logra identificar las pendientes medias de las cuencas por medio del programa, arrojando como resultado un valor de 21.24% para la cuenca del canal abierto y de 36.56% para la cuenca del box culvert,

Este parámetro es de vital importancia en el análisis de las cuencas hidrográficas, dado que influye en los tiempos de concentración, es así como observamos que las mayores pendientes corresponden a tiempos de concentración menores, en donde la gota discurre a lo largo de la cuenca libremente y con velocidades que conllevan a un desplazamiento más rápido.

La determinación de la Pendiente Media de una Cuenca Hidrográfica es una de las tareas más importantes en la realización de cualquier estudio hidrológico, pues este valor controla la velocidad con que se dará la escorrentía superficial en la cuenca. Es por esta razón que este parámetro clasifica la cuenca como se observa en la siguiente tabla, y esto afecta directamente en la obtención de los caudales de diseño.

TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE UNA CUENCA SEGÚN SU PORCENTAJE DE PENDIENTE

PENDIENTE MEDIA (%)	TIPO DE TERRENO
2	Llano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuerte accidentado
50	Escarpado
> a 50	Muy escarpado

De acuerdo con la anterior tabla, se puede extraer como conclusión que como ambas cuencas de estudio poseen una pendiente media de 21.24 % y 36.56 %, el tipo de terreno se clasifica entre “fuerte accidentado” y “escarpado”.

3.3 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS

Se presenta a continuación el método analizado para la estimación de los caudales máximos de las cuencas de la quebrada “San José” según el punto de aforo de interés, para diferentes periodos de recurrencia.
Una primera variable de interés es el tiempo de concentración, el cual se define como el tiempo que transcurre entre la caída de una gota de lluvia en las cabeceras de una cuenca de drenaje, y la llegada a un sitio de interés.

3.3.1 Estimación del tiempo de concentración

Con base en los parámetros morfométricos determinados para cada una de las cuencas de drenaje de la quebrada mencionada anteriormente, se puede calcular el tiempo de concentración.

Existen diversas metodologías para determinar el tiempo de concentración de una cuenca a partir de los parámetros morfométricos, todas ellas construidas a partir de ajustes empíricos de registros hidrológicos. En la literatura existen múltiples expresiones para el cálculo del tiempo de concentración como las propuestas por Kirpich, Témez, Johnstone & Cross, Giandotti, Ventura-Heras, Ven Te Chow, U.S. Army Corps of Engineers, California Culverts Practice, Linsley, S.C.S Ranser, etc. A continuación, se muestran las ecuaciones que se tuvieron en cuenta:

Kirpich (1990)

$$Tc = 0.06628 * \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
S: *Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal en metros por metro (m/m)*

Témez (1978)

$$Tc = 0.3 \left(\frac{L}{S_o^{0.25}} \right)^{0.75}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
S_o: *Pendiente total del cauce principal, en porcentaje.*

Johnstone & Cross (1949)

$$Tc = 2.6\left(\frac{L}{\sqrt{S_o}}\right)^{0.5}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *longitud del cauce principal en kilómetros,*
So: *pendiente total del cauce principal en metros por kilómetro.*

Giandiotti (1990)

$$Tc = \frac{4\sqrt{A}+1.5L}{0.8\sqrt{H}}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
A: *Área de la cuenca en kilómetros cuadrados,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
H: *Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente en m.*

Ventura-Heras (1990)

$$Tc = 0.30\left(\frac{L}{S_o^{0.25}}\right)^{0.75}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
S_o: *Pendiente total del cauce principal, en porcentaje.*

Ven Te Chow:

$$\mathrm{T_c} = 0.273 * \left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.64}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
S: *Pendiente del cauce principal, en metros por metro.*

Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers)

$$T_c = 0.28 * \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
S: *Pendiente del cauce principal, en metros por metro.*

California Culverts Practice

$$T_c = \left(0.87 * \frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
H: *Desnivel altitudinal en metros.*

Linsley

$$T_c = 0.06628\left(\frac{L}{S_0^{0.5}}\right)^{0.77}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
S_0: *Pendiente total del cauce principal, en porcentaje.*

S.C.S Ranser

$$T_c = 0.97\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

Tc: *Tiempo de concentración en horas,*
L: *Longitud del cauce principal en kilómetros,*
H: *Desnivel altitudinal en metros.*

La aplicación de las metodologías empíricas de tiempos de concentración, así como la elección de un tiempo de concentración de diseño, se resume en las siguientes tablas:

TABLA 7. ELECCIÓN DE TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE DISEÑO PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE LA OBRA DE CANAL ABIERTO

TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN						
Modelo	**Tc (horas)**	**Tc (min)**	**$L_{inferior}$ (min)**	**$L_{superior}$ (min)**	**Aceptación**	**Tc valido**
Kirpich	0.13	7.99	8.01	28.28	No	-
Temez	0.42	25.48	8.01	28.28	Sí	25.48
Johnstone & Cross	0.63	38.05	8.01	28.28	No	-
Giandiotti	0.29	17.45	8.01	28.28	Sí	17.45
Ventura-Heras	0.42	25.48	8.01	28.28	Sí	25.48
Ven Te Chow	0.37	22.03	8.01	28.28	Sí	22.03
U.S Corps of Engineers	0.40	23.89	8.01	28.28	Sí	23.89
California Culverts Practice	0.11	6.47	8.01	28.28	No	-
Linsley	0.13	7.99	8.01	28.28	No	-
S.C.S Ranser	0.11	6.62	8.01	28.28	No	-
					Promedio	**22.86**

TABLA 8. ELECCIÓN DE TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE DISEÑO PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE LA OBRA DE BOX CULVERT

TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN						
Modelo	**Tc (horas)**	**Tc (min)**	**$L_{inferior}$ (min)**	**$L_{superior}$ (min)**	**Aceptación**	**Tc valido**
Kirpich	0.14	8.50	9.32	32.49	No	-
Temez	0.49	29.62	9.32	32.49	Sí	29.62
Johnstone & Cross	0.73	43.58	9.32	32.49	No	-
Giandiotti	0.32	19.03	9.32	32.49	Sí	19.03
Ventura-Heras	0.49	29.62	9.32	32.49	Sí	29.62
Ven Te Chow	0.42	25.05	9.32	32.49	Sí	25.05
U.S Corps of Engineers	0.46	27.83	9.32	32.49	Sí	27.83
California Culverts Practice	0.14	8.57	9.32	32.49	No	-
Linsley	0.14	8.50	9.32	32.49	No	-
S.C.S Ranser	0.15	8.77	9.32	32.49	No	-

Promedio	26.23

Después de aplicar las diferentes metodologías, y teniendo en cuenta que, por tratarse de métodos empíricos, no todos los valores tienen la misma tendencia en su resultado. Por esta razón, se utiliza como criterio de elección el método estadístico de los valores atípicos, el cual identifica y elimina valores extremos no representativos, para posteriormente promediar los resultados que se encuentren dentro del rango de valores aceptables. Esto se puede evidenciar en las siguientes gráficas:

FIGURA 3. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN OBTENIDOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE LA OBRA DE CANAL ABIERTO

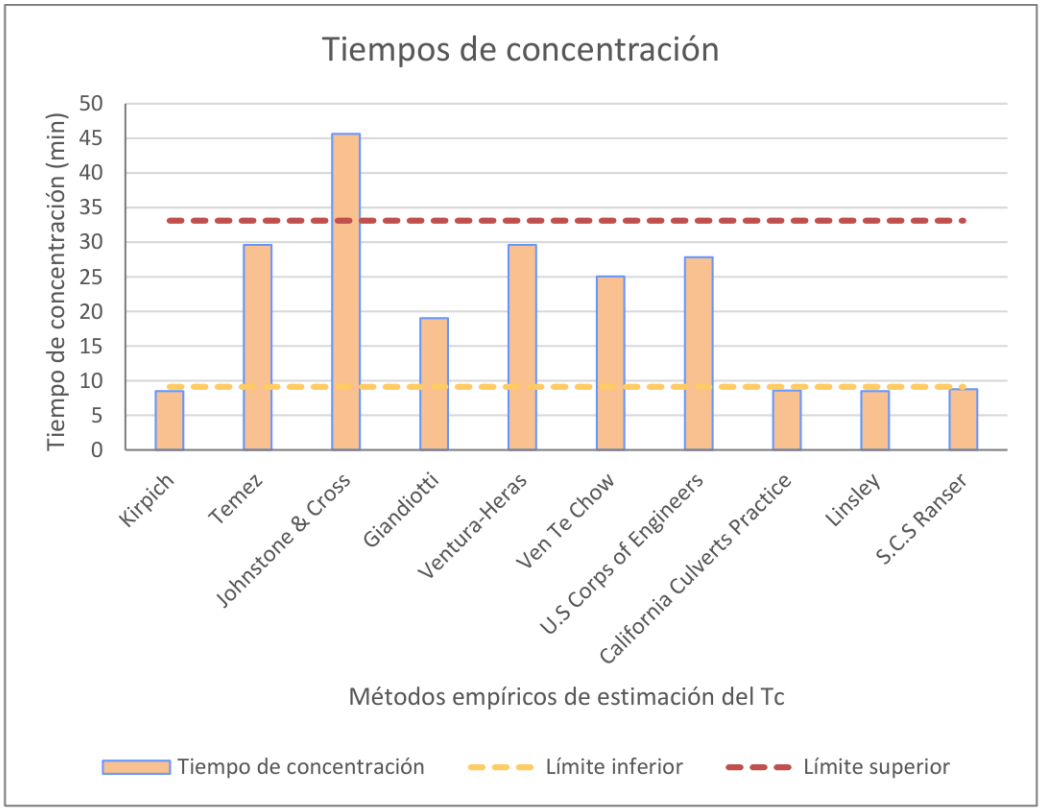
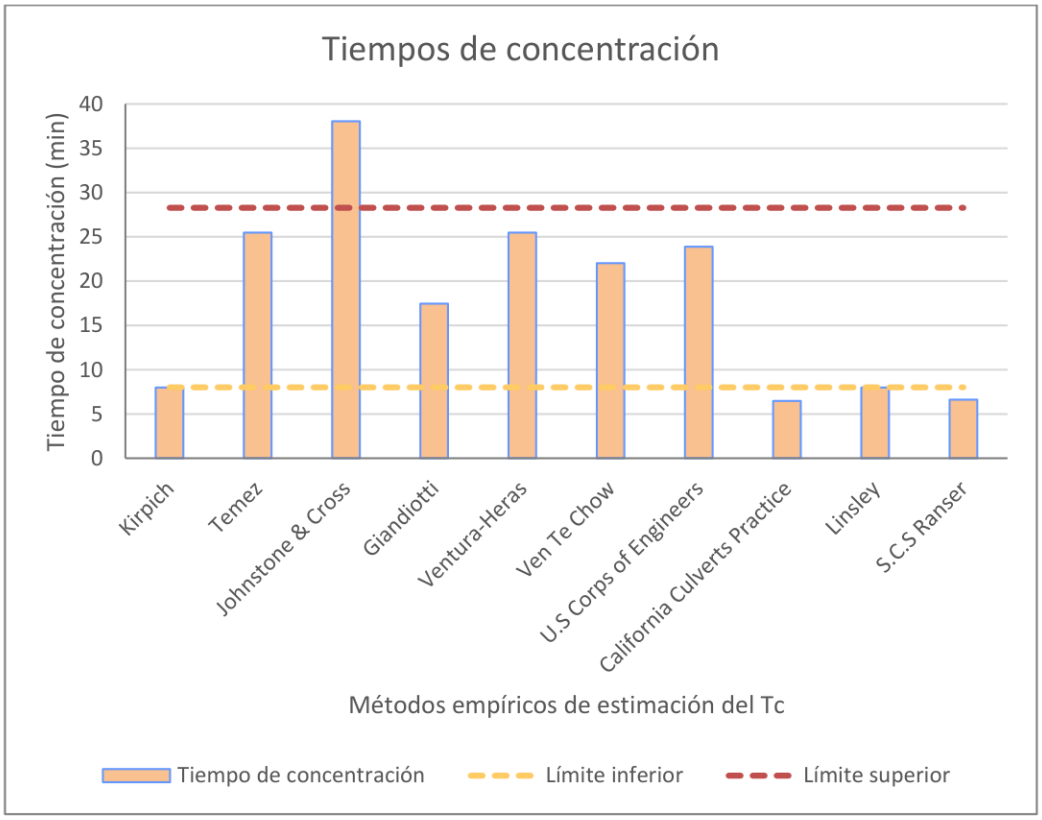


FIGURA 4. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN OBTENIDOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE LA OBRA DE BOX CULVERT



Los métodos empíricos de tiempos de concentración que se encuentran dentro de los rangos para estas cuencas que pertenecen a la misma quebrada, pero a diferente punto de aforo, son Témez, Giandotti, Ventura-Heras, Ven Te Chow y el Cuerpo de Ingeniero de los Estados Unidos, de los cuales se realizó el promedio, cuyos resultados fueron unos tiempos de 22.86 minutos para el canal abierto y 26.23 minutos para el box culvert.

3.3.2 Intensidades de diseño y magnitud de la precipitación para diferentes periodos de retorno

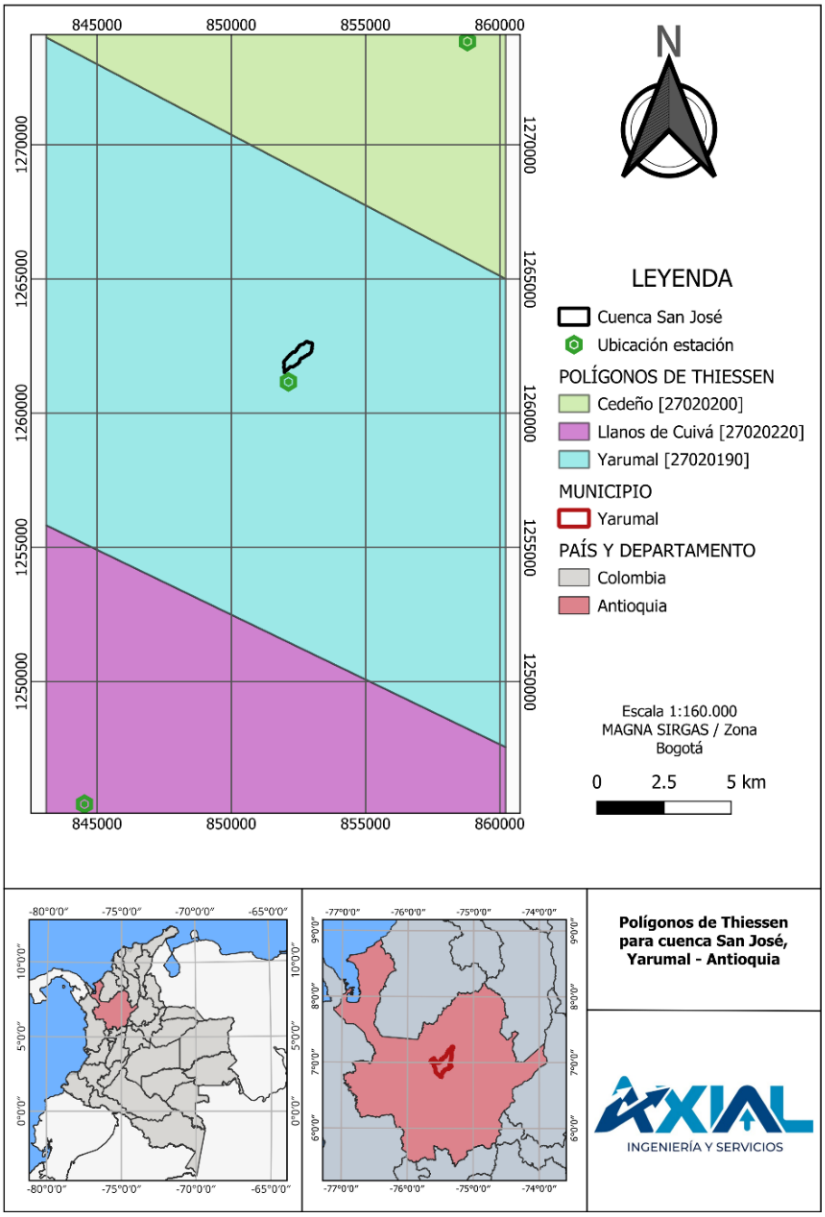
Para determinar la intensidad de lluvia asociada a diferentes periodos de retorno, se hace un análisis de las estaciones pluviométricas cercanas a las cuencas, por medio de los Polígonos de Thiessen. Las estaciones se encuentran localizadas en las siguientes coordenadas:

TABLA 9. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS CERCANAS A LAS CUENCAS DE ESTUDIO

ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS CERCANAS A LA CUENCA DE ESTUDIO							
CÓDIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	X (m)	Y (m)	OPERARIO	% DE INFLUENCIA	COLOR
27020190	Yarumal	Yarumal	-75.41555556	6.955972222	IDEAM	100.00%	
23110040	Cedeño	Yarumal	-75.35558333	7.070722222	IDEAM	0.00%	
23110030	Los Llanos de Cuivá	Yarumal	-75.48386111	6.813611111	IDEAM	0.00%	

A continuación, se muestra el análisis de influencia de las estaciones:

FIGURA 5. POLÍGONOS DE THIESSEN SEGÚN LA INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DE LA ZONA DE INTERÉS CUENCA SAN JOSÉ



Como se evidencia en la imagen, la estación que tiene influencia sobre las cuencas es la estación de Yarumal [27020190] del municipio de Yarumal, Antioquia. De acuerdo con esto, se hace uso de dicha estación pluviométrica para ambas cuencas.

Las intensidades de diseño para los periodos de retorno se obtienen mediante el método de intensidades máximas anuales y para una duración de la lluvia igual al tiempo de concentración de la cuenca, considerándose este como el caso más desfavorable, “puesto que es para esta duración cuando la totalidad de la cuenca está aportando al proceso de escorrentía, por lo cual se espera que se presenten los caudales máximos” (Villegas, 2020). Lluvias con una duración mayor, producirán menores intensidades y estas a su vez, menores caudales, y lluvias de menor duración producirán intensidades altas y mayores caudales, pero no toda la cuenca estaría aportando al proceso de escorrentía. Se espera que la lluvia de diseño no sea de duración menor que el tiempo de concentración de la cuenca. Debe tenerse en cuenta que, debido a que los puntos de aforo de caudal están situados en lugares diferentes, varían los tiempos de concentración para ambas cuencas, y por consiguiente, las intensidades de diseño.

Por otro lado, la magnitud de la precipitación total se puede determinar a partir de la intensidad de lluvia para diferentes períodos de retorno mediante la siguiente expresión, donde i es la intensidad en mm/h, d es la duración de la lluvia en minutos.

$$P = i * \frac{d}{60}$$

Para obtener estas curvas es necesario realizar un análisis estadístico de los registros de las tormentas, que se obtienen de los pluviógrafos, por lo que se debe disponer de registros que tengan períodos de al menos 10 años.

3.3.2.1 Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia son una de las herramientas más importantes para el diseño hidrológico de caudales máximos, especialmente cuando se utilizan modelos lluvia – escorrentía, como lo es el método racional.

Los datos de precipitación diaria fueron tomados de las series de precipitación de la zona, es decir, las series ponderadas de precipitación de los registros de estaciones climatológicas cercanas o en la cuenca. De estas precipitaciones se escogen las máximas anuales. A partir de estas últimas, es posible determinar los valores máximos anuales de intensidad para duraciones de 24 h.

La metodología tradicional que se ha venido utilizando a lo largo de la historia en el cálculo de las Curvas IDF consiste básicamente, en realizar un análisis de frecuencia a cada una de las series de valores máximos de precipitación obtenidas para cada duración.

La serie a la cual se le realiza el análisis de frecuencias puede seleccionarse de tres formas, a saber:

- Serie de máximos anuales: es aquella serie que está conformada por cada uno de los valores máximos de precipitación observados en cada uno de los años de registro.
- Serie de duraciones parciales, en la cual la serie de datos está conformada por aquellos datos que sobrepasan un valor base predefinido.
- Serie de excedencias anuales, en la cual el valor base, de la serie anterior, es seleccionado de tal forma que el número de datos que conforman la serie sea igual al número de años de registros.

No existe un consenso entre los diferentes investigadores, sobre cual tipo de serie de datos debería utilizarse en los análisis, sin embargo, algunos reportan que diferentes investigadores le han encontrado sentido teórico al análisis de series parciales, (Bocacci, 1984). Otros autores reportan que la utilización de cada uno de los tipos de series es determinada por cada proyecto específico en el cual se vayan a utilizar los resultados del análisis de los eventos extremos (Chow, 1964).

Pese a lo anterior, en muchos de los casos prácticos se utilizan las series máximas anuales, ya que en este tipo de análisis no es necesaria la separación de la serie de registros continua en eventos o tormentas estadísticamente independientes, lo que eventualmente puede complicar un poco el análisis. Chow muestra que existe una relación entre las series de máximas anuales y las series de duraciones parciales (1964).

Una vez seleccionada la serie de máximos, el siguiente paso consiste en establecer el rango de duraciones para el cual se estimarán las CURVAS IDF. Algunos autores consideran que en un sitio específico puede estimarse una sola familia de curvas para un amplio rango de duraciones, por ejemplo, entre 5 minutos y 24 horas, mientras que la gran mayoría consideran que para cada sitio específico deben determinarse dos familias de curvas una para las duraciones más cortas, entre 5 y 60 o 120 minutos; y otro entre 60 o 120 minutos hasta 24 horas e incluso hasta varios días. A pesar de no tenerse ninguna demostración rigurosa, diversos autores consideran que esta subdivisión debe realizarse, ya que se tienen características físicas muy diferentes en las lluvias de corta duración, entre 0 y 1 o 2 horas, las cuales son debidas a fenómenos netamente convectivos, y las de larga duración, mayores a 2 horas que obedecen a otros tipos de fenómenos meteorológicos (Bonacci 1984).

Luego de escoger el rango de validez de las Curvas IDF, a cada una de las series obtenidas para cada duración, se le ajusta una función de distribución, normalmente la distribución Gumbel. Con la función de distribución ajustada a los datos observados, se construyen familias de curvas, en las cuales, pueden estimarse las intensidades máximas (o precipitaciones) para diferentes duraciones y probabilidades de ocurrencia. No obstante, el Instituto Nacional de Vías tiene establecido un método simplificado para el país colombiano según la regionalización de parámetros, sustentado también por el estudio de Vargas & Díaz-Granados, 1998, de la universidad de los Andes.

Para obtener la intensidad a partir de las series de precipitación máxima promedio anual se empleó dicho método simplificado del INVÍAS (Vargas & Díaz-Granados, 1998):

$$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{(\frac{t}{60})^c}$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h)

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual.

T: Periodo de retorno, en años

t: Duración de la lluvia, en minutos

a, b, c, d: Parámetros regionalizados (adimensional)

A continuación, se presentan los parámetros por regiones tenidos en cuenta para la construcción de las curvas IDF

TABLA 10. PARÁMETROS REGIONALES MÉTODO SIMPLIFICADO INVÍAS (VARGAS & DÍAZ-GRANADOS, 1998)

REGIÓN	a	b	c	d
Andina	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe	24.85	0.22	0.5	0.1
Pacífico	13.92	0.19	0.58	0.2

Orinoquía	5.53	0.17	0.63	0.42

Los parámetros seleccionados corresponden a la región Andina, siendo 0.94, 0.18, 0.66 y 0.83 los valores de a, b, c y d respectivamente.

De acuerdo con los registros de la estación pluviométrica de Yarumal [27020190], se obtuvieron los siguientes resultados de precipitación máxima en 24 horas.

TABLA 11. REGISTRO DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA YARUMAL [27020190]

PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS													
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**MÁXIMO ANUAL**
2000	34.0	5.0	15.0	23.0	39.0	45.0	66.0	43.0	48.0	59.0	34.0	37.0	66.0
2001	18.0	10.0	32.0	30.0	75.0	53.0	39.0	27.0	63.0	34.0	35.0	55.0	75.0
2002	32.0	9.0	31.0	42.0	40.0	42.0	28.0	40.0	33.0	47.0	44.0	25.0	47.0
2003	3.0	43.0	23.0	49.0	50.0	47.0	70.0	59.0	60.0	40.0	27.0	42.0	70.0
2004	33.0	32.0	9.0	27.0	37.0	80.0	61.0	85.0	36.0	46.0	35.0	20.0	85.0
2005	14.0	4.0	21.0	54.0	55.0	47.0	32.0	26.0	29.0	31.0	49.0	18.0	55.0
2006	13.0	37.0	36.0	48.0	90.0	52.0	76.0	31.0	22.0		72.0	16.0	90.0
2007	23.0	9.0	49.0	30.0	92.0	55.0	75.0	38.0	32.0	32.0	35.0	18.0	92.0
2008	14.0	75.0	25.0	19.0	38.0	34.0	36.0	56.0	38.0	37.0	55.0	25.0	75.0
2009	17.0	48.0	54.0	55.0	40.0	54.0	30.0	37.0	34.0	64.0	35.0	51.0	64.0
2010	6.0	20.0	28.0	35.0	67.0	73.0	50.0	34.0	46.0	39.0	32.0	41.0	73.0
2011	12.0	17.0	46.0	40.0	40.0	79.0	48.0	43.0	75.0	55.0	27.0	20.0	79.0
2012	10.0	11.0	39.0	41.0	46.0	66.0	30.0	45.0	54.0	50.0	29.0	16.0	66.0
2013	15.0	36.0	27.0	35.0	31.0	25.0	51.0	55.0	34.0	35.0	42.0	17.0	55.0
2014	15.0	35.0	21.0	95.0	28.0	71.0	29.0	59.0	39.0	45.0	41.0	21.0	95.0
2015	40.0	15.0	39.0	33.0	59.0	44.0	77.0	48.0	28.0	51.0	58.0	31.0	77.0
2016	29.0	14.0	31.0	55.0	72.0	28.0	47.0	32.0	55.0	39.0	37.0	40.0	72.0
2017	19.0	14.0	23.0	60.0	36.0	58.0	51.0	60.0	91.0	28.0	50.0	41.0	91.0
2018	42.0	38.0	23.0	62.0	40.0	42.0	54.0	74.0	42.0	41.0	29.0	24.0	74.0
2019	25.0	25.0	33.0	38.0	49.0	39.0	68.0	60.0	77.0	49.0	31.0	17.0	77.0
2020	9.0	10.0	51.0	21.0	42.0	38.0	41.0	32.0	68.0	45.0	39.0	34.0	68.0
2021	19.0	25.0	27.0	48.0	45.0	35.0	50.0	48.0	42.0	30.0	17.0	16.0	50.0
2022	17.0	38.0	40.0	46.0	58.0	31.0	53.0	55.0	64.0	41.0	50.0	17.0	64.0

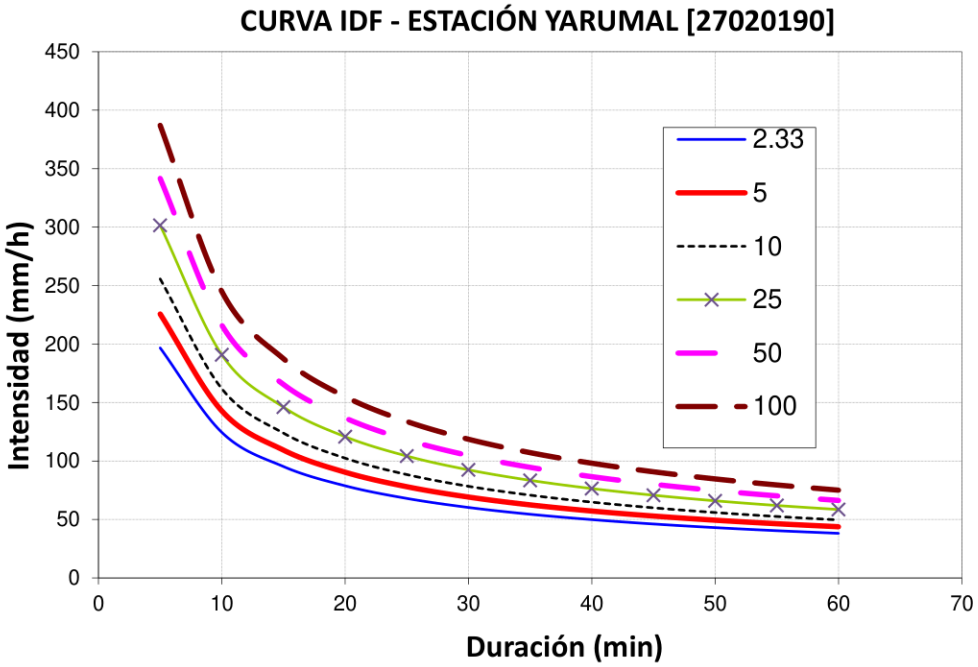
2023	17.0	21.0	46.0	56.0	5.0								56.0

Obteniendo una precipitación máxima promedio anual en 24 h de 72.2 mm, para la estación YARUMAL [27020190].

TABLA 12. ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA YARUMAL [27020190] – CURVA INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA (VALORES EN MM/H)

Duración (min)	Tr					
	2.33	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**
5	196.77	225.77	255.77	301.63	341.71	387.12
10	124.53	142.88	161.87	190.89	216.26	245.00
15	95.29	109.33	123.86	146.07	165.48	187.47
20	78.81	90.43	102.44	120.81	136.87	155.05
25	68.02	78.04	88.41	104.27	118.12	133.82
30	60.31	69.20	78.39	92.45	104.73	118.65
35	54.48	62.50	70.81	83.50	94.60	107.17
40	49.88	57.23	64.83	76.46	86.62	98.13
45	46.15	52.95	59.99	70.74	80.14	90.79
50	43.05	49.39	55.96	65.99	74.76	84.69
55	40.42	46.38	52.54	61.97	70.20	79.53
60	38.17	43.79	49.61	58.51	66.28	75.09

FIGURA 6. CURVAS IDF DE LA ESTACIÓN YARUMAL [27020190]



Una vez se haya definido esta información, se procede a definir las intensidades de diseño para cada uno de los periodos de retorno en ambas cuencas.

TABLA 13. INTENSIDADES DE DISEÑO MÉTODO SIMPLIFICADO INVÍAS PARA CANAL ABIERTO, CON DURACIÓN D=TC=22.86 MINUTOS

Cálculo de intensidades estación Yarumal [27020190] método simplificado INVÍAS Intensidades para d=tc=22.86 min (mm/h)	
Tr (años)	**Intensidad (mm/h)**
2.33	72.15
5	82.78
10	93.78
25	110.60
50	125.30

100	141.95

TABLA 14. INTENSIDADES DE DISEÑO MÉTODO SIMPLIFICADO INVÍAS PARA BOX CULVERT, CON DURACIÓN D=TC=26.23 MINUTOS

Cálculo de intensidades estación Yarumal [27020190] método simplificado INVÍAS Intensidades para d=tc=26.23 min (mm/h)	
Tr (años)	**Intensidad (mm/h)**
2.33	65.90
5	75.61
10	85.66
25	101.02
50	114.44
100	129.65

3.4 CAUDALES MÁXIMOS

Para la estimación de los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, necesarios para determinar los niveles que se presentarían en las llanuras de inundación y en las estructuras hidráulicas de canalización mencionadas anteriormente, se empleó el método racional.

3.4.1 Método Racional

El método asume que la escorrentía es directamente proporcional a la precipitación efectiva, y, aunque esto exactamente no es cierto, los errores en cuencas pequeñas no son significativos.

Con este método puede hallarse el caudal con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C * i * A}{3.6}$$

Donde

Q: Caudal que transcurre por el punto de interés (m^3/s).

A: Área de la cuenca (km^2).

i: Intensidad de lluvia asociado a los periodos de retorno (mm/h).

C: Coeficiente de escorrentía

3.4.1.1 Coeficiente de escorrentía

El valor del coeficiente de escorrentía *C* es función de las condiciones del terreno. Para la determinación del coeficiente de escorrentía se utilizaron los valores de referencia encontrados en el libro “Hidrología Aplicada”, de Ven Te Chow, que se muestra más adelante.

3.4.1.1.1 Coeficiente escorrentía cuenca canal abierto

Para la estimación de las crecientes de la quebrada San José y el cálculo de los coeficientes de escorrentía para los diversos periodos de retorno a la altura del canal abierto, se ha considerado que esta cuenca está conformada por varias coberturas superficiales: Por cobertura de construcciones, representando un 34.32 %. Existe una zona boscosa en esta cuenca de 47.68 % favoreciendo la infiltración e interceptación del agua; y, por último, tiene una cobertura de pastizales de 18.01 %. Esta estimación se hizo con ayuda del software QGIS, que a partir de información geográfica referenciada descargada de la ESA Land Cover permite ver datos actualizados de los tipos de cobertura o usos de suelo. La pendiente también juega un papel importante al momento de determinar el coeficiente de escorrentía, y en este caso, según la tabla de Coeficiente de Escorrentía de V. T. Chow, este terreno se clasifica en terreno pendiente (pendiente superior al 7%, según el parámetro medio extraído de la cuenca, que para esta cuenca es de 21.24 %).

3.4.1.1.2 Coeficiente escorrentía cuenca box culvert

Para la estimación de las crecientes de la quebrada San José, y el cálculo de los coeficientes de escorrentía para los diversos periodos de retorno a la altura del box culvert, se ha considerado que esta cuenca está conformada por varias coberturas superficiales: Principalmente por cobertura de construcciones, representando un 48.48 %. Existe una zona boscosa en esta cuenca de 37.84 % favoreciendo la infiltración e interceptación del agua; y, por último, tiene una cobertura de pastizales de 13.68 %. Esta estimación se hizo con ayuda del software QGIS, que a partir de información geográfica referenciada descargada de la ESA Land Cover permite ver datos actualizados de los tipos de cobertura o usos de suelo. La pendiente también juega un papel importante al momento de determinar el coeficiente de escorrentía, y en este caso, según la tabla de Coeficiente de

Escorrentía de V. T. Chow, este terreno se clasifica en terreno pendiente (pendiente superior al 7%, según el parámetro medio extraído de la cuenca, que en este caso es de 36.56 %).

FIGURA 7. COBERTURAS DE SUELO PARA CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA DE LAS CUENCAS DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL CANAL ABIERTO Y EL BOX CULVERT

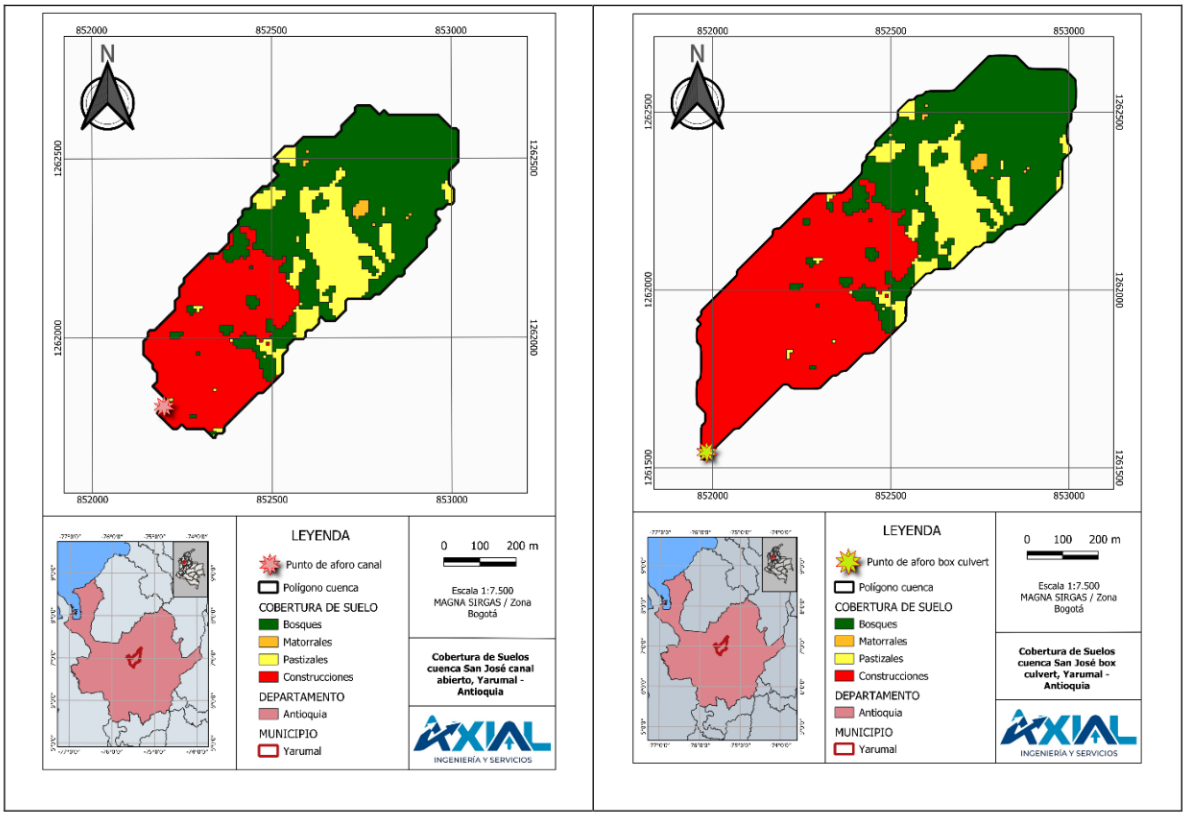


TABLA 15. VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PARA LA CUENCA DEL CANAL ABIERTO

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA								
Periodo de retorno							%Área	Área (m2)
Características de la superficie	2	5	10	25	50	100		
Áreas desarrolladas								
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.9	0.95		0
Concreto/techo	0.75	0.8	0.83	0.88	0.92	0.97	34.32%	134020.1098
Zonas verdes (Jardines, parques, etc)								

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA								
Periodo de retorno							%Área	Área (m2)
Características de la superficie	2	5	10	25	50	100		
Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)								
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.4	0.44	0.47		0
Promedio, 2-7%	0.37	0.4	0.43	0.46	0.49	0.53		0
Pendiente, superior a 7%	0.4	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55		0
Condición promedio (Cubierta de pasto del 50 al 75% del área)								
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.3	0.34	0.37	0.41		0
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49		0
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.4	0.42	0.46	0.49	0.53		0
Condición buena (Cubierta de pasto mayor del 75% del área)								
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36		0
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46		0
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.4	0.44	0.47	0.51		0
Áreas no desarrolladas								
Área de cultivos								
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.43	0.47		0
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51		0
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54		0
Pastizales								
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.3	0.34	0.37	0.41		0
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49		0
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.4	0.42	0.46	0.49	0.53	18.01%	70321.55762
Bosques								
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39		0
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.43	0.47		0
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	47.68%	186205.1526

TABLA 16. VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PARA LA CUENCA DEL BOX CULVERT

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA								
Periodo de retorno							%Área	Área (m2)
Características de la superficie	2	5	10	25	50	100		
Áreas desarrolladas								
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.9	0.95		0
Concreto/techo	0.75	0.8	0.83	0.88	0.92	0.97	48.48%	243503.9975
Zonas verdes (Jardines, parques, etc)								
Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)								
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.4	0.44	0.47		0
Promedio, 2-7%	0.37	0.4	0.43	0.46	0.49	0.53		0
Pendiente, superior a 7%	0.4	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55		0
Condición promedio (Cubierta de pasto del 50 al 75% del área)								
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.3	0.34	0.37	0.41		0
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49		0
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.4	0.42	0.46	0.49	0.53		0
Condición buena (Cubierta de pasto mayor del 75% del área)								
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36		0
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46		0
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.4	0.44	0.47	0.51		0
Áreas no desarrolladas								
Área de cultivos								
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.43	0.47		0
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51		0
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54		0
Pastizales								
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.3	0.34	0.37	0.41		0
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49		0
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.4	0.42	0.46	0.49	0.53	13.68%	68723.1841
Bosques								
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39		0
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.43	0.47		0
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	37.84%	190072.9084

Fuente: “Hidrología Aplicada”, Ven Te Chow 1993.

Con base en las tablas anteriores, se calcula el coeficiente de escorrentía más apropiado para las cuencas, según porcentajes del área total discriminados por la cobertura, los periodos de retorno y la topografía, lo cual se hace ponderando según su relevancia de ocupación dentro de las cuencas. Los resultados se presentan a continuación:

TABLA 17. CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PONDERADO SEGÚN EL USO DE SUELO PARA CADA PERIODO DE RETORNO, CUENCA SAN JOSÉ, CANAL ABIERTO

COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA	
TR (años)	C
2.33	**0.47**
5	**0.51**
10	**0.53**
25	**0.58**
50	**0.61**
100	**0.65**

TABLA 18. CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PONDERADO SEGÚN EL USO DE SUELO PARA CADA PERIODO DE RETORNO, CUENCA SAN JOSÉ, BOX CULVERT

COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA	
TR (años)	C
2.33	**0.53**
5	**0.57**
10	**0.60**
25	**0.64**
50	**0.68**
100	**0.72**

3.4.1.2 Estimación de crecientes

Con base en el área de las cuencas de la quebrada que drena pasando por la estructura hidráulica de canalización en consideración a la altura del canal abierto y el box culvert,

además utilizando los coeficientes de escorrentía hallados, y las intensidades de lluvia mostradas, se obtienen los caudales de creciente por dicho método racional, asociados a diferentes períodos de retorno. Los resultados se presentan a continuación:

TABLA 19. CAUDALES DE CRECIENTE POR EL MÉTODO RACIONAL PARA LA CUENCA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL CANAL ABIERTO, EN M^3/S

CAUDALES (MÉTODO RACIONAL)		
Q=C*I*A/3.6		
Tiempo concentración (min)		22.86
Área cuenca (km^2)		0.39
Tr (años)	I (mm/h)	Q (m^3/s)
2.33	72.15	3.69
5	82.78	4.57
10	93.78	5.41
25	110.60	6.91
50	125.30	8.28
100	141.95	10.05

TABLA 20. CAUDALES DE CRECIENTE POR EL MÉTODO RACIONAL PARA LA CUENCA SAN JOSÉ A LA ALTURA DE BOX CULVERT, EN M^3/S

CAUDALES (MÉTODO RACIONAL)		
Q=C*I*A/3.6		
Tiempo concentración (min)		26.23
Área cuenca (km^2)		0.50
Tr (años)	I (mm/h) ponderada	Q (m^3/s)
2.33	65.90	4.89
5	75.61	6.03
10	85.66	7.12
25	101.02	9.03
50	114.44	10.79
100	129.65	13.04

3.5 CAUDAL MEDIO

En las siguientes figuras se presenta el valor del caudal medio de las cuencas de estudio, para ello se considera un factor de escorrentía que, al multiplicarse por la precipitación media multianual, permite evaluar la escorrentía promedio. La escorrentía promedio multiplicada por el área de drenaje de la cuenca determina el caudal medio multianual en el sitio de interés. El porcentaje de pérdidas se estimó en un 25%, es decir que el factor de escorrentía (100 % - % de pérdidas) sería de 0.75.

De la información suministrada por la Gobernación de Antioquia: "Precipitación registrada en las estaciones de hidrología, meteorología y estudio ambiental en algunos municipios de Antioquia" se tomó la precipitación anual de 3.375,71 mm para el municipio de Yarumal:

FIGURA 8. DATOS DE PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL DEL MUNICIPIO DE YARUMAL, ANTIOQUIA

Precipitación registrada	Meses												Total (1)
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Total precipitación (mm)	50,96	124,20	18,54	357,30	178,80	300,20	93,47	338,00	157,20	325,30	325,30	147,80	2.417,07

Los caudales medios de la fuente objeto de estudio se calcula de la siguiente forma:

1. Se toman los datos de precipitación mensuales para el municipio de Yarumal.
2. Posteriormente, se realiza la siguiente operación para calcular el caudal medio mensual Qm en L/s, teniendo en cuenta que se aplica para las dos áreas de las cuencas de la misma quebrada:

$$Qm = \frac{Pm}{365 * 86400} * A_{1,2}$$

Donde

Pm: Precipitación media mensual de la cuenca, en metros (m/año)

A: Área de cada una de las cuencas en metros cuadrados (m^2).

Así, se muestra el resultado en la siguiente tabla, del cálculo con las condiciones para estos casos:

TABLA 21. CAUDAL MEDIO DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL CANALA ABIERTO

CAUDAL MEDIO				
Ppam (m/año)	Área (m^2)	Factor escorrentía	Q (m^3/s)	Q (L/s)
2.417	390546.32	0.75	0.022450	22.450

TABLA 22. CAUDAL MEDIO DE LA QUEBRADA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL BOX CULVERT

CAUDAL MEDIO				
Ppam (m/año)	Área (m^2)	Factor escorrentía	Q (m^3/s)	Q (L/s)
2.417	502300	0.75	0.028874	28.874

3.6 CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO

De acuerdo con el numeral *"3.4.2 Reducción por caudal ecológico"*, de la resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *"Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales"*, y que define como *"caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio".* En las siguientes tablas se relaciona el cálculo de los caudales mínimos ecológicos.

TABLA 23. CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO DE ACUERDO CON EL MES MÁS CRÍTICO DE PRECIPITACIÓN DE YARUMAL, ANTIOQUIA, CUENCA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL CANAL ABIERTO

CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO (L/s)			
Mes de estudio	**Precipitación mensual promedio**	**Caudal medio mensual (L/s)**	**Caudal ecológico, 25% de caudal (L/s)**
Enero (crítico)	50.96	7.68	1.92
Febrero	124.2	18.71	4.68
Marzo	18.54	2.79	0.70
Abril	357.3	53.84	13.46
Mayo	178.8	26.94	6.74
Junio	300.2	45.23	11.31
Julio	93.47	14.08	3.52
Agosto	338	50.93	12.73
Septiembre	157.2	23.69	5.92
Octubre	325.3	49.01	12.25
Noviembre	325.3	49.01	12.25
Diciembre	147.8	22.27	5.57
	PROMEDIO	**30.35**	**7.59**

TABLA 24. CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO DE ACUERDO CON EL MES MÁS CRÍTICO DE PRECIPITACIÓN DE YARUMAL, ANTIOQUIA, CUENCA SAN JOSÉ A LA ALTURA DEL BOX CULVERT

CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO (L/s)			
Mes de estudio	**Precipitación mensual promedio**	**Caudal medio mensual (L/s)**	**Caudal ecológico, 25% de caudal (L/s)**
Enero (crítico)	50.96	9.88	2.47
Febrero	124.2	24.07	6.02
Marzo	18.54	3.59	0.90
Abril	357.3	69.24	17.31
Mayo	178.8	34.65	8.66
Junio	300.2	58.18	14.54
Julio	93.47	18.11	4.53
Agosto	338	65.50	16.38
Septiembre	157.2	30.46	7.62
Octubre	325.3	63.04	15.76
Noviembre	325.3	63.04	15.76
Diciembre	147.8	28.64	7.16
	PROMEDIO	**39.03**	**9.76**

De esta forma, se evidencia que el mes crítico en cuanto a la cantidad de precipitación es enero. No obstante, es de resaltar que con el tipo de estructuras que se requiere construir no se afecta el caudal ecológico del afluente, toda vez que no se estará captando recurso hídrico.

4. MODELACIÓN HIDRÁULICA

4.1 INTRODUCCIÓN

En este numeral se presentan los procedimientos y resultados obtenidos en la modelación de los niveles de inundación de la fuente San José del municipio de Yarumal en los puntos de estudio. Estos servirán de gran aporte para el análisis de las cotas de inundación de la quebrada para el periodo de retorno de 100 años, como insumo para el emplazamiento de las estructuras hidráulicas de canalización.

Para el diseño de las estructuras hidráulicas de canalización sobre la quebrada en mención, se realizó el levantamiento topográfico de la franja de inundación en ambas márgenes, desde aguas arriba, hasta aguas abajo. La modelación de los niveles de inundación para la creciente de diseño incluye la simulación de los niveles de flujo tanto aguas arriba como aguas abajo, incluyendo la simulación del funcionamiento hidráulico la estructura propuesta en el sitio.

Para la modelación hidráulica de los niveles de inundación de esta quebrada, se analizaron los perfiles de flujo y los niveles de la lámina de agua para caudales máximos estimados por el método racional, con las secciones transversales levantadas durante la realización de este estudio, con secciones transversales espaciadas cada quince (15) metros, levantadas topográficamente a lo largo del cauce de la quebrada. La modelación del tránsito de las crecientes se realizó para períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, pero para las obras hidráulicas de canalización, se tuvo en cuenta la creciente de diseño correspondiente a un período de retorno (TR) de 100 años.

Para el cálculo de los perfiles de flujo se utilizó el software de libre acceso HEC-RAS versión 5.0.7 desarrollado por U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. El modelo se basa en el método del paso estándar y permite elaborar los perfiles de flujo para cualquier condición de flujo impuesta, incluyendo la geometría real del cauce y las condiciones hidráulicas de rugosidad requeridas por el usuario, permitiendo utilizar diferentes condiciones de borde en las secciones aguas abajo y/o aguas arriba, como la profundidad normal asociada a la pendiente del cauce o la profundidad crítica. Como resultado del modelo se obtiene la superficie libre del agua asociada a una condición de caudal impuesta que puede variar a lo largo del cauce.

4.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA

Para la simulación de los niveles máximos en régimen permanente, el modelo requiere la geometría del cauce (batimetría), los caudales de diseño para simular los niveles máximos y las condiciones iniciales y de frontera.

Para la simulación de las condiciones de flujo en la quebrada de interés, se utilizó el modelo HEC-RAS. El programa HEC-RAS requiere datos de entrada para realizar la modelación, una serie de características de la topografía de la sección, las distancias entre las secciones, los coeficientes de rugosidad y unas condiciones de borde.

Las condiciones de borde establecen el valor inicial para la evaluación de la superficie libre, las opciones disponibles son las siguientes: nivel conocido, profundidad crítica y método área-pendiente considerando para la sección inicial de cálculo la pendiente de la línea de energía igual a la pendiente de la superficie del agua.

Para calcular los perfiles de flujo se utilizó el programa de computación HEC-RAS 5.0.7 elaborado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos. El programa calcula, el perfil con las ecuaciones de flujo uniforme, utilizando el método estándar por pasos. Es muy importante mencionar que las expresiones utilizadas por el modelo fueron desarrolladas para flujo de agua limpia, es decir, sin considerar las variaciones debidas a altas concentraciones de sedimentos como es el caso particular de los flujos de lodos y flujos de escombros que presentan fuertes variaciones en las propiedades básicas de los fluidos como viscosidad, densidad, etc. haciendo que el comportamiento del flujo sea el de un fluido no newtoniano. Es de esperarse que cuando se presentan caudales altos las concentraciones de sedimentos aumenten; elegir el umbral de aplicación de flujo de agua limpia no es sencillo, pero se acepta en este caso, que a pesar de que hay concentraciones moderadamente altas no es el caso de flujo de lodos o escombros.

Las distancias entre secciones consecutivas, medidas por la línea central y por cada margen, dan cuenta implícitamente del alineamiento del canal.

4.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS

Los cambios en el perfil se calculan con las ecuaciones de momentum, energía y aproximaciones de carácter empírico. El programa dispone de la opción adicional de calcular los perfiles en tramos del canal con obstrucciones y flujo a través de islas, en las cuales se genera flujo dividido.

La metodología incorporada en el modelo se basa en varias suposiciones que simplifican el tránsito hidráulico. Se tiene en cuenta:

- Flujo permanente

- Flujo gradualmente variado
- Flujo unidimensional. El programa utiliza un factor de corrección para tener en cuenta la heterogeneidad en la distribución de velocidades horizontales.
- Canales de baja pendiente.
- Pendiente de la línea de energía constante entre secciones adyacentes.
- Lecho rígido

Los resultados se deben comparar con lo observado en visitas de campo y la información recopilada en la zona del estudio en lo referente con los niveles de inundación registrados. La razón por la cual el HEC-RAS, un modelo de flujo permanente, puede ser utilizado para la modelación de un fenómeno de flujo no permanente, como una creciente, está en el hecho del crecimiento y decrecimiento gradual de la onda de creciente.

Las pérdidas de energía ocasionadas por la fricción del agua a lo largo del perímetro mojado de la sección, las determina el programa como el producto de la pendiente media de la línea de energía y la longitud ponderada con base en los caudales por las sobre bancas y el canal entre secciones. Las pérdidas locales por contracciones o expansiones, las calcula como un porcentaje del cambio de la cabeza de velocidad entre las secciones.

Las ecuaciones básicas para la determinación de las pérdidas de energía son las siguientes:

$$h_e = L\overline{S_f} + C\left|\frac{\alpha_2 V_2^{\,2}}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^{\,2}}{2g}\right|$$

$$\overline{S_f} = \left(\frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{K_1 + K_2 + K_3}\right)^2$$

$$L = \frac{L_{lov}\overline{Q_{lov}} + L_{ch}\overline{Q_{ch}} + L_{rov}\overline{Q_{rov}}}{\overline{Q_{lov}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rov}}}$$

Donde:

h_e: Pérdidas en la cabeza de energía

S_f: Pendiente de fricción representativa entre secciones contiguas.

C: Coeficiente de expansión o contracción.

L: Distancia ponderada entre secciones.

α_1 y α_2: Coeficientes de corrección para la velocidad media de flujo.

L_{lov}, L_{ch} y L_{rov}: Distancias entre las secciones transversales por la banca izquierda, por el canal y por la banca derecha, respectivamente.

Q_{lov}, $\bar{Q}_{ch}$ y $\bar{Q}_{rov}$: Promedio aritmético de los caudales entre las secciones transversales por la banca izquierda, por el canal y por la banca derecha.

V_1 y V_2: Velocidades medias entre secciones contiguas.

Estas velocidades se determinan con base en la ecuación de Manning, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde

R es el radio hidráulico

n el coeficiente de rugosidad de Manning

S la pendiente de la línea de energía.

La información con la cual se alimenta el programa consta de la geometría transversal del río, dentro de la cual se incluyen las secciones topográficas del cauce y su llanura de inundación, las distancias entre las secciones por el eje central del canal y las márgenes izquierda y derecha, los coeficientes de rugosidad de Manning (los cuales pueden variar transversalmente en la sección), los coeficientes de pérdidas locales, las obstrucciones al flujo, zonas de flujo inefectivo, los caudales para los cuales se desee estimar los perfiles de flujo y las condiciones de frontera, que pueden ser una curva de calibración, niveles conocidos del agua, las pendientes de fondo del canal o la profundidad crítica, en la sección aguas arriba, aguas abajo o ambas, dependiendo si se van a calcular perfiles supercríticos, subcríticos o mixtos respectivamente.

4.4 EL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL FLUJO (MANNING)

Una de las variables de mayor incertidumbre para la estimación de los niveles de flujo es el coeficiente de rugosidad de Manning. En el presente estudio los coeficientes de rugosidad fueron estimados mediante la comparación visual de las fotografías del lecho y las márgenes de las quebradas y los valores reportados para la rugosidad de Manning en el libro “Open-Channel Hydraulics” Ven Te Chow (1959). De acuerdo con esta comparación, se tuvieron en cuenta los siguientes coeficientes de rugosidad de acuerdo con lo evidenciado en la zona. La siguiente tabla resume los coeficientes utilizados para las modelaciones.

TABLA 25. VALORES DE RUGOSIDAD PARA LAS ZONAS NATURALES DE BANCAS Y LECHO DE LA QUEBRADA

Valores de coeficiente de Manning en corrientes naturales (cauces y llanuras de inundación) y canales revestidos			
Tipo de canal y descripción	**Mín.**	**Normal**	**Máx.**
1. Canales principales			
a. Limpio, recto, lleno, sin grietas ni pozos profundos	0.025	0.03	0.033
b. Lo mismo que el anterior, pero más piedras y maleza	0.03*	0.035*	0.04**
c. Limpio, sinuoso, algunas pozos naturales y bancos de arena	0.033	0.04	0.045
d. Lo mismo que el anterior, pero algunas malezas y rocas	0.035	0.045	0.05
e. Lo mismo que el anterior, con niveles de agua más bajo, con más áreas de pendiente o secciones inefectivas	0.04	0.048	0.055
f. Lo mismo que el "d" pero más piedras	0.045	0.05	0.06
g. Tramos lentos, con maleza, pozos profundos	0.05	0.07	0.08
h. Tramos con mucha maleza, pozos profundos o cauces con gran cantidad de árboles y matorrales	0.07	0.1	0.15
2. Llanuras de inundación			
a. Pastizal sin matorrales			
1. Césped corto	0.025	0.03	0.035
2. Césped alto	0.03	0.035	0.05
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.02	0.03	0.04

Valores de coeficiente de Manning en corrientes naturales (cauces y llanuras de inundación) y canales revestidos			
Tipo de canal y descripción	**Mín.**	**Normal**	**Máx.**
2. Cultivos en hileras maduros	0.025	0.035	0.045
3. Cultivos de campo maduros	0.03	0.04	0.05
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, maleza densa	0.035***	0.05***	0.07
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.05	0.06
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.04	0.06	0.08
4. Matorrales de medio a densos, en invierno	0.045	0.07	0.11
5. Matorrales de medio a densos, en verano	0.07	0.1	0.16
d. Árboles			
1. Terreno despejado con tocones de árboles, sin retoños nuevos	0.03	0.04	0.05
2. Lo mismo que el anterior, pero retoños densos	0.05	0.06	0.08
3. Bosque denso, pocos árboles caídos, poca maleza, flujo debajo de las ramas	0.08	0.1	0.12
4. Lo mismo que el anterior, pero con flujo por las ramas	0.1	0.12	0.16
5. Sauces densos, en verano y rectos.	0.11	0.15	0.2
3. Corrientes de montaña, sin vegetación en el cauce, bancas generalmente escarpadas, con árboles y matorrales sumergidas en las bancas			

Valores de coeficiente de Manning en corrientes naturales (cauces y llanuras de inundación) y canales revestidos			
Tipo de canal y descripción	**Mín.**	**Normal**	**Máx.**
a. En el fondo: grava, guijarros y algunas rocas grandes	0.03	0.04	0.05
b. En el fondo: guijarros con rocas muy grandes	0.04	0.05	0.07
4. Canales construidos			
a. Concreto acabado con llana en el fondo			
1. Piedra tallada con mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra aleatoria en mortero	0.017	0.020****	0.024
3. Mampostería de escombros de cemento, enlucida	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de escombros de cemento	0.020	0.025	0.030
5. Escombros secos sobre escollera	0.020	0.030	0.035
5. Canales construidos (laterales)			
a. Concreto			
1. Acabado con llana	.013*****	.015*****	0.016

NOTAS:

*Valor para el lecho natural aguas arriba del box culvert nuevo (solo en modelación de box culvert sin canal abierto) representado en las secciones con abscisas K0+438, K0+446 y K0+454.

**Valor para el lecho natural aguas abajo del box culvert existente (ambas modelaciones) desde la sección K0+005 hasta la K0+045.

***Valor para las bancas naturales donde no hay existencia de obras canalizadoras.

****Valor para la losa inferior del box culvert existente + nuevo (evidenciado en ambas modelaciones) desde la abscisa K0+047.93 hasta la K0+430.69.

*****Valor para el fondo del canal abierto, y los laterales del canal y box culvert (en ambas modelaciones).

4.5 CONDICIONES DE FRONTERA (“BOUNDARY CONDITIONS”)

Las condiciones de frontera son necesarias para iniciar el cálculo del nivel de la superficie libre del agua en los extremos de un sistema fluvial (aguas arriba o aguas abajo). Se requiere suponer, o conocer, el nivel de la superficie libre del agua en uno de los extremos del tramo a simular, para que el programa HEC-RAS pueda iniciar los cálculos en las secciones transversales subsiguientes. En condición de flujo subcrítico, las condiciones de frontera se requieren solamente en la sección de aguas abajo del tramo fluvial a simular. Si el régimen de flujo es supercrítico, se requiere como condición de borde, conocer el nivel de flujo en la sección de aguas arriba del tramo a simular. Si se considera que en el tramo se puede presentar un régimen mixto, se deben tener condiciones de frontera en las secciones extremas de aguas arriba y aguas abajo.

El programa HEC-RAS manejó cuatro tipos de condiciones de frontera:

Elevación de nivel de flujo conocida: Para esta condición de frontera el usuario debe ingresar un nivel de la superficie libre del agua para cada caudal que se quiera simular.

Profundidad crítica: Cuando se selecciona esta condición de frontera, el usuario no requiere ingresar ninguna información adicional. El programa HEC-RAS calculará el nivel de flujo crítico asociado a cada caudal que se quiera simular.

Profundidad Normal: Para este tipo de condición de frontera, el usuario requiere ingresar la pendiente de la línea de energía, que será utilizada por el programa HEC-RAS para calcular la profundidad Normal, utilizando la ecuación de Manning en cada sección. Se calcula una profundidad Normal, asociada a cada caudal que se quiera simular.

Curva de calibración: Cuando se utiliza esta condición de frontera, el usuario debe ingresar una tabla de elevación versus caudal. Para cada perfil de flujo que se quiera simular, la elevación de la superficie libre del agua es interpolada utilizando la curva de calibración proporcionada por el usuario.

Cuando la elevación de la superficie libre del agua, en los extremos del tramo fluvial a simular no se conoce, el usuario debe estimar bien sea el nivel de la superficie libre del agua, o seleccionar la profundidad normal o la profundidad crítica. Al utilizar un estimativo del nivel de la superficie libre del agua en las fronteras, se incorporará un error en el cálculo del nivel de la superficie libre en la vecindad de las secciones de frontera (aguas arriba o aguas abajo). Para tener respuestas más precisas en el tramo de interés, se deben ingresar secciones transversales adicionales. Si el régimen de flujo es subcrítico, es aconsejable ingresar secciones transversales adicionales aguas abajo del tramo de interés, y si el régimen de flujo es supercrítico, es aconsejable ingresar secciones transversales adicionales en el tramo de aguas arriba, del sector de interés. Si en el tramo de estudio, se

advierte que se puede presentar un régimen de flujo mixto, es entonces aconsejable ingresar secciones transversales adicionales, tanto aguas arriba, como aguas abajo.

Con el fin de probar si las secciones transversales adicionadas son suficientes para una condición de frontera específica, el usuario debe tantear con diferentes elevaciones en la sección transversal de frontera. Si el nivel de la superficie libre en las secciones transversales que se encuentran al interior del tramo de interés converge a una misma respuesta, quiere decir que las secciones transversales adicionadas son suficientes, y por lo tanto el nivel de la superficie libre del agua supuesto en la frontera, no afecta las respuestas en el área de estudio. Si no converge, hay que ingresar secciones transversales adicionales, aguas arriba, aguas abajo, o en ambos extremos, del sector de interés.

Para el caso que nos ocupa, el estudio de niveles de flujo durante el paso de las crecientes por las estructuras hidráulicas en consideración, se supuso condiciones de flujo crítico en la sección de aguas arriba, y flujo normal en la sección de aguas abajo.

4.6 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO

Para la simulación de la mancha de inundación en la planicie y las condiciones hidráulicas del flujo para diferentes crecientes, el modelo requiere la geometría del cauce (secciones transversales), la rugosidad del lecho y de las bancas, los caudales de diseño y las condiciones iniciales y de frontera.

La geometría del canal permite determinar la capacidad del cauce para transportar una determinada creciente. En el tramo del levantamiento topográfico de la quebrada se transitaron las crecientes con período de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Al modelo HEC-RAS se ingresan las distancias entre secciones consecutivas, medidas por la línea central y por cada margen, para dar cuenta implícitamente del alineamiento del canal.

Los caudales máximos utilizados para la simulación del flujo en la quebrada en los dos puntos de estudio de canalización hidráulica son el resultado de la aplicación del método racional como se describe en el componente hidrológico. En las siguientes tablas, se presentan nuevamente los estimativos de crecientes máximas para diferentes períodos de retorno en la quebrada a la altura de los dos puntos de interés.

TABLA 26. CAUDALES DE CRECIENTES SOBRE ESTRUCTURA HIDRÁULICA TIPO CANAL ABIERTO PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO EN M³/S

CAUDALES (MÉTODO RACIONAL)		
Q=C*I*A/3.6		
Tiempo concentración (min)		22.86
Área cuenca (km²)		0.39
Tr (años)	I (mm/h)	Q (m³/s)
2.33	72.15	3.69
5	82.78	4.57
10	93.78	5.41
25	110.60	6.91
50	125.30	8.28
100	141.95	10.05

TABLA 27. CAUDALES DE CRECIENTES SOBRE ESTRUCTURA HIDRÁULICA TIPO BOX CULVERT PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO EN M³/S

CAUDALES (MÉTODO RACIONAL)		
Q=C*I*A/3.6		
Tiempo concentración (min)		26.23
Área cuenca (km²)		0.50
Tr (años)	I (mm/h) ponderada	Q (m³/s)
2.33	65.90	4.89
5	75.61	6.03
10	85.66	7.12
25	101.02	9.03
50	114.44	10.79
100	129.65	13.04

4.7 CONDICIONES DEL FLUJO PARA LOS CAUDALES SIMULADOS

4.7.1 Condiciones de flujo fuente SAN JOSÉ.

Las secciones transversales en el modelo HEC-RAS se enumeran desde la sección de aguas abajo (sección 1, abscisa K0+005) hasta la sección de aguas arriba (sección 38, Abscisa K0+454). Como se mencionó anteriormente, desde la sección K0+005 hasta la K0+045 corresponde a la modelación de la quebrada en condiciones naturales. A partir de la sección K0+047.93 hasta la abscisa K0+173.79 se encuentra el box culvert existente de sección geométrica de 1.20 × 1.70 m. A partir de esta última abscisa K0+173.79 hasta la sección K0+389.67 consiste en un box culvert (proyectado) de la misma sección transversal de 1.20 × 1.70 m. Luego, hasta la abscisa K0+395.63 va haciendo una transición al box culvert (proyectado) de 1.50 × 1.70 m. A partir de este último hasta la sección K0+430.69 se proyecta dicho box culvert nuevo. Finalmente, a partir de este último punto comienza el canal abierto escalonado hasta la abscisa K0+459.36. En las siguientes figuras se presentan los caudales una vez ingresados al programa para los dos puntos de estudio, junto con imágenes de secciones transversales representativas de la modelación, haciendo la claridad de que tanto el box culvert como el canal abierto se modelaron de la misma manera (representando el box como canal abierto debido a que está proyectado para trabajar parcialmente lleno).

FIGURA 9. CAUDALES DE INGRESO MODELACIÓN EN HEC RAS EN LA FUENTE SAN JOSÉ PARA MODELACIÓN DE CANAL ABIERTO

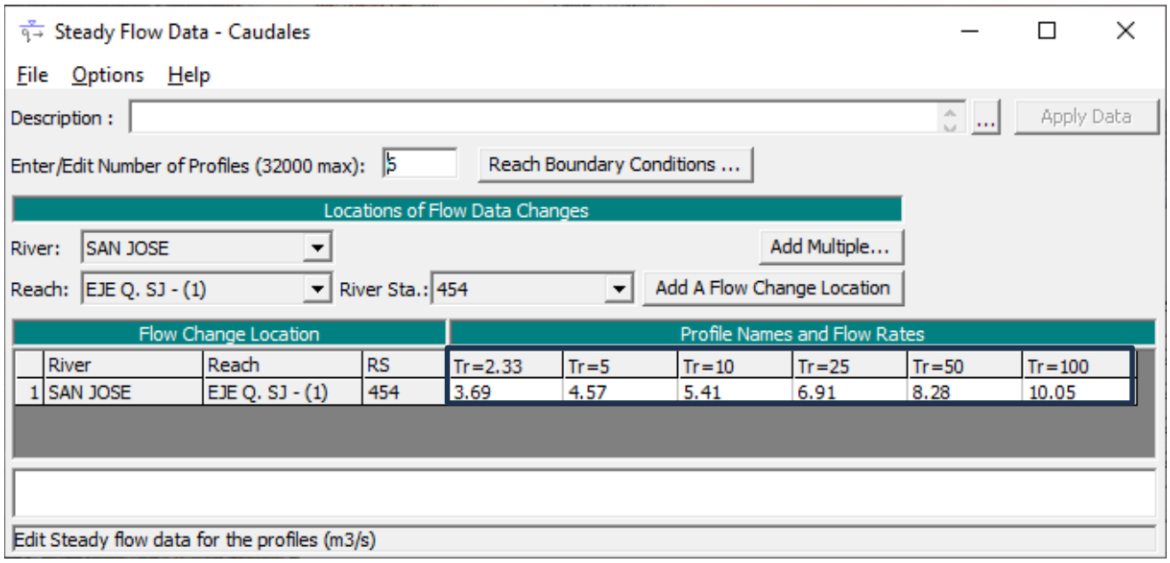


FIGURA 10. CAUDALES DE INGRESO MODELACIÓN EN HEC RAS EN LA FUENTE SAN JOSÉ PARA MODELACIÓN BOX CULVERT

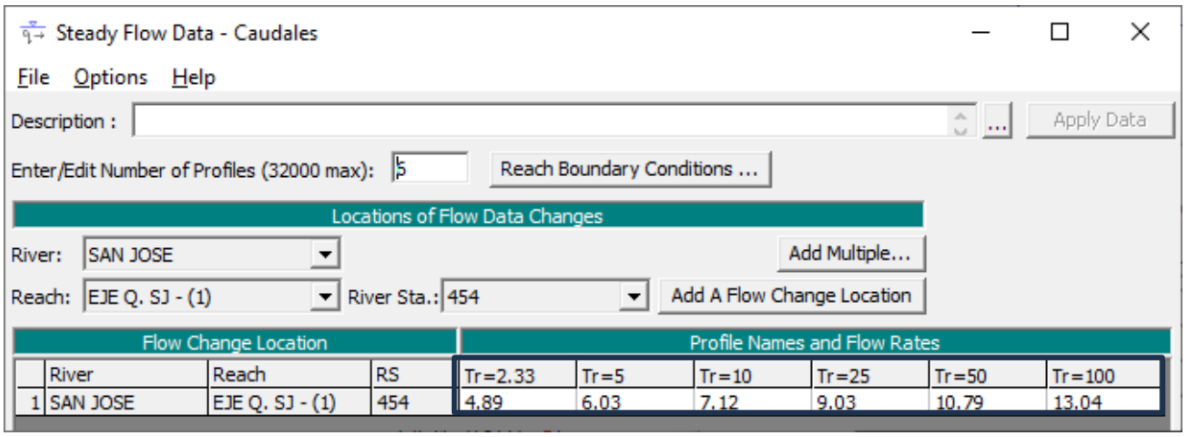


FIGURA 11. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+045 REPRESENTANDO LECHO NATURAL AGUAS ABAJO DEL BOX CULVERT EXISTENTE Q_{TR100}=13.04 M^3/S

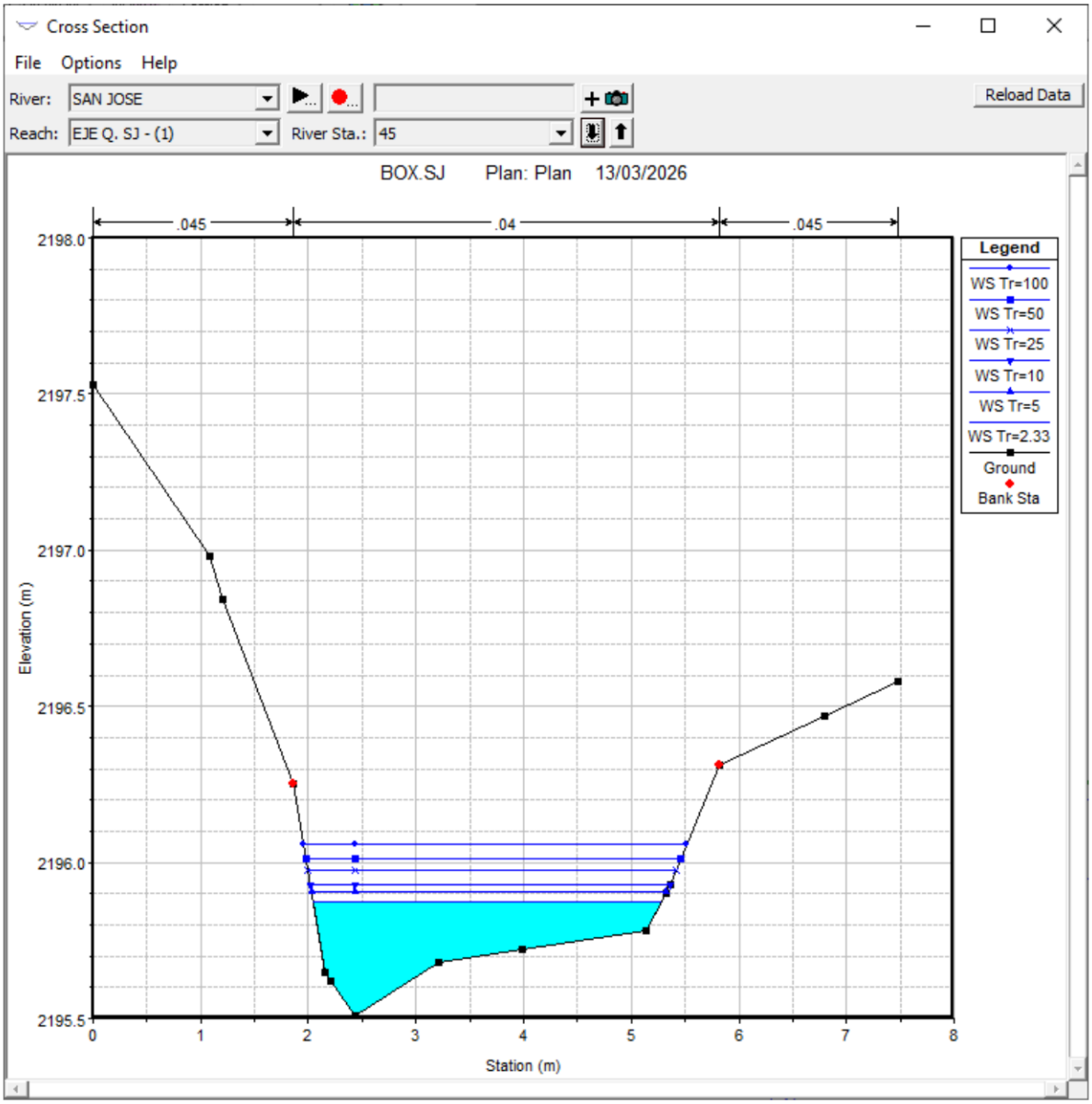


FIGURA 12. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+047.93 REPRESENTANDO SALIDA O DESCOLE DE BOX CULVERT EXISTENTE DE 1.20×1.70 M CON Q_{TR100}=13.04 M^3/S

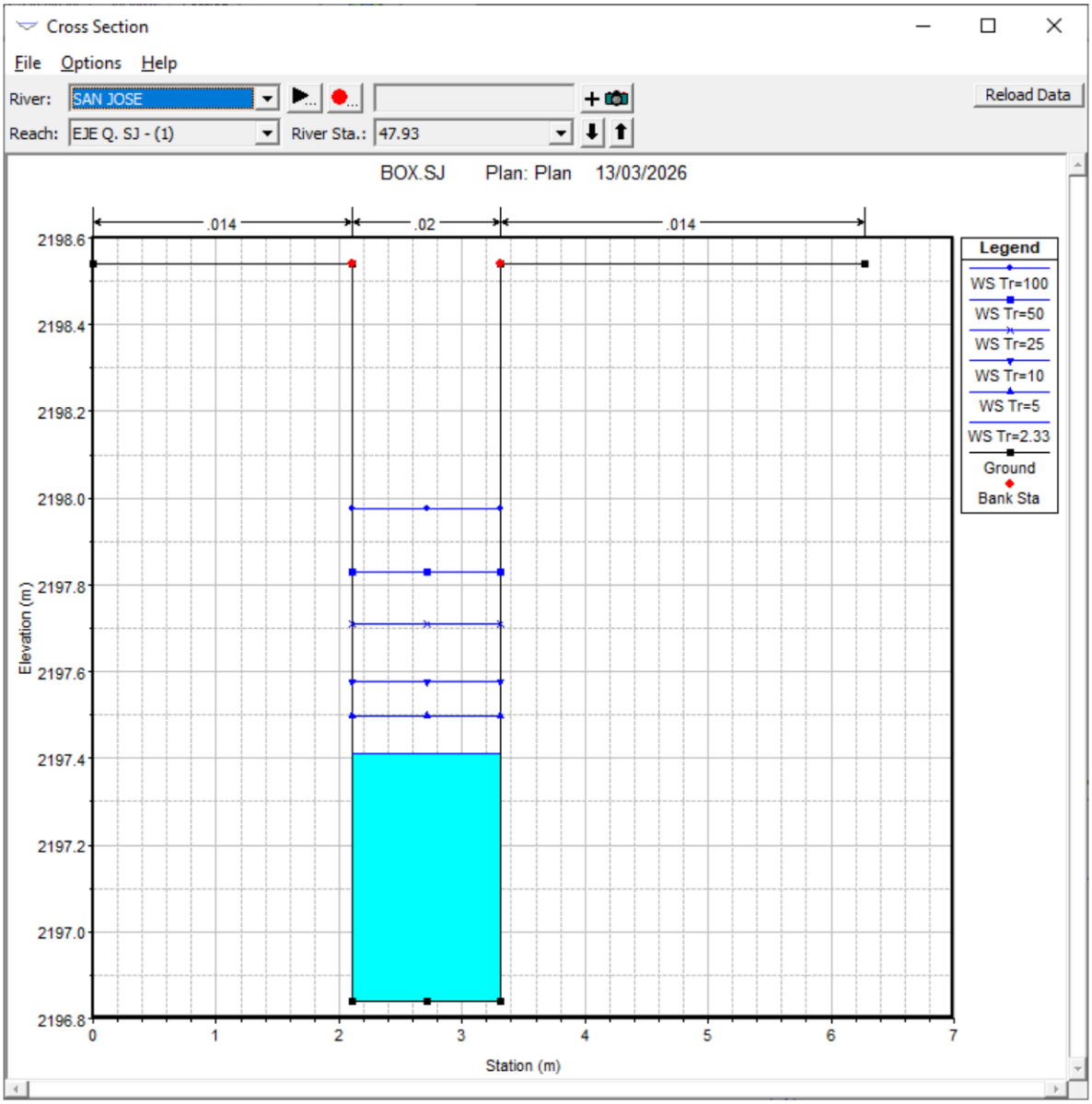


FIGURA 13. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+180 (BOX CULVERT NUEVO SECCIÓN 1.20×1.70 M) EN LA MODELACIÓN HEC-RAS CON Q_{TR100}=13.04 M^3/S

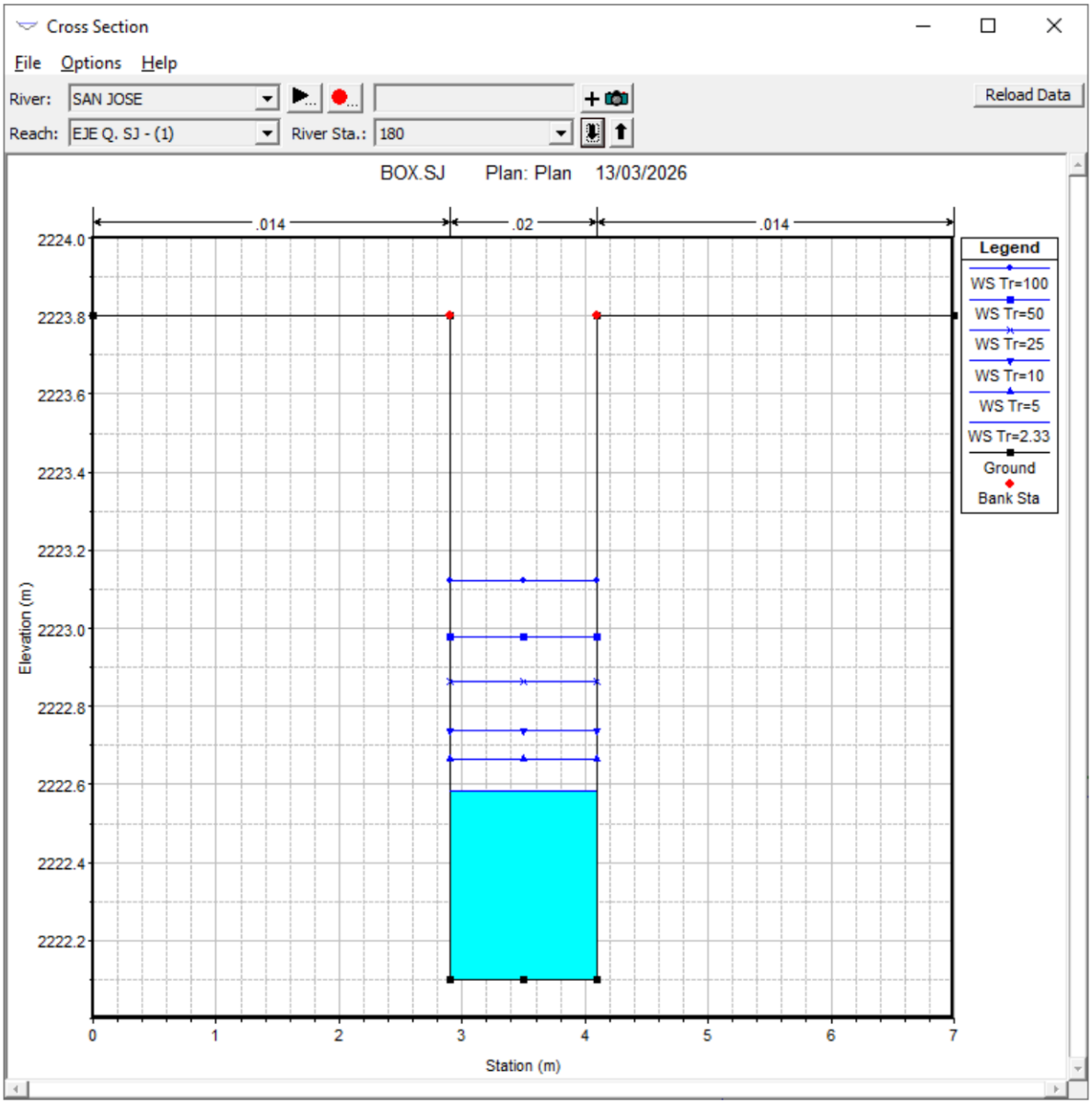


FIGURA 14. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+389.67 REPRESENTANDO LA SALIDA O DESCOLE DE BOX CULVERT NUEVO DE 1.20×1.70 CON Q_{TR100}=13.04 M^3/S

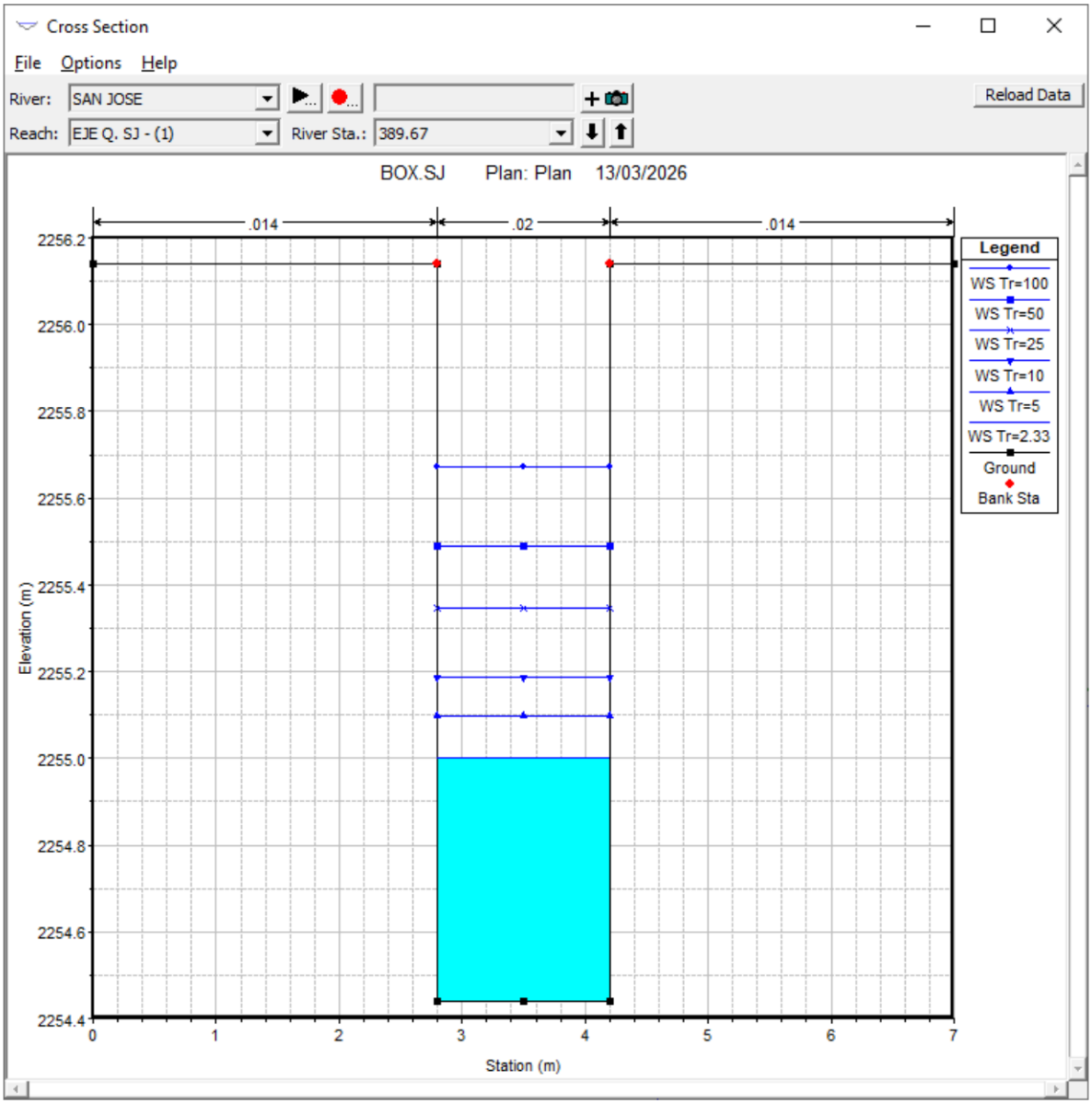


FIGURA 15. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+430.69 REPRESENTANDO INICIO DE BOX CULVERT NUEVO DE 1.50×1.70 M CON Q_{TR100}=13.04 M^3/S

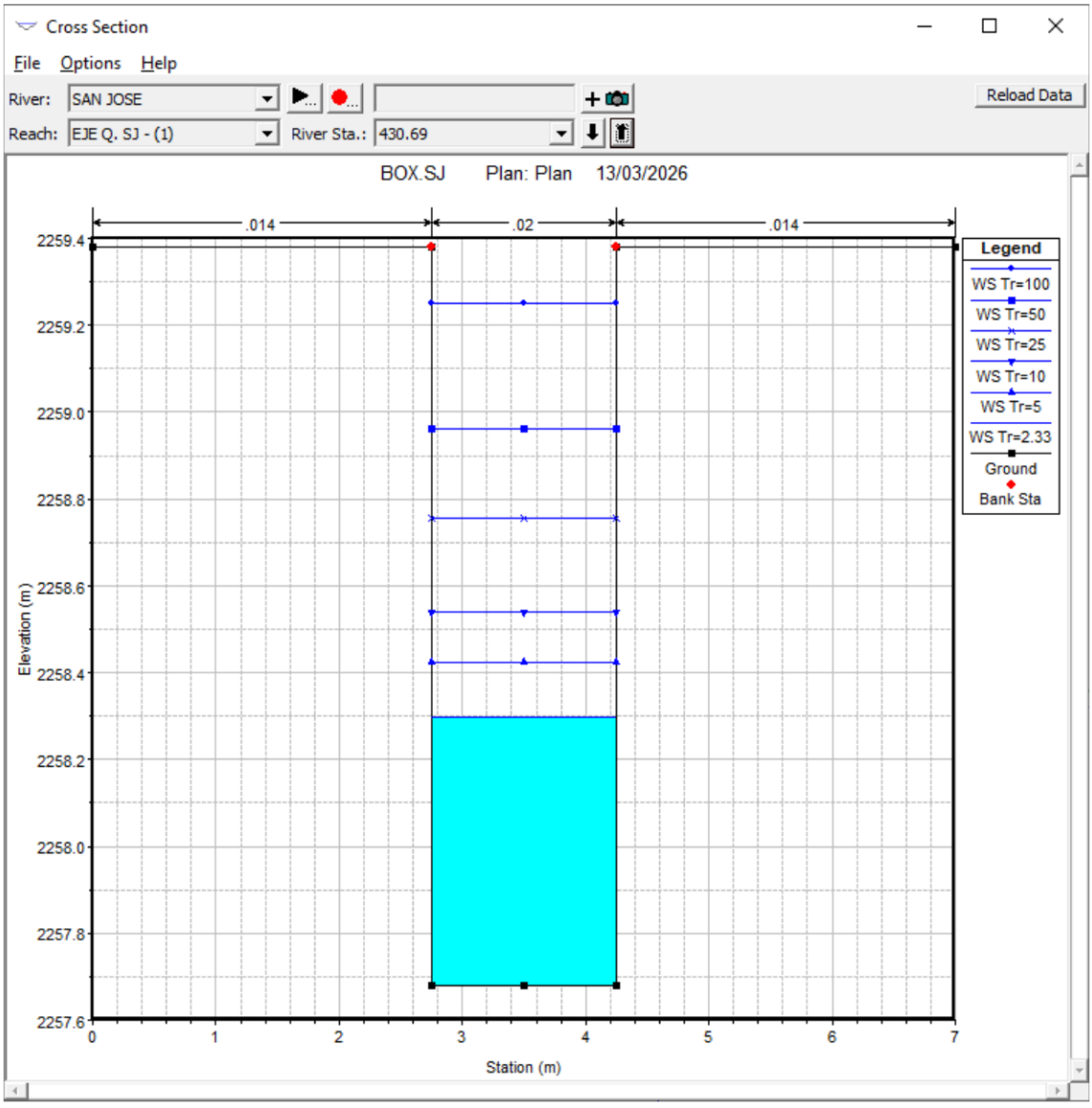
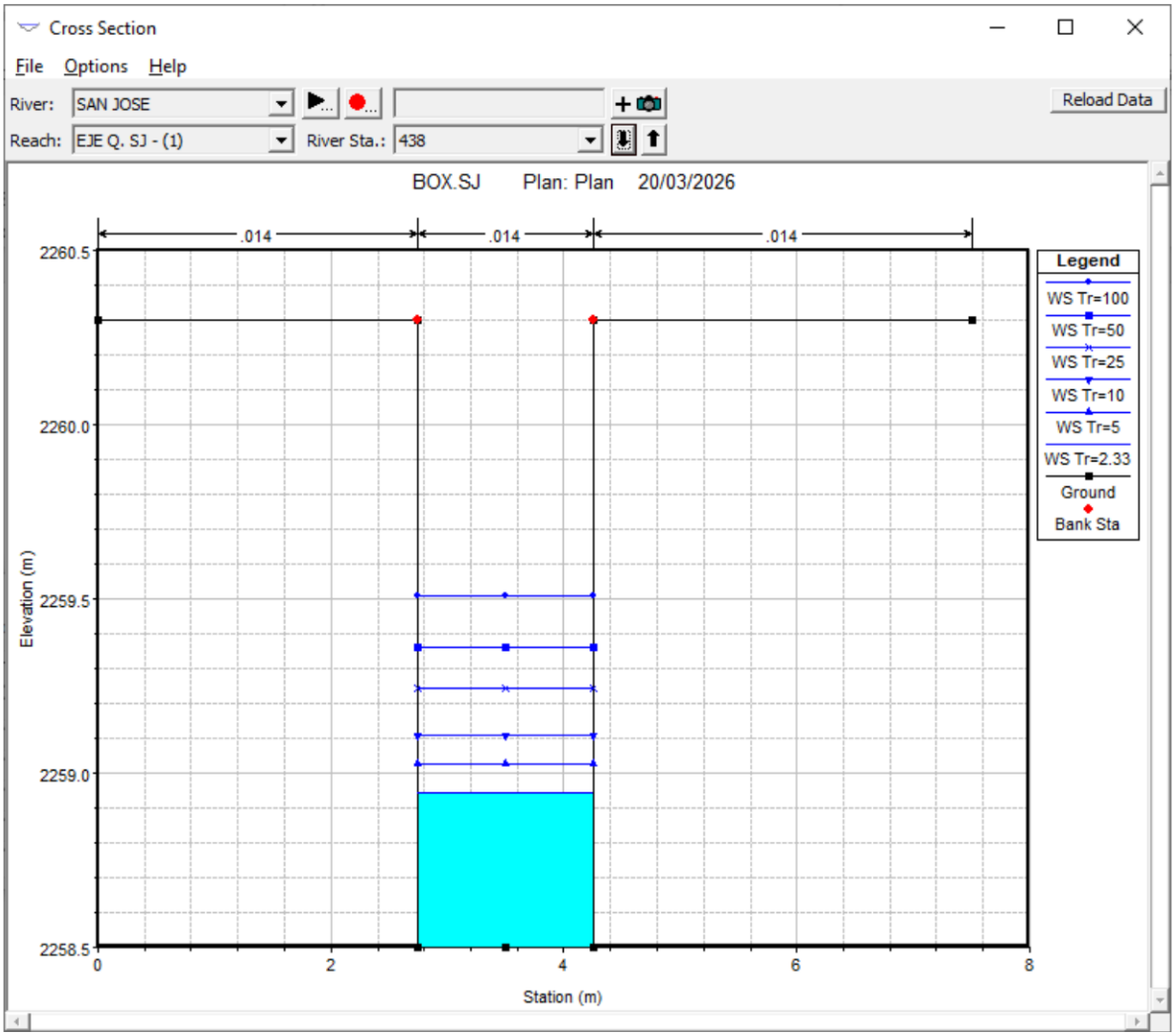


FIGURA 16. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA K0+438 REPRESENTANDO CANAL ABIERTO DE SECCIÓN 1.50×1.80 M EN LA CON Q_{TR100}=10.05 M^3/S



5. ÁNALISIS DE MODELACIONES EN HEC RAS 5.0.7

Una vez realizados los modelos en HEC RAS. 5.0.7 se puede realizar el siguiente resumen de características hidráulicas, con resultados para el periodo de retorno Tr=100 años:

TABLA 28. RESUMEN DE MODELACIÓN CANAL ABIERTO Q_{TR100}=10.05 M^3/S

CUADRO RESUMEN MODELACIÓN												
Tramo	Progresiva	Perfil	Q total	Cota Mín. Canal	Cota lámina superficial	Cota crítica lámina superficial	Cota gradiente energía	Pendiente gradiente energía	Vel. Cauce	Área de flujo	Ancho máximo	Nro. Froude canal
	(K0+000)		(m^3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	[-]
EJE Q. SJ - (1)	454	Tr=100	10.05	2259.52	2261.17	2261.17	2262.01	0.00779	4.06	2.48	1.5	1.01
EJE Q. SJ - (1)	446	Tr=100	10.05	2259.12	2260.31	2260.77	2261.92	0.017387	5.62	1.79	1.5	1.64
EJE Q. SJ - (1)	438	Tr=100	10.05	2258.50	2259.51	2260.15	2261.75	0.026515	6.63	1.52	1.5	2.11
EJE Q. SJ - (1)	430.69	Tr=100	10.05	2257.68	2258.57	2259.64	2261.45	0.074668	7.51	1.34	1.5	2.54
EJE Q. SJ - (1)	420	Tr=100	10.05	2256.83	2257.71	2258.79	2260.64	0.076386	7.58	1.33	1.5	2.57
EJE Q. SJ - (1)	410	Tr=100	10.05	2256.04	2256.92	2258	2259.87	0.077232	7.61	1.32	1.5	2.59
EJE Q. SJ - (1)	400	Tr=100	10.05	2255.25	2256.13	2257.21	2259.1	0.077815	7.63	1.32	1.5	2.6
EJE Q. SJ - (1)	389.67	Tr=100	10.05	2254.44	2255.59	2256.44	2258.31	0.074105	7.31	1.37	1.2	2.18
EJE Q. SJ - (1)	375	Tr=100	10.05	2251.99	2252.93	2253.99	2256.95	0.119933	8.87	1.13	1.2	2.92
EJE Q. SJ - (1)	360	Tr=100	10.05	2249.48	2250.36	2251.49	2254.99	0.143486	9.52	1.06	1.2	3.24
EJE Q. SJ - (1)	345	Tr=100	10.05	2247.41	2248.3	2249.42	2252.85	0.140808	9.45	1.06	1.2	3.21
EJE Q. SJ - (1)	330	Tr=100	10.05	2245.19	2246.07	2247.19	2250.72	0.144354	9.55	1.05	1.2	3.26
EJE Q. SJ - (1)	315	Tr=100	10.05	2242.89	2243.76	2244.89	2248.52	0.148808	9.66	1.04	1.2	3.31
EJE Q. SJ - (1)	300	Tr=100	10.05	2240.64	2241.51	2242.65	2246.28	0.14933	9.68	1.04	1.2	3.32
EJE Q. SJ - (1)	285	Tr=100	10.05	2238.40	2239.27	2240.41	2244.04	0.14933	9.68	1.04	1.2	3.32
EJE Q. SJ - (1)	270	Tr=100	10.05	2236.16	2237.03	2238.17	2241.8	0.14933	9.68	1.04	1.2	3.32
EJE Q. SJ - (1)	255	Tr=100	10.05	2234.01	2234.88	2236.01	2239.58	0.146302	9.6	1.05	1.2	3.28
EJE Q. SJ - (1)	240	Tr=100	10.05	2232.08	2232.97	2234.08	2237.45	0.137676	9.37	1.07	1.2	3.17
EJE Q. SJ - (1)	225	Tr=100	10.05	2230.06	2230.96	2232.07	2235.4	0.13612	9.33	1.08	1.2	3.14
EJE Q. SJ - (1)	210	Tr=100	10.05	2227.78	2228.66	2229.79	2233.3	0.143919	9.54	1.05	1.2	3.25
EJE Q. SJ - (1)	195	Tr=100	10.05	2224.16	2224.94	2226.16	2230.8	0.194222	10.72	0.94	1.2	3.87
EJE Q. SJ - (1)	180	Tr=100	10.05	2222.10	2222.93	2224.1	2228.11	0.165908	10.08	1	1.2	3.53
EJE Q. SJ - (1)	165	Tr=100	10.05	2219.89	2220.74	2221.89	2225.7	0.156637	9.86	1.02	1.2	3.42
EJE Q. SJ - (1)	150	Tr=100	10.05	2216.70	2217.5	2218.7	2223.15	0.185273	10.53	0.95	1.2	3.77
EJE Q. SJ - (1)	135	Tr=100	10.05	2213.41	2214.18	2215.41	2220.24	0.202889	10.9	0.92	1.2	3.97
EJE Q. SJ - (1)	120	Tr=100	10.05	2209.70	2210.44	2211.7	2217.03	0.226187	11.37	0.88	1.2	4.23
EJE Q. SJ - (1)	105	Tr=100	10.05	2205.93	2206.65	2207.93	2213.54	0.239554	11.62	0.86	1.2	4.37
EJE Q. SJ - (1)	90	Tr=100	10.05	2201.95	2202.66	2203.95	2209.84	0.253242	11.87	0.85	1.2	4.52
EJE Q. SJ - (1)	80	Tr=100	10.05	2199.16	2199.86	2201.16	2207.26	0.263293	12.05	0.83	1.2	4.62
EJE Q. SJ - (1)	72.07	Tr=100	10.05	2197.92	2198.65	2199.9	2205.32	0.229427	11.43	0.88	1.2	4.27
EJE Q. SJ - (1)	60	Tr=100	10.05	2197.89	2198.79	2199.89	2203.22	0.136005	9.33	1.08	1.2	3.14
EJE Q. SJ - (1)	53.47	Tr=100	10.05	2197.88	2198.88	2199.91	2202.45	0.103564	8.37	1.2	1.2	2.67
EJE Q. SJ - (1)	47.93	Tr=100	10.05	2196.84	2197.78	2198.85	2201.83	0.121374	8.92	1.13	1.2	2.94
EJE Q. SJ - (1)	45	Tr=100	10.05	2195.51	2196	2196.66	2201.06	0.93301	9.97	1.01	3.46	5.9
EJE Q. SJ - (1)	35	Tr=100	10.05	2192.05	2192.7	2193.24	2195.43	0.327977	7.32	1.37	3.4	3.68
EJE Q. SJ - (1)	25	Tr=100	10.05	2189.00	2189.55	2190.12	2192.26	0.30636	7.29	1.39	3.31	3.5
EJE Q. SJ - (1)	15	Tr=100	10.05	2185.95	2186.5	2187.05	2189.21	0.302668	7.31	1.4	3.44	3.39
EJE Q. SJ - (1)	5	Tr=100	10.05	2183.51	2184.28	2184.91	2186.63	0.220646	6.81	1.5	2.74	2.71

TABLA 29. RESUMEN DE MODELACIÓN BOX CULVERT Q_{TR100}=13.04 M^3/S

CUADRO RESUMEN MODELACIÓN

Tramo	Progresiva	Perfil	Q total	Cota Mín. Canal	Cota lámina superficial	Cota crítica lámina superficial	Cota gradiente energía	Pendiente gradiente energía	Vel. Cauce	Área de flujo	Ancho máximo	Nro. Froude canal
	(K0+000)		(m^3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	[-]
EJE Q. SJ - (1)	454	Tr=100	13.04	2259.63	2261.42	2261.42	2261.79	0.01265	3.37	5.4	7.04	0.86
EJE Q. SJ - (1)	446	Tr=100	13.04	2259.00	2259.91	2260.38	2261.54	0.056796	6.15	2.65	4.89	2.15
EJE Q. SJ - (1)	438	Tr=100	13.04	2258.63	2259.53	2259.96	2261.01	0.068956	6.98	2.85	5.75	2.41
EJE Q. SJ - (1)	430.69	Tr=100	13.04	2257.68	2259.36	2259.74	2260.72	0.025608	5.17	2.52	1.5	1.27
EJE Q. SJ - (1)	420	Tr=100	13.04	2256.83	2258.17	2258.88	2260.33	0.045049	6.51	2	1.5	1.8
EJE Q. SJ - (1)	410	Tr=100	13.04	2256.04	2257.27	2258.09	2259.83	0.05566	7.09	1.84	1.5	2.04
EJE Q. SJ - (1)	400	Tr=100	13.04	2255.25	2256.42	2257.3	2259.24	0.062771	7.43	1.75	1.5	2.19
EJE Q. SJ - (1)	389.67	Tr=100	13.04	2254.44	2255.68	2256.5	2258.57	0.066406	7.53	1.73	1.4	2.16
EJE Q. SJ - (1)	375	Tr=100	13.04	2251.99	2253.2	2254.1	2257.34	0.109958	9.01	1.45	1.2	2.62
EJE Q. SJ - (1)	360	Tr=100	13.04	2249.48	2250.59	2251.6	2255.51	0.135872	9.82	1.33	1.2	2.98
EJE Q. SJ - (1)	345	Tr=100	13.04	2247.41	2248.51	2249.53	2253.46	0.136825	9.85	1.32	1.2	2.99
EJE Q. SJ - (1)	330	Tr=100	13.04	2245.19	2246.28	2247.31	2251.37	0.141832	9.99	1.3	1.2	3.06
EJE Q. SJ - (1)	315	Tr=100	13.04	2242.89	2243.96	2245.01	2249.21	0.14711	10.14	1.29	1.2	3.13
EJE Q. SJ - (1)	300	Tr=100	13.04	2240.64	2241.71	2242.76	2246.99	0.148384	10.18	1.28	1.2	3.15
EJE Q. SJ - (1)	285	Tr=100	13.04	2238.40	2239.47	2240.52	2244.76	0.148795	10.19	1.28	1.2	3.15
EJE Q. SJ - (1)	270	Tr=100	13.04	2236.16	2237.23	2238.28	2242.53	0.149053	10.2	1.28	1.2	3.15
EJE Q. SJ - (1)	255	Tr=100	13.04	2234.01	2235.08	2236.13	2240.31	0.146453	10.12	1.29	1.2	3.12
EJE Q. SJ - (1)	240	Tr=100	13.04	2232.08	2233.18	2234.19	2238.17	0.138434	9.9	1.32	1.2	3.02
EJE Q. SJ - (1)	225	Tr=100	13.04	2230.06	2231.16	2232.18	2236.11	0.136734	9.85	1.32	1.2	2.99
EJE Q. SJ - (1)	210	Tr=100	13.04	2227.78	2228.86	2229.9	2234.01	0.143625	10.04	1.3	1.2	3.08
EJE Q. SJ - (1)	195	Tr=100	13.04	2224.16	2225.13	2226.28	2231.55	0.189213	11.22	1.16	1.2	3.64
EJE Q. SJ - (1)	180	Tr=100	13.04	2222.10	2223.12	2224.21	2228.89	0.165731	10.64	1.23	1.2	3.36
EJE Q. SJ - (1)	165	Tr=100	13.04	2219.89	2220.93	2221.99	2226.47	0.157434	10.42	1.25	1.2	3.26
EJE Q. SJ - (1)	150	Tr=100	13.04	2216.70	2217.68	2218.81	2223.93	0.183015	11.07	1.18	1.2	3.57
EJE Q. SJ - (1)	135	Tr=100	13.04	2213.41	2214.36	2215.52	2220.99	0.196874	11.4	1.14	1.2	3.73
EJE Q. SJ - (1)	120	Tr=100	13.04	2209.70	2210.61	2211.8	2217.86	0.220729	11.93	1.09	1.2	3.99
EJE Q. SJ - (1)	105	Tr=100	13.04	2205.93	2206.82	2208.04	2214.45	0.235246	12.23	1.07	1.2	4.14
EJE Q. SJ - (1)	90	Tr=100	13.04	2201.95	2202.82	2204.06	2210.81	0.24965	12.52	1.04	1.2	4.29
EJE Q. SJ - (1)	80	Tr=100	13.04	2199.16	2200.01	2201.28	2208.26	0.259855	12.72	1.03	1.2	4.39
EJE Q. SJ - (1)	72.07	Tr=100	13.04	2197.92	2198.82	2199.99	2206.32	0.230613	12.13	1.07	1.2	4.09
EJE Q. SJ - (1)	60	Tr=100	13.04	2197.89	2198.97	2200	2204.15	0.144856	10.08	1.29	1.2	3.1
EJE Q. SJ - (1)	53.47	Tr=100	13.04	2197.88	2199.07	2200.02	2203.31	0.113313	9.12	1.43	1.2	2.67
EJE Q. SJ - (1)	47.93	Tr=100	13.04	2196.84	2197.98	2198.96	2202.65	0.127595	9.57	1.36	1.2	2.87
EJE Q. SJ - (1)	45	Tr=100	13.04	2195.51	2196.06	2196.8	2201.87	0.875356	10.67	1.22	3.56	5.82
EJE Q. SJ - (1)	35	Tr=100	13.04	2192.05	2192.77	2193.41	2196.11	0.351253	8.1	1.61	3.58	3.86
EJE Q. SJ - (1)	25	Tr=100	13.04	2189.00	2189.63	2190.3	2192.84	0.303324	7.95	1.66	3.53	3.55
EJE Q. SJ - (1)	15	Tr=100	13.04	2185.95	2186.58	2187.22	2189.8	0.304391	8.01	1.69	3.86	3.45
EJE Q. SJ - (1)	5	Tr=100	13.04	2183.51	2184.39	2185.11	2187.19	0.225412	7.47	1.8	2.95	2.77

6. RESUMEN DE OBRAS A EJECUTAR

6.1 DESCRIPCIÓN DE OBRAS

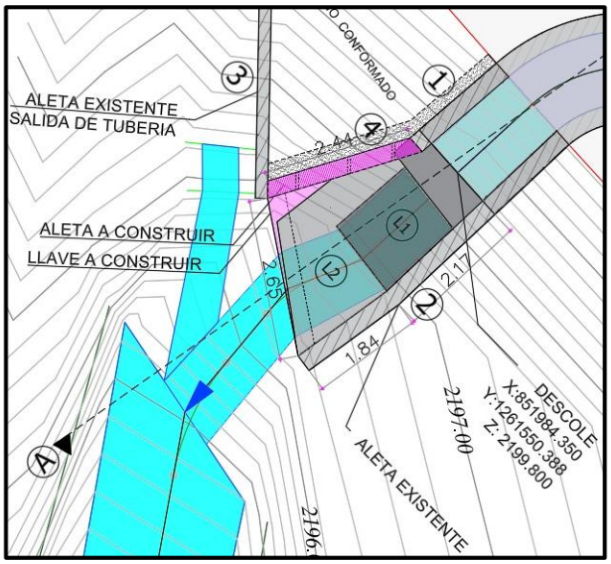
- En la zona urbana del municipio de Yarumal, Antioquia, se proyecta realizar una obra hidráulica de canalización de la quebrada “San José” por medio de un canal abierto y un box culvert.
- Se tiene en cuenta que hay un tramo de box culvert existente de sección hidráulica de 1.20×1.70 m, que en términos de calles se ubica desde la carrera 23 hasta la carrera 22, y en términos de abscisado trazado para el proyecto se ubica entre K0+047.93 y K0+173.79, teniendo una longitud de 125.86 m. Se proyecta el empalme de un box culvert de sección 1.20×1.70 m nuevo a partir de esta última abscisa hasta la K0+430.69, cuya sección es de 1.20×1.70 m hasta la abscisa K0+389.67, en donde comienza a hacer una transición de sección hasta la abscisa K0+395.63, llegando a la sección de 1.50×1.70 m, la cual se conserva hasta la mencionada abscisa de K0+430.69). La longitud total de este tramo nuevo de box culvert es de 256.90 m. A partir de la abscisa K0+430.69 hasta la K0+459.36 se ubica el canal abierto escalonado de sección 1.50×1.80 m, con una longitud de 28.67 m. En la figura N.º 20 se grafica lo anteriormente descrito, así como en la modelación hidráulica y plano topográfico se puede ver a mayor detalle.
- Para el tema de la socavación con respecto a la obra, se proyecta la construcción de una aleta al lado derecho (sentido del flujo) en el descole del box culvert existente, el cual se ubica en la abscisa K0+047.93, dada la vulnerabilidad que existe en la obra en este costado. Esto puede observarse en la siguiente fotografía del sitio:

FIGURA 17. CONDICIÓN EXISTENTE (AUSENCIA DE ALETA DERECHA EN SENTIDO DEL FLUJO) DESCOLE DE BOX CULVERT EN LA ABSCISA K0+047.93



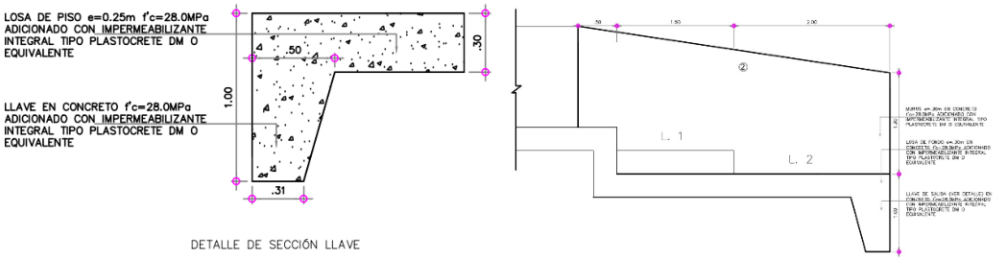
Adicionalmente, se completa la losa para que quede como una estructura monolítica. En la siguiente imagen se evidencia el diseño planteado:

FIGURA 18. ALETA PROYECTADA Y COMPLETACIÓN DE LOSA PARA MITIGAR LA SOCAVACIÓN LATERAL EN DESCOLE DE BOX CULVERT EXISTENTE (COLOR MAGENTA)



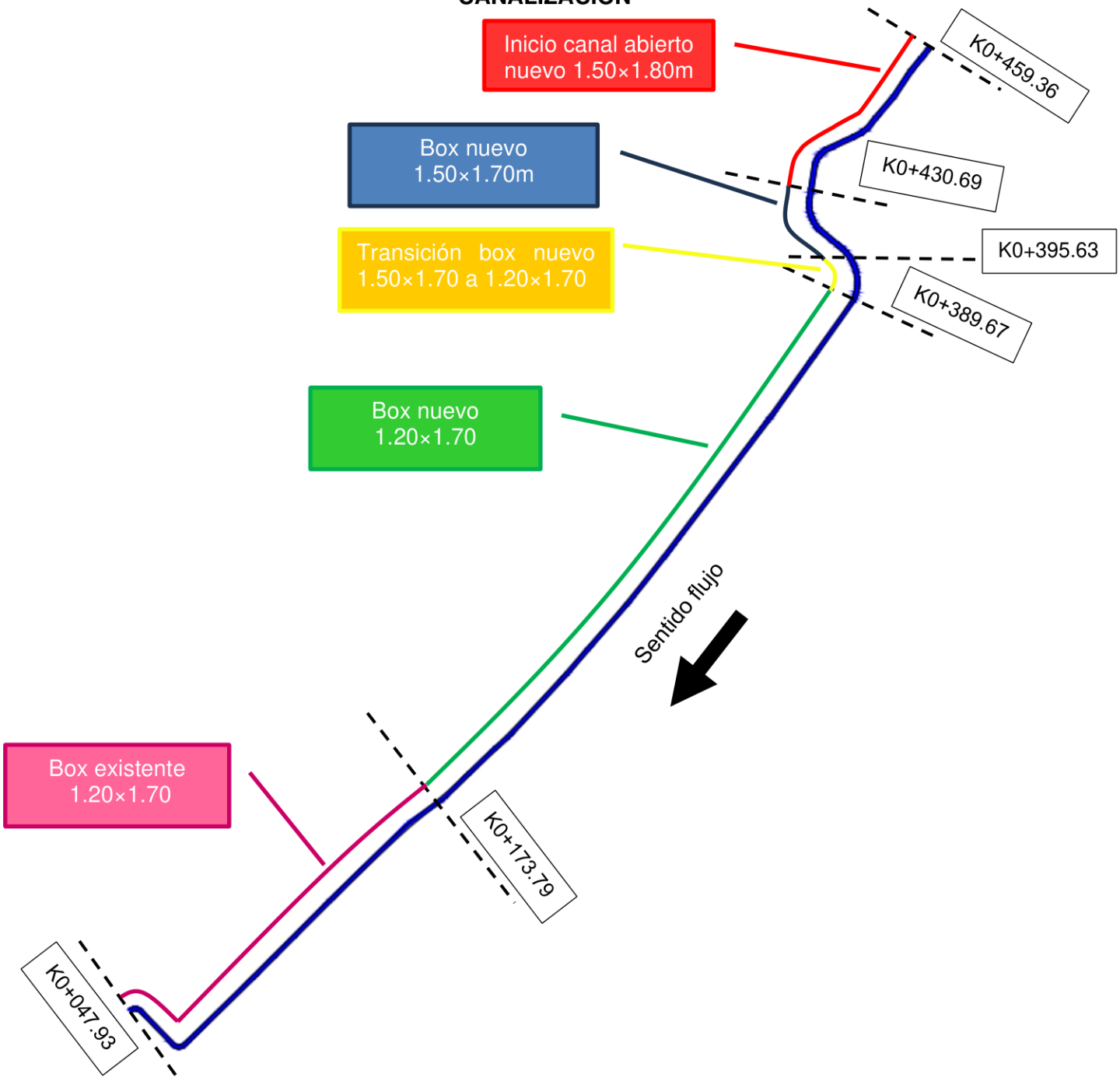
- Por otro lado, considerando que la socavación también afecta verticalmente, se proyecta una llave de confinamiento con las siguientes características:

FIGURA 19. DISEÑO DE LLAVE VERTICAL DE CONFINAMIENTO PARA LA SOCAVACIÓN



DETALLE DE SECCIÓN LLAVE

FIGURA 20. VISTA EN PLANTA DEL DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS DE CANALIZACIÓN



La información previamente descrita se consolida y complementa en las siguientes tablas:

TABLA 30. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA CANAL ABIERTO

Obra N°:			1	Tipo de la Obra:				Canal abierto	
Nombre de la Fuente:			San José					Duración de la Obra:	Permanente
Coordenadas								Altura(m):	1.80
LONGITUD (W) - X				LATITUD (N) Y			Z	Longitud(m):	28.67
Inicio	-75°	24’	53.07”	6°	57’	43.05”	2261.73	talud(H:V):	0:1
								ancho menor (m):	1.50
								ancho mayor(m):	1.50
Final	-75°	24’	53.64”	6°	57’	42.44”	2257.68	Pendiente Longitudinal (%):	Variable: 12,1%;4.7%;44.2%
								Profundidad obra de Socavación(m):	1.00
								Capacidad(m3/seg):	19.64*
								Cota Lámina de agua de la fuente de Tr= 100 años (m) sección K0+446	2260.31
								Cota del fondo del canal (m) sección K0+446	2259.12
Observaciones:				*El valor corresponde al cálculo de la capacidad hidráulica del canal para la pendiente más desfavorable, que es el valor de 4.7%					

TABLA 31. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA BOX CULVERT

Obra N°:			2	Tipo de la Obra:			Box culvert nuevo	
Nombre de la Fuente:			San José				Duración de la Obra:	Permanente
Coordenadas inicio*							Altura(m):	1.70
LONGITUD (W) - X			LATITUD (N) Y			Z	Ancho(m):	1.50 / 1.20
-75°	24’	53.64”	6°	57’	42.44”	2259.38	Longitud(m):	256.90
							Pendiente (%):	≈15.4 %
							Capacidad total sección 1.50x1.70 / sección 1.20x1.70 (m3/seg):	23.18 / 23.28**
Coordenadas fin*							Cota Lámina de agua de la fuente de Tr= 100 años (m) sección 1.50x1.70 / sección 1.20x1.70	2256.42 / 2255.68***
-75°	24’	57.73”	6°	57’	35.96”	2222.90	Cota superior de la obra (m) sección 1.50x1.70 / sección 1.20x1.70	2256.95 / 2256.14***
Observaciones:	*Las coordenadas corresponden al abscisado K0+430.69 (inicio box nuevo) y K0+173.79 (fin box nuevo), con Z en la cota hidráulica efectiva en la parte superior de la obra. **Para el cálculo de ambos valores varía la sección transversal y la pendiente en los tramos, obteniendo valores de capacidad hidráulica similares. ***Valores que corresponden en las abscisas K0+400 y K0+389.67 respectivamente como secciones representativas.							

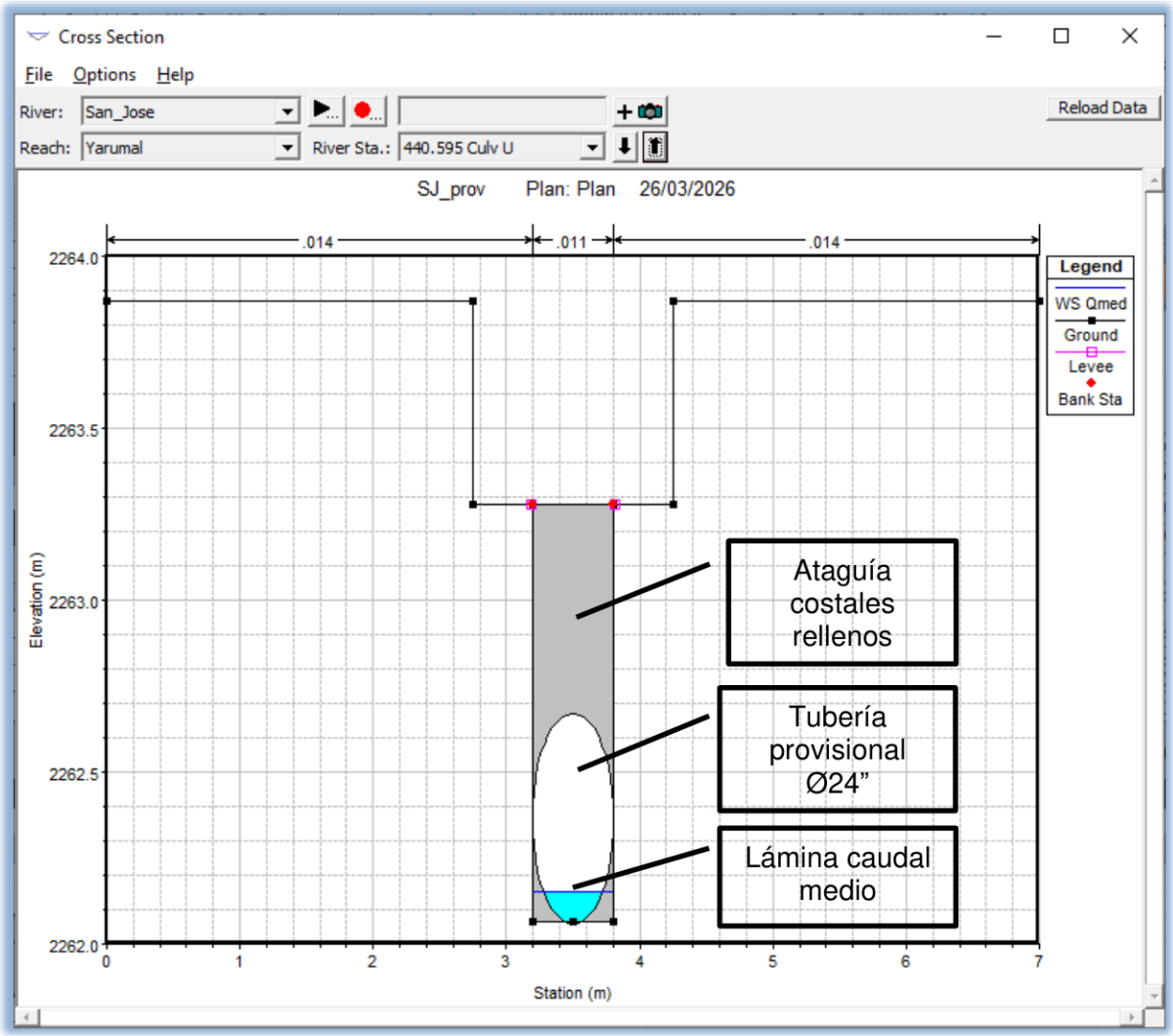
Lo anteriormente descrito se puede ver de forma gráfica y detallada dentro del plano topográfico, donde se ubican espacialmente las estructuras propuestas.

6.2 OBRA PROVISIONAL

- La modelación de la obra provisional se realizó utilizando el caudal medio de la fuente calculado con base en la precipitación promedio multianual y el área de la cuenca, considerando además que la ejecución de la obra definitiva tendrá lugar durante una temporada no invernal. Esto permite un análisis adecuado de las condiciones hidrológicas esperadas. Sin embargo, en caso de presentarse una avenida torrencial inesperada y al ser la obra provisional una ataguía de costales con tubería Novafort PVC, el arrastre y el impacto de estos por el lecho es mínimo, además, la entidad constructora estará obligada a retirar los costales de la fuente y a reconstruir la obra provisional para garantizar la continuidad y correcta finalización de la obra definitiva. Esta medida asegura la protección y estabilidad del proyecto frente a eventos hidrometeorológicos extraordinarios.
- Se plantea el uso de una obra provisional (tubo Novafort PVC de diámetro Ø24") de acuerdo con el caudal medio de la fuente de 0.02245 m^3/s con base en la precipitación promedio multianual y el área de la cuenca, con el objetivo de realizar un desvío temporal del flujo del agua canalizando la entrada por medio de costales rellenos con material proveniente de la excavación, mientras se realiza la construcción de la obra principal, así evitando la sedimentación con residuos sólidos al afluente y tener un mejor rendimiento en la ejecución del proyecto.
- En caso de presentarse una avenida torrencial o creciente extraordinaria, dado que la obra definitiva está diseñada para un periodo de retorno de 100 años, las actividades se suspenderán hasta que el caudal retorne a su nivel medio y las condiciones de trabajo sean seguras. Por ende, la entidad constructora deberá retirar la obra provisional y retomarla en el debido momento que vuelvan las condiciones regulares, garantizando así la continuidad y correcta finalización de la obra definitiva.

Con el fin de demostrar la viabilidad del manejo provisional de aguas, se anexa modelación de la obra mencionada:

FIGURA 21. IMPLEMENTACIÓN DE OBRA PROVISIONAL EN FUENTE "SAN JOSÉ" POR MEDIO DE TUBERÍA PROVISIONAL



La información previamente descrita se consolida y complementa en las siguientes tablas:

TABLA 32. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA PROVISIONAL (TUBERÍA Ø=24")

Obra N°:			3	Tipo de la Obra:			Tubería	
Nombre de la Fuente:			San José	Duración de la Obra:			Provisional	
Coordenadas de inicio							Longitud (m):	33.45
LONGITUD (W) - X			LATITUD (N) Y			Z	Diámetro (m):	0.6096
-75°	24'	53.01"	6°	57'	43.11"	2262.05	Pendiente Longitudinal (m/m):	0.151
							70% Capacidad (m^3/seg):	2.27
Coordenadas de fin							Cota Lámina de agua de la fuente Qmed (m)	2262.15 (entrada) 2257.03 (salida)
-75°	24'	53.72"	6°	57'	42.30"	2257.00	Cota Batea (m)	2262.06 (entrada) 2256.99 (salida)
Observaciones:								

TABLA 33. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA PROVISIONAL (ATAGUÍA EN COSTALES RELLENOS)

Obra N.°				4	Tipo de la obra			Ataguía (muro en costales)	
Nombre de la fuente:				San José				Duración de la obra:	Provisional
Coordenadas								Altura (m)	1.20
	LONGITUD (W) - X			LATITUD (N) Y			Z	Ancho (m)	0.40
Inicio izq. Inicio der.	-75° -75°	24’ 24’	52.95” 53.00”	6° 6°	57’ 57’	43.15” 43.19”	2262.60 2262.60	Longitud (m)	13.00
								Pendiente longitudinal (%)	3.46 %
Fin izq. Fin der.	-75° -75°	24’ 24'	53.70” 53.76”	6° 6°	57’ 57’	42.22” 42.22”	2256.86 2256.86		
Observaciones:									

6.3 MEDIDAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL PARA LA ETAPA CONSTRUCTIVA

Teniendo en cuenta que la obra a ejecutar consiste en la construcción de obras hidráulicas de canalización, se recomienda implementar medidas en pro de la mitigación del impacto ambiental. Por esta razón, se elabora un Plan de Manejo Ambiental (PMA) que se encuentra anexo con la documentación.

6.4 PROGRAMACIÓN DE OBRA

La ejecución del proyecto se estima alcance su ejecución de acuerdo con el cronograma que se adjunta en la respectiva carpeta de programación de obra.

7. CAPACIDAD HIDRÁULICA

Para determinar la capacidad hidráulica de las estructuras se emplea la Ecuación de Manning:

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

Donde

Q: Caudal de diseño, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

n: Coeficiente de rugosidad de Manning.

A: Área mojada, en metros cuadrados (m^2).

Rh: Radio hidráulico, en metros (m).

S: Pendiente del ducto, en metros por metro (m/m).

Según el Instituto Nacional de Vias (2009), las obras como alcantarillas (culverts) deben trabajar máximo con el 70% de su capacidad hidráulica, pues no es permitido el funcionamiento de estas como ductos a presión, para así evitar totalmente los desbordamientos sobre la vía. Además, con este valor se provee un margen para el paso de material flotante y basuras.

Es importante realizar un trabajo de mantenimiento, el cual consiste en la rocería, excavación, remoción, limpieza y transporte de los materiales que se encuentran depositados en los encoles y descoles o dentro del cuerpo de las estructuras existentes, a fin de restablecer su capacidad hidráulica y correcto funcionamiento del drenaje de cauces naturales, que de alguna manera pueden afectar la estabilidad del entorno de las obras.

Conociendo la capacidad hidráulica máxima que debe tener la estructura y los caudales de diseño, es posible obtener una relación que indica cuáles de las estructuras están en la capacidad de transportar el caudal de diseño hidrológico (aquellas cuya relación de caudales es menor a uno) y cuáles no están en capacidad.

$$\frac{Caudal\ de\ diseño}{70\%\ de\ la\ capacidad\ hidráulica} \leq 1$$

Una vez aplicadas las ecuaciones antes mencionadas se tienen los siguientes resultados:

TABLA 34. RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LA OBRA CANAL ABIERTO CON EL CAUDAL Q_{TR100}=10.05 M^3/S

COMPROBACIÓN DISEÑO	
Caudal diseño, Q_{dis} [m^3/s]	10.05
Capacidad hidráulica canal 1.20x1.80 [m^3/s]	19.64
Relación Caudal diseño/Capacidad hidráulica	0.51
Tirante normal, Y0 [m]	1.03
Altura canal [m]	1.80
Velocidad normal (m/s)	8.1157
Número de Froude	2.5511
Régimen de flujo	Supercrítico
Verificación	**Cumple**

TABLA 35. RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE BOX CULVERT CON EL CAUDAL Q_{TR100}=13.04 M^3/S

DISEÑO CAPACIDAD HIDRÁULICA BOX CULVERT		
Parámetro	**Box 1.20 x 1.70**	**Box 1.50 x 1.70**
Caudal diseño, Q dis (m^3/s)	13.040	13.040
Material [-]	Concreto reforzado con enrocado aleatorio	Concreto reforzado con enrocado aleatorio
Coeficiente Manning [-]	0.02	0.02
Área mojada, Am [m^2]	2.04	2.55
Perímetro mojado, Pm [m]	4.60	4.90
Radio hidraulico, RH [m]	0.4435	0.5204
Pendiente [m/m]	0.15	0.08
Capacidad hidraulica [m^3/s]	23.28	23.18
70 % Capacidad hidraulica	16.30	16.23
Relacion caudal/capacidad	0.800	0.804
Verificación	**Cumple**	**Cumple**

TABLA 36. RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE TUBERÍA PROVISIONAL CON EL CAUDAL Q_{MEDIO}=0.02245 M³/S

DISEÑO TUBERÍA CONCRETO Ø=32"	
PARÁMETRO	**VALOR**
Caudal diseño, Qdis [m^3/s]	0.02245
Material	PVC
Coeficiente de Manning, n [-]	0.010
Ángulo, θ al 100% capacidad (Grados)	360.00
Ángulo, θ al 100% capacidad (Radianes)	6.28
Diám. tubo, Ø (m)	0.6096
Área mojada, Am [m^2]	0.29
Radio hidráulico, Rh [m]	0.15
Pendiente, S [m/m]	0.152
100% capacidad hidráulica [m^3/s]	3.24
70% capacidad hidráulica [m^3/s]	2.27
Caudal de diseño [m^3/s]	0.02
Relación Caudal/Capacidad	0.01
Verificación	**Cumple**

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Según la figura N.º 2 “Cuencas de drenaje tributario de la quebrada San José delimitadas hasta los puntos de interés (canal y box culvert)” se puede evidenciar la forma de las ramificaciones de la red de drenaje que conforma la cuenca en mención, tiene un patrón de drenaje de “Tipo dendrítico”, este tipo de red se desarrolla en terrenos con materiales uniformes, donde los afluentes se unen al cauce principal en ángulos agudos. Este tipo de red de drenaje se da especialmente en áreas con rocas sedimentarias planas o rocas ígneas masivas

Teniendo en cuenta el índice de compacidad de la cuenca o también denominado coeficiente de Gravelius (Kg), se afirma que la cuenca tiende a tener una forma oval-redonda a oval-oblonga, debido a que el valor del índice de compacidad es de 1.40. Esto quiere decir que, las cuencas tienen una respuesta intermedia (moderadamente rápida) ante eventos de precipitación, con crecidas y riesgos de crecientes moderados.

Se puede afirmar que los parámetros de forma y relieve de la cuenca de estudio son de gran importancia para interpretar su comportamiento hidrológico y entender su incidencia ante eventos de precipitación y avenidas torrenciales.

Se concluye que los caudales de diseño fueron determinados mediante el método racional, el cual se considera un procedimiento eficiente y válido para cuencas pequeñas, específicamente con áreas menores a 2.5 km², como es el caso del presente estudio.

Se considera necesaria la elaboración de dos estudios hidrológico-hidráulicos, en razón a la longitud de la obra de canalización proyectada. Esto permite garantizar que los caudales de diseño, derivados del análisis de las cuencas, sean coherentes con los puntos de aforo utilizados para el dimensionamiento. De esta manera, se evita el sobredimensionamiento de las estructuras ubicadas en los tramos aguas arriba.

Se ha considerado que las cuencas asociadas a la quebrada San José, delimitadas en dos puntos de aforo distintos, presentan diferencias significativas en su cobertura de suelo. En la cuenca correspondiente al canal (de menor área), se identifican porcentajes de 34,32% en construcciones, 18,01% en pastizales y 47,68% en bosques. Por su parte, en la cuenca asociada al punto de aforo del box culvert, ubicado aguas abajo de la zona urbana, la distribución cambia a 48,48% en construcciones, 13,68% en pastizales y 37,84% en bosques. Estas variaciones en el uso y cobertura del suelo generan diferencias en los coeficientes de escorrentía y, en consecuencia, en los caudales de diseño. Por ello, resulta fundamental considerar dichas particularidades en cada punto de análisis, con el fin de garantizar coherencia en el dimensionamiento hidráulico y evitar el sobredimensionamiento de las estructuras ubicadas en tramos aguas arriba.

La pendiente también juega un papel importante al momento de determinar el coeficiente de escorrentía, y en este caso, el tipo de topografía predominante en la cuenca, con base en la pendiente media de la cuenca extraída del software QGIS, se define y clasifica el terreno como “pendiente”, cuando la pendiente es mayor a un 7%, según la tabla de coeficientes de escorrentía para usar en el método racional del libro Hidrología Aplicada de V.T Chow, que para estas dos cuencas es del 21.24% y 36.56%.

De acuerdo con los estudios hidrológicos-hidráulicos realizados, las secciones propuestas para los tramos nuevos de canalización, cumplen satisfactoriamente en cuanto capacidad hidráulica, evidenciado en la modelación hidráulica en HEC-RAS y en la memoria de cálculos adjuntada en el presente informe.

Uno de los propósitos de este trabajo fue analizar la cota máxima de inundación que alcanzaría la creciente asociada al periodo de retorno de 100 años para los dos puntos de interés, para el diseño de las estructuras hidráulicas de canalización. Se hizo necesario la elaboración de dos estudios hidrológico-hidráulicos en la fuente San José hasta los sitios de ocupación del cauce, así como estimativos de los niveles de inundación asociados a crecientes con diferentes períodos de recurrencia por medio del software HEC-RAS, para el dimensionamiento de las estructuras, utilizando especialmente el caudal del periodo de retorno de 100 años.

Para el cálculo de niveles de flujo asociados a crecientes con diferentes períodos de retorno, se utilizó el modelo HEC-RAS, alimentado con la información de caudales de crecientes estimados para la quebrada en ambos puntos y con la información del levantamiento topográfico de secciones transversales extendidas a lo largo de su planicie de inundación, tanto aguas arriba como aguas debajo de las obras hidráulicas de canalización.

9. BIBLIOGRAFIA

Villegas, P. (24 de febrero de 2020). Tiempo de concentración de la cuenca. Agua y SIG. https://aguaysig.com/tiempo-de-concentracion-de-la-cuenca/

CHOW, V. T., 1992. Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia. 667 p.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D., Y MAYS, L., 1994. Hidrología Aplicada. Editorial McGraw-Hill. 584p.

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN (EPM), 2005. Revista Hidrometeorológica. Área de hidrometría e instrumentación. Medellín. 150p.

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN (EPM). Anuario Hidrometeorológico No.1, 1991, citado por HIDRAMSA, 1997.

HANDBOOK OF HYDROLOGY. David R. Maidment, Editor in Chief. McGraw Hill International Editions, 1992.

INTRODUCTION TO HYDROLOGY. Warren Viessman,Jr., John W. Knapp, Gary L. Lewis. The Late Terence E. Hargauch. Second Edition, Harper and Row, Publishers, 1972.

MINISTERIO DE TRANSPORTE, Instituto Nacional de Vías – INVIAS, 2009. Manual de Drenaje para carreteras.

Roughness Characteristics of Natural Channels, U.S. Geological Survey. Water Supply Paper 1849. 1987.

SMITH, R., VELEZ, M.V., 1991. Hidrología de Antioquia. Secretaria de Obras Públicas, 50 años, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas.

U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. February 1995.

Wilches, Santiago, Pizarro, Héctor. “Estudio de Precipitaciones Máximas en el Valle de Aburrá y el Oriente Antioqueño”, Empresas Públicas de Medellín, E.S.P., 2015 (en impresión).