“GESTION VIAL INTEGRAL DE LA CARRETERA ZIPAQUIRÁ - UBATE - PUENTE NACIONAL - SAN GIL - PALENQUE Y BUCARAMANGA SAN ALBERTO, RUTA 45 A, TRAMO 08, SECTOR RIONEGRO - SAN ALBERTO PR 18+000 AL PR 93+0694”

INFORME HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO RETORNO SECTOR ISMOCOL PLANTA - PERFIL - FLORIDA -GIRÓN K5+300 - K5+685.910

ELABORÓ:

ABNER ALEXEY RINCÓN SUÁREZ
INGENIERO CIVIL
M. SC. RECURSOS HÍDRICOS
68202-244832 STD

BUCARAMANGA
MAYO DE 2022

TABLA DE CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN 7

1 OBJETIVOS 8

1.1 OBJETIVO GENERAL 8

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 8

2 LOCALIZACIÓN 9

3 FASE HIDROLÓGICA 10

3.1 ÁREA HIDROGRÁFICA Y SUS CARACTERISTICAS FÍSICAS 10

3.1.1 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN: 14

3.2 CARACTERISTICAS CLIMATICAS 15

3.2.1 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN 15

3.2.2 CURVAS IFD 21

3.2.2.1 HIETOGRAMAS DE TORMENTA DE DISEÑO 25

3.3 CÁLCULO DE CAUDALES 28

3.3.1 MÉTODO RACIONAL 29

3.3.2 CÁLCULO DE CAUDALES PARA OBRAS DE ARTE PRIMARIAS (CRUCES DE CUERPOS HÍDRICOS) 31

3.3.3 CÁLCULO DE CAUDALES PARA OBRAS DE ARTE TERCIARIAS (CUNETAS) 31

4 FASE HIDRAULICA 32

4.1 DISEÑO DEL CONDUCTO DE LA ALCANTARILLA 33
4.1.1 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO 33
4.1.2 ALCANTARILLAS 34
4.1.3 MODELACIÓN DE ALCANTARILLA TIPO EN HY8 39
4.1.4 DISEÑO DE ALCANTARILLAS CIRCULARES TIPO Y CAJONES TIPO 41
4.2 DISEÑO DE CUNETA TIPO 42
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 43
6 BIBLIOGRAFÍA 44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas de las áreas aferentes del proyecto 12

Tabla 2. Tiempo de concentración para los cuerpos hídricos del proyecto 14

Tabla 3. Estaciones adyacentes al proyecto 15

Tabla 4. Datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones adyacentes 17

Tabla 5. Precipitación máxima 24 h en mm para TR por Gumbel 21

Tabla 6. Parámetros de ajuste de regresión regionalizados en Colombia 22

Tabla 7. Cálculo de tormenta de diseño, estación La Floresta 26

Tabla 8. Tiempos de retorno para diferentes tipos de obra 28

Tabla 9. Caudales de cuerpos hídricos que interceptan la vía 31

Tabla 10. Caudales para cunetas cada 100m 31

Tabla 11. Obras propuestas para alcantarillas existentes 41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del proyecto 9

Figura 2. Áreas aferentes de los cuerpos hídricos en estudio 12

Figura 3. Ancho impluvium 13

Figura 4. Ubicación de estaciones adyacentes al proyecto 16

Figura 5. Software de aplicación de las fórmulas explicadas a usar 19

Figura 6. Verificación de bondad de ajuste para datos de la estación La Floresta 20

Figura 7. Ajuste de probabilidad Gumbel estación La Floresta 20

Figura 8. Regiones de Colombia para definición de parámetros a, b, c y d 23

Figura 9. Curvas IDF para la estación La Floresta 24

Figura 10. Hietograma de tormenta de diseño, estación La Floresta 27

Figura 11. Coeficientes de escorrentía para ser usados en el método racional 30

Figura 12. Flujo Controlado a la entrada y a la salida 33

Figura 13. Clasificación de alcantarillas según condiciones para el cálculo de Hw con control a la entrada 36

Figura 14. Alcantarillas circulares de concreto con control a la entrada 37

Figura 15. Alcantarilla de cajón de concreto con control a la entrada 38

Figura 16. Análisis de Alcantarilla tipo Box de 2mx1.5m con las condiciones más críticas en HY8 39

Figura 17. Reporte de resultados de alcantarilla tipo Box 2x1.5 con las condiciones más críticas en HY8 40

Figura 18. Análisis de Alcantarilla tipo Box de 1mx1m" con las condiciones más críticas en HY8 40

Figura 19. Reporte de resultados de alcantarilla tipo Box de 1mx1m con las condiciones más críticas en HY8 41

Figura 20. Sección de cuneta tipo 42

Figura 21. Capacidad hidráulica de la cuneta tipo 42

INTRODUCCIÓN

La proyección y evaluación de sistemas de alcantarillado, parten de un análisis del clima del sector en estudio. Entre los factores climáticos de mayor relevancia para este tipo de estudios se encuentra la precipitación.

La predicción de la lluvia en un área determinada es complicada. Por lo tanto, con el objeto de reducir la incertidumbre, es necesario el desarrollo de análisis estadísticos con base en los registros de datos de las estaciones climatológicas de las entidades ambientales (IDEAM) adyacentes al área del proyecto. Dichos análisis son la base para la estimación de la masa (caudal) en los puntos de interés del estudio. Para ello se utiliza una metodología de cálculo acorde a las características morfométricas de la cuenca, entre las cuales las más usadas son el método racional (Áreas menores a 2.5 Km2) o el método del hidrograma unitario (Áreas superiores a 2.5 Km2).

Estimado el caudal, es necesaria la representación del comportamiento hidráulico del flujo en las obras de arte a evaluar y proyectar mediante ayudas matemáticas o modelos hidráulicos acordes al problema.

El presente informe comprende los cálculos hidrológicos e hidráulicos para las diferentes obras de arte necesarias para el proyecto, con base en los fundamentos de la ingeniería hidráulica y las recomendaciones de drenaje de INVIAS.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el diseño hidrológico e hidráulico para las obras de arte de interés en el proyecto que comprende la construcción del retorno sector ISMOCOL planta - perfil - florida -girón k5+300 - k5+685.910 municipio de Floridablanca del departamento de Santander.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

-Estimar el comportamiento de la precipitación del proyecto con base en el análisis estadístico de los registros climáticos de las estaciones del IDEAM adyacentes.

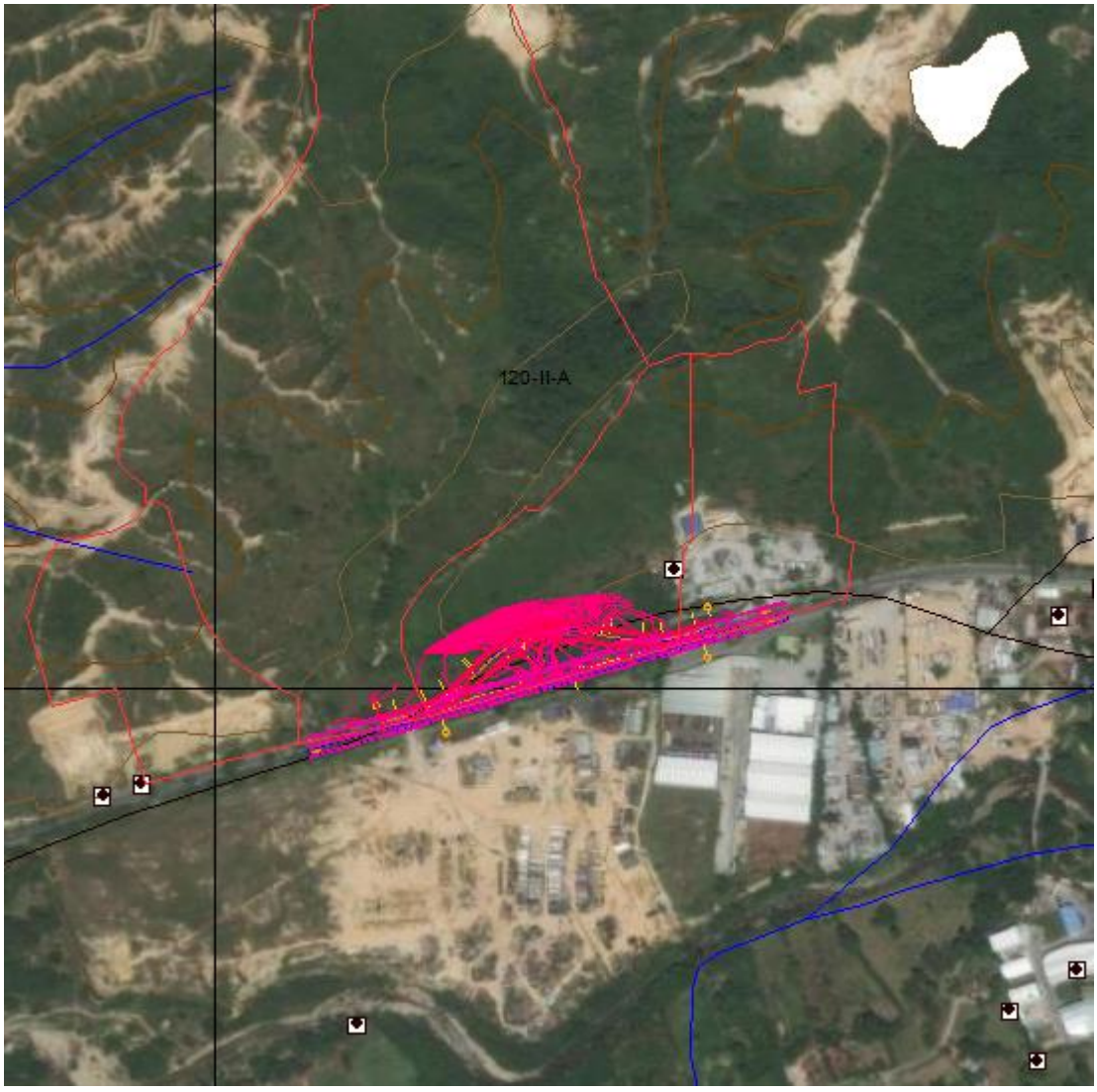
-Determinar la tormenta de diseño con un periodo de retorno adecuado para la estimación del caudal de las obras de arte de interés.

-Elaborar una modelación hidráulica de las obras de arte de interés con el fin de determinar el adecuado comportamiento hidráulico de las mismas para el caudal estimado.

2 LOCALIZACIÓN

El proyecto se ubica en el municipio de Floridablanca en el departamento de Santander, en la plancha 120-II-A 1:25000 del IGAC.

Figura 1. Localización del proyecto



Fuente: Elaboración propia del consultor

3 FASE HIDROLÓGICA

El presente capitulo comprende los cálculos y procedimientos para la obtención de los caudales máximos para las probabilidades de periodos de retorno adecuados según la normatividad vigente (INVIAS) para la determinación de la lámina de inundación del presente proyecto el diseño del canal.

Todos los procedimientos matemáticos se elaboran con base en los cálculos estadísticos de los datos climatológicos de las estaciones del IDEAM adyacentes y con información suficiente para un adecuado análisis. Adicionalmente, las características morfométricas del área aferente al punto de interés, se desarrollan con base en la cartografía vigente del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y se determina la cobertura del suelo con base en las coberturas de tierra para Colombia Corine Land Cover.

Se entiende que la precipitación (Lluvia) es el factor de mayor relevancia para la generación de inundaciones. Se conoce que la precipitación es variable tanto espacial como temporalmente, por lo que se debe hacer una aproximación al comportamiento de la precipitación medida y almacenada en la base de datos de las estaciones climatológicas adyacentes al proyecto. Estos aspectos serán explicados a continuación.

3.1 ÁREA HIDROGRÁFICA Y SUS CARACTERISTICAS FÍSICAS

El área aferente corresponde al estado físico natural para toda operación hidrológica. Esta área se define como la superficie topográficamente limitada, la cual se drena por uno o varios recorridos de agua, de tal manera que la totalidad del flujo efluente es drenado a partir de una salida (conductos en sistemas de alcantarillado).

El límite topográfico del área aferente (divisoria), corresponde a la línea imaginaria que divide la precipitación en áreas aferentes adyacentes y orientan la escorrentía resultante a un sistema de drenaje[1].

[1] INVIAS. (2011). Manual de drenaje para carreteras.

Las características de mayor relevancia de las áreas aferentes para la adecuada estimación de caudales son:

- Superficie: Corresponde al área plana (proyección horizontal) que se incluye en la divisoria topográfica.
- Longitud y pendiente: Este parámetro se define mediante la longitud horizontal del drenaje y la diferencia entre la cota mayor y menor en dicha longitud. Estos parámetros determinan la capacidad de concentración de flujo, como su velocidad para el desarrollo del caudal pico.
- Tiempo de concentración: Esta variable se refiere al tiempo necesario, desde el comienzo de la precipitación, para que la totalidad del área aferente aporte hasta el punto de salida de la misma.

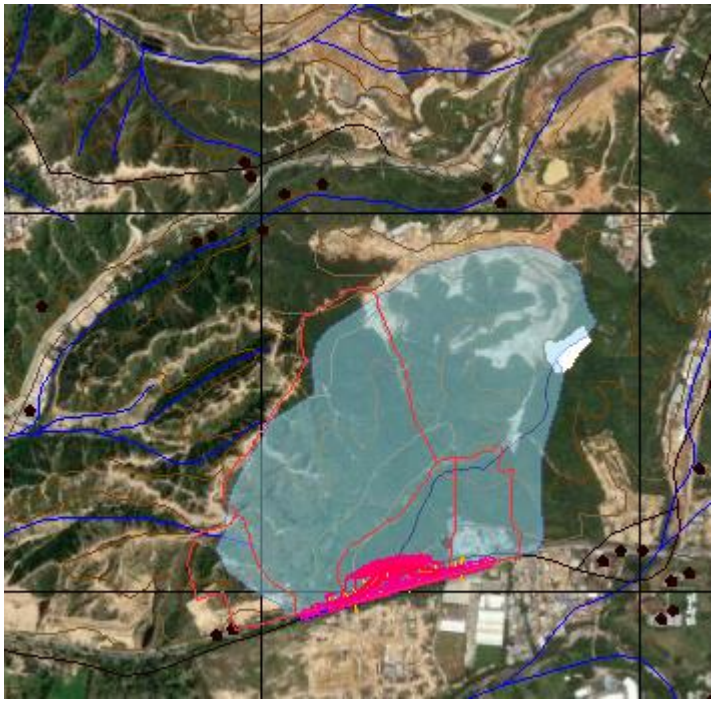
Dichas mediciones de elaboran en la cartografía vigente del IGAC

Partiendo de que los análisis hidrológicos e hidráulicos para alcantarillado de carreteo, es necesaria la jerarquización de las obras de arte de la siguiente manera:

1. Primarias: Cruces de cuerpos hídricos (Pontones, Box Culver y Alcantarillas de múltiples conductos).
2. Secundarias: Drenaje vial (Alcantarilla de carreteo estándar).
3. Terciarias: Captación y conducción de escorrentía en la vía (Cunetas, zanjas y filtros).

Considerando esta condición y la geometría del proyecto en el sector, se evidencia que no existen drenajes relevantes soportados por el IGAC, sin embargo, se presentan depresiones o cañadas que aportan flujo al sistema y que en la actualidad se conducen mediante dos alcantarillas de carreteo del sector. Por lo que, se delimitan las áreas aferentes de cada una para la continuidad de la fase hidrológica del proyecto.

Figura 2. Áreas aferentes de los cuerpos hídricos en estudio



Fuente: Elaboración propia del consultor

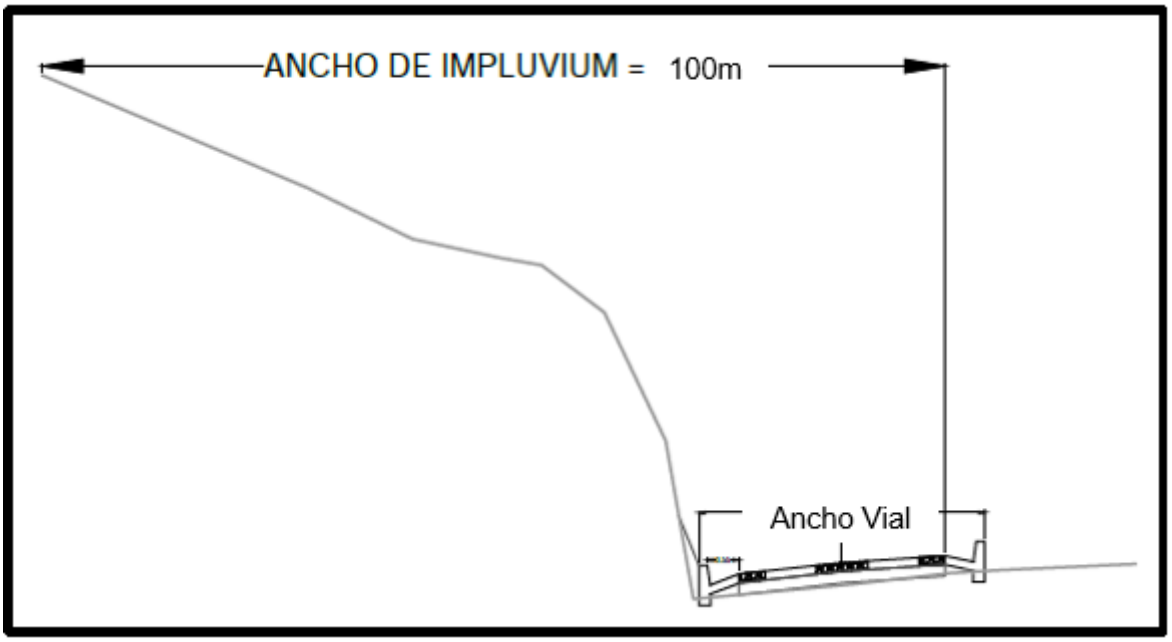
Tabla 1. Características físicas de las áreas aferentes del proyecto

ABSCISA	NOMBRE DE LA AFLUENTE	LONGITUD (Km)	AREA DE INFLUENCIA (Km^2)	COTA MAYOR (m)	COTA MENOR (m)	S (m/m)
K5+280.00	Área Aferente 1	0.166	0.519083	850	180	4.0361
K5+739.13	Área Aferente 2	0.603	0.102653	850	200	1.0779

Fuente: Elaboración propia del consultor

Para la estimación del caudal de las obras secundarias y terciarias, las características físicas del presente proyecto se darán con las condiciones más críticas de los tramos viales proyectados, teniendo en cuenta que se debe tomar un área aferente de un ancho impluvium de 100m lo largo de los tramos viales[2] y la separación o distancia entre cada colector.

Figura 3. Ancho impluvium



Fuente: INVIAS, Manual de drenaje para carreteras, 2011

[2] INVIAS, Manual de drenaje para carreteras, 2011

3.1.1 Tiempo de concentración:

El tiempo de concentración (tc), es aquel que tarda una gota de agua que se precipita en el punto más alejado del cierre de una cuenca, en viajar hasta este por la superficie. El cálculo de este tiempo se hace mediante ecuaciones que tienen en cuenta parámetros morfológicos de las cuencas, la ecuación utilizada en el presente estudio es la ecuación de Giandotti.

$$Tc = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8H^{0.5}}$$

Dónde:

Tc= Tiempo de concentración, en horas.

A= Superficie de la cuenca en Km^2

L= Longitud del cauce de interés, en km.

H=Altura media de la cuenta sobre el punto estudiado, en m.

Con los valores consignados en la Tabla 2, se llevó a cabo el cálculo de los tiempos de concentración.

Tabla 2. Tiempo de concentración para los cuerpos hídricos del proyecto

ABSCISA	NOMBRE DE LA AFLUENTE	S (m/m)	TC (hr)	TC (min)
K5+280.00	Área Aferente 1	4.0361	0.15	9.07
K5+739.13	Área Aferente 2	1.0779	0.11	6.43

Fuente: Elaboración propia del Consultor

Los parámetros mínimos de tiempo de concentración según INVIAS, corresponde a 15min[3].

[3] INVIAS, Manual de drenaje para carreteras, 2011

3.2 CARACTERISTICAS CLIMATICAS

La naturaleza es por excelencia impredecible, lo que hace necesario el desarrollo de modelos matemáticos que permitan con un grado de confianza en un rango de interés, para la estimación adecuada en el comportamiento de la variable en estudio. Para el caso de la precipitación en lo temporal, se propone la creación de curvas que relacionen la intensidad, la frecuencia de ocurrencia y el tiempo de duración de un evento de precipitación, configurando así las curvas IDF (intensidad-duración-frecuencia).

3.2.1 Análisis de la precipitación

Los análisis de las series de datos de las estaciones climatológicas adyacentes al proyecto, deben elaborarse de tal manera que se obtenga una estimación con menor incertidumbre el comportamiento de la lluvia en esta zona. En el presente caso corresponde a la precipitación, cuya información debe ser analizada y procesada para tener resultados satisfactorios.

Para la zona de interés, se tienen varias estaciones cercanas, con un tiempo representativo de datos, de las cuales se escoge aquella que puede representar de mejor manera la precipitación en el área aferentes de interés. Dicha estación es:

Tabla 3. Estaciones adyacentes al proyecto

Nombre	Código	Tipo	Estado	Operada	Departamento	Municipio	Fecha de instalación
La Floresta	23190590	Pluviométrica	Activa	IDEAM	Santander	Bucaramanga	14/10/1971

Figura 4. Ubicación de estaciones adyacentes al proyecto



Fuente: IDEAM

Se escoge dicha estación debido a la proximidad a la cuenda de interés y por el amplio y constante registro de datos para el adecuado desarrollo de análisis estadísticos.

Los estudios hidrológicos requieren partir de valores extremos (máximos o mínimos), para la determinación de estos se conocen dos distribuciones comúnmente usadas, la distribución de Gumbel tipo I.

Tabla 4. Datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones adyacentes

LA FLORESTA	
Año	**Pmax en 24 Horas**
1992	76
1993	74.6
1994	58.5
1995	104
1996	61.8
1997	127
1998	128.5
1999	70
2000	73
2001	76
2002	66
2003	91
2004	75
2005	96
2006	80
2007	58.7
2008	84.2
2009	101.8
2010	86.8
2011	71.7
2012	85.6
2013	87.3
2014	85.2
2015	63.1
2016	70.5
2017	80.3
2018	130.7
2019	70.5
2020	150.8
2021	80.4

Fuente: IDEAM

En el presente estudio se utilizó la distribución de valores extremos Gumbel tipo I comúnmente utilizada y de bastante aceptación en el medio, que es un caso especial de la distribución GEV de tres parámetros descrita por el British Flood Studies Report en 1975.

La distribución acumulada viene dada por la Ecuación:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-e^{\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{s\sqrt{6}}{\pi}$$

$$u = \bar{x} - 0.5772$$

Definiendo la variable reducida:

$$b = \frac{x - u}{\alpha}$$

Se tiene entonces que:

$$P(X \leq x) = \frac{1}{T} = e^{-e^{-b}}$$

Dónde:

x = Variable en estudio (Precipitación)

$\bar{x}$ = Media de la variable en estudio

S = Desviación estándar de la variable en estudio

T=Tiempo de retorno en años

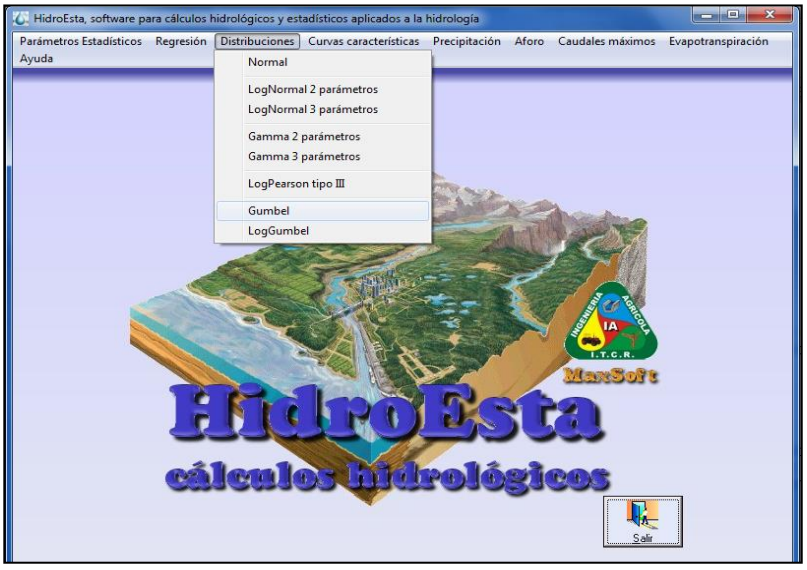
La probabilidad de ocurrencia de un evento con un valor igual o mayor que un valor dado x se expresa con la Ecuación, la cual permite determinar la magnitud de la variable hidrológica correspondiente a un periodo de retorno dado.

$$P(X \leq x) = \frac{1}{T} = e^{-e^{-b}}$$

Para este cálculo se utiliza el software HidroEsta, este se alimenta con los datos de precipitación máxima en 24 horas. Primero el programa verifica la bondad de ajuste escogida, para este caso Gumbel y determina su confiabilidad de acuerdo al número de datos y valores.

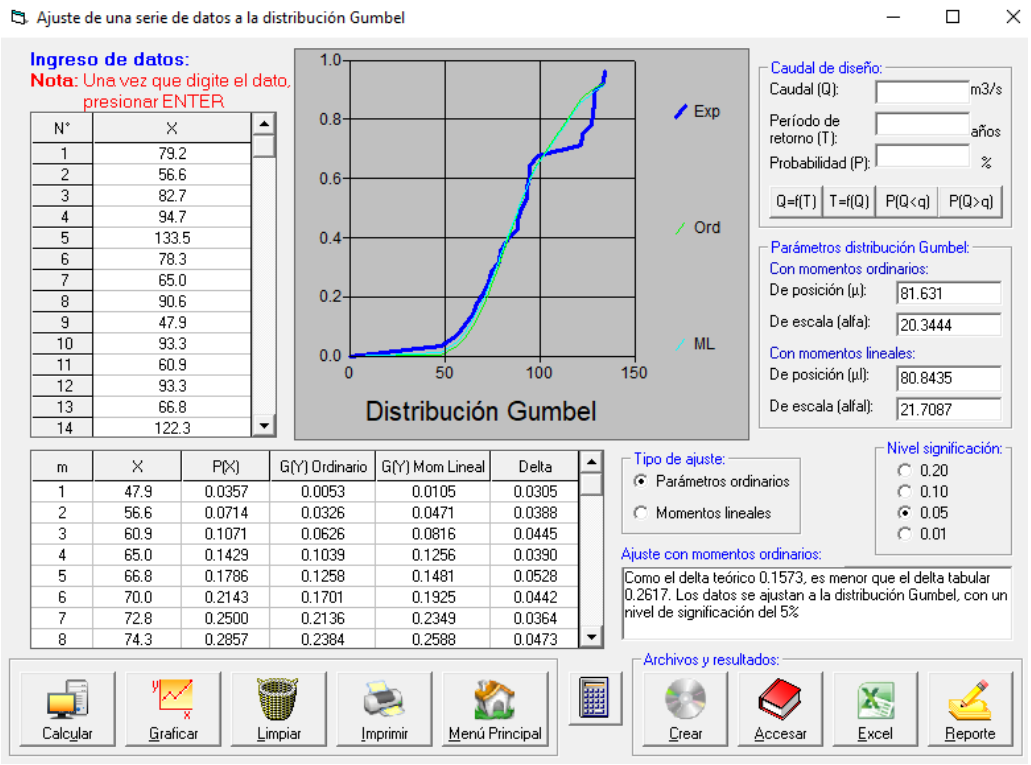
Este software fue desarrollado por Villon Bejar, Máximo. Software para cálculos hidrológicos y su uso es libre.

Figura 5. Software de aplicación de las fórmulas explicadas a usar



Fuente: software Hidroesta

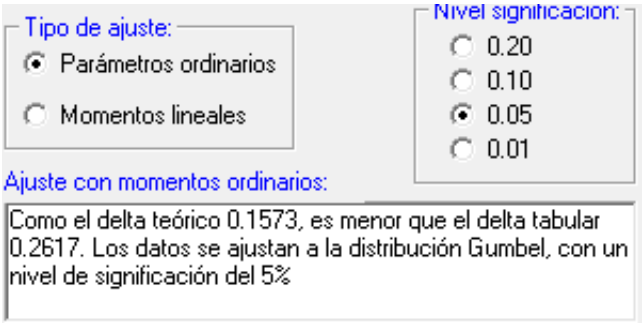
Figura 6. Verificación de bondad de ajuste para datos de la estación La Floresta



Fuente: software Hidroesta.

Realizada la prueba de bondad se despliega una nota donde informa que el delta teórico es menor que el delta tabular ajustándose los datos a una distribución Gumbel.

Figura 7. Ajuste de probabilidad Gumbel estación La Floresta



Fuente: Software Hidroesta

El procedimiento se repite cambiando el periodo de retorno y los datos de acuerdo a la estación analizada.

De acuerdo con esta estimación, los valores de precipitación máximos para los periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años se registran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Precipitación máxima 24 h en mm para TR por Gumbel

Estación	Tr 10 años	Tr 25 años	Tr 50 años	Tr 100 años	Tr 500 años
La Floresta	147.5	165.6	179	192.3	223.1

Fuente: Elaboración propia del Consultor

3.2.2 Curvas IFD

Las curvas IDF, son graficas en las cuales se exponen las lluvias mediante la intensidad de la precipitacion, como ordenadas de la duracion de la lluvia y la probabilidad (periodo de retorno).

Para el presente proyecto, se construyen curvas IDF sintenticas mediante la metodologia propuesta por (Vargas & Díaz-Granados, 1998)[4] ya que este estudio correlaciona la precipitacion maxima en 24 horas, el numero promedio de dias de lluvia al año, la precipitacion total media anual y la elevacion de la estacion, con unis oarametros de ajuste de regresion adaptados para cada una de las regiones del pais.

La formulación general para la obtención de la intensidad media I en mm/hr se da como sigue:

$$(1)\ I = a\frac{T^b}{t^c}M^d \qquad (2)\ I = a\frac{T^b}{t^c}M^d N^e$$

$$(3)\ I = a\frac{T^b}{t^c}M^d N^e P T^f$$

[4] Vargas, R., & Díaz-Granados, M. (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad duración-frecuencia para Colombia. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes

Dónde:

I = Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h)

T = Período de retorno en años

M = Precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel minutal

t = Duración de la tormenta en horas.

N = Promedio de número de días con lluvia al año (días)

PT = Precipitación media anual (mm)

a, b, c, d, e, f = Parámetros de ajuste de regresión, regionalizados

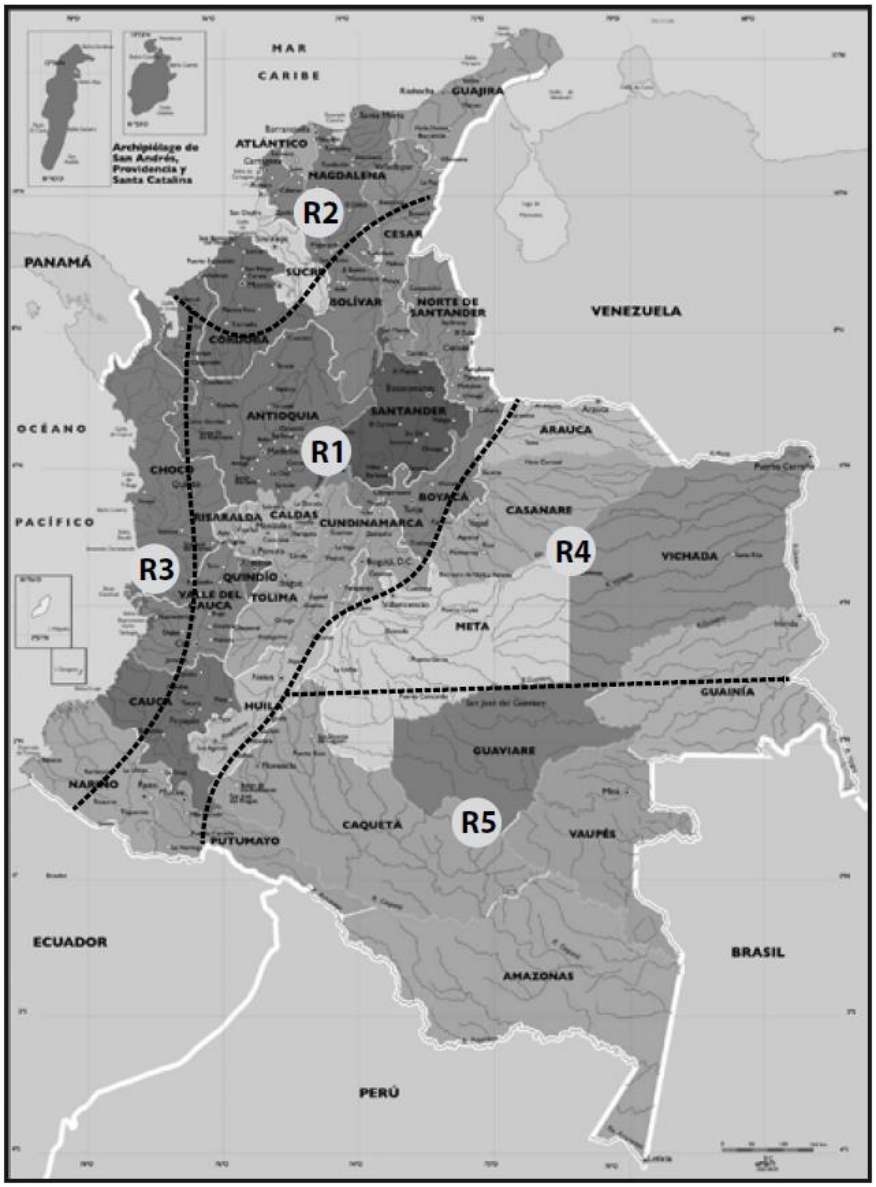
Los valores de los parámetros para las diferentes regiones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Parámetros de ajuste de regresión regionalizados en Colombia

Región	Ecuación	a	b	c	d	e	f
Andina (R1)	1	0.94	0.18	0.66	0.83		
	2	1.22	0.19	0.66	0.83	-0.05	
	3	1.61	0.19	0.65	0.75	-0.15	0.08
Caribe (R2)	1	24.85	0.22	0.5	0.1		
	2	16.66	0.21	0.5	0.03	0.15	
	3	8.51	0.21	0.5	-0.01	-0.08	0.28
Pacifico (R3)	1	13.92	0.19	0.58	0.2		
	2	3.02	0.19	0.58	0.04	0.44	
	3	2.31	0.19	0.58	-0.2	0.12	0.4
Orinoquia (R4)	1	5.53	0.17	0.63	0.42		
	2	75.03	0.17	0.63	0.12	-0.23	
	3	1.3E-26	0.19	0.58	1.19	-1.46	8.28

Fuente: Vargas, R., & Díaz-Granados, M. (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad duración-frecuencia para Colombia. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

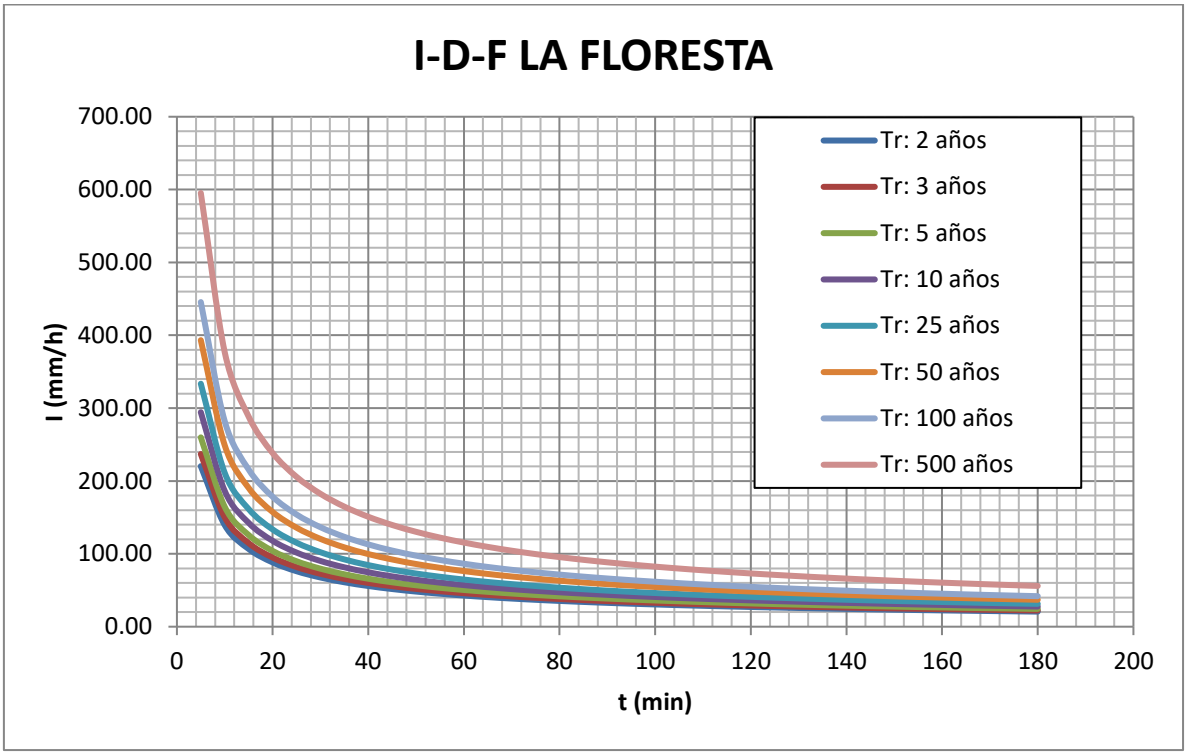
Figura 8. Regiones de Colombia para definición de parámetros a, b, c y d



Fuente: INVIAS. (2015). Guía de diseño de pavimento con placa-huella.

Con base en lo anterior, se construyen las curvas IDF a partir de la ecuacion 1 de la metodologia presentada.

Figura 9. Curvas IDF para la estación La Floresta



Fuente: Elaboración propia del Consultor

3.2.2.1 Hietogramas de tormenta de diseño

Hietogramas puntuales de aguaceros de diseño con curvas intensidad-duración-frecuencia

Las bases teóricas para la deducción de las curvas intensidad-duración-frecuencia se presentaron en documentación explicada anteriormente.

El procedimiento para elaborar la tormenta de diseño es el siguiente:

1) Con base en los datos de las curvas intensidad-duración-frecuencia para la estación analizada, representativa de la hoya hidrográfica hasta el sitio de la vía, se deben calcular las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 180 min, por ejemplo, y los periodos de retorno seleccionados, en intervalos de tiempo congruentes con la duración de la lluvia efectiva del hidrograma de escorrentía superficial seleccionado, igual a tr.

2) Posteriormente, con base en estas curvas de masas, se deberán calcular los hietogramas de los aguaceros puntuales respectivos.

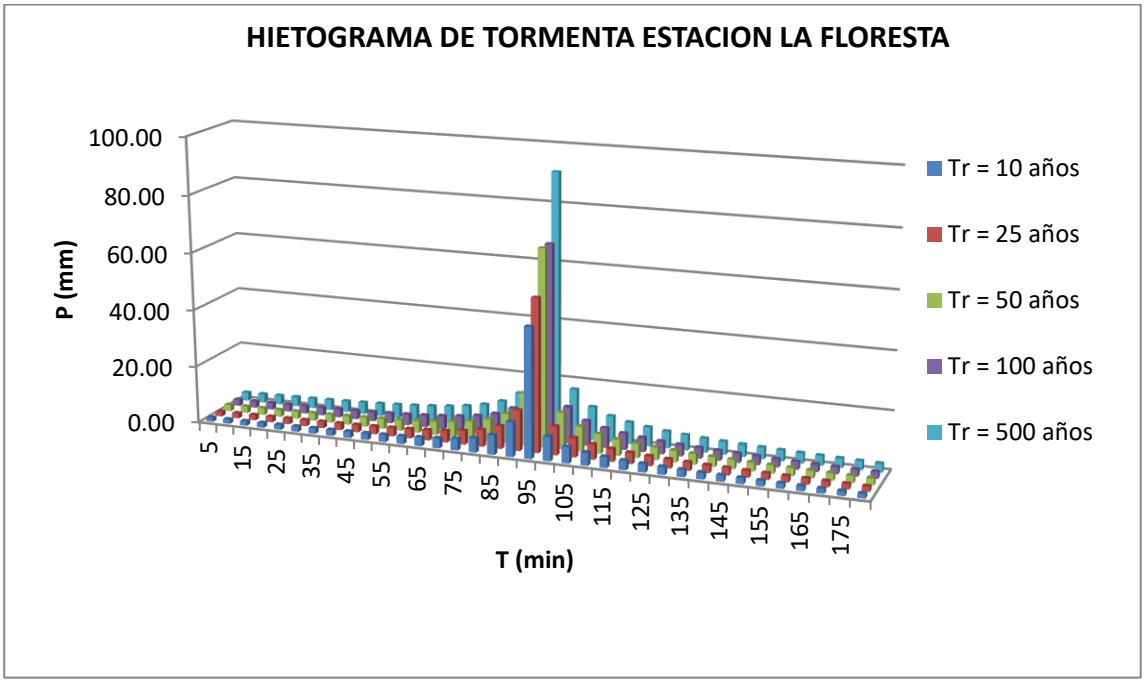
3) Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, y por medio del método del Bloque Alterno, los incrementos de lluvia de los hietogramas mencionados previamente se deben arreglar de la siguiente manera: el valor más bajo se colocará en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocará en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicará en segundo lugar, el cuarto valor en el penúltimo lugar, y así sucesivamente. El resultado corresponde con los hietogramas de lluvia puntual de los aguaceros de diseño.

Tabla 7. Cálculo de tormenta de diseño, estación La Floresta

T (min)	P (mm) 10 años	P (mm) 25 años	P (mm) 50 años	P (mm) 100 años	P (mm) 500 años
5	0.79	0.90	1.06	1.20	1.60
10	0.82	0.93	1.10	1.24	1.66
15	0.86	0.97	1.14	1.30	1.73
20	0.89	1.01	1.19	1.35	1.81
25	0.94	1.06	1.25	1.42	1.89
30	0.98	1.11	1.31	1.49	1.99
35	1.04	1.18	1.39	1.57	2.10
40	1.10	1.25	1.47	1.67	2.23
45	1.17	1.33	1.57	1.78	2.37
50	1.26	1.43	1.69	1.91	2.55
55	1.37	1.55	1.83	2.07	2.76
60	1.50	1.70	2.00	2.27	3.03
65	1.66	1.89	2.22	2.52	3.37
70	1.89	2.14	2.52	2.86	3.82
75	2.21	2.50	2.95	3.34	4.47
80	2.71	3.07	3.62	4.10	5.48
85	3.66	4.15	4.89	5.54	7.41
90	6.52	7.39	8.71	9.87	13.18
95	24.53	27.79	32.78	37.13	49.61
100	4.59	5.20	6.13	6.95	9.28
105	3.10	3.51	4.14	4.69	6.26
110	2.43	2.75	3.24	3.67	4.91
115	2.03	2.30	2.72	3.08	4.11
120	1.77	2.00	2.36	2.68	3.57
125	1.58	1.78	2.10	2.38	3.19
130	1.43	1.62	1.91	2.16	2.89
135	1.31	1.49	1.75	1.98	2.65
140	1.22	1.38	1.62	1.84	2.46
145	1.14	1.29	1.52	1.72	2.30
150	1.07	1.21	1.43	1.62	2.16
155	1.01	1.14	1.35	1.53	2.04
160	0.96	1.09	1.28	1.45	1.94
165	0.91	1.04	1.22	1.38	1.85
170	0.87	0.99	1.17	1.32	1.77
175	0.84	0.95	1.12	1.27	1.70
180	0.81	0.91	1.08	1.22	1.63

Fuente: Elaboración propia del Consultor

Figura 10. Hietograma de tormenta de diseño, estación La Floresta



Fuente: Elaboración propia del Consultor

Con las intensidades de las estaciones utilizadas iniciando en 5 minutos y hasta 180 minutos se encuentra la precipitación para cada intervalo de 5 minutos, para un tiempo de retorno Tr =10, 25, 50, 100 y 500 años.

3.3 CÁLCULO DE CAUDALES

Según el manual de drenajes del INVIAS para áreas menores a 2.5 km^2, permite utilizar el método racional para el cálculo de caudales, áreas superiores debe usarse el método del hidrograma de escorrentía superficial, con un tiempo de retorno diferente para cada uno de los métodos, dependiendo del tipo de estructura a evaluar.

A continuación, se muestra el tiempo de retorno para calcular caudales de diferentes estructuras:

Tabla 8. Tiempos de retorno para diferentes tipos de obra

Tipo de Obra	Tiempo de retorno (años)
Cunetas	5
Zanjas de coronación	10
Estructuras de caída	10
Alcantarillas de 0.90m de diámetro	10
Alcantarillas mayores a 0.9m de diámetro	20
Puentes menores (luz menor a 10m)	25
Puentes de luz mayor o igual a 10m y menor a 50m	50
Puentes de luz mayor o igual a 50m	100
Drenaje subsuperficial	2

Fuente: Manual de drenajes para carreteras INVIAS

Considerando que en el presente proyecto, el área aferente corresponde a las laderas adyacentes de las vías de interés, y según el manual de drenaje del INVIAS puede estimarse como una longitud de 100m (Ancho Impluvium) adyacente y la separación entre alcantarillas, existentes, por lo que el caudal aportante de escorrentía por las laderas adyacentes y áreas aferentes de cuerpos hídricos del proyecto tienen una superficie menor de 2.5km2, y por esta razón se utiliza el método racional, de igual manera para estimar el caudal que aportan las laderas a el tramo vial.

Dicho método se explica a continuación.

3.3.1 Método Racional

Es uno de los métodos de mayor aplicación para el cálculo de caudales extremos en cuencas pequeñas, está basado en el concepto de que si una lluvia de intensidad i, comienza instantáneamente y continúa indefinidamente, la tasa de escorrentía aumentará hasta que se alcance el tiempo de concentración Tc, tiempo en el cual toda la cuenca está contribuyendo al flujo de salida en el cierre.

$$Q = kCI_{tr}A$$

Dónde:

Q = Caudal pico (m^3/s) para un periodo de retorno T años

K = 0.278 (factor de conversión para garantizar unidades de Km^2)

C = Coeficiente de escorrentía para un periodo de retorno T años

I_{tr} = Intensidad promedio de la lluvia (mm/h) para una duración de lluvia Tc horas y un periodo de retorno T años

A = Área de la cuenca (Km^2)

Figura 11. Coeficientes de escorrentía para ser usados en el método racional

Coeficientes de escorrentía para ser usados en el método racional

	Periodo de retorno (años)						
Característica de la superficie	**2**	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**	**500**
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
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	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Fuente: Hidrología Aplicada Ven Te Chow, Tabla 15.1.1

3.3.2 Cálculo de caudales para obras de arte primarias (cruces de cuerpos hídricos)

Para estos cauces que corresponden a las obras primarias debido a su relevancia en el proyecto, se tomó un periodo de retorno correspondiente a 20 años y se estimó dicho caudal con base en las características físicas del área aferente de cada cuerpo hídrico.

Tabla 9. Caudales de cuerpos hídricos que interceptan la vía

ABSCISA	NOMBRE DE LA AFLUENTE	LONGITUD (Km)	AREA DE INFLUENCIA (Km^2)	S (m/m)	TC (min)	Intensidad (mm/hr)	C	Q (m^3/s)
K5+280.00	Área Aferente 1	0.166	0.519083	4.0361	9.07	147.52	0.4	8.52
K5+739.13	Área Aferente 2	0.603	0.102653	1.0779	6.43	147.52	0.4	1.68

Fuente: Elaboración propia del Consultor

3.3.3 Cálculo de caudales para obras de arte terciarias (cunetas)

Debido a la topografía del terreno y la separación de obras de arte del mismo, se calcula un área de influencia a lo largo de la vía de las distancias de los colectores y 100 metros perpendicular a el eje de la vía, donde se tiene en cuenta el área de banca de la vía. Como estas áreas no son mayores a 2.5 Km^2 se usa el método racional para los cálculos de los caudales, donde se considera un coeficiente de escorrentía C=0.3 utilizados para el cálculo de caudales por el método racional y con intensidades para un tiempo de retorno TR = 5 años como está consignado en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. para la evaluación de caudales de las cunetas.

Tabla 10. Caudales para cunetas cada 100m

ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL	A. Influencia Ladera (Km^2)	Intensidad (mm/hr)	C	Q. (m^3/s)
K5+280.00	K5+500.00	0.022	114.94	0.3	0.21
K0+100.00	K0+200.00	0.01	114.94	0.	0.23

Fuente: Elaboración propia del Consultor

4 FASE HIDRAULICA

Una vez calculados los caudales que debe transportar cada estructura, se procede a la evaluación de su capacidad hidráulica con base en sus características físicas, ratificando que son aptas y procediendo a proyección de nuevas estructuras en caso de lo contrario.

Para la evaluación del dimensionamiento de las diferentes estructuras tipo alcantarilla, se utilizan los nomogramas del manual de drenajes del Instituto Nacional de Vías y la modelación en el software gratuito HY8.

Se entiende que la clave de la alcantarilla debe tener 0.6m, por lo que se estima esta altura más la del diámetro de la tubería como parámetro de entrada y una salida que corresponda a una pendiente mínima del 1%

Para la estimación de la capacidad hidráulica de la sección de las demás obras de arte a flujo libre se utiliza la expresión de Manning:

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

Dónde:

Q = Caudal (m3/s)

n = Rugosidad de Manning (adimensional)

R = Radio Hidráulico (m)

S = Pendiente (m/m)

A = Área hidráulica (m2)

Asumiendo una altura de la estructura de pavimento de 1.2 m, se tiene que la altura de entrada de las estructuras va a ser mínimo de la altura de la sección hidráulica más sesenta centímetros y se según el Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS.

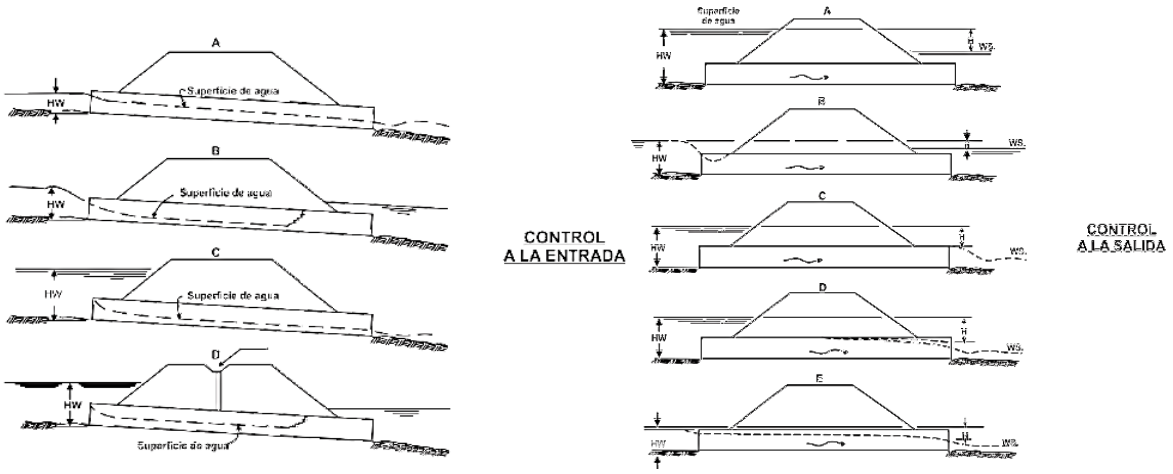
4.1 DISEÑO DEL CONDUCTO DE LA ALCANTARILLA

El diseño de las siguientes alcantarillas, corresponden a alcantarillas de tipo carreteo, ya que su comportamiento hidráulico obedece a otras condiciones físicas y topológicas que las de un alcantarillado urbano convencional (pozo – tubería).

4.1.1 Funcionamiento hidráulico

El flujo en una alcantarilla es usualmente no uniforme, presentando zonas con flujo gradualmente variado y zonas con flujo rápidamente variado, por lo que su análisis teórico es complejo y se ha desarrollado con ayuda de experimentación en laboratorio. De acuerdo al punto donde se encuentre la sección de control en la alcantarilla, el flujo puede ser con control a la entrada o con control a la salida y dependiendo de la sumergencia o no de los extremos del conducto y la condición de flujo (a tubo lleno o parcialmente lleno), se presentan diferentes tipos de flujo.

Figura 12. Flujo Controlado a la entrada y a la salida



Fuente: Manual de drenajes para carreteras INVIAS

Para el caso de la vía en estudio el flujo es controlado a la entrada, ya que las alcantarillas se les aumentan el diámetro, de tal manera que la capacidad de la tubería sea mayor que la capacidad de la estructura de entrada.

4.1.2 Alcantarillas

Las alcantarillas deben cumplir con un diámetro mínimo de 36", así se pueda cumplir la capacidad requerida con un diámetro menor, como especifica el manual de drenajes del INVIAS. Se debe asegurar que las alcantarillas trabajen a flujo libre, para lo que debe asegurarse que el tirante sea menor que la altura de la estructura, aproximadamente el tirante sea el 80% de la altura de la estructura.

Para un flujo de control a la entrada el manual de drenajes del INVIAS propone las siguientes ecuaciones:

Para: $\frac{Hwi}{D} < 0.5$ ya que se diseña sin sumergencia

$Hwi = d_c + (1 + K_e)\frac{{V_c}^2}{2g}$ Ecuación mínima de energía de canales abiertos

Si Q $<0.15Q_{0.5}$

$Hwi = d_c + (1 + C_{vh})\frac{{V_{corr}}^2}{2g}$ Ecuación mínima de energía asumiendo un canal muy ancho

Dónde:

Hwi: Carga a la entrada, en metros (m).

D: Diámetro, altura o flecha de la alcantarilla, en metros (m).

d_c: Profundidad crítica, en metros (m).

K_e: Coeficiente de pérdidas en la entrada

$$Ke = \frac{(0.5D - d_c)2g}{\frac{{Q_{0.5}}^2}{{A_c}^2}} - 1$$

Dónde:

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

$Q_{0.5}$: Caudal correspondiente a un valor de Hw=0.5D, en metros cúbicos por segundo (m^3/s) (calculado con la ecuación de regresión para su límite inferior)

A_c: Área de la sección transversal con el caudal crítico, en metros cuadrados (m^2).

V_c: Velocidad a la profundidad crítica, en metros por segundo (m/s).

g: Aceleración de la gravedad (g = 9.81 m/s^2).

C_{vh}: Coeficiente de la cabeza de velocidad, calculado como:

$$C_{vh} = \frac{1 - Q_{frac}}{1 + \left(\frac{V^2}{2g} Q_{frac}\right)}$$

$$Q_{frac} = \frac{0.15Q_{0.5} - Q}{0.15Q_{0.5}}$$

Dónde:

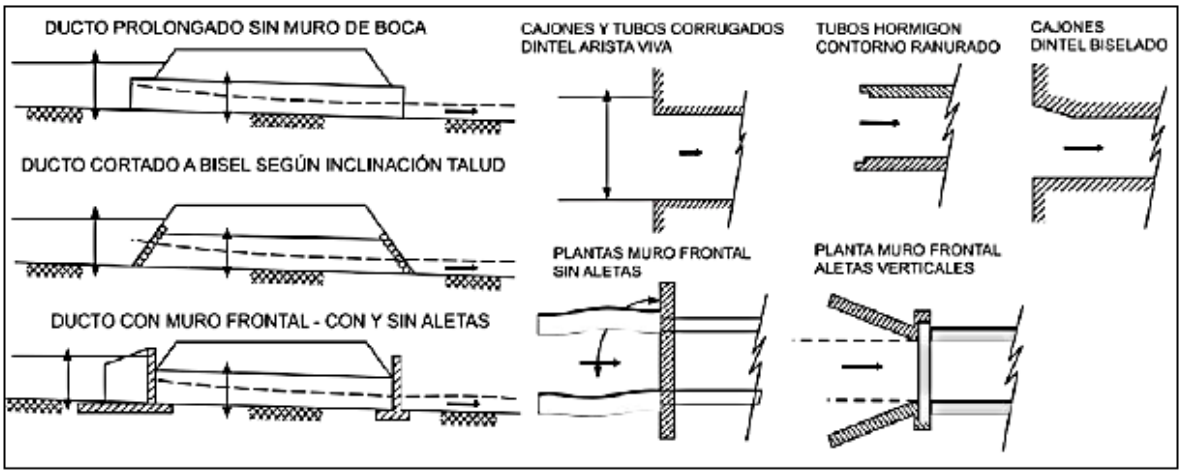
V: Velocidad media, en metros por segundo (m/s).

V_{corr}: Velocidad corregida, en metros por segundo (m/s).

$$\frac{{V_{corr}}^2}{2g} = \left(Q_{frac} 0.5 d_c\right) + \left(\frac{V^2}{2g} C_{vh}\right)$$

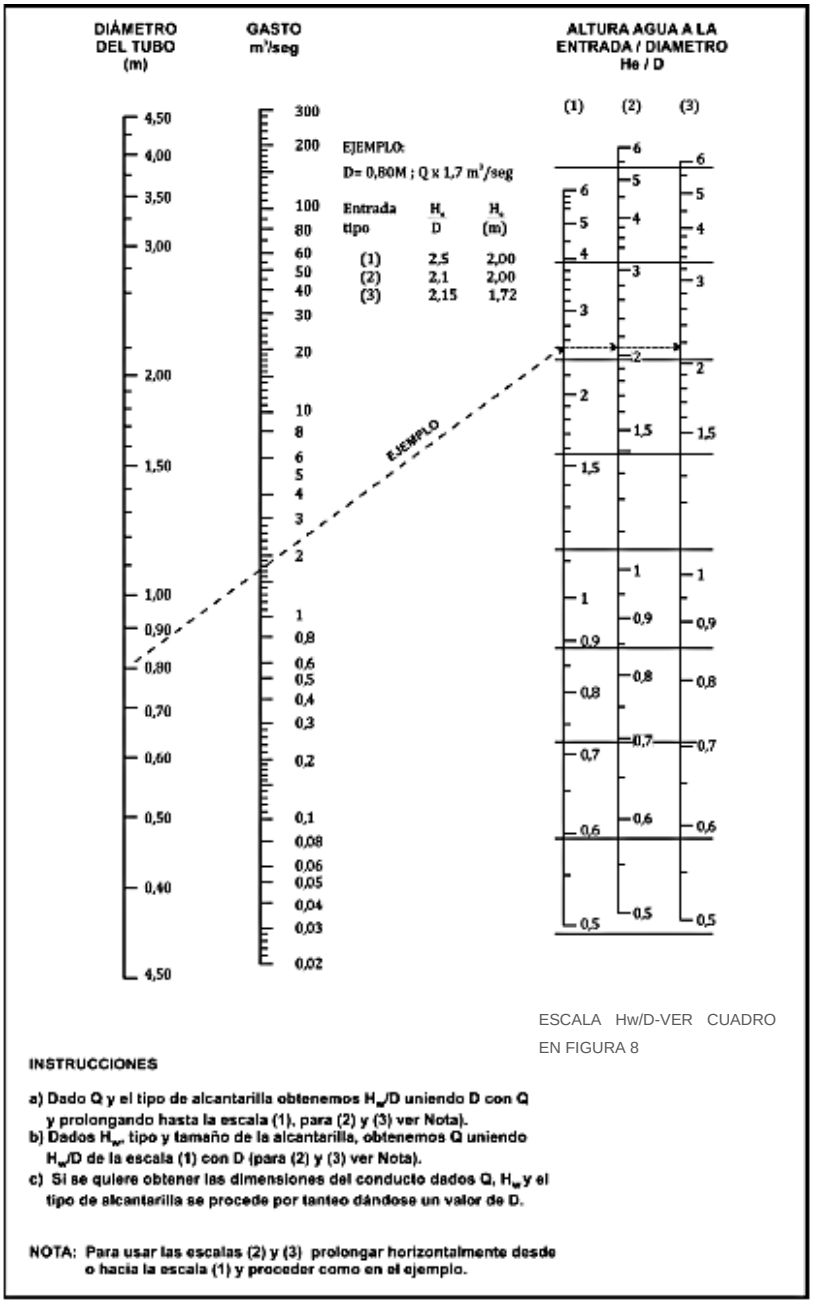
Las anteriores ecuaciones se encuentran resueltas de manera gráfica en un rango de Hw/D > 0.3 en los nomogramas incluidos en el manual de drenajes del INVIAS, los cuales han sido convertidos a unidades métricas y se presentan a continuación.

Figura 13. Clasificación de alcantarillas según condiciones para el cálculo de Hw con control a la entrada



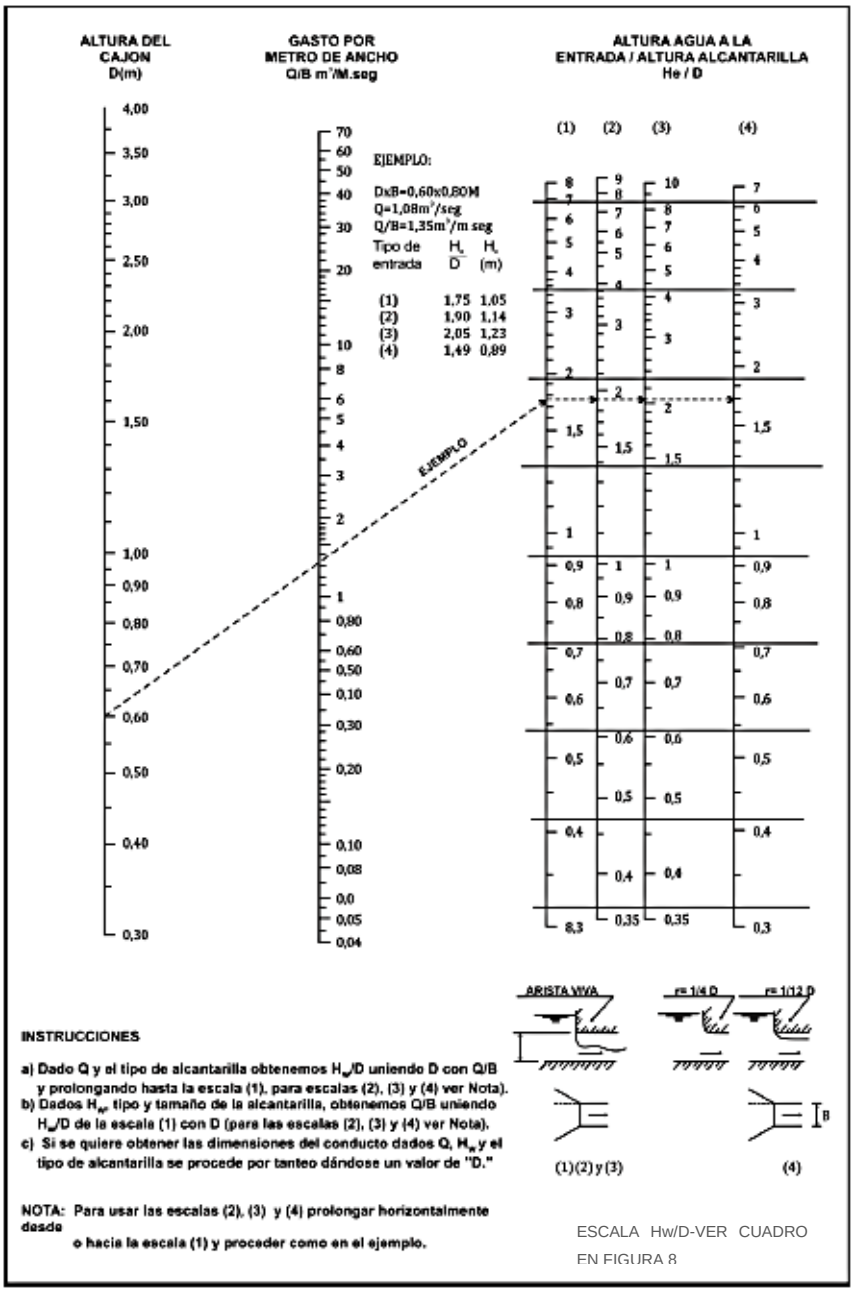
Fuente: Manual de drenajes para carreteras INVIAS

Figura 14. Alcantarillas circulares de concreto con control a la entrada



Fuente: Manual de drenajes para carreteras INVIAS

Figura 15. Alcantarilla de cajón de concreto con control a la entrada



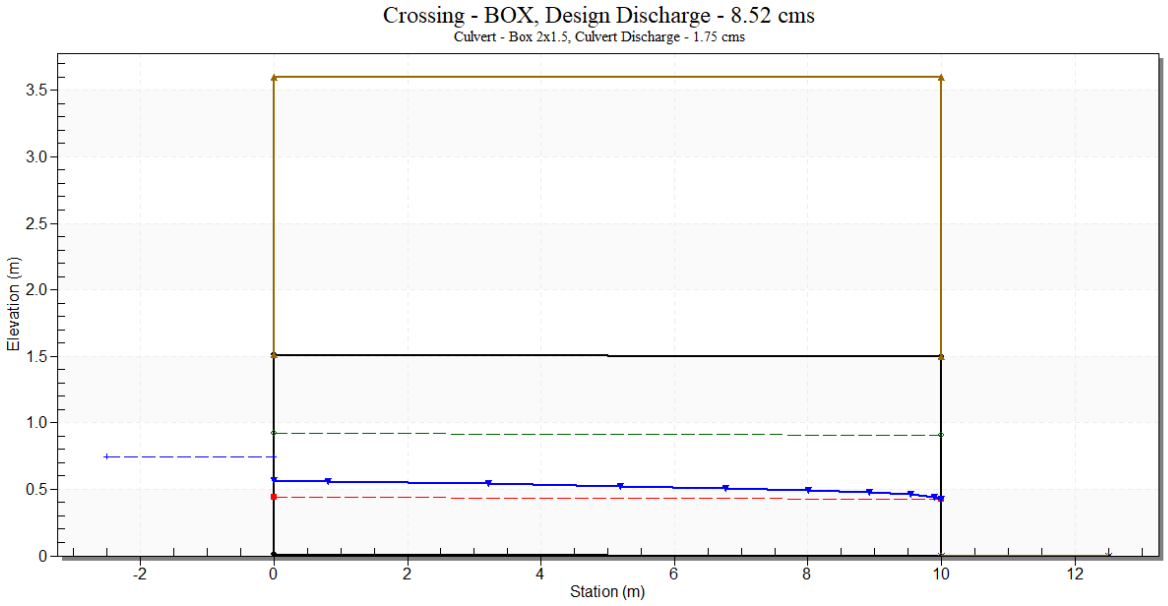
Fuente: Manual de drenajes para carreteras INVIAS

4.1.3 Modelación de Alcantarilla tipo en HY8

El HY8 es una colección de programas desarrollada por la FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) para ayudar en el análisis y el diseño de alcantarillas. Se compone de cuatro módulos: uno de análisis de alcantarillas; dos módulos de generación y tránsito de hidrogramas y un cuarto módulo para el diseño de estructuras de disipación de energía.

Ya que el manual de drenajes para carreteras se basa en los estudios realizados por la FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA), se utiliza este programa de adquisición gratuita, para hacer los diseños y análisis de las diferentes alcantarillas tanto circulares como cajón. Por lo tanto, se desarrolla un modelo con las condiciones previamente presentadas de caudal (8.52 m3/s, 1.68m3/s) y pendiente mínima del 1%. El análisis se muestra a continuación:

Figura 16. Análisis de Alcantarilla tipo Box de 2mx1.5m con las condiciones más críticas en HY8



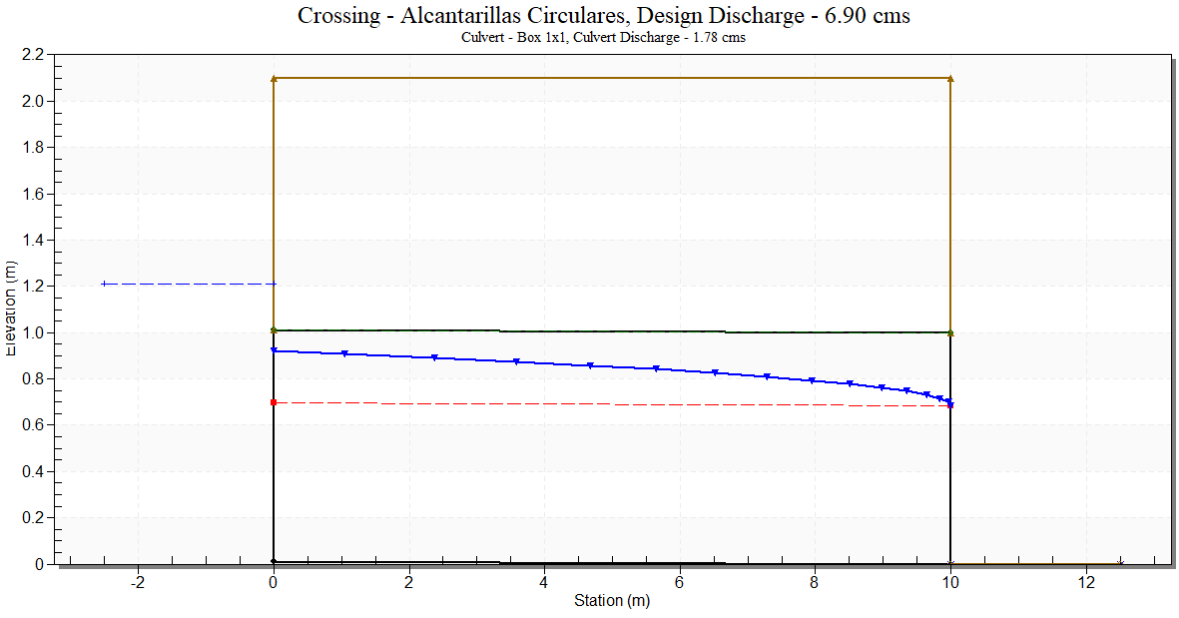
Fuente: Software HY8

Figura 17. Reporte de resultados de alcantarilla tipo Box 2x1.5 con las condiciones más críticas en HY8

Total Discharge (cms)	Culvert Discharge (cms)	Headwater Elevation (m)	Inlet Control Depth(m)	Outlet Control Depth(m)	Flow Type	Normal Depth (m)	Critical Depth (m)	Outlet Depth (m)	Tailwater Depth (m)	Outlet Velocity (m/s)	Tailwater Velocity (m/s)
1.68	0.42	0.30	0.25	**0.29**	2-M2c	0.33	0.16	0.16	0.00	1.27	0.00
2.51	0.61	0.38	0.32	**0.37**	2-M2c	0.43	0.21	0.21	0.00	1.44	0.00
3.34	0.77	0.44	0.38	**0.43**	2-M2c	0.51	0.25	0.25	0.00	1.56	0.00
4.18	0.94	0.50	0.43	**0.49**	2-M2c	0.58	0.28	0.28	0.00	1.66	0.00
5.01	1.10	0.55	0.48	**0.54**	2-M2c	0.65	0.31	0.31	0.00	1.75	0.00
5.84	1.25	0.60	0.53	**0.59**	2-M2c	0.71	0.34	0.34	0.00	1.83	0.00
6.67	1.41	0.65	0.57	**0.64**	2-M2c	0.77	0.37	0.37	0.00	1.91	0.00
7.50	1.57	0.69	0.61	**0.68**	2-M2c	0.84	0.40	0.40	0.00	1.97	0.00
8.52	1.75	0.74	0.66	**0.73**	2-M2c	0.91	0.43	0.43	0.00	2.05	0.00
9.17	1.87	0.77	0.69	**0.76**	2-M2c	0.95	0.45	0.45	0.00	2.09	0.00
10.00	2.02	0.81	0.72	**0.80**	2-M2c	1.01	0.47	0.47	0.00	2.15	0.00

Fuente: Software HY8

Figura 18. Análisis de Alcantarilla tipo Box de 1mx1m" con las condiciones más críticas en HY8



Fuente: Software HY8

Figura 19. Reporte de resultados de alcantarilla tipo Box de 1mx1m con las condiciones más críticas en HY8

Total Discharge (cms)	Culvert Discharge (cms)	Headwater Elevation (m)	Inlet Control Depth(m)	Outlet Control Depth(m)	Flow Type	Normal Depth (m)	Critical Depth (m)	Outlet Depth (m)	Tailwater Depth (m)	Outlet Velocity (m/s)	Tailwater Velocity (m/s)
1.68	0.52	0.55	0.52	**0.54**	2-M2c	0.74	0.30	0.30	0.00	1.73	0.00
2.23	0.66	0.64	0.60	**0.63**	2-M2c	0.89	0.35	0.35	0.00	1.86	0.00
2.78	0.79	0.71	0.68	**0.71**	2-M2c	1.00	0.40	0.40	0.00	1.98	0.00
3.34	0.92	0.79	0.75	**0.78**	2-M2c	1.00	0.44	0.44	0.00	2.08	0.00
3.89	1.04	0.86	0.81	**0.85**	2-M2c	1.00	0.48	0.48	0.00	2.17	0.00
4.44	1.17	0.92	0.88	**0.91**	2-M2c	1.00	0.52	0.52	0.00	2.25	0.00
4.99	1.30	0.99	0.94	**0.98**	2-M2c	1.00	0.56	0.56	0.00	2.34	0.00
5.54	1.43	1.05	1.01	**1.04**	7-M2c	1.00	0.59	0.59	0.00	2.41	0.00
6.10	1.57	1.12	1.08	**1.11**	7-M2c	1.00	0.63	0.63	0.00	2.49	0.00
6.90	1.78	1.21	1.18	**1.20**	7-M2c	1.00	0.68	0.68	0.00	2.59	0.00
7.20	1.86	1.25	1.22	**1.24**	7-M2c	1.00	0.71	0.71	0.00	2.63	0.00

Fuente: Software HY8

Como se puede observar, la velocidad en esas condiciones garantiza un régimen súper crítico a lo largo del conducto y al ser la velocidad del flujo superior a 2.00m/s, garantiza una auto limpieza del ducto, que no se sedimenten partículas que puedan afectar la rugosidad y la sección hidráulica de la alcantarilla, sin desgastar el concreto del ducto.

4.1.4 Diseño de alcantarillas circulares tipo y cajones tipo

A continuación, se presentan las obras hidráulicas vía de interés.

Tabla 11. Obras propuestas para alcantarillas existentes

NO.	ABSCISA	TIPO	DIMENSIONES PROPUESTAS			SENTIDO	COTA BATEA DERECHA	COTA BATEA IZQUIERDA	PENDIENTE
			D o B (m)	H (m)	LONGITUD (m)				
1	K5+280.0	BOX.	1.0	1.0	24	DI	731	730.76	0.01
2	K5+400	BOX.	1.0	1.0	13	DI	728.40	728.27	0.01
3	K0+095.5	BOX.	1.0	1.0	13	DI	728.00	727.87	0.01
4	K5+550	BOX.	2.0	1.5	15	DI	728.30	728.15	0.01
5	K0+077.65	BOX.	2.0	1.5	15	DI	728.00	727.85	0.01
6	K0+626.946	BOX.	1.0	1.0	24	DI	728.50	728.26	0.01

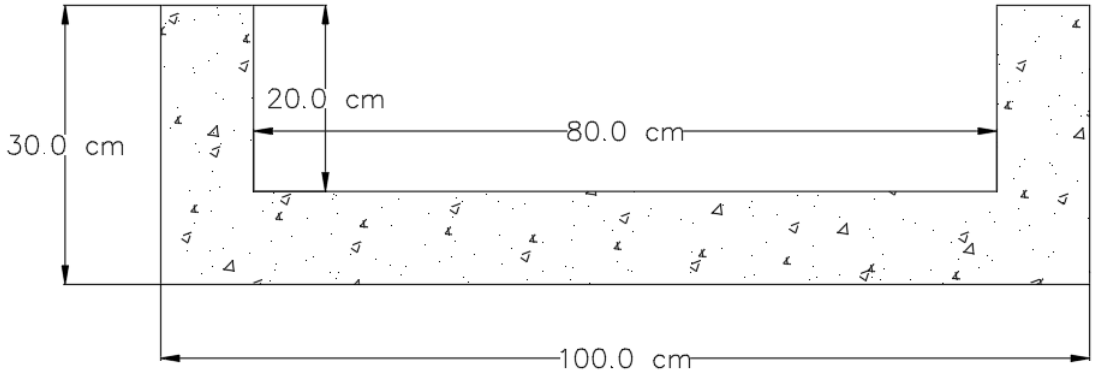
Fuente: Elaboración propia del consultor

4.2 DISEÑO DE CUNETA TIPO

Las cunetas se diseñaron con el caudal más crítico calculado en la parte hidrológica, el cual corresponde a 0.23m³/s. El diseño hidráulico consiste en determinar la sección transversal y puntos de desagüe. La velocidad máxima admisible es de 4.5 m/s, esto obedeciendo el Artículo 671, el cual establece que el material de construcción debe ser concreto. Se aconseja una velocidad mínima de 0.35 m/s, con el fin de evitar que el material en suspensión se deposite en el fondo de la cuneta con la consecuente disminución de la capacidad hidráulica. En este caso se calcularán los parámetros de diseño para el tramo vial, de una sección de cuneta tipo propuesta con el fin de determinar que no se desborda el flujo de la cuneta, antes de entregarse a una alcantarilla.

En el presente capítulo se evalúa la sección rectangular, la cual es la siguiente:

Figura 20. Sección de cuneta tipo



La estimación de la capacidad hidráulica de dicha sección de cuneta se desarrolla mediante la aplicación de la expresión de Manning como se muestra en el capítulo del presente estudio.

Figura 21. Capacidad hidráulica de la cuneta tipo

A (m2)	R (m)	n	S (%)	Q max (m3/s)	Q Diseño (m3/s)
0.16	0.133333333	0.012	0.5	0.25	246.06

Fuente: Elaboración propia del consultor

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-Para el presente proyecto, no se encontraron cuerpos hídricos perennes. Sin embargo, se delimita el área aferente de las cañadas adyacentes al proyecto, las cuales se analizaron y proyectaron obras de arte con las dimensiones y pendientes suficientes para su adecuado paso en la vía para un periodo de tormenta de diseño de 20 años.

-Partiendo de las recomendaciones de la población del sector, la topografía del sector, las condiciones físicas de las áreas aferentes del proyecto y los tipos de obras presentes en la zona del proyecto, se proponen únicamente estructuras tipo cajón o box culvert las cuales comprenden dimensiones de 1x1 y 2x1.5 y se distribuyen según su necesidad en el proyecto.

-Se recomienda un adecuado relleno no menor a 60cm por encima de la clave de las diferentes obras de arte proyectadas.

6 BIBLIOGRAFÍA

Chow Ven Te. (1959). Open-channel hydraulics. McGRaw-Hill, Civil Engineering Series.

Chow Ven Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. New York, USA: McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series.

INVIAS. (2011). Manual de drenaje para carreteras.

INVIAS. (2015). Guia de diseño de pavimentos con placa-huella.

Vargas, R., & Díaz-Granados, M. (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para colombia. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.