

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla y fecha (día, mes, año)

DEDICATORIA

A Dios dedico este triunfo.

A la memoria de “Lalo” Arrieta y Emigdio Turizo pilares de mis dos familias.

A ti “Miña” Turizo.

JOSÉ ARRIETA TURIZO

DEDICATORIA

A mi familia, que ha sido un ejemplo excepcional en mi vida y en especial a la memoria de mis abuelas.

Inocencia pitre Aragón.

María concepción Acosta de Fernández

YESID FERNÁNDEZ CÓRDOBA

AGRADECIMIENTOS

A Dios quiero agradecer por todo, por conocerle y por guiarme en mi camino hacia esta meta que tanto anhelé.

A Socorro y A Jorge mis padres que siempre me han apoyado y aconsejado para seguir adelante.

A Mau y A Esy por soportarme en mi vida como hermano.

A mis compañeros de estudio por el tiempo compartido.

A mis profesores por el conocimiento impartido en mí, especialmente al Ingeniero Gustavo Camargo Arévalo por la confianza y ayuda ofrecida, y sabiendo que el alumno cuando es bueno respeta al profesor.

Al grupo ANEICUC grandes compañeros, una familia.

A los ingenieros Camilo Osorio García y Jorge González Coneo asesores de esta investigación por su ayuda incondicional.

A José Domínguez y Teresa Martínez. “PAPA” Y “MAMA”

A mis demás familiares.

JOSÉ ARRIETA TURIZO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, primordialmente por brindarme la oportunidad de transformar este sueño en realidad, por brindarme la fuerza, conocimiento, y dedicación. A mis padres, el motor de mi vida que con esfuerzo y dedicación permitieron y acompañaron cada momento perseguir mis metas.

Con cada grano aportado por mis familiares, tíos, primos, amistades, que con alientos y motivaciones permitieron en los momentos flacos retomar y alcanzar las metas propuestas.

Prescindiblemente agradezco a los Ingenieros que acompañaron y permitieron sus grandes aportes a este documento, al ing. Camilo Osorio, él ing. Jorge Enrique González Coneo, el grupo de trabajo de investigación.

Un agradecimiento en especial a esa persona que fue como mi madre que permitió su apoyo en muchos momentos en conocimientos, amistad, y ejemplo de vida ing. Enith Miranda

YESID FERNÁNDEZ CÓRDOBA

RESUMEN

Los arroyos en la ciudad de Barranquilla Departamento del Atlántico si bien es sabido es una problemática que tienes años de existir generando en la urbe problemas de tipo socioeconómico en donde el principal afectado por su puesto es el habitante. Con el paso de los años se ha dado necesidad de estudiar cada uno de los arroyos, conocer sus características y a fin poder tomar o evaluar una solución, dentro de estos está la vertiente denominada “ARROYO DE LA SEGUNDA BRIGADA” descrito más adelante. Las nuevas tecnologías de software han empleado y/o desarrollado modelos de los cuales permiten estimar parámetros como caudales, velocidades entre otras, la herramienta computacional EPA-SWMM tiene esa característica y con ayuda de ella se plantea estimar para diferentes periodos de retorno los caudales de este arroyo, para luego ser comparados con los arrojados por los métodos de estimación de caudales tradicionales y con datos obtenidos por una investigación realizada por el ingeniero Humberto Ávila¹ y sacar conclusiones.

Palabras Claves: Arroyos, Caudales, Velocidades, EPA-SWMM, Métodos de Estimación de Caudales, Periodos de Retorno.

¹Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia.
PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

ABSTRACT

The streams waters in Barranquilla city of Atlantic department, it is a big problematic that exist long years ago, this problematic has been generating problems of socioeconomic type in the city, where the principal one affected by this condition are the citizen. With the time it has been necessary to study each one of the streams waters from the city, to know his characteristics and to end to be able to take or evaluate a solution, inside these there is the slope called "STREAM WATER OF THE SECOND BRIGADE " described at a later time. The new technologies of software that has been creating and developed some models that are used to allow the estimate parameters like flows, speeds between others, the computational tool EPA-SWMM has that characteristic and helpful to consider estimates to different return periods the flows of the stream waters, then to be compared with results by the methods of estimation of traditional flows and with information obtained by an investigation realized by the engineer Humberto Ávila and to extract conclusions.

Keywords: Stream water, Flows, Speeds, EPA-SWMM, Methods of Estimation of Flows, Return periods.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. Formulación del problema	14
2. Justificación	17
3. Objetivos	19
3.1. Objetivo General	19
3.2. Objetivos Específicos	19
4. Delimitaciones	20
5. Limitaciones	21
6. Marco referencial	22
6.1. Marco teórico	22
6.2. Antecedentes y teorías básicas del problema	93
6.3. Formulación de términos básicos	100
6.4. Formulación de hipótesis	103
6.5. Marco histórico	104
6.6. Marco geográfico	110
6.7. Marco legal	112
7. Diseño Metodológico	113
8. Desarrollo del trabajo	115
8.1. Definición del trazado del arroyo	116
8.2. Levantamiento topográfico	117

8.3.	Perfil longitudinal del arroyo	118
8.4.	Secciones transversales	118
8.5.	Delimitación de cuenca con ayuda de ARC GIS versión 9.3	120
8.6.	División de sub cuencas con ayuda de ARC GIS versión 9.3	121
8.7.	División de sub cuencas por calles	122
8.8.	Características morfométricas de las sub cuencas	123
8.9.	Precipitaciones	123
8.10.	Datos dudosos	125
8.11.	Curvas IDF	128
8.12.	Construcción de hietogramas	132
8.12.1.	Construcción de hietogramas estación las flores	132
8.13.	Construcción del modelo	133
8.13.1.	Introducción de nodos	134
8.13.2.	Secciones transversales	135
8.13.3.	Unión de nodos por líneas	136
8.13.4.	Series temporales	137
8.13.5.	Introducción de la lluvia	138
8.13.6.	Construcción de sub cuencas	141
8.13.7.	Presentación del arroyo con sus componentes en el modelo	147
8.13.8.	Corrida del modelo	148
8.14.	Montaje del modelo en HEC-RAS	150
8.14.1.	Secciones transversales	150
8.14.2.	Estructura completa del arroyo dentro del HEC-RAS	152

8.14.3.	Introducción de caudales en HEC-RAS	153
8.14.4.	Modelación del arroyo en HEC-RAS	154
8.14.5.	Simulación del arroyo	154
9.	Resultados obtenidos	156
10.	Análisis de los resultados	175
11.	Recursos	188
12.	Cronograma	189
13.	Presupuesto	190
14.	Conclusiones	191
15.	Bibliografía	193
	ANEXOS	196

INTRODUCCIÓN

El DEIP de Barranquilla dentro de su historia siempre ha carecido de un sistema de drenaje pluvial, esto ha generado una serie de problemas de distintas índoles a causa de la generación de una escorrentía superficial, los llamados “Arroyos de Barranquilla” más de 30 en su totalidad, la búsqueda de soluciones pertinentes para arraigar esta problemática han hecho que personal experto en el área desarrollen investigaciones con ámbitos en conocer a fondo las características de cada uno de los cauces o bien llamadas en esta ciudad Vía-canales puesto que la gran parte de las escorrentías de gran caudal pasas por la calles.

Este compendio de hojas comprende una investigación donde se estima con el software EPA-SWMM los caudales del arroyo de la segunda brigada para diferentes periodos de recurrencia, con datos de topografía reales expuestos dentro del capitulo 8, dicho trabajo se realizará con base a la metodología que sigue la herramienta computacional explicada más adelante. A demás de EPA-SWMM utilizaron otros programas de computador como son el AutoCAD, HEC-RAS y Arc Gis. Con ayuda de estos se pudo tomar información valiosa para la construcción del modelo hidrológico, por ejemplo con Arc Gis se logró delimitar la cuenca hidrográfica del arroyo en estudio y con Hec Ras se logra modelar el arroyo con los Caudales obtenidos y las secciones dadas por la respectiva topografía.

Los resultados obtenidos se compararan con valores obtenidos en los métodos tradicionales de estimación como los son: el método racional y el hidrograma

unitario triangular del SCS (Soil Conservation Service) y con una investigación realizada por el Ingeniero Humberto Ávila donde plasma resultados de caudales y velocidades para arroyos importantes dentro esta ciudad donde se encuentra el de la segunda brigada o también llamado arroyo calle 65.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Colombia es un país que se encuentra en una franja de convergencia intertropical, que determina la época lluviosa o de mayor precipitación durante el año. La ciudad de Barranquilla en el transcurso anual tiene dos periodos lluviosos; el primero se manifiesta en el mes de abril y el segundo está comprendido entre los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre, esto demuestra un comportamiento bimodal. El desarrollo socio-económico conlleva a un crecimiento poblacional, uno de los indicadores de dicho desarrollo, es la construcción de edificaciones, al realizar estas labores se transforma el sector circundante generando variaciones o cambios en ciclo hidrológico, la construcción de estructuras con materiales poco permeables trae consigo problemas que en un principio no se consideraban de gran envergadura, esto hace que no haya paso o infiltración del agua en el suelo, evita la alimentación de los acuífero, humedales, lagunas y ríos, y convierte gran parte del agua precipitada en escorrentía superficial.

El balance hídrico representa el equilibrio que existe entre todos los recursos hídricos que salen y entran al sistema de modo que las plantas intervienen dentro de este, cumpliendo la etapa de evapotranspiración, retienen el recurso natural, disminuyendo la velocidad de escorrentía y permitiendo la infiltración, todo este proceso se ve truncado cuando un sector es deforestado.

Barranquilla es una ciudad costera del río Magdalena, donde los niveles de evaporación tienen valores considerables que al momento de precipitarse generan eventos de gran intensidad y carece de un sistema de drenaje pluvial.

La no planificación del crecimiento, la construcción de urbanizaciones e invasiones, deriva que los porcentajes de infiltración sean muy bajos por la impermeabilización de la superficie y el agua se acumula en grandes cantidades en los puntos más bajo de la ciudad en los periodos lluviosos.

El mal uso del suelo no teniendo en cuenta el cauce natural de los arroyos al momento de construir hace que el agua precipitada en movimiento afecte las obras realizadas y convierta las vías en vías-canales, lavándolas y transportando agentes contaminante de diversa índoles, dando paso al desperdicio del recurso natural por una contaminación difusa, con ello se generan efectos como parálisis en la movilidad, inundaciones, deterioro en las estructuras y hasta cobrar vidas humanas, y afectando el comercio no permitiendo el desarrollo de la economía.

La canalización de los arroyos también es parte de la problemática, el agua cuando se precipita, una parte se infiltra en el suelo alimentando los acuíferos, cuando el suelo se satura entonces se presenta la escorrentía superficial y sub-superficial que hace parte del caudal que alimenta los cuerpos de agua de manera directa, en épocas de sequía el agua infiltrada en el suelo se convierte en un aporte de caudal al cuerpo, al canalizar los arroyos con materiales poco permeables se pierde esta comunicación y el suelo no se descarga por completo

haciendo que en la siguiente temporada lluviosa haya menos infiltración y más escorrentía superficial. ¿La implementación de nuevas tecnologías computacionales permite una equivalencia con respecto a los métodos tradicionales de estimación de caudales?

2. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento poblacional de manera desmesurada, el cambio del uso del suelo, la no planificación al momento de construir con materiales poco permeables, ha alterado el comportamiento de las aguas en la ciudad de Barranquilla, haciendo que el ciclo hidrológico se altere, produciendo variaciones en las entradas y salidas del balance hídrico hecho sobre el área observada.

La estimación de los caudales generados en el sector de estudio se determina realizando un balance hídrico, el cual tiene en cuenta las entradas (precipitación y entradas externas) y salidas (evaporación, evapotranspiración, escorrentía, infiltración y percolación) y así de calcular que tanto de lo que llueve se convierte en caudal.

El mejoramiento de la cantidad de agua se refiere a mantener el hidrograma natural, previo a cualquier desarrollo de la zona, tanto el caudal de aportación base como el tiempo de concentración, e incluso mejorarlo si este provocaba problemas de inundación.

Como es de saber el principal afectado por este problema de los arroyos en el DEIP de barranquilla es la ciudadanía en general perjudicando su movilidad, cuando este fenómeno ocurre la ciudad queda en total incomunicación que provocando a que la persona cometa toda clase imprudencia, que en algunos casos puede hasta causarle la muerte y casos se han visto. De una u otra forma la economía de barranquilla se ve afectada, también el transporte se ve agravado y

en si un sinfín de problemas que generan los arroyos en esta ciudad y el gran interrogante que se plantea la comunidad es si, ¿las autoridades competentes están tomando medidas o no?

Dado la problemática e impacto generado por los arroyos en la ciudad de barranquilla, la comunidad académica perteneciente al programa de ingeniería civil ha resuelto obtener por medio de esta investigación, la información que caracteriza las condiciones hidráulicas e hidrológicas del arroyo de la segunda brigada (II). Para posibles estudios de obtenciones de viables soluciones. No comprendidas dentro de esta investigación.

3. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

Estimar mediante modelos lluvia escorrentía los caudales del arroyo de LA SEGUNDA BRIGADA II, para diferentes períodos de retorno a partir de datos estadísticos.

3.2. ESPECÍFICOS

- Determinar las características morfométricas las cuencas del arroyo LA SEGUNDA BRIGADA II.
- Construir curvas IDF a partir del análisis estadístico de datos pluviométricos.
- Construir el modelo hidrológico de la cuenca del arroyo aplicando la herramienta computacional EPA-SWMM.
- modelar del arroyo en HEC-RAS
- Analizar los respectivos resultados arrojados por los diferentes softwares.

4. DELIMITACIONES

- **Delimitación Temporal:**

El presente trabajo se realizó en el periodo comprendido entre noviembre del 2013 a noviembre del 2014, acumulando un tiempo de trabajo de investigación de 12 meses.

- **Delimitación Espacial:**

La presente investigación se realizó en la ciudad de barranquilla departamento del atlántico. Comprendiendo el análisis de estudio en la zona metropolitana teniendo en cuenta el área de influencia de la cuenca macro del arroyo y el cauce de la misma, iniciando el afluente en la carrera 32 con calle 69 esquina, y desembocando en el rio magdalena el cual invade los predios de la escuela naval de sub- oficiales de la ciudad de barranquilla.

5. LIMITACIONES

- En el área de estudio de la cuenca, se presentaron algunas limitaciones con las mediciones de áreas impermeables, ya que el espacio en superficie cuadrada es demasiado extenso y comprende tres sub-cuencas, generando dificultades para medir de vivienda en vivienda las áreas impermeables. Es por este motivo que se tomó la información de la página web de la entidad I.G.A.C, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, ente que regula lo relacionado con los predios correspondientes a cada una de las ciudades.

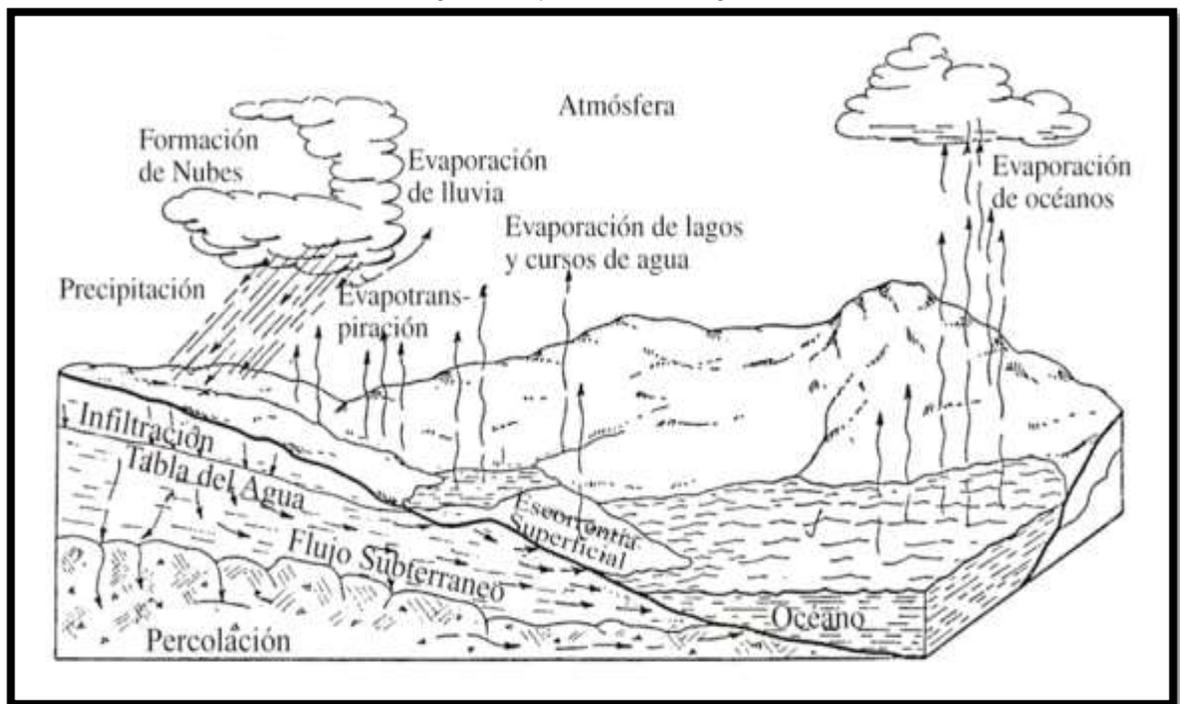
Se realizaron algunas pruebas por áreas y obteniendo dichos coeficientes. Cabe resaltar que para próximas mediciones o estudios en base a este documento sea necesario actualizar las áreas impermeables ya que el crecimiento poblacional desarrollos urbanísticos está en constante cambios, generando así variaciones en los distintos coeficientes.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1. EL CICLO HIDROLÓGICO²

Figura 1. Esquema ciclo hidrológico



El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida.

²Pedro c. Fernández; Sergio Fattorelli. Diseño Hidrológico, segunda edición en español, edición digital. Año 2011

La transferencia de agua desde la superficie de la Tierra hacia la atmósfera, en forma de vapor de agua, se debe a la evaporación directa, a la transpiración por las plantas y animales y por sublimación (paso directo del agua sólida a vapor de agua). La cantidad de agua movida, dentro del ciclo hidrológico, por el fenómeno de sublimación es insignificante en relación a las cantidades movidas por evaporación y por transpiración, cuyo proceso conjunto se denomina evapotranspiración. El vapor de agua es transportado por la circulación atmosférica y se condensa luego de haber recorrido distancias que pueden sobrepasar 1000 km. El agua condensada da lugar a la formación de nieblas y nubes y, posteriormente, a precipitación.

La precipitación puede ocurrir en la fase líquida (lluvia) o en la fase sólida (nieve o granizo). El agua precipitada en la fase sólida se presenta con una estructura cristalina, en el caso de la nieve, y con estructura granular, regular en capas, en el caso del granizo. La precipitación incluye el agua que pasa de la atmósfera a la superficie terrestre por condensación del vapor de agua (rocío) o por congelación del vapor (helada) y por intercepción de las gotas de agua de las nieblas. El agua que precipita en tierra puede tener varios destinos. Una parte es devuelta directamente a la atmósfera por evaporación; otra parte escurre por la superficie del terreno, escorrentía superficial, que se concentra en surcos y va a originar las líneas de agua. El agua restante se infiltra penetrando en el interior del suelo; esta agua infiltrada puede volver a la atmósfera por evapotranspiración o profundizarse hasta alcanzar las capas freáticas.

Tanto el escurrimiento superficial como el subterráneo van a alimentar los cursos de agua que desembocan en lagos y en océanos. La escorrentía superficial se presenta siempre que hay precipitación y termina poco después de haber terminado la precipitación. Por otro lado, el escurrimiento subterráneo, especialmente cuando se da a través de medios porosos, ocurre con gran lentitud y sigue alimentando los cursos de agua mucho después de haber terminado la precipitación que le dio origen.

6.1.2. MODELOS LLUVIA ESCORRENTÍA

Los modelos de lluvia-escorrentía son unas representaciones que forman parte del ciclo hidrológico en cuanto al fenómeno de la escorrentía superficial de una cuenca hidrográfica. El modelo se usa mayormente para entender el proceso de escurrimiento y para pronosticarlo con el propósito de regularizar el uso del agua o diseñar obras hidráulicas para el control de inundaciones.

Los modelos lluvia – escorrentía también pueden utilizados cuando no existe la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje en hoyas hidrográficas, y son modelos en los cuales se calcula la escorrentía superficial. De esta manera, a través de datos históricos de lluvia de corta duración, existentes en la cuenca de interés y representativos de ella, aplicados a la hoya hidrográfica con características específicas geométricas, de suelos, vegetación, etc., se calcula el caudal máximo instantáneo de escorrentía superficial sobre la hoya.

Existen distintos métodos de estimación, los cuales se utilizarán en los siguientes:

Método racional: Existe discrepancia entre los diferentes autores sobre el rango de aplicabilidad del método en relación con el área de drenaje de las hoyas. Valores entre 0.65 y 12.5 km² han sido citados en la literatura técnica. La tendencia actual es usar 1.3 a 2.5 km² como el límite superior para la aplicabilidad del método racional.

Método del hidrograma de escorrentía superficial: utilizado para áreas de drenaje mayores a 2.5 km². Sherman, el autor de la metodología, lo propuso para áreas de drenaje de hasta 20 km², pero es usual utilizarlo en hidrología para valores mayores.

6.1.2.1. MÉTODO RACIONAL³

El método racional parte de la definición del coeficiente de escorrentía C, valor adimensional, el cual se puede definir como la relación entre el volumen de escorrentía superficial, V_E, y el volumen de precipitación total, V_P, ambos expresados en m³, así:

$$C = \frac{V_{\text{ESCORRENTIA SUPERFICIAL}}}{V_{\text{PRECIPITACIÓN TOTAL}}} = \frac{V_E \frac{V_E}{t}}{V_P \frac{V_P}{t}} \quad \text{Ec. 1}$$

Entonces:

³República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

$$\frac{V_E}{t} = Q_E \quad \text{Ec. 2}$$

Y,

$$\frac{V_P}{t} = i A \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

Q_E : Caudal de escorrentía superficial, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

i : Intensidad de precipitación, en metros por segundo (m/s).

t : Tiempo de duración de la lluvia, en segundos (s).

A : Área de drenaje de la hoya hidrográfica, en metros cuadrados (m^2).

Entonces:

$$C = \frac{Q_E}{i A} \quad \text{Ec. 4}$$

El numerador representa el volumen de escorrentía superficial por unidad de tiempo de duración de la lluvia y el denominador representa el volumen de lluvia por unidad de tiempo de esta duración.

$$Q_E = CIA \quad \text{Ec. 5}$$

Al utilizar la fórmula racional, se supone que el caudal Q_E toma un valor de caudal máximo (pico) Q_P , cuando, debido a una cierta intensidad de lluvia sobre el área de drenaje, es producido por esa precipitación que se mantiene por un tiempo

igual al periodo de concentración del caudal en el punto en consideración. Teóricamente, éste es el tiempo de concentración, el cual se define como el tiempo requerido para que la escorrentía superficial fluya desde la parte más remota de la hoya hasta el punto de interés.

Entonces, Q_P corresponde a una lluvia de intensidad i sobre un área de drenaje A , lluvia ésta que dure, como mínimo, un tiempo tal que toda el área de drenaje contribuya a la escorrentía superficial, siendo Q_P el caudal máximo de escorrentía superficial, el cual está dado por:

$$Q_P = CIA \quad \text{Ec. 6}$$

Ahora bien, si A está dado en km^2 , i en mm/h y Q_P en m^3/s , la anterior ecuación queda igual a:

$$Q_P = 0.278 CIA \quad \text{Ec. 7}$$

La aplicación de la fórmula racional depende del coeficiente de escorrentía, el cual se encuentra en tablas elaboradas para tal fin. En la Tabla 1⁴ y en la Tabla 2⁵ se dan valores típicos del coeficiente para áreas urbanas y rurales, respectivamente.

Por otro lado, el valor del coeficiente de escorrentía C se puede determinar también de acuerdo con la siguiente expresión:

⁴ ⁵República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

$$C = \frac{[(P_d - P_o)(P_d + 23P_o)]}{(P_d + 11P_o)^2} \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

Po: Parámetro que depende del uso y tipo de suelo, de la cobertura vegetal de la cuenca y de la humedad antecedente del suelo antes del aguacero de diseño, en milímetros (mm).

Pd: Precipitación máxima puntual anual en 24 horas para un periodo de retorno específico, en milímetros (mm).

El valor Po se obtiene a partir de la siguiente expresión que lo relaciona con el número de curva de escurrimiento CN del método del Soil Conservation Service, que se define en el numeral 2.7⁶ del manual de drenaje para carreteras:

$$P_o = \frac{(5080 - 50.8CN)}{CN} \quad \text{Ec. 9}$$

⁶República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Tabla 1. Valores del coeficiente de escorrentía en áreas urbanas⁷

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

⁷República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Tabla 2. Valores del coeficiente de escorrentía en áreas rurales⁸

VEGETACIÓN Y TOPOGRAFÍA Y	TEXTURA DEL SUELO		
	FRANCO ARENOSO	FRANCO LIMO ARCILLOSO	ARCILLOSO
BOSQUES			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.25	0.35	0.50
Montañoso	0.30	0.50	0.60
PASTOS			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.16	0.36	0.55
Montañoso	0.22	0.42	0.60
TIERRAS CULTIVADAS			
Plano	0.30	0.50	0.60
Ondulado	0.40	0.60	0.70
Montañoso	0.52	0.72	0.82
Nota: Plano (pendiente 0 - 5%); Ondulado (pendiente 5 - 10%); Montañoso (pendiente 10 - 30%). Para valores mayores al 30 %, a falta de datos, utilizar los valores para pendientes entre el 10 y el 30 %.			

⁸República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

6.1.2.2. MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.⁹

- **HIDROGRAMA DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y UNITARIO DE UNA HOYA.**

Es el hidrograma de escorrentía superficial total resultante de un volumen unitario de lluvia neta, uniformemente distribuido en espacio y tiempo. La altura de la lluvia neta o efectiva corresponde con la altura de escorrentía superficial total del hidrograma unitario. Este método se define para áreas de drenaje mayores a 2.5 km².

$$dA = \int_0^t Q_e dt \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

d: Lluvia neta o efectiva total, en milímetros (mm).

A: Área de drenaje de la hoya hidrográfica, en kilómetros cuadrados (km²).

Q_e: Escorrentía superficial total, en metros cúbicos por segundo (m³ / s).

t: Tiempo base del hidrograma unitario de la hoya, en horas (h).

⁹República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

- **CÁLCULO DE HIDROGRAMAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN UNA HOYA.**

Los hidrogramas de escorrentía superficial en una hoya se pueden calcular por dos metodologías, a saber: con datos históricos de creciente, o mediante metodologías relacionadas con hidrogramas unitarios sintéticos.

- ✓ **HIDROGRAMAS UNITARIOS SINTÉTICOS**

Se han desarrollado, mediante formulación empírica, muchos hidrogramas unitarios denominados sintéticos, los cuales se calculan con base en características físicas de la hoya en consideración.

- ✓ **HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR**

Al no contarse con datos históricos de precipitación-escorrentía en una hoya hidrográfica, se pueden deducir hidrogramas unitarios a partir de medios sintéticos.

Un hidrograma unitario sintético es un hidrograma unitario estimado siguiendo una metodología establecida, sin necesidad del análisis de datos de precipitación-escorrentía.

El desarrollo de hidrogramas unitarios sintéticos se basa en el siguiente principio: si el volumen del hidrograma de escorrentía superficial es conocido (el volumen de escorrentía superficial es igual al área de la hoya hidrográfica multiplicado por la

altura de precipitación efectiva), el caudal pico puede ser calculado suponiendo una cierta forma del hidrograma unitario.

Si se supone una forma triangular, el volumen es igual a:

$$V = \frac{Q_P T_{bt}}{2} = A \times (1) \quad \text{Ec. 11}$$

Dónde:

V: Volumen bajo el hidrograma unitario triangular, en metros cúbicos (m³).

Q_p: Caudal pico, en metros cúbicos por segundo (m³/s).

T_{bt}: Tiempo base del hidrograma unitario triangular, en segundos (s).

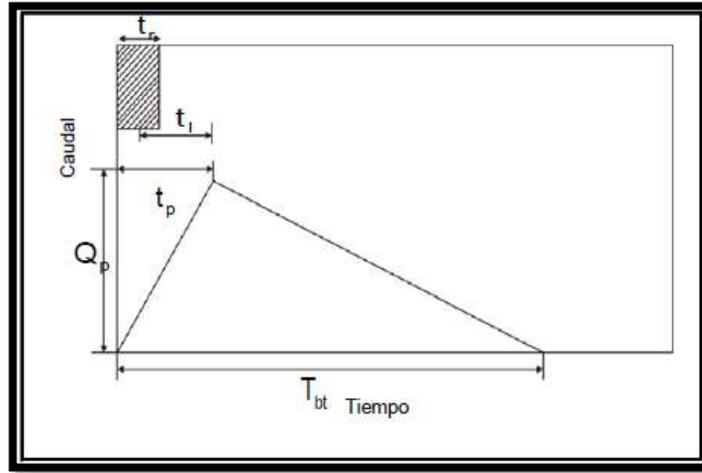
A: Área de drenaje de la hoya hidrográfica, en metros cuadrados (m²).

(1): Unidad de altura de precipitación

Además:

$$Q_P = \frac{2A}{T_{bt}} \quad \text{Ec. 12}$$

Figura 2. Hidrograma unitario triangular¹⁰



Para un milímetro de lluvia efectiva, el caudal pico resulta igual a:

$$Q_p = \frac{0.20833A}{t_p} \quad \text{Ec. 13}$$

Dónde:

Q_p : Caudal pico por milímetro de lluvia efectiva, en metros cúbicos por segundo (m³/s).

A: Área de drenaje, en kilómetros cuadrados (km²).

t_p : Tiempo al pico del hidrograma unitario triangular, en horas (h).

Además:

$$t_p = \frac{t_r}{2} + 0.6t_c \quad \text{Ec. 14}$$

¹⁰República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

$$t_l = t_p - \frac{t_r}{2} \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

t_r : Duración de la lluvia efectiva, en horas (h).

t_c : Tiempo de concentración de la hoya, en horas (h).

t_L : Tiempo de desfase de la hoya, en horas (h).

Adicionalmente:

$$T_{bt} = \frac{8}{3} t_p \quad \text{Ec. 16}$$

✓ **HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL DEL UNITED STATES SOIL CONSERVATION SERVICE, SCS**

El hidrograma unitario sintético del SCS es el hidrograma unitario adimensional desarrollado por Víctor Mockus en 1950. Este hidrograma fue estudiado con base en el análisis de un gran número de hidrogramas unitarios naturales de un amplio rango de tamaños de hoyas hidrográficas y sitios geográficos.

Para calcular el tiempo de desfase de la hoya hidrográfica, el método del SCS usa los dos métodos siguientes: (1) el método de número de curva CN que se explicará más adelante en este Manual, y (2) el método de velocidad.

En el método del número de curva CN, el tiempo de desfase se expresa a través de la siguiente fórmula:

$$t_l = \frac{L^{0.8}(2540 - 22.86CN)^{0.7}}{14104 CN^{0.7} S^{0.5}} \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).

CN: Número de curva del SCS.

L: Longitud del cauce principal, en metros (m).

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

Nota: La ecuación está restringida a números de curva CN en un rango de 50 a 95.

$$t_p = \frac{t_r}{2} + t_l \quad \text{Ec. 18}$$

$$Q_p = \frac{0.20833A}{t_p} \quad \text{Ec. 19}$$

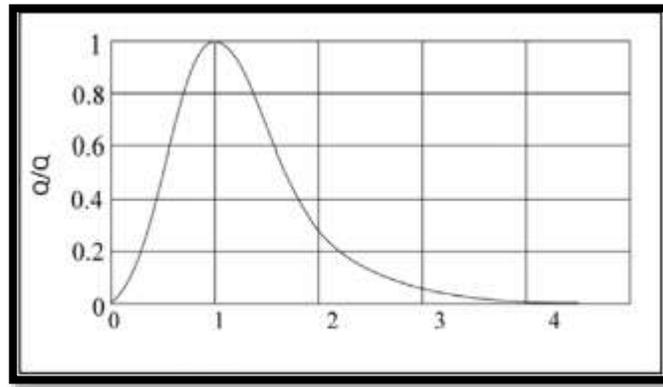
Dónde:

Q_p: Caudal pico del hidrograma unitario para 1 mm de precipitación efectiva, en metros cúbicos por segundo (m³/s).

A: Área de drenaje de la hoya hidrográfica, en kilómetros cuadrados (km²).

t_p: Tiempo al pico, en horas (h).

Figura 3. Hidrograma unitario adimensional del SCS.¹¹



6.1.3. PRECIPITACIONES EFECTIVAS DE DISEÑO EN MODELOS LLUVIA – ESCORRENTÍA

6.1.3.1. MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA CN DEL SCS PARA ESTIMAR ABSTRACCIONES DE LA PRECIPITACIÓN

El Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América, SCS, desarrolló un método denominado número de curva de escorrentía CN, para calcular las abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la interceptación, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha.

En este método, la profundidad de escorrentía (es decir, la profundidad efectiva de precipitación) es una función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, denominado número de curva o CN. El número de curva varía en un rango de 1 a 100,

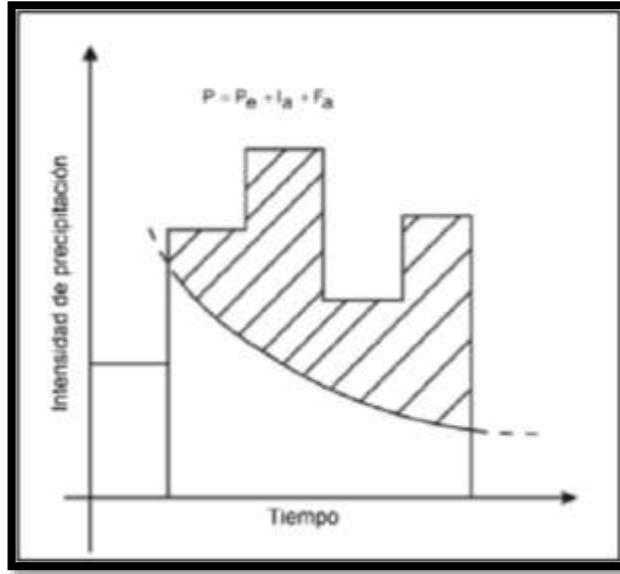
¹¹República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentía de la hoya hidrográfica: (1) tipo de suelo hidrológico, (2) utilización y tratamiento del suelo, (3) condiciones de la superficie del terreno, y (4) condición de humedad antecedente del suelo.

El método del número de curva de escorrentía fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escorrentía de 24 horas y, como tal, debe ser usado hasta esta última duración. No toma explícitamente en consideración las variaciones temporales de intensidad de lluvia. La distribución temporal de precipitación puede ser introducida en una etapa posterior.

Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa, P_e , es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a la retención potencial máxima S , como se presenta en la Figura 4.

Figura 4. Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS; I_a = abstracción inicial, P_e = exceso de precipitación; F_a = abstracción continuada, P = precipitación total¹²



Existe una cierta cantidad de precipitación I_a (abstracción inicial antes de encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es $P - I_a$. La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad \text{Ec. 20}$$

Del principio de continuidad de la precipitación:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad \text{Ec. 21}$$

¹²República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Combinando las ecuaciones anteriores, y resolviendo para P_e se encuentra:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Ec. 22}$$

Esta es la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta, utilizando el método del SCS.

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica:

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ec. 23}$$

Con base en esto, la ecuación de la precipitación efectiva queda:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{P - 0.8 \times S} \quad \text{Ec. 24}$$

En la que P y S están expresados en pulgadas. Esta fórmula es válida para $P \geq 0.2S$; si $(P - 0.2S) \leq 0$, entonces $P_e = 0$.

Ya que la máxima retención potencial varía ampliamente, es más apropiado expresarla en términos del número de curva de escorrentía CN, un entero que varía en el rango de 1 a 100, de la siguiente forma:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ec. 25}$$

En la que CN es el número de curva de escorrentía (adimensional), y S están en mm. Para CN=100, S=0; y para CN=1, S=25146 mm.

De esta manera, las abstracciones totales A (incluyendo intercepción, detención superficial e infiltración propiamente dicha) son iguales a:

$$A = P - P_e \quad Ec. 26$$

➤ **ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA, CN**

Los complejos de cubierta hidrológica del suelo describen una combinación específica de los grupos de suelos hidrológicos, el uso y el tratamiento de la tierra, la condición hidrológica superficial y las condiciones de humedad antecedente. Todos estos factores tienen un comportamiento directo sobre la cantidad de escorrentía producida por una hoya hidrográfica. El grupo hidrológico de suelos describe el tipo de suelo. El uso y el tratamiento del suelo describen el tipo y la condición de la cubierta vegetal. La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la hoya hidrográfica para aumentar o impedir la escorrentía directa. La condición de humedad antecedente tiene en cuenta la historia reciente de la precipitación y, consecuentemente, es una medida de la cantidad almacenada por la hoya.

➤ **CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS SUELOS**

Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planteamiento de cuencas para la estimación de la escorrentía superficial a partir de la precipitación. Las propiedades de los suelos “desnudos”, luego de un humedecimiento prolongado, que son consideradas para estimar la tasa mínima de infiltración, son: profundidad del nivel freático en época de invierno, infiltración y permeabilidad del suelo luego de un humedecimiento prolongado, y la profundidad hasta el estrato de permeabilidad muy baja. La influencia de la cobertura vegetal es tratada independientemente.

Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos A, B, C, y D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

A. (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

B. (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

C. (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100 cm).

D. (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

➤ **CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE**

El método del número de curva de escorrentía tiene tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta que se analiza. La condición de humedad antecedente seca (AMC I) tienen el menor potencial de escorrentía, con los suelos estando lo suficientemente secos para un arado satisfactorio o para que una siembra se lleve a cabo. La condición de humedad antecedente promedio (AMC II) tiene un potencial de escorrentía promedio. La condición de humedad antecedente húmeda

(AMC III) tiene el mayor potencial de escorrentía, con la hoya hidrográfica prácticamente saturada de precipitaciones anteriores. La condición de humedad antecedente puede ser determinada a partir de la información de la Tabla 3.

Tabla.3. Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente¹³

CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE (AMC)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA DE LOS 5 DÍAS PREVIOS AL EVENTO EN CONSIDERACIÓN (mm)
I	0 - 36
II	36.1 – 52.5
III	Más de 52.5

➤ DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA

Actualmente están en uso tablas de número de curva de escorrentía CN para un promedio de la condición AMC II para varias coberturas hidrológicas del suelo. En las Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 se muestran los números de curva para áreas urbanas, para áreas agrícolas cultivadas, y para otros tipos de tierras agrícolas, respectivamente.

¹³República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Tabla 4. Número de curvas de escorrentía para áreas urbanas para condición de Humedad antecedente promedio AMCII e Ia-0.2S¹⁴

TIPO DE COBERTURA Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA	% PROMEDIO ÁREAS IMPERMEABLES ¹	NUMERO DE CURVAS PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS			
		A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desarrolladas (vegetación ya establecida):					
Espacios abiertos (prados, parques, campos de golf, cementerios, etc.) ²					
Condición pobre (menos del 50% cubierto de pasto)		68	79	86	89
Condición regular (del 50% al 75% cubierto de pasto)		49	69	79	84
Condición buena (más del 75% cubierto de pasto)		39	61	74	80
Áreas Impermeables:					
Parqueaderos pavimentados, techos, autopistas, etc. (excluyendo derecho de vía)		98	98	98	98
Calles y caminos:					
Pavimentados		98	98	98	98
Pavimentados; zanjas abiertas (incluyendo derecho de vía)		83	89	92	93
Grava (incluyendo derecho de vía)		76	85	89	91
Tierra (incluyendo derecho de vía)		72	82	87	89
Áreas desiertas urbanas:					
Paisajes desérticos naturales (solamente áreas permeables) ³		63	77	85	88
Paisajes desérticos artificiales (barreras impermeables de maleza, arbustos de desierto con 1 a 2 pulg de diámetro; Cubierta de arena o grava y orillas de áreas húmedas)		96	96	96	96
Áreas urbanas:					
Comercial y de negocios	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Áreas residenciales por promedio del tamaño del lote:					
1/8 de acre o menos (506 m ² o menos)	65	77	85	90	92
1/4 acre (1012 m ²)	38	61	75	83	87
1/3 acre (1350 m ²)	30	57	72	81	86
1/2 acre (2025 m ²)	25	54	70	80	85
1 acre (4050 m ²)	20	51	68	79	84
2 acre (8100 m ²)	12	46	65	77	82
Áreas urbanas desarrolladas:					
Áreas permeables conformadas (solamente áreas permeables, sin vegetación)		77	86	91	94

¹⁴República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Tabla 5. Número de curvas de escorrentía para áreas urbanas para condición de humedad antecedente promedio AMCII e la-0.2S¹⁵

COBERTURA		CONDICIÓN HIDROLÓGICA	GRUPO DE SUELOS			
USO DE LA TIERRA	TRATAMIENTO O PRÁCTICA		A	B	C	D
			NÚMERO DE CURVA			
Rastrojo	Hileras Rectas	---	77	86	91	94
Cultivos en hileras	Hileras Rectas	Mala	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Leguminosas en ¹ hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80

¹⁵República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Tabla 6. Número de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas para una condición de humedad antecedente promedio AMCII e Ia=0.2S¹⁶

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE COBERTURA	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	NÚMERO DE CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS			
		A	B	C	D
Pastos, forraje para pastoreo ¹	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno	---	30	58	71	78
Maleza mezclada con pasto de semilla con la maleza como principal elemento ²	Mala	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30 ³	48	65	73
Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles) ⁴	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques ⁵	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	---	59	74	82	86

¹⁶República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

6.1.4. HIETOGRAMAS¹⁷

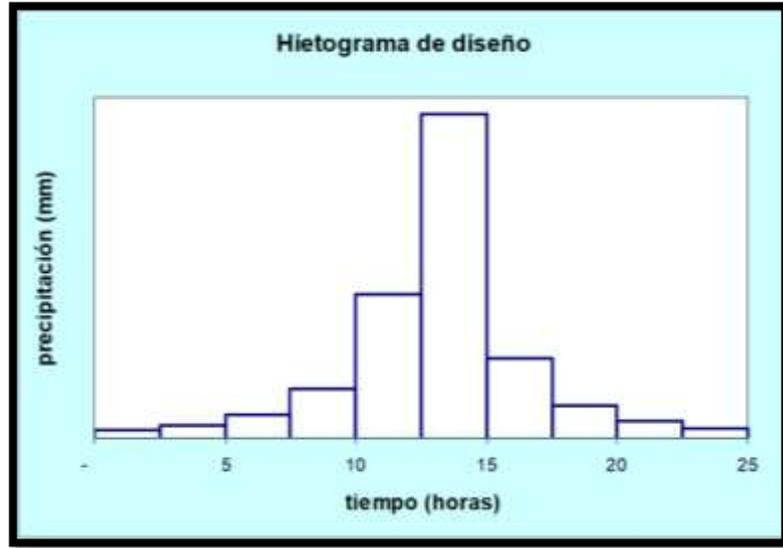
6.1.4.1. HIETOGRAMAS PUNTUALES DE AGUACEROS DE DISEÑO CON CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA POR MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS.

El método del bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva-duración-frecuencia. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt , sobre una duración total de $T_d = n \cdot \Delta t$.

Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, $4\Delta t$,... y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (Figura 5)

¹⁷República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Figura 5. Ejemplo Hietograma de Diseño¹⁸



El procedimiento es el siguiente:

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

¹⁸República del Perú, Ministerio de Transporte y comunicaciones, "manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje" Perú, 2008.

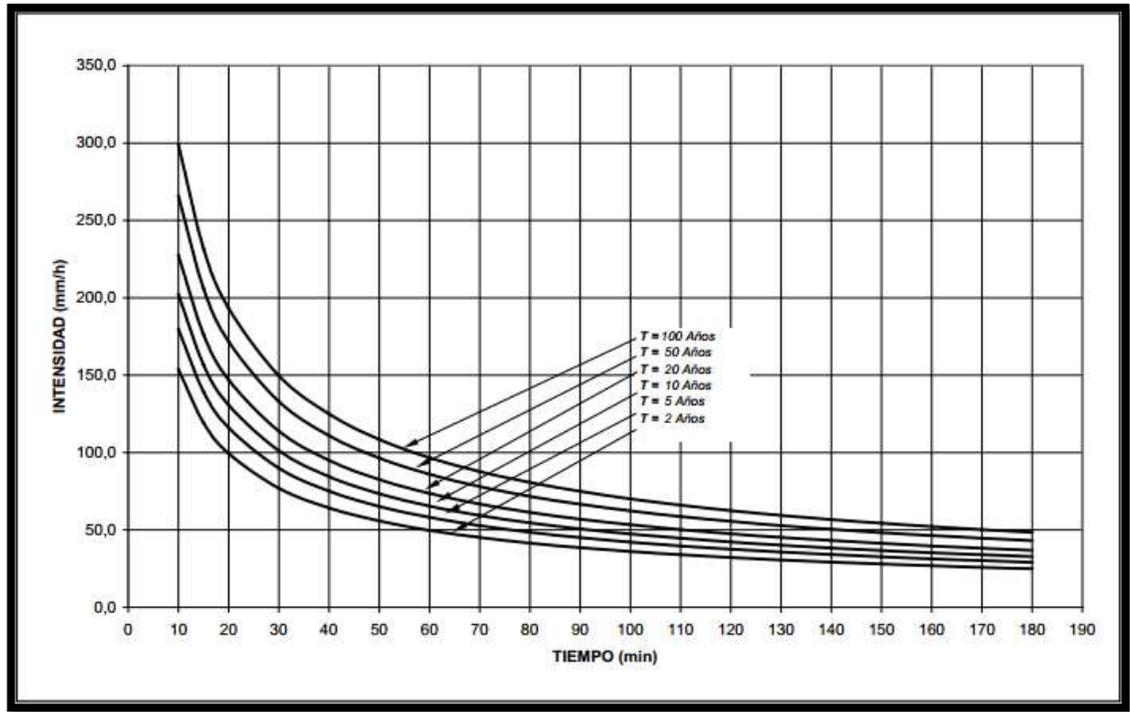
3) Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, y por medio del método del Bloque Alterno, los incrementos de lluvia de los hietogramas mencionados previamente se deben arreglar de la siguiente manera: el valor más bajo se colocará en el primer lugar, el segundo 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.

6.1.5. CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA, IDF¹⁹

Las curvas intensidad – duración – frecuencia, IDF, son arreglos en los cuales se presentan las lluvias (estimadas como intensidad de precipitación) contra su duración y el periodo de retorno, como se presenta en la Figura 6.

¹⁹República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Figura 6. Curvas IDF típicas²⁰



6.1.5.1. CÁLCULO DE CURVAS IDF CON DATOS HISTÓRICOS DE PRECIPITACIÓN.

Para el cálculo de las curvas intensidad – duración – frecuencia con datos históricos de precipitación se debe seguir el siguiente procedimiento:

- 1) Definir una estación provista de pluviógrafo, representativa de la cuenca hidrográfica de análisis.
- 2) Para cada año de registros históricos, seleccionar los aguaceros de corta duración más intensos.

²⁰República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

- 3)** Se selecciona una duración específica del aguacero. Se comienza usualmente con 10 min de duración. Para cada aguacero se selecciona la máxima precipitación en 10 min.
- 4)** Para cada año, se selecciona la precipitación máxima (en este caso para 10 min de duración), de todos los aguaceros de ese año.
- 5)** Lo anterior da como resultado una muestra de datos de precipitación máxima anual para todos los años analizados (para 10 min de duración en este caso).
- 6)** La muestra de datos se ajusta a una distribución probabilística conocida (Gumbel y Log-Pearson Tipo III, por ejemplo) y se hacen inferencias estadísticas, calculando los valores de precipitación para periodos de retorno, por ejemplo, de 2, 5, 20, 20, 50 y 100 años.
- 7)** Se repite el procedimiento anterior para duraciones totales de la lluvia iguales a 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 y 180 min.
- 8)** Se calculan o trazan curvas de mejor ajuste a los datos resultantes anteriores, obteniéndose curvas de intensidad de precipitación para cada uno de los periodos de retorno mencionados y duraciones entre 10 y 180min. Esta familia de curvas tiene una forma semejante y, usualmente, se pueden ajustar con todos los datos resultantes a una ecuación del tipo:

$$i = \frac{(K \times T^m)}{(t + t_0)^n} \quad \text{Ec. 27}$$

Dónde:

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

T: Periodo de retorno, en años.

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

K, n, m, to: Parámetros de ajuste.

6.1.5.2. CÁLCULO DE CURVAS IDF POR MÉTODO SIMPLIFICADO²¹

La metodología simplificada de cálculo de las curvas intensidad – duración – frecuencia se debe llevar a cabo siempre y cuando no se disponga de datos históricos de precipitación de corta duración (datos pluviográficos).

Para Colombia se propone el método que se presenta en la referencia bibliográfica (2.15) del manual de drenaje para carreteras de Colombia. En este estudio se dedujeron curvas intensidad-duración-frecuencia por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año, la precipitación total media anual y la elevación de la estación.

La mejor correlación obtenida, sin embargo, fue la que se obtuvo con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas en una estación, y es la que se propone para los estudios, además de que es la más sencilla de utilizar.

La expresión resultante está dada por:

$$i = \frac{a \times T^b \times M^c}{\left(\frac{t}{60}\right)^d} \quad \text{Ec. 28}$$

²¹República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Dónde:

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

T: Periodo de retorno, en años.

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

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados como se presenta en la Figura 7, y sus valores se presentan en la Tabla 7.

6.1.6. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN²²

Es el tiempo requerido por una gota para recorrer desde el punto hidráulicamente más lejano hasta la salida de la cuenca. Transcurrido el tiempo de concentración se considera que toda la cuenca contribuye a la salida. Como existe una relación inversa entre la duración de una tormenta y su intensidad (a mayor duración disminuye la intensidad), entonces se asume que la duración crítica es igual al tiempo de concentración t_c . El tiempo de concentración real depende de muchos factores, entre otros de la geometría en planta de la cuenca (una cuenca alargada tendrá un mayor tiempo de concentración), de su pendiente pues una mayor pendiente produce flujos más veloces y en menor tiempo de concentración, el área, las características del suelo, cobertura vegetal, etc.

²²República del Perú, Ministerio de Transporte y comunicaciones, "manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje" Perú, 2008.

En general, el tiempo de concentración se calcula por medio de ecuaciones empíricas, dentro de las cuales se cuentan las siguientes:

✓ **Ecuación de Kirpich²³**

$$T_C = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros por metro (m/m)

✓ **Ecuación de Témez²⁴**

$$T_C = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad \text{Ec. 30}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente total del cauce principal, en porcentaje (%).

²³ ²⁴ República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

✓ **Ecuación de V.T. Chow²⁵**

$$T_C = 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64} \quad \text{Ec. 31}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

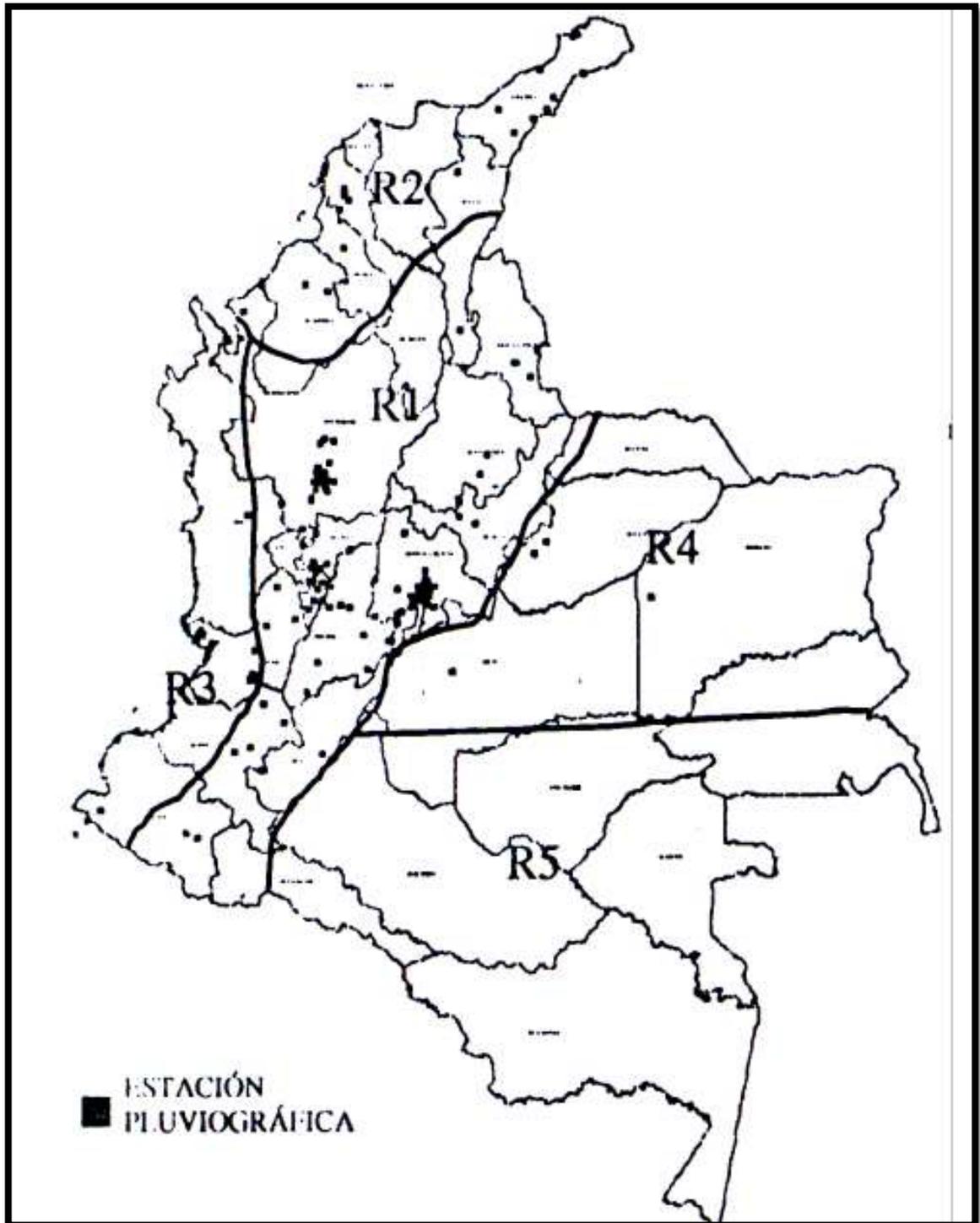
S: Pendiente total del cauce principal, en metros por metro (m/m).

Tabla 7. Valores de los coeficientes a, b, c, y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración y frecuencia, IDF, para Colombia²⁶

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

^{25 26} República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.

Figura 7. Regiones en Colombia para la definición de a, b, c y d²⁷



²⁷ República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009

6.1.7. PERÍODO DE RETORNO²⁸

Período de retorno es uno de los parámetros más significativos a ser tomado en cuenta en el momento de dimensionar una obra hidráulica destinada a soportar avenidas, como por ejemplo: el vertedero de una presa, los diques para control de inundaciones; o una obra que requiera cruzar un río o arroyo con seguridad, como puede ser un puente.

El periodo de retorno se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m-ésimo evento de los n registros.

El valor del periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria ($P_{m\acute{a}x}$ o $Q_{m\acute{a}x}$ en su caso) en una tabla de valores, ordenados de mayor a menor. Con base en las siguientes relaciones:

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad \text{Ec. 32}$$

T = Período de retorno (años).

n = Número de años de registro.

m = Número de orden.

²⁸Monsalve Sáenz, German. Hidrología en la ingeniería, Edición 2.Santafe de Bogotá, alfa omega, año 1999.

El período de retorno para el que se debe dimensionar una obra varía en función de la importancia de la misma (interés económico, socio-económico, estratégico, turístico), de la existencia de otras vías alternativas capaces de remplazarla, y de los daños que implicaría su ruptura: pérdida de vidas humanas, costo y duración de la reconstrucción, costo del no funcionamiento de la obra, etc.

6.1.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS HIDROLÓGICOS²⁹

El objetivo de la estadística es extraer la información esencial de un conjunto de datos, reduciendo un conjunto grande de números a un conjunto pequeño de números. Las estadísticas son números calculados de una muestra los cuales resumen sus características más importantes. Los parámetros estadísticos son características de una población. Tales como μ y σ en la ecuación (indicar número de ecuación).

Un parámetro estadístico es el valor esperado E de alguna función de una variable aleatoria. Un parámetro simple es la media μ , el valor esperado de la variable aleatoria. Para una variable aleatoria X, la media E(X), y se calcula como el producto de la X y la correspondiente densidad de probabilidad $f(x)$, integrado sobre el rango factible de la variable aleatoria:

$$E(X) = \mu = \int_{-\alpha}^{\alpha} xf(x)dx \quad \text{Ec. 33}$$

²⁹República del Perú, Ministerio de Transporte y comunicaciones, "manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje" Perú, 2008.

$E(X)$ es el primer momento alrededor del origen de la variable aleatoria, una medida del punto medio o “tendencia central” de la distribución.

- **LA MEDIA**

La estimación por la muestra de la media es el promedio \bar{x} de la información de la muestra:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{Ec. 34}$$

- **LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR O DESVIACIÓN TÍPICA**

Es la raíz cuadrada de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Ec. 35}$$

- **COEFICIENTE DE VARIACIÓN**

Es una medida que se emplea fundamentalmente para:

- 1) Comparar la variabilidad entre dos grupos de datos referidos a distintos sistemas de unidades de medida.
- 2) Comparar la variabilidad entre dos grupos de datos obtenidos por dos o más personas distintas.

- 3) Comparar dos grupos de datos que tienen distinta media.
- 4) Determinar si cierta media es consistente con distinta varianza.

El Coeficiente de Variación muestral se denota y se define como:

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \quad \text{Ec. 36}$$

6.1.8.1. PRUEBAS DE DATOS DUDOSOS³⁰

El método del Water Resources Council recomienda la realización de ajustes de datos dudosos. Los datos dudosos (outliers) son puntos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente en muestras pequeñas.

Los procedimientos para tratar los datos dudosos requieren un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas. De acuerdo con el Water Resources Council (1981), si la asimetría de estación es mayor que +0.4, se consideran primero las pruebas para detectar datos dudosos altos; si la asimetría de estación es menor que -0.4, primero se consideran pruebas para detectar datos dudosos bajos.

³⁰Ven Te Chow; Maidment, David R., y Mays, Larry W. "Hidrología aplicada". Editorial McGraw Hill, 1994.

Cuando la asimetría de la estación está entre 0.4, deben aplicarse pruebas para detectar datos dudosos altos y bajos antes de eliminar cualquier dato dudoso del conjunto de datos.

La siguiente ecuación de frecuencia puede utilizarse para detectar datos dudosos:

$$Y_H = \bar{Y} + K_n S_y \quad \text{Ec. 37}$$

Donde Y_H es el umbral de dato dudoso alto en unidades logarítmicas y K_n es tal como se da en la tabla. Para un tamaño de muestra n . Los valores de K_n dados en la tabla. Se usan en pruebas de un lado para detectar datos dudosos en el nivel 10% de significancia en información normalmente distribuida. Si los logaritmos de los valores en una muestra son mayores que Y_H , en la anterior ecuación, entonces se consideran como datos dudosos altos. Picos de creciente considerados como datos dudosos altos deben compararse con la información histórica y de crecientes en sitios cercanos. La información histórica de crecientes contiene información de eventos inusualmente extremos, fuera del registro sistemático. De acuerdo con el Water Resources Council (1981), si existe información disponible que indica que un dato dudoso alto es el máximo sobre un periodo extendido, el dato dudoso es tratado como información histórica de crecientes y es excluido del análisis. Si no hay disponibilidad de información histórica útil para comparar con los datos dudosos altos, entonces éstos deben ser retenidos como parte del registro sistemático.

Una ecuación similar puede utilizarse para detectar los datos dudosos bajos:

$$Y_L = \bar{Y} - K_n S_y \quad \text{Ec. 38}$$

Donde Y_L . Es el umbral de datos dudosos bajos en unidades logarítmicas. Los picos de crecientes considerados como datos dudosos bajos se eliminan del registro y puede aplicarse un ajuste de probabilidad condicional descrito por el Water Resources Council (1981).

Tabla 8. Valores de K_n para la prueba de datos dudosos³¹

Tamaño de muestra n	K_n						
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

³¹Ven Te Chow; Maidment, David R., y Mays, Larry W. "Hidrología aplicada". Editorial McGraw Hill, 1994.

6.1.9. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

6.1.9.1. SOFTWARE EPA SWMM³²

El software nombrado Modelo de Gestión de Aguas Pluviales SWMM por sus siglas en inglés (Storm Water Management Model) desarrollado por la EPA, es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones y sistemas de alcantarillado de cualquier tipo, ya que puede ser utilizado para un único acontecimiento, o bien, para realizar una simulación continua durante un periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos. El módulo de escorrentía o hidrológico de EPA SWMM funciona con una serie de cuencas en las cuales se genera el escurrimiento. EPA SWMM analiza el recorrido del agua a través de un sistema compuesto por conductos, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Así mismo, EPA SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad del agua en cada conducto y canal, durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.

Éste software es publicado por la EPA con el propósito de complementar la modelación de sistemas de alcantarillado. EPA SWMM es bastante similar en

³²Manual básico de EPA SWMM

cuanto a la interfaz y funcionamiento al software de abastecimiento de agua potable de la EPA EPANET.

➤ **UTILIDADES DEL SOFTWARE EPA SWMM**

Desde su aparición, EPA SWMM se ha utilizado en miles de redes de evacuación de aguas tanto residuales como pluviales. Entre las aplicaciones típicas se pueden mencionar:

- Diseño y dimensionamiento de componentes de la red de drenaje para prevenir inundaciones.
- Dimensionamiento de estructuras de retención y accesorios correspondientes para el control de inundaciones y protección de la calidad de las aguas.
- Diseño de estrategias de control de la red para minimizar el número de descargas de sistemas unitarios.
- Evaluación del impacto de aportes e infiltraciones en las descargas de sistemas de evacuación de aguas residuales.

• **DIBUJO DE OBJETOS**

El software EPA SWMM es un programa de interacción, es decir que el usuario debe dibujar la red del sistema de alcantarillado a diseñar, o bien, la red ya diseñada y que será revisada.

Para llevar a cabo el dibujo se necesitan planos de la población ya establecida o una imagen satelital. Una de las opciones que ofrece el programa es insertar imágenes, para que sobre ésta se dibuje la red del sistema de alcantarillado, siempre y cuando sean considerados los factores de escala.

Existe una gran variedad de objetos a dibujar en el plano del software, por ejemplo: conexión, vertido, conductos, cuencas, orificios, bombas, entre otros; cada tipo de objeto desempeña funciones diferentes y específicas.

La interfaz del software se muestra en la figura 8 en la cual destacan los siguientes elementos:

- **BARRA DE OPCIONES ESTÁNDAR.**

Ésta barra permite el acceso a diferentes opciones con respecto al archivo del software, así como de la red de conductos dibujada sobre el plano. Cuenta con 15 botones. La función de cada botón se explica a continuación:

1. **Nuevo.** Permite al usuario crear un plano en blanco y sustituir al que está en pantalla.
2. **Abrir.** Permite el acceso a un plano guardado previamente desde la dirección que se indique.
3. **Guardar.** Ofrece la opción de almacenar el plano que está en uso en la dirección que se indique (el archivo queda guardado con la extensión *.INP).

4. **Imprimir.** El plano en uso es enviado a la impresora predeterminada del equipo en uso, para obtener una copia impresa en papel de dicho plano.
5. **Copiar.** Éste botón ofrece varias opciones, como obtener una copia del plano que está en uso como una imagen en plano de bits, o bien, como meta-archivo.
6. **Buscar.** Ofrece la opción de encontrar y seleccionar cualquier objeto dibujado sobre el plano que deseé.
7. **Calcular.** Éste botón realiza la simulación del sistema de alcantarillado con los datos cargados en cada objeto dibujado sobre el plano, de ésta forma se obtiene el comportamiento que presentará cada elemento que compone el sistema a lo largo del periodo de simulación.
8. **Consulta.** Ofrece la opción de señalar los objetos que cumplan ciertas características definidas por el usuario.
9. **Perfil longitudinal.** Ofrece la opción de realizar una representación gráfica del perfil de uno o todos los conductos entre los nudos seleccionados por el usuario, siempre y cuando los nudos seleccionados estén conectados.
10. **Gráfico evolución.** Ofrece al usuario la opción de observar una gráfica de resultados de la simulación con las características y objetos deseados.
11. **Gráfico de dispersión.** Ofrece al usuario la opción de observar una gráfica de resultados de la simulación con las características y objetos deseados definiendo las variables en las direcciones X y Y.
12. **Tabla.** Ofrece la opción de generar una tabla resumen con los objetos y datos seleccionados a lo largo de la simulación.

13. **Estadísticas.** Ofrece la opción de observar en un plano cartesiano el comportamiento de cualquier elemento en forma de una serie de puntos unidos por una línea.

14. **Opciones.** Permite configurar las características del plano en uso, por ejemplo: objetos dibujados, etiquetas, grosor de línea, color de nudos, color de fondo, etc.

15. **Ventanas en cascada.** Permite observar varios planos dentro de una misma ventana y de ésta manera seleccionar el plano que se deseé.

- **BARRA DE OPCIONES DEL PLANO.**

Ésta barra ofrece cambiar algunas características de la red de conductos dibujada sobre el plano, cuenta con 8 botones, los cuales son descritos a continuación:

1. **Seleccionar objeto.** Permite mover, editar, o bien seleccionar cualquier objeto dentro del plano.

2. **Seleccionar vértice.** Permite editar la ubicación de los vértices de una subcuenca para modificar la forma de ésta.

3. **Seleccionar región.** Ofrece la opción de generar una región dentro del plano, para seleccionar, o buscar objetos que estén dentro de dicha región.

4. **Desplazar.** Permite al usuario moverse a lo largo y ancho del plano.

5. **Acercar.** Ofrece la opción observar de mejor manera la imagen del plano para observar detalles pequeños.

6. **Alejar.** Ofrece la opción de regresar a la vista anterior una vez que se oprimió el botón de acercar.

7. **Extensión.** Ofrece la opción de regresar a la vista completa del área del plano en uso.

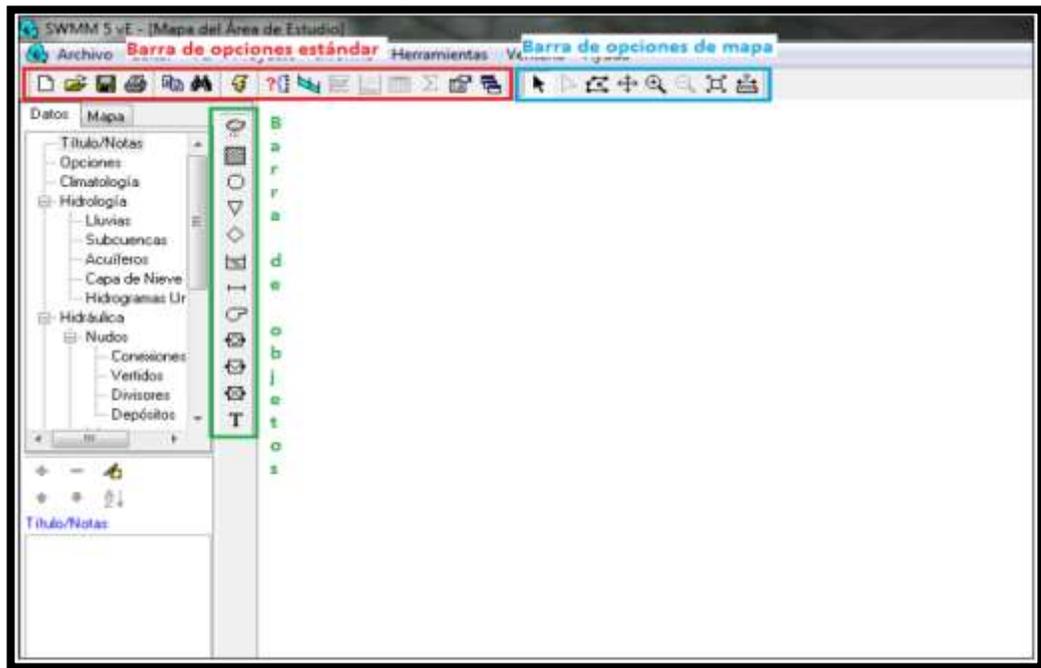
8. **Medir distancia.** Ofrece la opción de calcular la distancia entre dos objetos sin importar la dirección en la que se seleccione, esto quiere decir que se puede obtener la longitud total de una red de conductos.

- **BARRA DE OBJETOS.**

Ésta barra ofrece al usuario la opción de dibujar libremente los objetos deseados, siempre y cuando se haya seleccionado previamente el botón del objeto a dibujar.

Cuenta con 12 botones.

Figura 8. Interfaz del Epa swmm



A continuación se explican algunos detalles del dibujo de los objetos en el software, así como las diferentes características de cada objeto.

- **CUENCA**

a) Seleccionar mediante el cursor la opción  “subcuenca” de la Barra de Objeto. Nótese como al seleccionar la opción de subcuenca, el cursor adquiere el aspecto de un lápiz.

b) Mover el cursor al punto del plano donde se desea insertar una de las esquinas de la cuenca C-I y pulsar el botón secundario del ratón.

c) Realizar el mismo procedimiento para cada una de las esquinas de la cuenca y finalmente pulse el botón derecho del ratón (o pulse la tecla Enter) para cerrar el polígono.

d) Para modificar el aspecto de la cuenca (cambiar de forma a rectangular, cuadrada, trapezoidal, etc.) seleccionar el centroide de la cuenca, seleccionar la opción  “seleccionar vértice” entonces la cuenca accionará a cada vértice un punto, el cual puede ser modificado de posición libremente.

- **NUDOS O CONEXIONES**

En éste software existen diferentes maneras de dibujar conexiones entre conductos, las más importantes son las conexiones y los puntos de vertido. A continuación se explica el procedimiento para dibujar cada uno de estos nudos.

- **Conexiones**

1. Para añadir un nudo de este tipo, seleccione  “conexión” utilizando el cursor, el botón se encuentra en la barra de objeto.
2. Mover el cursor a la posición donde desee insertar el nudo o conexión, y pulsar el botón secundario del ratón.

- **Vertido**

Para añadir una descarga o punto de vertido, seleccione el botón  “vertido” en la barra de objeto, desplace el cursor al punto de localización del vertido en el plano y pulsar el botón secundario del ratón. Nótese que el nudo de vertido recibe de forma automática el nombre D-I.

- **Conducciones**

Para añadir conductos dentro del plano, será necesario dibujar previamente los nudos de inicio y final, ya que sin éstos no es posible dibujar algún conducto. El procedimiento para dibujar cualquier conducto se describe a continuación.

1. Seleccionar el botón  “conducto” en la barra de objetos. Nótese que el cursor cambia de aspecto representando una cruz.
2. Seleccione el botón secundario del ratón sobre el nudo inicial, nótese que el cursor adquiere el aspecto de un lápiz.

3. Mover el cursor en la dirección correspondiente hasta el nudo final y seleccionarlo, nótese que mientras se desplaza el cursor se dibuja una línea que representa la conducción que se está dibujando.

Las conducciones dibujadas sobre el plano pueden adquirir cualquier dirección, ya que si la conducción tiene dirección recta basta con realizar un trazo entre los puntos inicial y final; mientras que si la conducción presenta cambios de dirección sin ningún tipo de conexión, basta con marcar los cambios de dirección mientras se traza la conducción, hasta llegar al nudo final.

- **CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS**

EPA SWMM ofrece al usuario gran variedad de objetos a utilizar dentro del plano, cada uno de estos elementos cuentan con diferentes características, por ejemplo: parámetros de lluvia, volumen de agua, cotas, entre otros. A continuación se describen las diferentes funciones, características y parámetros de los principales objetos con los que cuenta el software.

- **PLUVIÓMETRO**

Este tipo de objeto realiza la función de asignar datos de precipitación a una o varias cuencas, esto con el motivo de simular la lluvia que cae sobre la cuenca, así como las características de la precipitación como duración e intensidad. En la figura 9 se muestra la ventana correspondiente a las características del pluviómetro, así mismo en la tabla 9, se explica de forma general cada parámetro.

Figura 9. Características del pluviómetro

Propiedad	Valor
Nombre	1
Coordenada X	
Coordenada Y	
Descripción	
Marca	
Formato de lluvia	INTENSITY
Intervalo de lluvia	1:00
Factor de corrección de nevadas	1.0
Origen de datos	TIMESERIES
SERIE TEMPORAL:	
- Nombre de la Serie	*
ARCHIVO:	
- Nombre del Fichero	*
- ID Estación	*
- Unidades de lluvia	MM
Nombre asignado por el usuario al pluviómetro	

Tabla 9. Parametros del pluviometro

Nombre	Nombre del pluviómetro
Coordenada x	Ubicación horizontal en el plano
Coordenada y	Ubicación vertical en el plano
Descripción	Descripción adicional
Marca	Etiqueta opcional para clasificar
Formato de lluvia	Formato de lluvia de los datos proporcionados: INTENSITY (hietograma): cada valor de precipitación es la intensidad media de la lluvia (en mm/h) a lo largo del intervalo registrado. VOLUMEN (pluviograma): cada valor de precipitación es el volumen de lluvia que se registro durante un cierto intervalo (en mm) CUMULATIVE (pluviograma acumulado): cada valor de precipitación representa la precipitación acumulada desde el inicio de la lluvia (en mm)
Intervalo de lluvia	Intervalo de tiempo que transcurrió entre lecturas del pluviómetro en formato decimal o como hh:mm
Factor de nieve	Factor que corrige las lecturas debidas a nieve en el pluviómetro
Origen de datos	Fuente de datos de la lluvia: TIME SERIES : serie temporal suministrada por el usuario. FILE : archivo externo de datos.
SERIE TEMPORAL	
Nombre de la serie	Nombre de la serie temporal con los datos de lluvia si el origen de los datos es una serie temporal. (dejar en blanco si no es el caso)
ARCHIVO	
Nombre del archivo	Nombre del archivo que contiene los datos de lluvia
No. Estación	Identificados de la estación donde está el pluviómetro cuyos datos se van a utilizar
Unidades de lluvia	Unidades en que están expresados los datos de la lluvia del archivo (mm o in)

- **SERIE TEMPORAL**

Para que un pluviómetro trabaje correctamente será necesario agregar una serie temporal, o bien, un archivo externo que contenga los datos de lluvia, en la figura 10 se muestra la ventana correspondiente a las características de la serie temporal. El procedimiento para generar una serie temporal se explica a continuación:

- a) En el menú de datos seleccionar serie temporal.
- b) Llenar la siguiente tabla con los datos que requiere el software (figura 10).
- c) Nombre. Nombre asignado a la serie temporal.
- d) Descripción. Comentario o descripción opcional sobre lo que representa la serie.
- e) Columna Fecha. Introducir la fecha en formato mes/día/año, correspondiente al intervalo de la precipitación.
- f) Columna Hora. Introduzca la hora en formato militar horas: minutos.
- g) Valores. Los valores numéricos de precipitación correspondientes a la precipitación.

Figura 10. Características del pluviómetro

Editor de Series Temporales

Nombre de la Serie Temporal:
[]

Descripción:
[]

Usar archivo externo (especifique el nombre abajo)
[]

Introducir datos de la serie temporal en la tabla inferior
Sin fecha implica tiempos desde el comienzo de la simulación

Fecha (M/D/Y)	Hora (H:M)	Valor

Ver

Aceptar

Cancelar

Ayuda

- **CUENCAS**

Son objetos dibujados por el usuario, en la cantidad y forma correspondiente al proyecto, la función que realizan dentro del plano, es simular las superficies terrestres sobre las que existe escurrimiento debido a precipitaciones. En la figura 11 se muestra la ventana correspondiente a las características de la cuenca, así mismo en la tabla 10, se explica de forma general cada parámetro.

Figura 11. Características de la cuenca

Propiedad	Valor
Nombre	1
Coordenada X	
Coordenada Y	
Descripción	
Marca	
Pluviómetro	-
Descarga	-
Área	5
Ancho	500
Pendiente (%)	0.5
Área impermeable (%)	25
Coef. n (Impermeable)	0.02
Coef. n (Permeable)	0.1
Alm. Dep. (Impermeable)	0.05
Alm. Dep. (Permeable)	0.05
(%) Área Imperm. sin Alm. Dep.	25
Flujo entre subáreas	OUTLET
(%) escorrentía transportada	100
Infiltración	HORTON
Aguas Subterráneas	NO
Capa de nieve	
Uso del suelo	0
Acumulación inicial	NONE
Longitud Cauce	0
Nombre asignado por el usuario a la cuenca	

Tabla 10. Parametros la cuenca

Nombre	Nombre asignado por el usuario a la cuenca
Coordenada X	Ubicación horizontal del centroide del área de la cuenca en el Mapa. Si se deja en blanco la subcuenca no aparecerá en el mapa.
Coordenada Y	Ubicación vertical del centroide del área de la cuenca en el Mapa. Si se deja en blanco la subcuenca no aparecerá en el mapa.
Descripción	Descripción opcional de la cuenca.
Etiqueta	Etiqueta opcional utilizada para clasificar la cuenca.
Pluviómetro	Nombre del pluviómetro asociado a la cuenca.
Descarga	Nombre del rudo o subcuenca que recibirá la escorrentía de la cuenca actual.
Área	Área de la cuenca (hectáreas o acres)
Ancho	Anchura característica del flujo debido a la escorrentía superficial (m o ft). (°)
Pendiente (%)	Pendiente media de la cuenca, en %
Área impermeable(%)	Porcentaje de cuenca cuyo suelo es impermeable
Coef. n – Suelo impermeable	Coef. n de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable de la cuenca (ver A.6 para valores típicos)
Coef. n – Suelo permeable	Coef. n de Manning para el flujo superficial sobre el área permeable de la cuenca (ver A.6 para valores típicos)

Continuación Tabla 10. Parametros la cuenca

% Alm. Dep. 0	Porcentaje de suelo impermeable que no presenta almacenamiento en depresión.
Flujo entre subáreas	Selección del sentido del flujo interno entre las áreas impermeable y permeable de la cuenca: IMPERV. Flujo desde permeable hacia impermeable. PERV. Flujo desde impermeable hacia permeable. OUTLET. Ambas áreas aportan directamente a la descarga
% Flujo	Porcentaje de escorrentía entre las distintas áreas.
Infiltración	Pulse <input type="checkbox"/> o [Enter] para editar los parámetros de infiltración de la cuenca
Aguas subterráneas	Pulse <input type="checkbox"/> o [Enter] para editar los parámetros de flujo subterráneo de la cuenca
Nieve	Nombre del conjunto de parámetros de nieve asignados a la cuenca (si existen)
Acumulación inicial	Pulse <input type="checkbox"/> o [Enter] para especificar cantidades iniciales de acumulación de comntaminantes sobre la cuenca
Usos del suelo	Pulse <input type="checkbox"/> o [Enter] para asignar usos del suelo a la cuenca
Long. Cauce	Longitud total de cunetas o cauces en la cuenca (en m o ft). Se utiliza cuando la acumulación de contaminantes se define por unidad de longitud del cauce.

- **CONEXIONES**

Son objetos que el usuario dibuja sobre el plano al inicio y final de cada conducto, desempeñan la función de simular pozos de visita, por lo que los datos necesarios por el software deberán ser correspondientes con el proyecto. En la figura 12 se muestra la ventana correspondiente a las características de la conexión, así mismo en la tabla 11, se ofrece de forma general, la descripción de cada parámetro.

Figura 12. Características de conexiones

Propiedad	Valor
Nombre	3
Coordenada X	
Coordenada Y	
Descripción	
Marca	
Aportes	NO
Tratamiento	NO
Cota del fondo	0
Profundidad Máxima	0
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Nombre asignado por el usuario a la conexión

Tabla 11. Parametros de conexiones

Nombre	Nombre del pozo
Coordenada x	Ubicación horizontal en el plano
Coordenada y	Ubicación vertical en el plano
Descripción	Descripción adicional
Marca	Etiqueta opcional para clasificar
Aportes	Opciones de edición de los parámetros de aportes (véase el subíndice i)
Tratamiento	Opciones de edición de los parámetros de tratamiento de contaminantes en la conexión
Cota de fondo	Cota del fondo del pozo
Profundidad máxima	Tirante máximo de agua dentro del pozo
Nivel inicial	Tirante del agua al inicio de la simulación
Altura de sobrepresión	Altura adicional de agua por encima del máximo antes de que aparezca la inundación (en m). Se utiliza para simular pozos con tapa soldada o cubierta
Área de inundación	Área ocupada por el agua acumulada sobre la conexión en caso de inundación (en m2)

- **CONTROLES LID**

Son las prácticas de desarrollo de bajo impacto diseñado para captar la escorrentía superficial y proporcionar una combinación de la detención, la infiltración y evapotranspiración. Ellos son considerados como propiedades de una subcuenca dada, similar a cómo se trata a los acuíferos y de Pack de nieve. SWMM puede modelar explícitamente cinco tipos diferentes de controles LID genéricos:

- **Las celdas de Bio-retención:** son depresiones que contienen vegetación crecida en una mezcla de tierra diseñados colocado encima de una cama de grava de drenaje. Proporcionan almacenamiento, infiltración y evaporación de precipitaciones directas y escurrimiento capturado de las zonas circundantes. Los jardines de lluvia, jardineras de la calle, y los techos verdes son todas las variaciones de celdas de bio-retención.

Figura 13. Parámetros de superficie para celdas de bio-retención

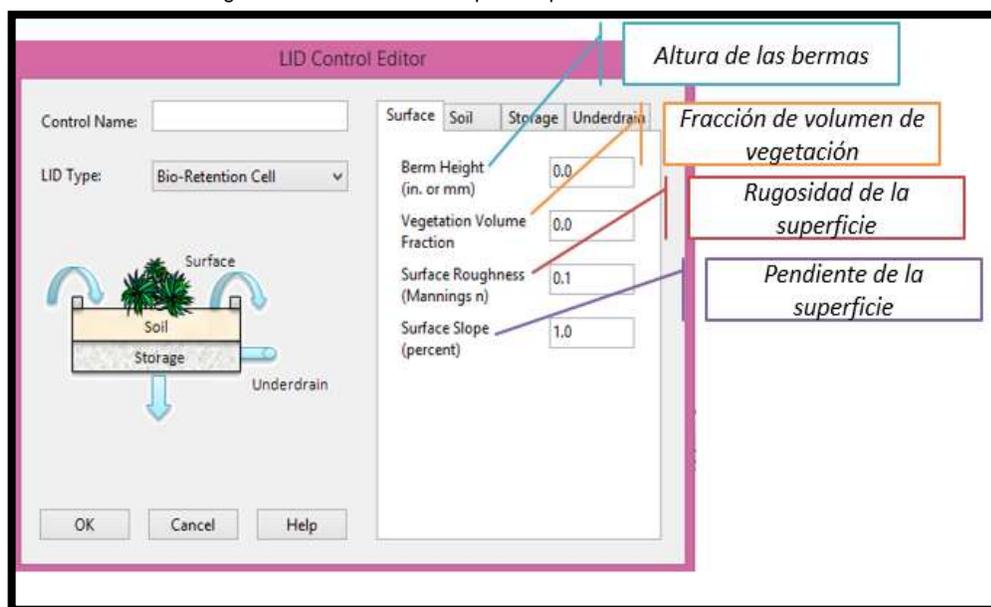


Figura 14. Parámetros del suelo para celdas de bio-retención

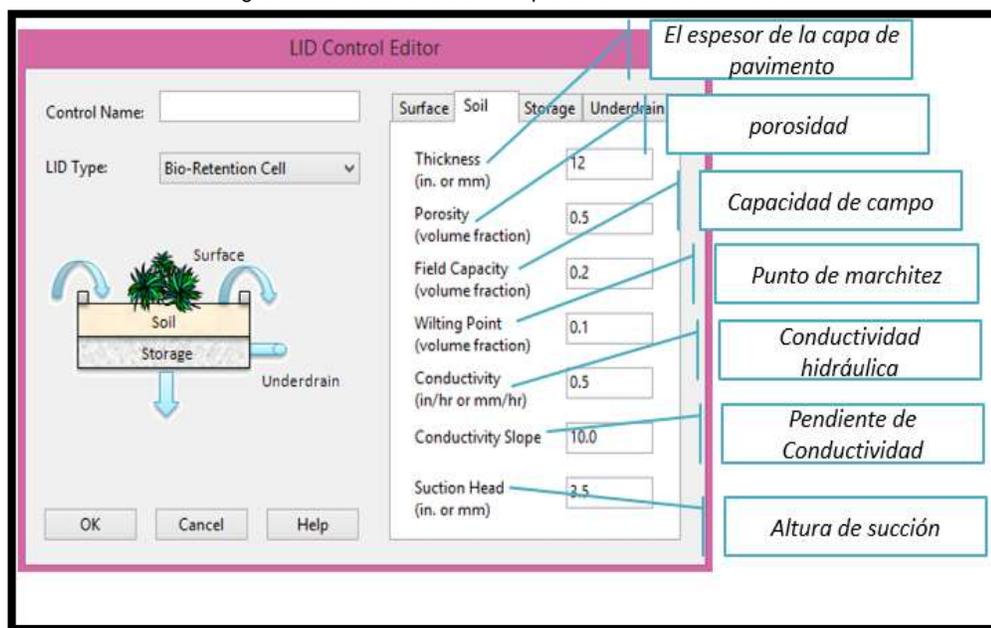


Figura 15. Parámetros de almacenamiento para celdas de bio-retención

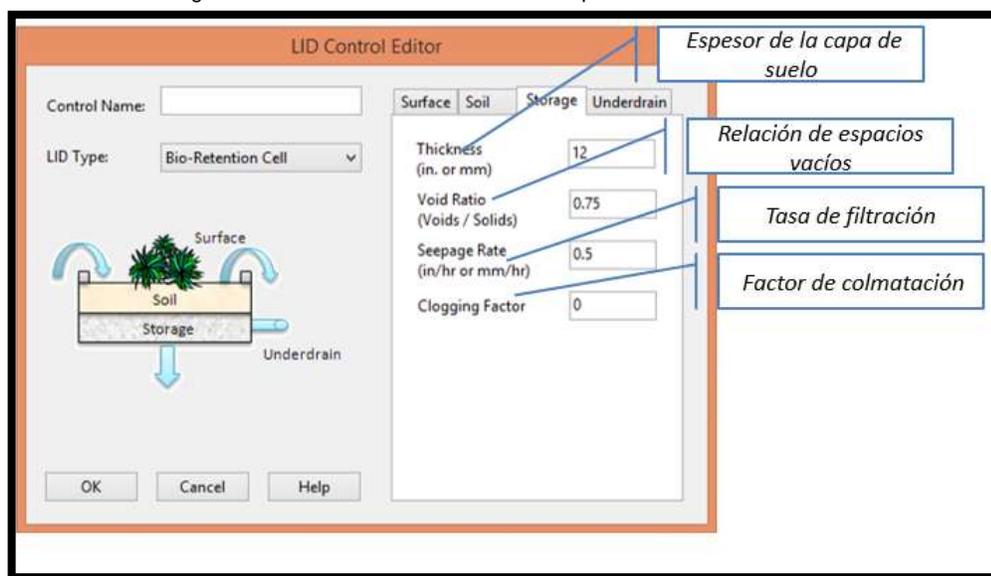
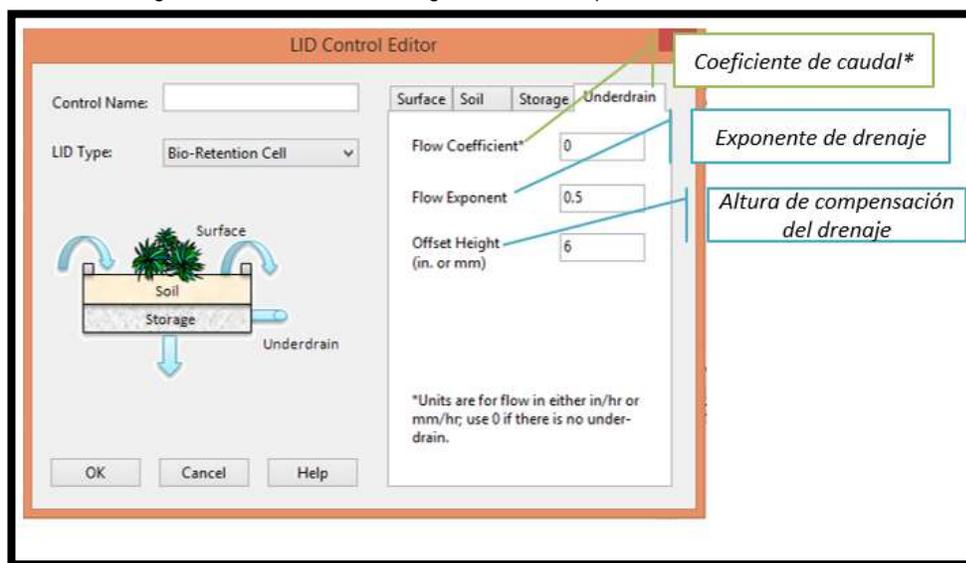


Figura 16. Parámetros de desagüe subterráneo para celdas de bio-retención



- **Las zanjas de infiltración:** son zanjas estrechas llenas de grava que interceptan la escorrentía de áreas impermeables de ladera. Proporcionan volumen de almacenamiento y el tiempo adicional para la escorrentía capturada para infiltrarse en el suelo nativo.

Figura 17. Parámetros de superficie para zanjas de infiltración

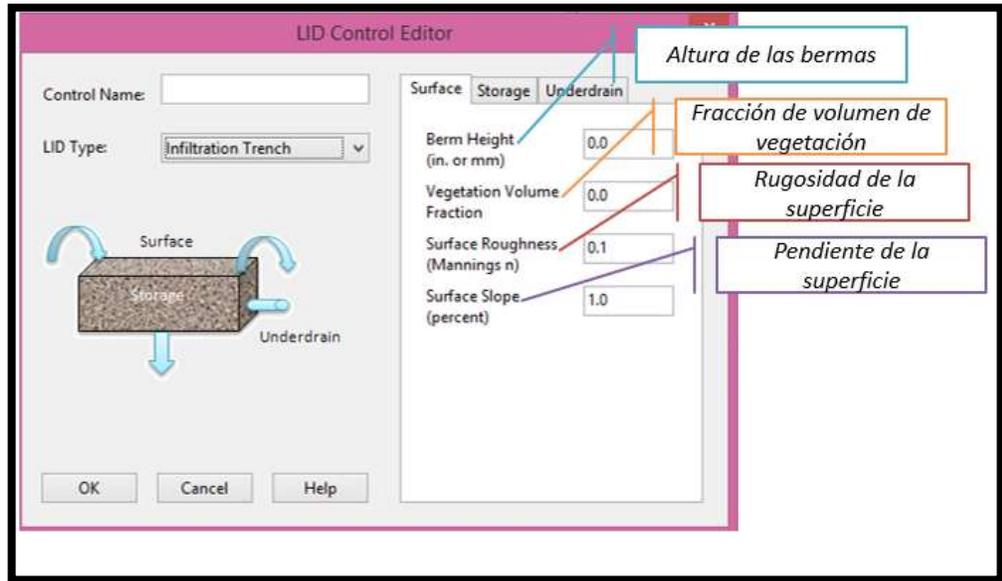


Figura 18. Parámetros de almacenamiento para zanjas de infiltración

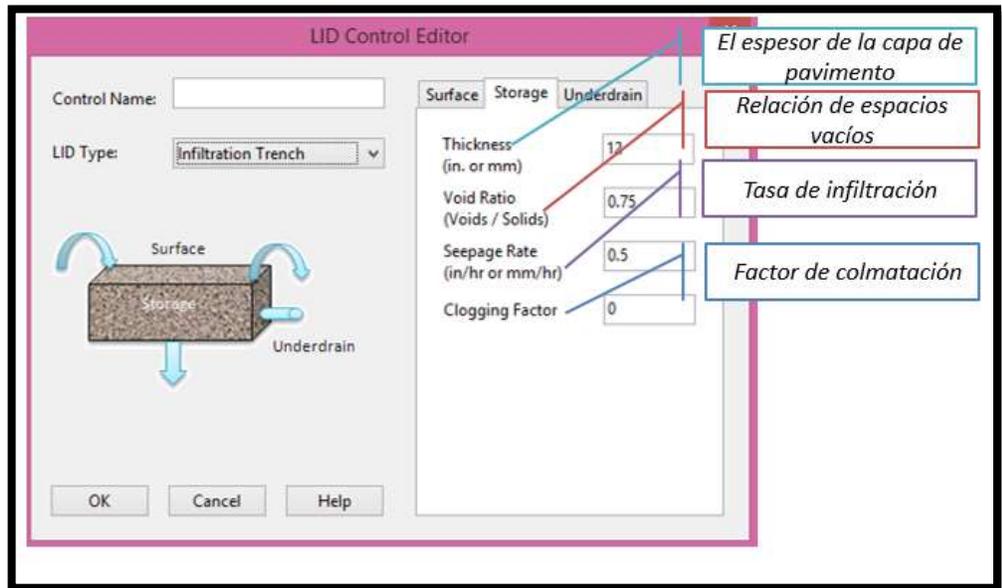
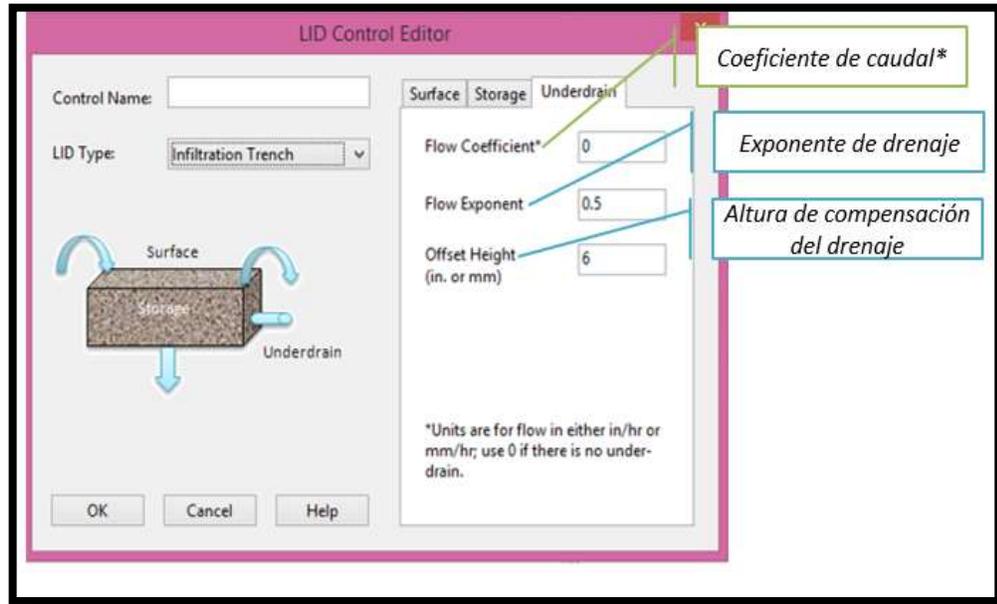


Figura 19. Parámetros de desagüe subterráneo para zanjas de infiltración



- **Sistemas continuos de pavimentos porosos:** son áreas llenas de grava excavados y pavimentadas de nuevo con una porosa mezcla de hormigón o asfalto. Normalmente toda la lluvia pasará inmediatamente a través de la acera en la capa de almacenamiento de grava debajo de ella donde se puede infiltrar en tasas naturales en suelo nativo del sitio. Sistemas bloques de pavimento consisten en bloques de adoquines impermeables colocadas en una arena o guisante lecho de grava con una capa de almacenamiento de grava. Las precipitaciones se capturan en los espacios abiertos entre los bloques y se transporta a la zona de almacenamiento y tierra natural de abajo.

Figura 20. Parámetros de superficie para pavimentos porosos

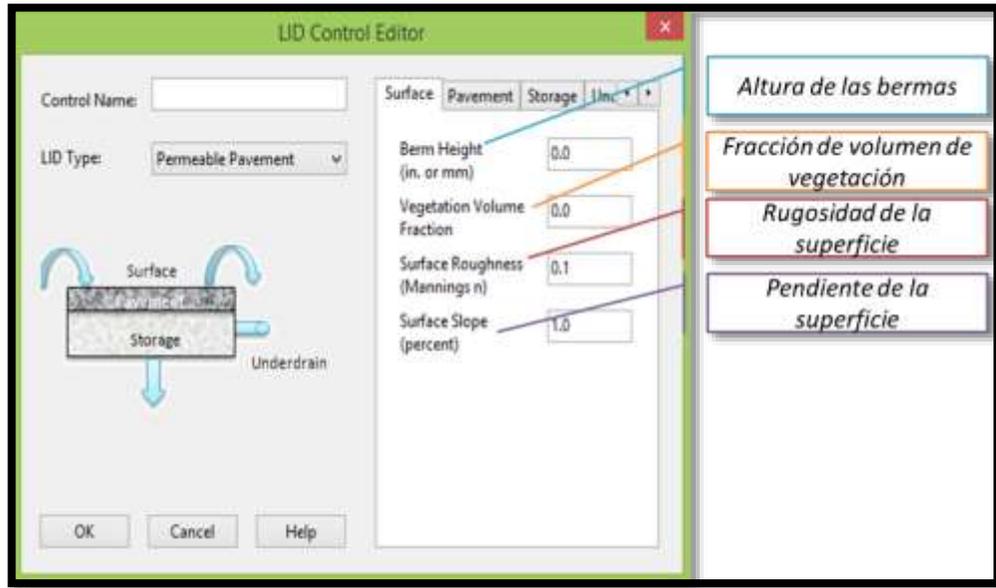


Figura 21. Parámetros del pavimento para pavimentos porosos

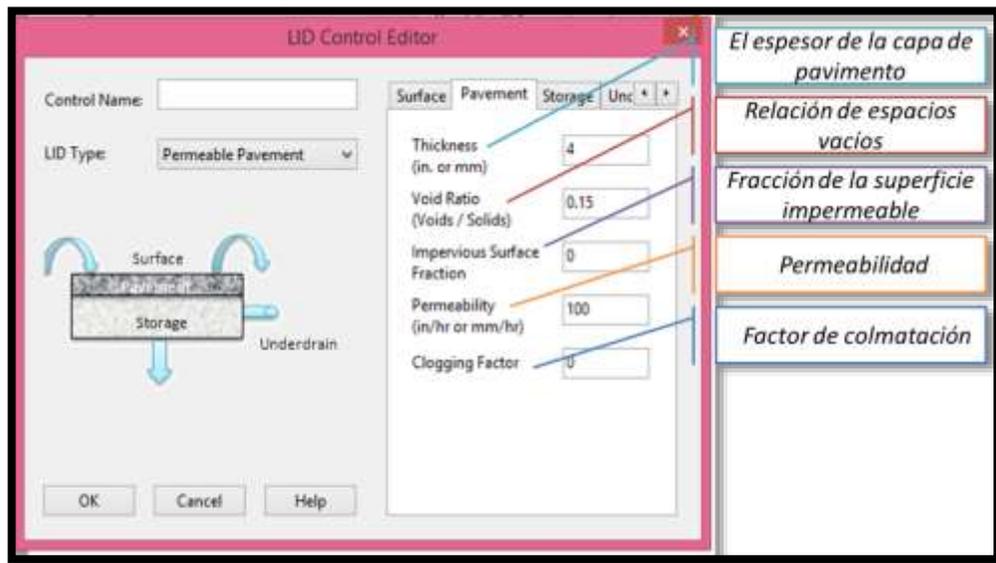


Figura 22. Parámetros de almacenamiento para pavimentos porosos

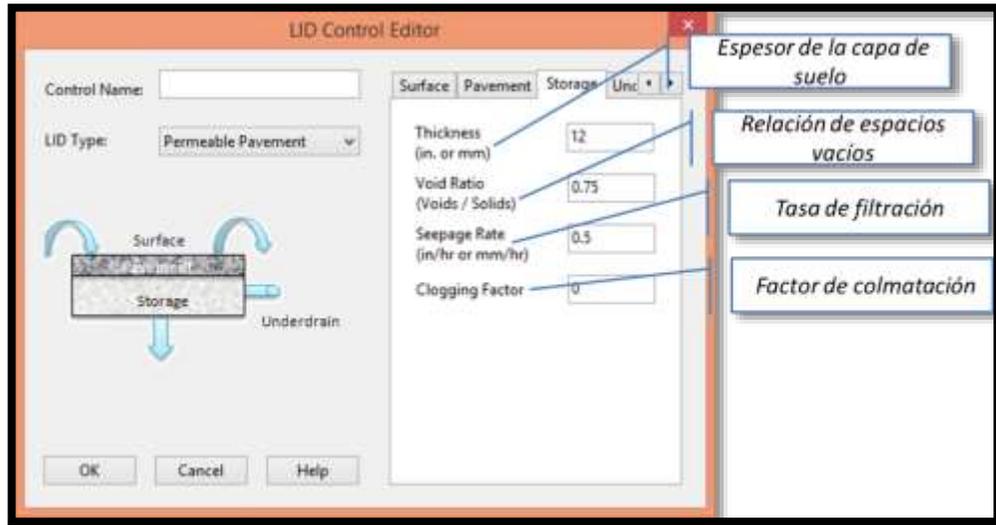
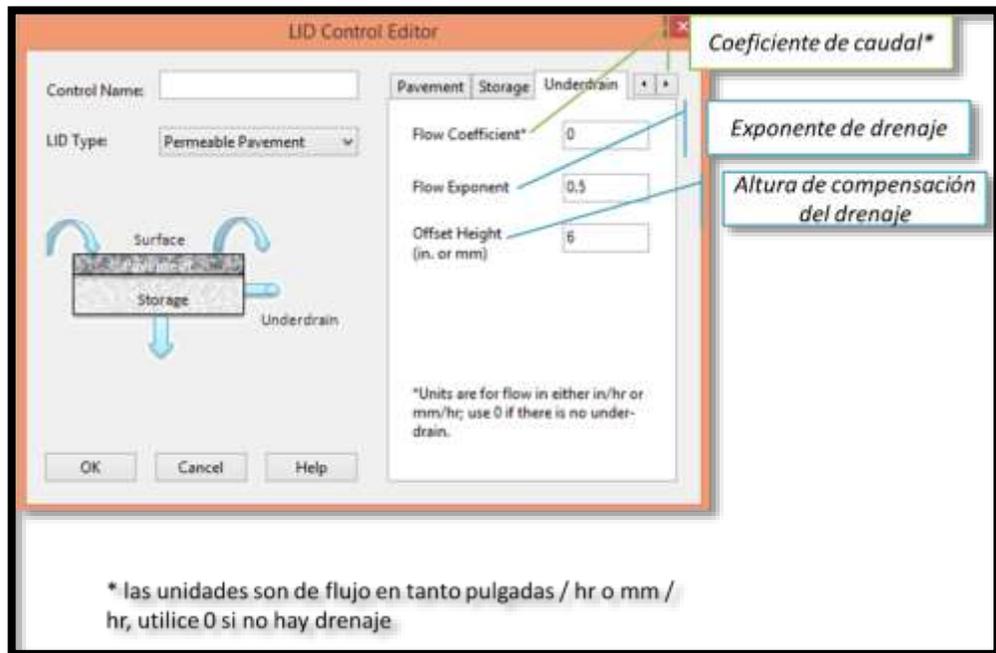


Figura 23. Parámetros de desagüe subterráneo para zanjas de infiltración



- **Barriles de lluvia (o cisternas):** son contenedores que recogen la escorrentía del techo durante las tormentas y puede o bien lanzar o volver a utilizar el agua de lluvia durante los períodos secos.

Figura 24. Parámetros de almacenamiento para barriles o cisternas

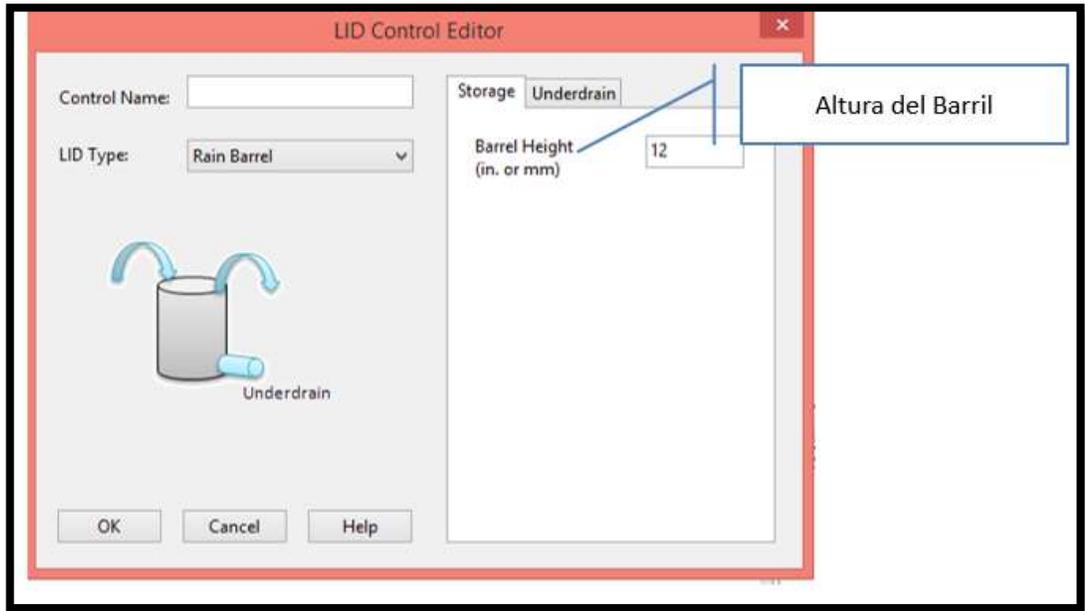
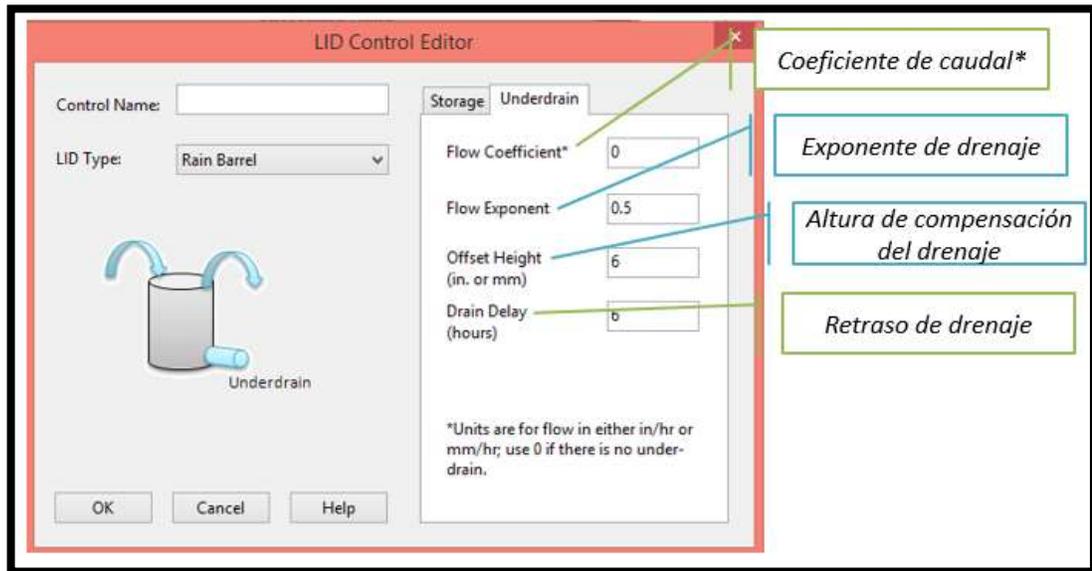
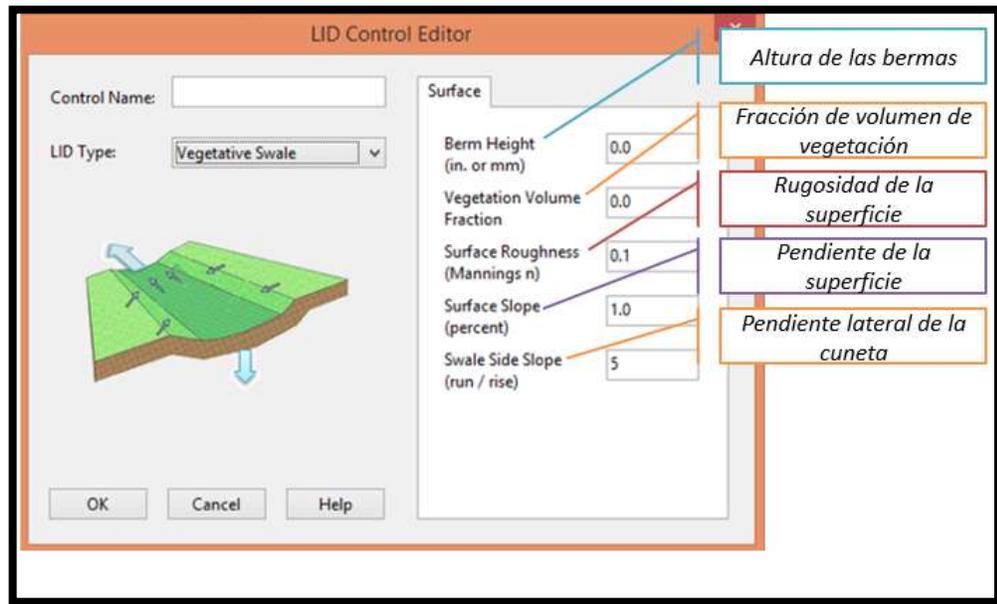


Figura 25. Parámetros de desagüe subterráneo para zanjas de infiltración



- **Cunetas Verdes:** son canales o zonas deprimidas con lados inclinados cubiertos de hierba y otra vegetación. Se retrasa el transporte de la escorrentía recogida y permiten más tiempo para infiltrarse en el suelo nativo debajo de ella.

Figura 26. Parámetros de almacenamiento para barriles o cisternas



6.1.9.2. SOFTWARE HEC RAS³³

- **DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA**

El HEC-RAS es un software desarrollado por el Hidrologic Engineering Center, U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, permite el cálculo en régimen permanente de la superficie libre del agua en cauces naturales y canales, tanto en régimen subcrítico como supercrítico. Es utilizable en el cálculo de tramos con un solo remanso así como con varios remansos dentro del mismo cálculo.

El programa permite modelizar tanto secciones transversales de cauces naturales como la curvatura en la definición en planta, definiendo distancia entre secciones

³³Martínez M. Eduardo, "Hidráulica Fluvial" principios y prácticas. 1era edición, editorial BELLISCO. ANEJO D, año 2001

en el centro y en ambos laterales. Así mismo permite la modelización de estructuras hidráulicas como puentes, diques, etc.

Los resultados calculados incluyen además de la definición de la superficie libre, las velocidades y energías en cada una de las secciones, así como otros datos de interés como pendiente de energía, etc.

La metodología utilizada es similar a la del anterior HEC-2 WATER SURFACE PROFILES también desarrollado por el HEC (Hidrologic Engineering Center), existiendo un módulo de aceptación de los datos desde el formato HEC-2.

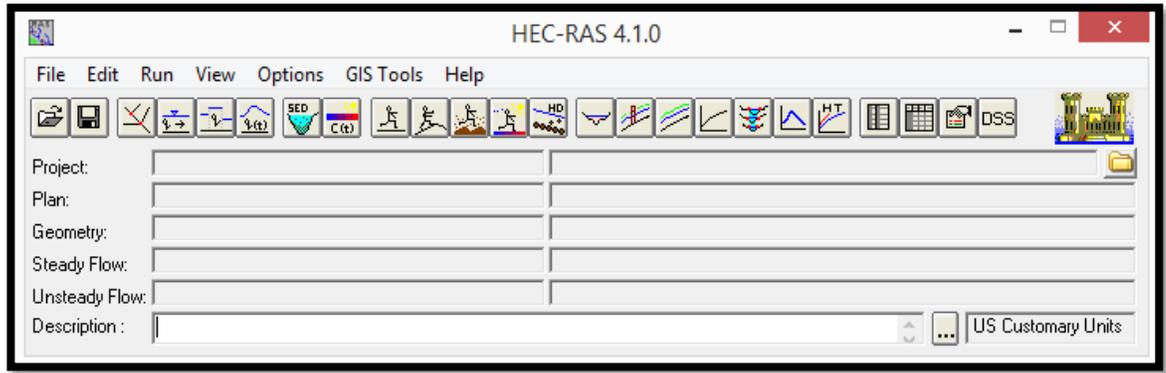
- **ENTRADA DE DATOS**

Los datos necesarios se pueden introducir bien directamente a través de pantallas interactivas o bien desde un fichero de HEC-2 o con cualquiera de las utilidades de Windows.

El comienzo del trabajo se realiza desde una pantalla inicial interactiva, figura 27, presentando las habituales opciones de Fichero, Edición, Simulación, Visualización, Opciones, Ayuda.

Todas las actividades realizadas con el programa, son interactivas actualizando de manera simultánea los distintos ficheros.

Figura 27. Pantalla principal del programa HEC-RAS

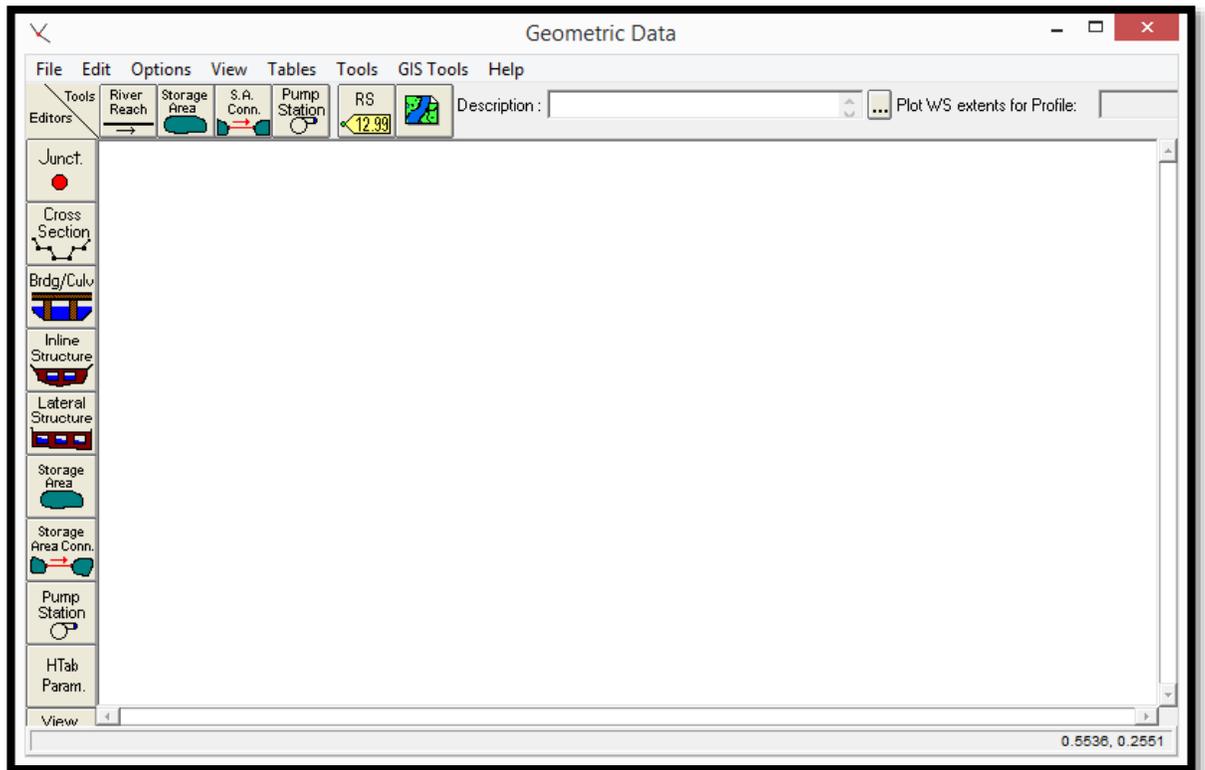


Los distintos proyectos están estructurados, en proyecto, plan, geometría y caudal, permitiendo una jerarquización y ordenación de los distintos cálculos.

Los datos necesarios son de tres tipos:

- Datos Geométricos, que definen el contorno de río.
- Datos hidráulicos, fundamentalmente, el caudal, la rugosidad y la evaluación de las pérdidas localizadas.
- Datos de contorno o condiciones de borde.

Figura 28. Ventana de datos geométricos



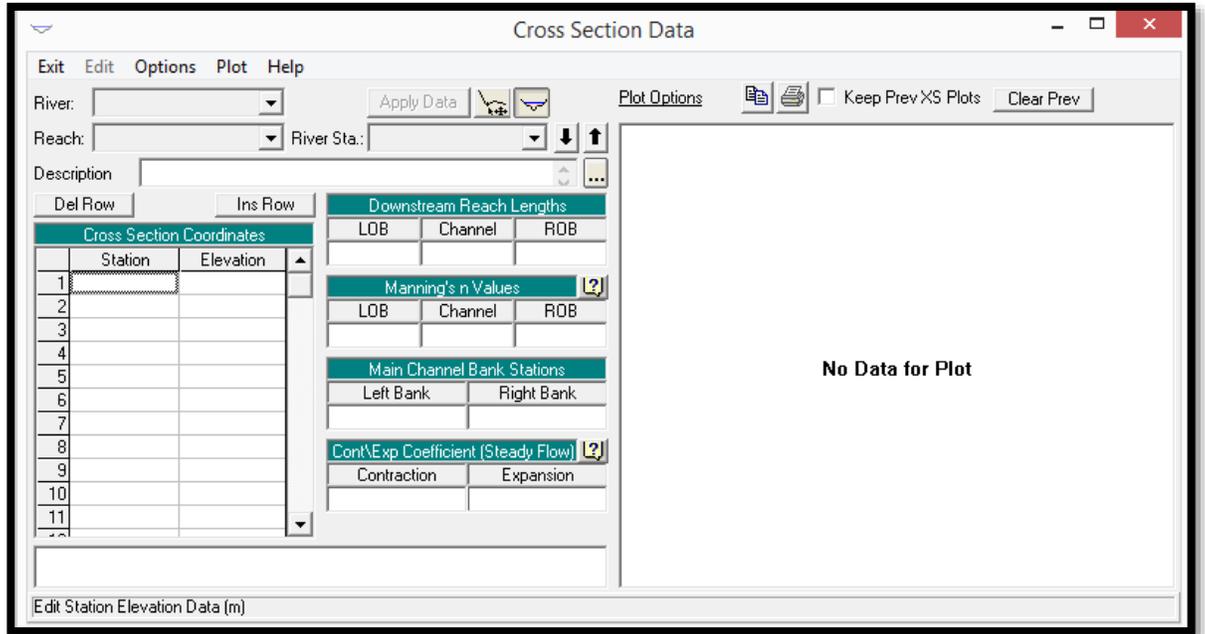
- **DATOS GEOMÉTRICOS**

Los datos geométricos se introducen por medio de la ventana de sección transversal (figura 29) y son:

- Datos geométricos de la sección, distancia y cota (la cota esta referenciada en todas las secciones al mismo plano de referencia).
- Distancia a la sección anterior (en la bancada izquierda “LOB”, el en cauce central, “Channel” y en la bancada derecha “ROB”).
- Valor de la “n” de Manning
- Delimitación en distancia del cauce central

- Coeficientes de contracción y de expansión.

Figura 29. Ventana de datos geométricos para secciones transversales



- **CONDICIONES HIDRÁULICAS**

Las condiciones hidráulicas, sección crítica, nivel conocido o pendiente conocida se introducen con la ventana de la figura 30.

Figura 30. Ventana con datos hidraulicos (condiciones de contorno)

Steady Flow Boundary Conditions

Set boundary for all profiles
 Set boundary for one profile at a time

Available External Boundary Condition Types

Selected Boundary Condition Locations and Types

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream

Enter to accept data changes.

Figura 31. Ventana con datos hidraulicos (caudales)

Steady Flow Data

File Options Help

Enter/Edit Number of Profiles (25000 max):

Locations of Flow Data Changes

River:

Reach: River Sta.:

Flow Change Location				Profile Names and Flow Rates	
	River	Reach	RS	PF 1	
1					

Enter to edit the boundary conditions

6.2. ANTECEDENTES Y TEORÍAS BÁSICAS DEL PROBLEMA

Estudios e investigaciones han demostrado que los métodos lluvia escorrentías han tenido gran éxitos en distintos proyectos dentro y fuera del país para la estimación de caudales para diferentes periodos de retorno con la ayuda del software EPA SWMM, para ello se han recopilado una serie de estudios, artículos donde se plasman las investigaciones que están paralelas a la que se está desarrollando en este documento de investigación, a continuación se hará mención de los aspectos más importantes de cada uno de los parámetros de las investigaciones citadas.

ESTUDIO DE LA CUENCA DE LA RIERETA EN SANT BOI DE LLOBREGAT, ESPAÑA MEDIANTE UN MODELO DE DRENAJE DUAL UTILIZANDO EPA SWMM. Ref.: articulo.

AUTOR: MÚRCIA BALAGUER, ANNA

TUTOR: GÓMEZ VALENTÍN, MANUEL

En este estudio se representa una modelo dual o drenaje conjunto entre dos sistemas y representado por la red de alcantarillado, y el sistema mayor, representado por las calles. “Donde el objetivo era modelar, siguiendo los principios básicos del drenaje dual, una cuenca urbana de reducidas dimensiones utilizando el software EPA SWMM 5.0 y comparar, posteriormente, los resultados obtenidos con un estudio tradicional de la misma cuenca, Esto nos permitirá

evaluar el comportamiento de la cuenca estudiada frente las tormentas de proyecto de período de retorno de 2, 5 y 10 años. Mediante estas simulaciones podremos ver el funcionamiento de la red de drenaje frente a eventos de lluvia extremos, así como conocer las zonas que presentan problemas de inundación o donde los niveles de agua o las velocidades del flujo en superficie pueden llegar a ser peligrosos para la seguridad de la población.”³⁴

Donde esta fueron algunas de conclusiones que plantearon:

- La elaboración de un modelo Dual, debido a la discretización en subcuencas de reducidas dimensiones, requiere un muy buen conocimiento de la zona de estudio en comparación con la información que se requiere para un modelo Tradicional donde se realiza una discretización más grosera.
- Para un modelo Dual, la calidad de los datos de base que hay que suministrar al programa de cálculo está todavía más en relación directa con la confianza en los datos finales que en el modelo Tradicional, por lo tanto, datos de partida adecuados de lluvia, de caudales de escorrentía y de geometría de la red son indispensables.
- La transferencia de caudales entre el nivel calle y el nivel red de alcantarillado, en ambos sentidos, se modela a través de simular en detalle la hidráulica de cada sumidero y de cada pozo de registro, para poder describir la

³⁴Estudio de la cuenca de La Riereta en Sant Boi de Llobregat, España mediante un modelo de drenaje dual utilizando EPA SWMM

entrada de agua en la red y la salida al exterior en caso de entrada en carga de la misma.

La utilización de un modelo Dual supone un volumen y un tiempo de trabajo adicional notable respecto utilizar un modelo Tradicional. El incremento del tiempo de trabajo no es consecuencia de un aumento del tiempo de cálculo con el ordenador, sino del tiempo necesario para describir la cuenca adecuadamente mediante las herramientas que el SWMM nos proporciona.

ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO PARA LA CANALIZACIÓN DEL ARROYO DE LA CALLE 84 EN LA CIUDAD DE BARRANQUILLA, COLOMBIA.

Este estudio se realizó en la ciudad de barranquilla con el fin de darle solución a uno de los problemas que aqueja al distrito que son los arroyos. Cuyo objetivo El objeto del presente documento “Plan Integral para el Sistema de Drenaje Pluvial de la microcuenca de la Calle 84”, es el de desarrollar la mejor alternativa para gestionar el drenaje de la cuenca, reduciendo en la medida de lo posible, los numerosos episodios de inundaciones que se producen habitualmente en la calle 84.

Donde se plasmaron las siguientes conclusiones:

- En el presente “Plan Integral para el Sistema de Drenaje Pluvial en la microcuenca Calle 84” se ha desarrollado la alternativa óptima para la gestión de los caudales de drenaje de la cuenca de la Calle 84. Dicha alternativa consiste en el

diseño de una red de drenaje separada del saneamiento y principalmente subterránea.

➤ La solución propuesta se basa en realizar el diseño de una red de drenaje subterránea capaz de recoger las aguas pluviales de la Micro Cuenca de la calle 84, y dirigir las a la red principal ya diseñada en el proyecto “Estudios y diseños de la obra reconstrucción vial y conducción del arroyo de la calle 84 entre las carreras 51B y 74 del distrito de Barranquilla. (CONSORCIO INTERVENTORÍA BARRANQUILLA 09, 2013)”

➤ La red se ha dimensionado siguiendo las directrices principales establecidas en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000).

REVISIÓN DEL SISTEMA DE ALCANTRILLADO DE LA ZONA DEPORTIVA DENTRO DE CIUDAD UNIVERSITARIA, UTILIZANDO EL SOFTWARE EPA SWMM. REF: TESIS

AUTOR: GUSTAVO ALAN BONILLA JAIME

TUTOR: CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES

Este trabajo se basó en el diagnóstico de la situación de operación y funcionamiento actual del sistema de alcantarillado de la zona deportiva del campus CU. La simulación se hizo mediante el uso del software EPA SWMM versión 5.

Conclusiones:

- El software EPA SWMM representa una herramienta útil y fácil de utilizar para el diseño o revisión de cualquier sistema de alcantarillado, lo cual hace pensar que cualquier problema referente al tema de alcantarillado se puede resolver sin dificultad alguna. Sin embargo, cabe destacar que para utilizar adecuadamente ésta herramienta y cualquier otra, hay que conocerla y aprender a utilizarla, para obtener los resultados esperados.
- El principal beneficio que ofrece este programa, es la visualización del comportamiento de cualquier elemento, que conforma el sistema en estudio, durante cualquier intervalo de tiempo y en un instante dado.
- En este trabajo se realizó la revisión de cada conducto mediante un método alternativo, dicho método se basa en un diagrama de flujo, el cual describe una serie de pasos a seguir para obtener la optimización mediante un proceso de prueba y error. Este método alternativo, comparado con el uso habitual de tablas de cálculo, disminuye considerablemente el tiempo de diseño y revisión de cualquier sistema.
- La infraestructura instalada que compone el sistema de alcantarillado en este estudio presenta problemas de inundación en los pozos de visita detectados, estos problemas se presentan únicamente en la situación más desfavorable. La inundación de los pozos se debe principalmente a las descargas sanitarias, ya que

durante la situación más desfavorable, el gasto debido a las descargas sanitarias es mayor que el gasto debido al escurrimiento por la precipitación.

➤ Respecto a los valores de velocidad y tirante dentro de los conductos del sistema, cabe destacar que únicamente se presentan valores fuera de los límites mínimos permisibles de 0.3 m/s y 1.5 cm, respectivamente, durante los intervalos de tiempo, en los que no existen descargas al sistema.

➤ Con este trabajo se ejemplifican los principales aspectos a considerar en el proceso de revisión de cualquier sistema de alcantarillado, tomando en cuenta que en la actualidad se han desarrollado herramientas computacionales que complementan y simplifican el trabajo que habitualmente era desarrollado de manera extensa y laboriosa.

SIMULACIÓN EN PERIODO EXTENDIDO - CUASIESTÁTICO - DE REDES URBANAS A SUPERFICIE LIBRE MEDIANTE SWMM 5.0 vE y 5.1 vI

REF: TESIS

AUTOR: DIANA ALEXANDRA GONZÁLEZ LABANDA

TUTOR: HOLGER M. BENAVIDES MUÑOZ

Se aplicó la herramienta epa swmm para modelar en forma dinámica precipitaciones para un acontecimiento único y para un periodo extendido; y para analizar el comportamiento de un sistema tipo de alcantarillado pluvial frente a una escorrentía máxima probable.

Conclusiones:

- Los resultados de la simulación de la red del ejemplo en SWMM, indican que de los 69.69 mm de lluvia que caen sobre la cuenca, se filtran sólo 2.15 mm en función del modelo del número de la Curva, 1.40 mm según el método de Horton y 2.55 mm en base a los resultados obtenidos del método de Green_ Ampt.
- Gracias al uso de este software, se realizó el análisis de los componentes y elementos que conforman una parte de la red de alcantarillado de la ciudad de Loja, para prevenir la presencia de futuras inundaciones en zonas bajas de la ciudad.
- De los tres métodos de cálculo hidráulico (flujo uniforme, onda cinemática y onda dinámica) el proceso de onda dinámica admite trabajar con pendientes invertidas o adversas, además de los nudos con más de una salida.
- Se plantea como alternativa de solución para la prevención de inundaciones, el incremento del diámetro de tuberías, la implantación de un sistema de bombeo y la ampliación de la red de alcantarillado en general con un colector principal que dirija sus aguas a una planta depuradora, para evitar la contaminación directa al río.
- Se recomienda el empleo del modelo de cálculo hidráulico de onda dinámica, puesto que se obtienen resultados más precisos, en una modelación, además como es más versátil contempla efectos de flujo inverso y presurizado, nudos con más de una salida, resalto hidráulico entre otros.

6.3. FORMULACIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **ÁREA DE DRENAJE:** Es el Área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica.
- **BALANCE HIDROLÓGICO:** Se relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico: precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, almacenamiento superficial y subterráneo y flujo de agua subterránea.
- **CICLO HIDROLÓGICO:** se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida.
- **COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA:** Se define como relación entre la precipitación que se convierte en escorrentía superficial y la precipitación total, adimensional.
- **COEFICIENTE DE VARIACION:** Es la relación que existe entre la desviación estándar y la media.
- **CONDENSACIÓN:** Transición del agua de la fase de vapor a la líquida.
- **CUENCA HIDROGRAFICA:** una cuenca hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple.
- **DESVIACIÓN ESTÁNDAR:** es la raíz cuadrada de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación.

- **ESCORRENTÍA:** parte de la precipitación que fluye por la superficie del terreno (escorrentía superficial) o por debajo de aquél (escorrentía subterránea).
- **EVAPORACIÓN DE AGUA:** Emisión de vapor de agua por una superficie libre a temperatura inferior a su punto de ebullición.
- **EVAPOTRANSPIRACIÓN:** Cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y por la transpiración de las plantas.
- **INFILTRACIÓN:** Formación de un paso de agua en forma de conducto a través de materiales naturales o artificiales, cuando las resultantes de todas las fuerzas que actúan sobre las partículas del suelo tienen una componente vertical en sentido de la gravedad.
- **INTENSIDAD:** es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo, se expresa en mm/h.
- **INTERCEPCIÓN:** proceso por el cual la precipitación es detenida y retenida por la vegetación y estructuras, precipitación que se pierde por evaporación y transpiración antes de penetrar en el suelo.
- **PERIODO DE RETORNO:** se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m-ésimo evento de los (n) registros.
- **PRECIPITACIÓN:** agregado de partículas acuosas, líquidas o sólidas, cristalizadas o amorfas, que caen de una nube o grupo de nubes y alcanza el suelo.

- **TIEMPO DE CONCENTRACIÓN:** Es un parámetro que se usa intensamente en los cálculos de la relación precipitación-escorrentía, es el tiempo de concentración de la cuenca que es el tiempo que una partícula de agua tarda en llegar del punto más alejado al punto de desagüe.
- **TRANSPIRACIÓN:** Proceso por el cual el agua de la vegetación pasa a la atmósfera en forma de vapor.

6.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

- SWMM contiene mayor o igual equivalencia en la estimación de caudales para los diferentes periodos de retorno con respecto a los métodos de estimación tradicional.

6.5. MARCO HISTÓRICO

En el pasado en las ciudades el agua lluvia corría en la superficie de las calles no existía ningún medio para su transporte y evacuación. Con el crecimiento poblacional se vieron en la necesidad de la construcción de alcantarillas para la evacuación de las aguas lluvias más tarde los pobladores vertieron sus aguas servidas, arrojando excrementos de animales y humanos convirtiéndose en alcantarillas combinadas.

“Los conceptos de diseño para las alcantarillas pluviales han cambiado considerablemente en los años recientes. En el pasado las alcantarillas eran diseñadas con frecuencia para drenar áreas locales de manera rápida, poco se tenía en cuenta el efecto acumulativo sobre un área urbana. Tal desarrollo produjo resultados como la inundación a causa de la escorrentía incrementada y la pérdida de recarga de agua subterránea a causa del aumento de impermeabilidad, así como la disminución en el tiempo de retención”³⁵

“No es sorprendente que la hidrología como ciencia no empezara a desarrollarse sino hasta el siglo XVII. Su predecesora la Ingeniería Hidrológica, con obras, por ejemplo, para la conservación de abastecimiento de agua, el mejoramiento de los

³⁵McGhee, Terence J. Abastecimiento de agua y Alcantarillado, Colombia, 6ª Edic. Edit. McGrawHill, 1999, Pág... 268.

cauces, la construcción de bordos o diques para defensa contra inundaciones y los canales para riego de cosechas”³⁶

En los inicios del siglo XX, particularmente a comienzos de la década de los 20, el municipio de Barranquilla contaba con una población de 74,358 habitantes en una superficie aproximada de 300 Has, la Casa R.W. Herbard & Company Inc. de Nueva York, presentó al Concejo Municipal una propuesta de pavimentación y un programa de alcantarillado pluvial valorado en \$258.316. La propuesta del alcantarillado pluvial, no se desarrolló porque el municipio atravesaba por una difícil situación económica. Años más tarde, comenzó el proceso de pavimentación, se incrementó la construcción de viviendas, se fue impermeabilizando la superficie con pavimento rígido y lo más grave, no se conservaron los cauces naturales de los arroyos.

En 1957, cuando la apropiación del espacio público ya era un problema difícil para la ciudad, la Compañía Town Planning Collaborative, establece el Primer Plan Regulador de la ciudad, con base en la Ley 88 de 1947. En dicho plan recomienda la canalización de algunos arroyos. El proyecto pretendía reordenar el espacio físico y evitar en lo sucesivo el caos urbano. Como todo proyecto, estaba sujeto a los intereses políticos del momento, y encontró poca receptividad. Aunque se aminoró el desorden, el programa no solucionó en toda su dimensión el problema. El proyecto no se concretó por los costos de las soluciones propuestas.

³⁶Kazmann, Rápale G. Hidrología Moderna, México-España-Argentina-Chile, Edit. (C.E.S.S.A.), Pag 26.

A partir de aquí, ha sido esta la razón, para rechazar o posponer todas las soluciones integrales o puntuales que en materia de arroyo se presentaron.

En los años siguientes se realizaron varios estudios pero como siempre la carencia de recursos económicos no permitió ejecutarlos, a finales de la década del 50 y principios del 60, estudios e informes realizados por Greeley and Hansen de Chicago, consultores de las Empresas Públicas Municipales, se limitaron a solucionar el sistema de Acueducto y Alcantarillado Sanitario.

Ante la imposibilidad de darle paso a soluciones integrales, comenzaron a ejecutarse trabajos puntuales, en los arroyos más peligrosos. En septiembre de 1962, se inaugura la primera etapa de canalización del arroyo Rebolo Las Empresas Públicas Municipales proponen en la década del 60 y 70 algunos estudios para solucionar la problemática del arroyo Felicidad. En 1964, La AID, Agencia Internacional de Desarrollo, anuncia que financiará un estudio para el alcantarillado pluvial.

El proceso de desarrollo continuó y las urbanizaciones e invasiones crecieron aceleradamente. Se incrementó la impermeabilización y se disminuyó la absorción de la superficie con la construcción de viviendas y vías en concreto, se modificaron aún más los cauces naturales y se estableció un sistema de drenaje superficial por las calles de la ciudad.

En 1975, se presentó un estudio técnico-económico por parte de la firma Senior & Viana y Paternostro y Medina "CONASTEC", con un costo estimado en \$1.789.692.000, para solucionar la problemática de los arroyos de Felicidad, La Paz, Bolívar y Hospital. De nuevo el proyecto fue rechazado por el elevado costo. En este mismo año, el Ministerio de Obras Públicas, acomete la canalización del Arroyo Rebolo y el Country. Posteriormente se proponen varios estudios de factibilidad realizados por las Empresas Públicas Municipales y el Ministerio de Obras públicas para un sistema de alcantarillado pluvial basado en el enterramiento de grandes tubos de 4 a 5 metros de diámetro. Este proyecto se consideró irrealizable por los costos producidos por las tuberías, las excavaciones, rompimiento de concreto de las calles, relocalización de redes subterráneas de teléfono, gas, acueducto, alcantarillado, etc.

En 1982, los Ingenieros Arzuza, proponen cubrir en forma completa con canales invertidos de concreto estructural prefabricado, las calles y avenidas que sean cauces. La nueva cubierta sería la plataforma para el tráfico vehicular y simultáneamente la tapa de un canal cerrado para aguas lluvias, que se conecta con los demás canales cerrados de la ciudad.

El Ingeniero H. Heilbron presentó a la ciudad una solución que consiste en la captación de las aguas de escorrentía que bajan por los arroyos por medio de un túnel principal y dos auxiliares, evitando que las aguas ingresen al Distrito central de la ciudad.

En 1987, se realizó el Estudio de Drenaje Urbano para Barranquilla, a cargo de la Agencia de Cooperación Internacional de la Misión Japonesa, JICA.

La Misión Japonesa, hizo algunas recomendaciones tendientes a atenuar los efectos de los arroyos. Entre las recomendaciones, que por cierto, no han sido desarrolladas con suficiencia, están la de instalar cunetas a ambos lados de la vía, canalizar las vías colectoras principales (box culverts), combinación de los dos casos anteriores, e instalación de drenaje en futuros planes de mejoramiento. Se sugirió también establecer soluciones en las vías más importantes, en los sitios críticos de mayor afluencia de agua, de acuerdo con la movilidad de la población, en sentido este - oeste, o viceversa, dentro de estos "puntos críticos" estarían las carreras 21, 38, 46, 51B y 54; y las calles 47, 45, 17 y 84.

También se planteó la posibilidad de construir reservorios de agua, para disminuir los volúmenes de escorrentía y facilitar el tránsito de los vehículos y peatones. Los reservorios podrían construirse en lugares cercanos a parques, a fin de extraer esta agua mediante tuberías subterráneas para riego de los mismos. En 1994, el Gobierno Municipal a través del alcalde Bernardo Hoyos, presentó una propuesta al gobierno canadiense con el objetivo de que este país realizara en Barranquilla el alcantarillado pluvial que se necesitaba. La propuesta fue rechazada.

Uno de las sugerencias más recientes, es el Estudio de Factibilidad y Diseño de Soluciones al Drenaje Pluvial de la ciudad de Barranquilla, presentada en marzo de 1997, por Fonade-Hidroestudios S.A y ConCEP Ltda. La propuesta se basa en

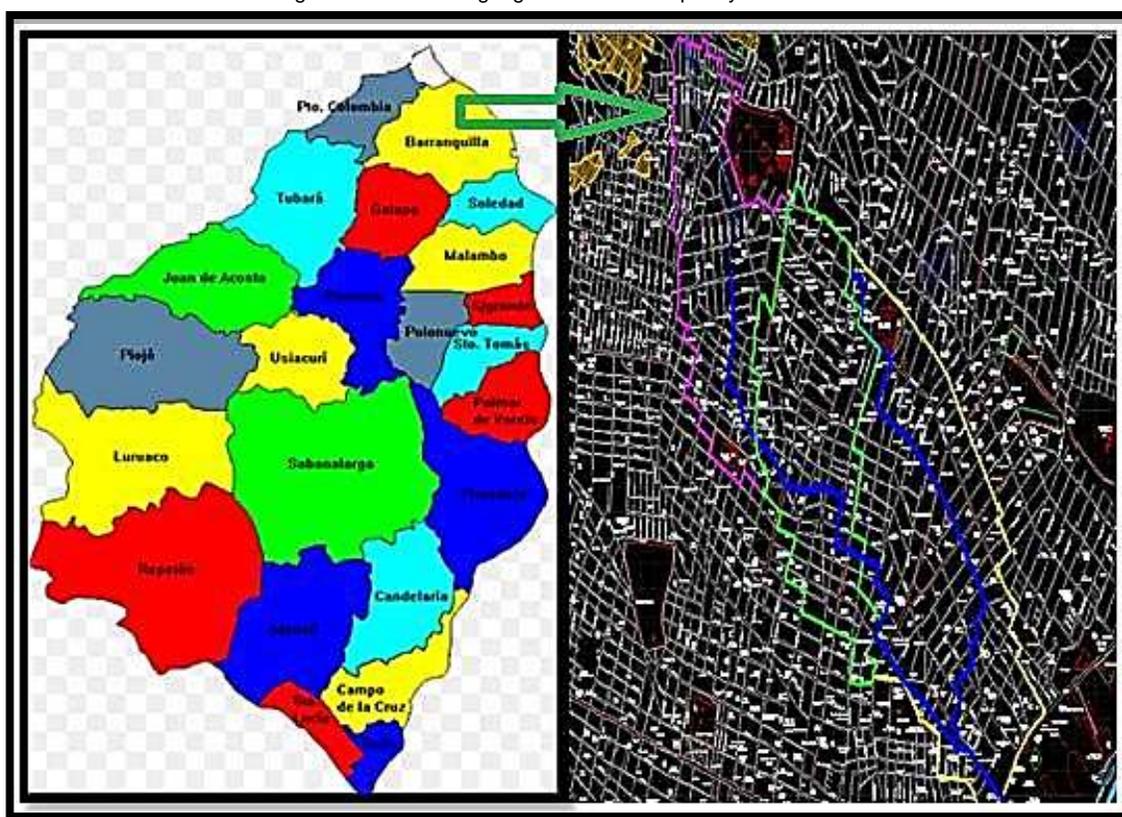
medidas estructurales y medidas no estructurales con las cuales se busca prevenir el avance del problema en el futuro. La nueva propuesta se aleja de las anteriores en el sentido que para la vertiente oriental, la solución busca solucionar las consecuencias de las carencia de alcantarillado pluvial, sin dar énfasis a la construcción, parcial o total de un sistema convencional, atacando la principal consecuencia cual es la parálisis que se genera en la ciudad.

De acuerdo a lo anterior, es diciente que la solución que siempre se buscó fue la de un manejo desde el punto de vista convencional y lo que pretendo con este proyecto es encontrar soluciones en la fuente y de esta manera minimizar estos volúmenes de escorrentía que cada día son mayores.

6.6. MARCO GEOGRÁFICO

Esta investigación está basada en la estimación de caudales, con ayuda del software EPA SWMM para la cuenca hidrología ubicada en el municipio de barranquilla, al cual se realizó su investigación de todos sus componentes necesarios para su fin.

Figura 32. Ubicación geográfica de barranquilla y las subcuencas



La ciudad de barranquilla se encuentra ubicado geográficamente al norte de América del sur y de la república de Colombia ocupa la parte más septentrional del departamento del atlántico, del cuál es su capital. La ciudad se levanta en la

margen izquierda del rio grande de la magdalena y a 22 kilómetros aguas arriba de su desembocadura en el mar caribe, sitio conocido como bocas de ceniza.

Para el instituto geográfico Agustín Codazzi, el distrito de barranquilla se localiza en las siguientes coordenadas:

10° 57' 42'' de latitud norte y 74° 46' 54'' de longitud occidental.

➤ **LIMITACIONES GEOGRÁFICAS**

Barranquilla limita al norte de manera natural con el mar caribe y políticamente con Jamaica, Republica dominicana y Haití; al sur con los municipios de soledad y galapa; al oriente y nororiente con el rio Magdalena; al occidente y noroccidente con el municipio de puerto Colombia; en el suroccidente en un pequeño tramo con el municipio de Tubará. Los límites naturales de barranquilla son el mar caribe y el rio Magdalena al oriente y nororiente.

6.7. MARCO LEGAL³⁷

La importancia de regulación y cuidados de los sistemas de recursos hídricos de Colombia se encuentran legislados bajo el Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Establecido bajo el sistema de información ambiental de Colombia (S.I.AC); permitiendo que el Sistema de Información Ambiental (S.I.A); permita diferentes sistemas de información, entre los cuales se accede establecer el sistema de información de recursos hídricos.

Sistema de Información del Recurso Hídrico.

“El sistema de información de recursos hídricos- SIRH es el conjunto que integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilita la gestión integral del recurso hídrico.”

Marco Legal decreto 1323 de 2007

Sus Objetivos acuerdo decreto 1323 de 2007 articulo 4

³⁷ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Republica de Colombia. “Taller de lanzamiento fortalecimiento de las capacidades nacionales en estadísticas y cuentas del agua para la generación de basadas en evidencia”, sistema de información del recurso hídrico – SIRH. IDEAM mayo de 2011. Pag 1-4

7. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología que se emplea para realizar esta investigación se define en varias fases, explicándose el proceso que se lleva a cabo en cada una de ellas y dando a conocer los parámetros obtenidos durante el desarrollo de ellas.

La primera fase que compone o le da vida a esta investigación es la recolección de información externa donde se logró obtener documentos valiosos como planos existentes es decir urbanísticos y topográficos de la ciudad de barranquilla donde se describen o trazan los principales arroyos que existen, además trabajos de investigaciones realizadas en cuanto a todo lo relacionado con los cauces presentes en el DEIP de Barranquilla.

El ciclo que sigue es la recolección de información de campo donde se mandó a realizar el levantamiento topográfico del arroyo en estudio, de los cuales entregaron el perfil longitudinal y las secciones transversales todo perfectamente detallado, por otro lado se logra comprar la información hidroclimática correspondiente a las estaciones pluviométricas existentes en la ciudad como los son: Estación aeropuerto Ernesto Cortissoz ubicada en este mismo y la Estación Las Flores que se encuentra en el barrio las Flores de esta ciudad.

Una vez culminada la etapa anterior se continúa con la redacción del anteproyecto con base buscando la bibliografía pertinente para organizarlo y presentarlo al comité evaluador para poder seguir con la investigación, dentro de la redacción se contemplaron los aspectos o capítulos que exige la norma para su presentación.

El paso a seguir es la implementación del modelo hidrológico contemplando todo lo anteriormente mencionado, pero antes de eso se tuvo que conseguir el software EPA SWMM para la creación del modelo, las informaciones citadas en principio fueron procesadas según criterio de la hidrología expuesta en el marco referencial. Igualmente ocurre con la modelación del arroyo en el HEC RAS partiendo desde la información obtenida en SWMM.

El análisis de los resultados es el paso a seguir, cuando ya finalmente se consiga la modelación en ambos programas la información arrojada debe ser analizada con cautela para sacar las conclusiones que serán plasmadas dentro del documento final.

Finalmente con todas las fases finiquitadas se procede a construir o elaborar el documento final donde se plasma lo realizado durante toda la investigación, para su empaste y por supuesto la sustentación y evaluación por parte de los jurados.

8. DESARROLLO DEL TRABAJO

El punto a tratar en este capítulo es la construcción total del trabajo en materia de cálculos, comenzando desde la consecución de aspectos topográficos detallados en la subdivisión de este ítem, se explica el paso a paso de todo lo realizado para poder conformar todo el modelo y así conseguir lo planteado en los objetivos y finalizar el proyecto. Cabe resaltar que como en la ciudad de Barranquilla existen dos estaciones pluviométricas que son la estación de las Flores ubicada en el barrio las Flores de esta ciudad y la estación Ernesto Cortissoz ubicado en el aeropuerto del DEIP de Barranquilla, se decide tomar la que más cercana está a la cuenca hidrográfica del arroyo en estudio. Dicha estación es la de las Flores así que todo proceso de cálculo en cuanto a precipitaciones se refiere estará redundando sobre ella, aunque para la estación Ernesto Cortissoz se detallaron muchos aspectos entre los cuales se muestran en las tablas 15 y 16, y en la figura 42 correspondientes a sus pruebas de datos dudosos y curvas IDF en su orden. Con esto se deja dicho gran parte de la guía correspondiente a esta parte del desarrollo de esta tesis.

8.1. DEFINICIÓN DEL TRAZADO DEL ARROYO.

Se redefinió el trazado del cauce principal del arroyo de la segunda brigada, pues la información que aparecía sobre el arroyo estaba en un porcentaje mínimo errada, este se realizó haciendo un recorrido desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río grande de la magdalena. Donde su inicio es la carrera 32 con calle 69 esquina, y desembocando en el río magdalena el cual invade los predios de la escuela naval de sub- oficiales de la ciudad de barranquilla, con una longitud de cauce principal de 4550 metros lineales.

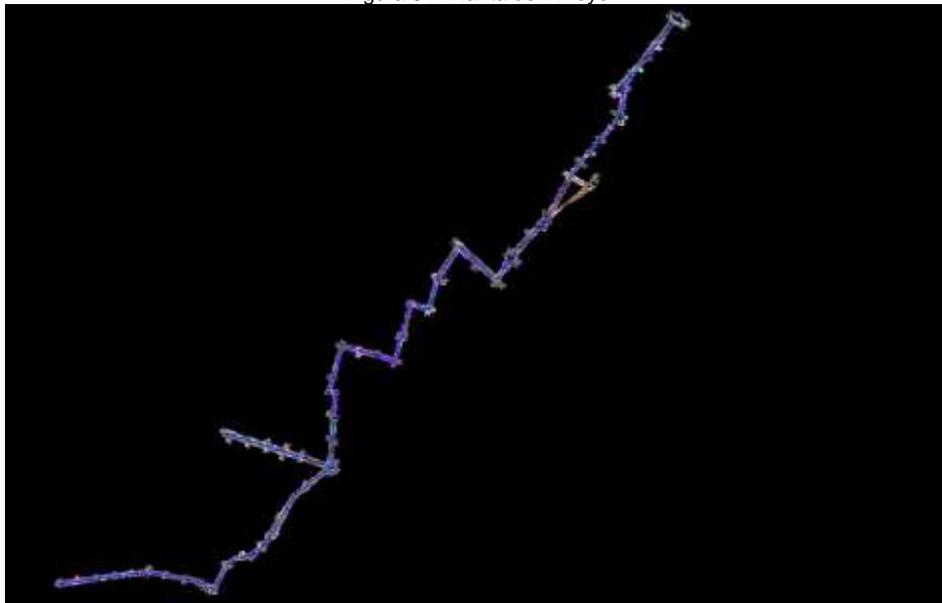
Figura 33. Trazado del Arroyo de la Segunda Brigada



8.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

El levantamiento topográfico entregó información necesaria para poder desarrollar gran parte de la investigación, suministró información de secciones transversales, perfil longitudinal y la planta del arroyo para introducirla en software y poder modelar el arroyo con sus respectivos parámetros.

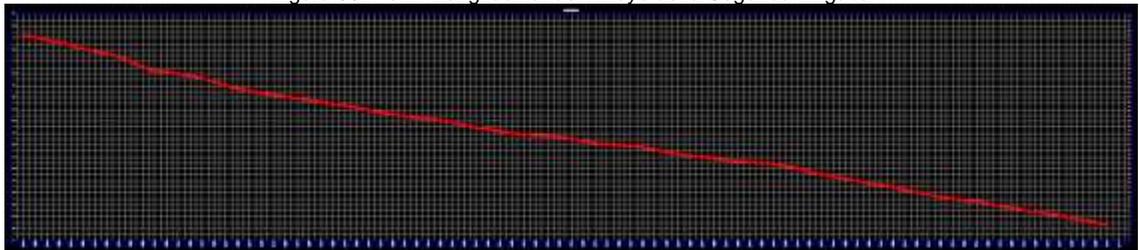
Figura 34. Planta del Arroyo



8.3. PERFIL LONGITUDINAL DEL ARROYO

Con el perfil longitudinal del arroyo se puede saber de manera directa cual es la pendiente que presenta el cauce principal y con base a esto se pueden estimar muchos parámetros importantes para hacer la respectiva construcción del modelo a desarrollar, dicho perfil muestra que posee una pendiente media del 1.8% respecto a los niveles superior e inferior.

Figura 35. Perfil Longitudinal del Arroyo de la Segunda Brigada



8.4. SECCIONES TRANSVERSALES

Las secciones transversales suministradas por la topografía, muestran la sección transversal por tramos levantados a cada 50 metros lineales, se tomó la información y se guardó en formato Excel para introducirlas en el software. Se presentan dos secciones correspondientes al K0+000 Y K0+400 respectivamente como muestra de lo obtenido en el levantamiento topográfico.

Figura 36. Sección típica del Arroyo

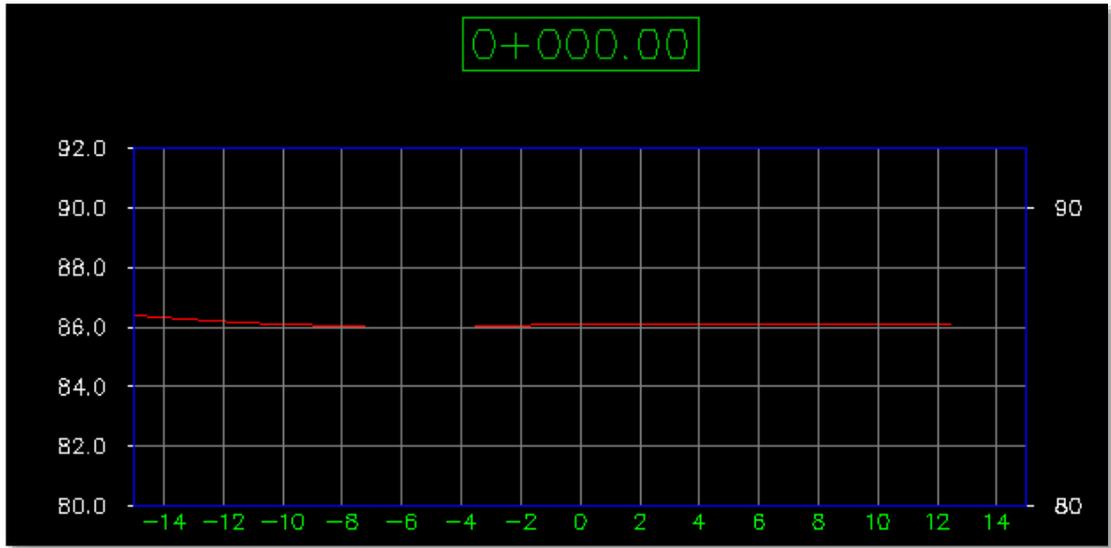
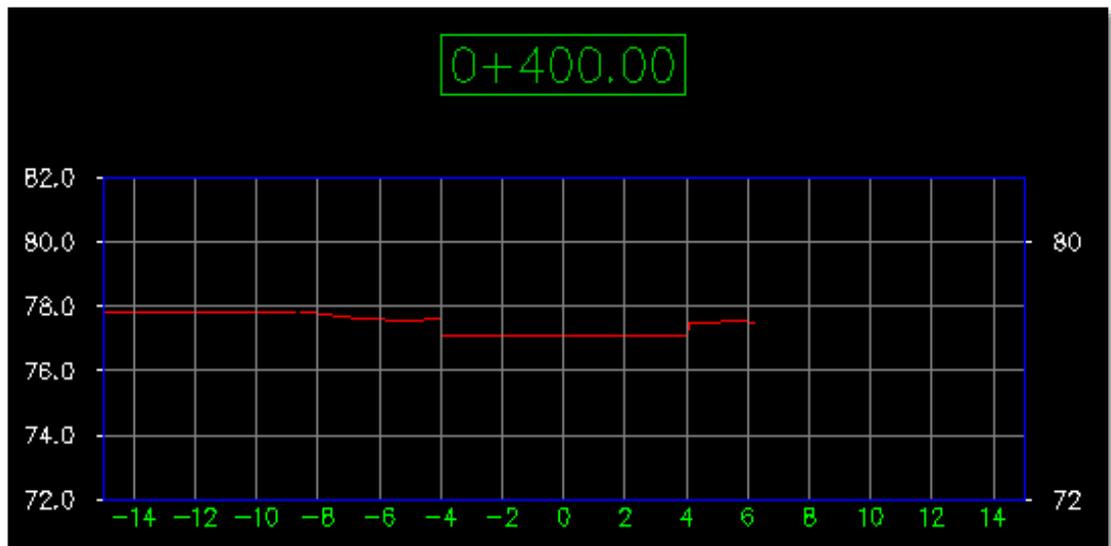


Figura 37. Sección típica del Arroyo

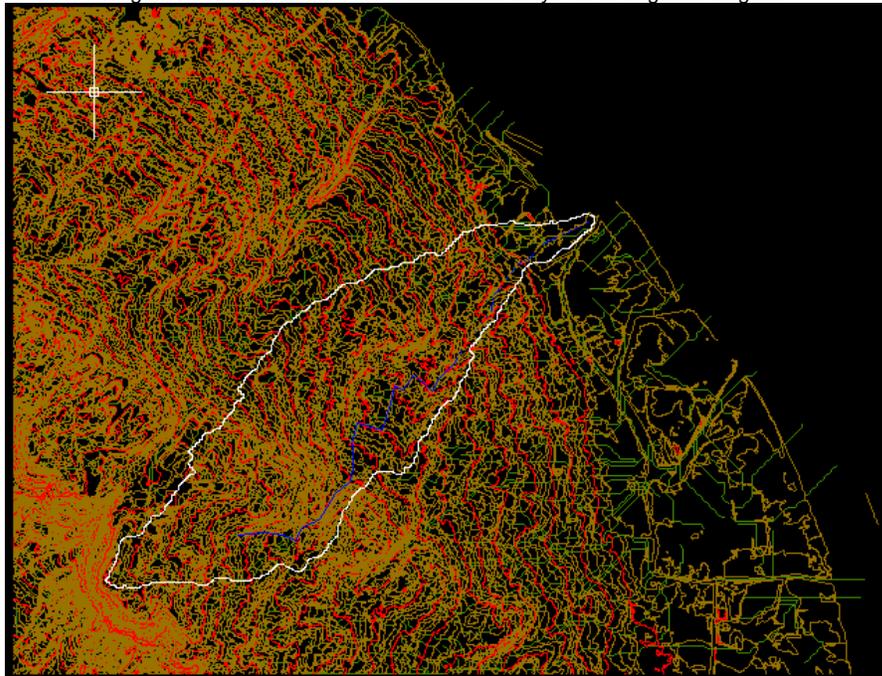


8.5. DELIMITACIÓN DE CUENCA CON AYUDA DEL SOFTWARE

ARCGIS VERSION 9.3

Para efectos de minimizar errores a la hora de delimitar la cuenca hidrográfica, se definió utilizar la herramienta computacional Arc gis y con ayuda de las curvas de niveles suministradas por él ingeniero Camilo Osorio, y por un proceso de pasos lógicos en el software este arroyo una cuenca con características mostradas en la imagen, todo esto con ayuda del docente asesor experto en el tema y se obtuvo un área de 5505240.6059 m². En la figura 38 se observa la hoya delimitada.

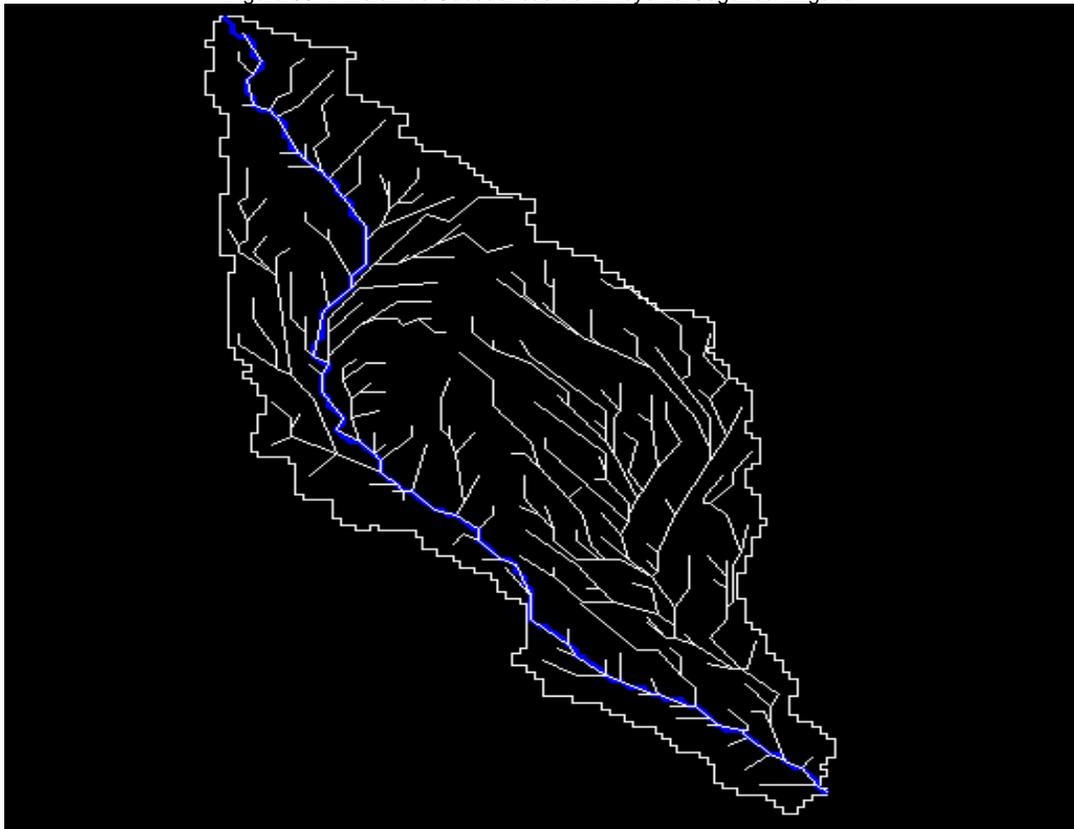
Figura 38. Delimitación de la Cuenca del Arroyo de la Segunda Brigada



8.6. DIVISION DE SUBCUENCAS CON AYUDA DEL SOFTWARE ARCGIS VERSION 9.3

Para una mejor caracterización del modelo se realizó a división de la hoya macro en tres pequeñas cuencas, cada una con características morfométricas diferentes, esto ayudara a que la estimación sea más exacta. Se muestra a en la figura 39 la división arrojada por Arc gis y todas las ramificaciones presentes en el caso.

Figura 39. División de Subcuencas del Arroyo La Segunda Brigada



8.7. SUBDIVISIÓN DE SUBCUENCAS POR CALLES

En este ítem se ajustaron las subcuencas por las calles para determinar un factor que más adelante se estará referenciando en itinerario 8.13.4. , esta determinación se realizó respetando los factores topográficos en cierto modo, pues se hizo un acomodo para que sus límites fueran los correctos. Pues se tiene en cuenta que por la delimitación hay áreas que aumenta y disminuyen a la hora de hacer este acomodo por las calles, en cierta manera por lo observado el área aumenta en cierto grado pero no con un valor tan amplio, en la tabla 12 se presentan los valores correspondientes a las áreas de cada una de las subcuencas. Para no generar confusión estas están identificadas por colores de la figura 40.

Figura 40. División de Subcuencas Por Calles



8.8. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LAS SUBCUENCAS

Una vez hecha la delimitación de subcuencas por calles se procede a obtener información característica de cada una de ellas, como por ejemplo sus áreas en superficie, longitudes de cauces, pendientes entre otros que se muestran a continuación en la tabla 12.

Tabla 12. Características Morfométricas de las Subcuencas

SUBCUENCAS						
CARACTERÍSTICAS						
	AREA (m ²)	L _c (m)	EL MAYOR (m)	EL MENOR (m)	PENDIENTE (m/m)	S (%)
SUBCUENCA 1	1309422.32	937.08	78	61	0.01814146	1.814%
SUBCUENCA 2	1625323.81	1387.9	61	36	0.01801283	1.801%
SUBCUENCA 3	2469577.84	3368.31	78	4	0.02196947	2.197%

8.9. PRECIPITACIONES

Es un parámetro de gran importancia y tiene gran alcance en la investigación, pues las estimaciones de caudales parten de la consecución de este factor, puesto que con la aplicación de la hidrología se determinan valores en función de esta. El IDEAM (INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA) proporciona esta información, en la ciudad de Barranquilla existen dos estaciones pluviométricas que son: Estación Aeropuerto Ernesto Cortissoz y Estación Las Flores. A continuación aparecen tabuladas sus respectivos años y precipitaciones máximas las 24 horas. De acuerdo con las ubicaciones de las estaciones pluviométricas se opta por utilizar en toda la

investigación la concebida por la estación ubicada en el barrio las flores porque es la que se encuentra más cercana a la cuenca del arroyo en estudio aunque a se decide hacer los estudios pertinentes a ambas estaciones pero llegando con la Ernesto Cortissoz hasta la construcción de sus curvas IDF de allí en adelante se continua con la otra estación.

Tabla 13. Información Hidroclimática Estación Las Flores

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES														SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL	
VALORES MAXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACION (MM) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO : 2014/03/17				TIPO EST		CP		DEPTO		ATLANTICO		ESTACION : I9045120 FLORES LAS		FECHA-INSTALACION 1971-ABR	
LATITUD 1102 N				ENTIDAD 01 IDEAM		MUNICIPIO BARRANQUILLA		CORRIENTE MAGDALENA		FECHA-SUSPENSIÓN					
LONGITUD 7449 W				REGIONAL 02 ATLANTICO											
ELEVACION 0002 m.s.n.m															
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1980	2	01							*	87.8 1	86.0	23.0	36.0	10.6 3	87.8 3
1981	2	01	.0	.6	.0	42.0	52.3	29.7	27.0	100.1 9	36.5	89.0	52.0 3	99.5	100.1 3
1982	2	01	.0	.5	.0	.3	56.4	14.8	12.7	7.4	68.6	32.6	75.7 9	25.6 9	75.7
1983	2	01	.0 9	.0 9	.0 9	7.9	.2	8.7	7.8 3	41.5	7.9	78.1	18.8	.0	78.1 3
1984	2	01	.0	.0	.0	.0	37.9	48.7	20.0	8.7	52.2	31.9	48.1	.0	52.2
1985	2	01	.0	.0	.0	2.8	25.0	6.9	4.1	35.9	48.1 1	32.7	34.5 1	43.9 1	48.1
1986	2	01	.0	.0	.0	.2	77.5	55.0	3.4	64.6	60.4	59.5		2.2	77.5 3
1987	1	01	4.5 9	5.4 9	3.6 9	15.5 9	98.6 9	59.3 9	29.6 9	76.3 9	105.9 9	142.6 9	75.9 9	27.1 9	142.6
1988	1	01	1.5 9	2.5 9	.7 9	12.6 9	95.6 9	56.9 9	27.0 9	73.7 9	103.4 9	140.2 9	73.7 9	25.0 9	140.2
1989	1	01	.0 9	.6 9	.0 9	10.7 9	94.5 9	54.5 9	25.5 9	72.2 9	101.9 9	138.8 9	72.5 9	24.0 9	138.8
1990	1	01	.0	.0	.0	.0	3.5	25.7	32.0	79.0	26.7	73.7 1	46.0	20.5	79.0
1991	1	01	.0	.0	.0	.0	68.3	2.0	.0	59.3	61.0	20.0	2.2	.0	68.3
1992	1	01	.0	.0	.0	7.6	32.0	8.9	16.2	52.4	30.3	66.5 1	.0	11.9 9	66.5
1993	1	01	.0	4.9	.0	6.2 3	63.0	3.7 1	25.8	24.0	89.3 9	40.0	40.6 1	11.9 9	89.3 3
1994	1	01	.0	4.9	.0	.0	37.0	3.7 1	3.7 1	24.0	23.0	8.5	2.0	83.5	83.5
1995	1	01	.0 9	.0 9	.0 9	.0 9	85.7 9	44.7 9	16.0 9	63.0 9	94.0 9	130.0 9	67.0 9	19.0 9	130.0
1996	1	01	.0 9	.0 9	.0 9	8.4 9	94.9 9	54.0 9	26.1 9	2.8	65.2	48.5	40.0	.0 3	94.9 3
1997	1	01	.0	.0	6.3 9	18.8 9	105.6 9	64.9 9	37.0 9	83.4 9	115.7 9	151.3 9	88.2 9	41.0 9	151.3
1998	1	01	16.5 9	18.7 9	3.5	.4	42.5	79.5 3	22.5	50.0 3	49.5 3	47.1 3	27.2 3	49.0 3	79.5 3
1999	1	01	.0 3	.0 3	.6 3	8.5	30.0 3	43.5	27.0	50.0 3	80.5 3	36.0	55.5	23.0	80.5 3
2000	1	01	.0 3	.0 3	.0 3	17.5 3	4.5 3	41.5 3	8.2 1	22.0	92.5 3	37.3	26.5	68.2	92.5 3
2001	1	01	.0	.0	.0	.0 3	.0 3	5.5 3	9.5	80.5 3	65.3 3	75.7 3	51.5 3	4.0 3	80.5 3
2002	1	01	.0	.0 3	.5	.0	21.0 3	59.9	48.5 3	22.5 3	121.0	10.7	5.0	.5 3	121.0 3
2003	1	01	.0	.0	.0	4.5 3	36.0 3	51.8	18.5	30.0 3	32.4	60.0		81.0	81.0 3
2004	1	01	.0 3	.0	.0	23.0 3	32.5 3	21.6	77.0 3	73.0	32.0 3				77.0 3
2005	1	01	.0 3	.0	.0	.0 3	.0 3	53.5 3	40.0	67.0 3	17.3	55.0	52.5	.0 3	67.0 3
2006	1	01	.0 3	.0	.0 3	.0 3	.0 3	61.5							61.5 3
2007	1	01												.4	0.4 3
2008	1	01	.0	.0	.0	.3	78.0	21.0	22.2	65.4	56.5	48.5		.0	78.0 3
2009	1	01	.0	.0	.0 3	.0	49.7	32.5	2.1	47.3 3	9.8	107.0		.0	107.0 3
2010	1	01	.0	.0	13.3	4.9	58.3		74.1	47.5	64.7	31.4	65.0 3	92.7 3	92.7 3
2011	1	01	.0	.0	.0	23.0	112.4	56.8	116.8	54.8	59.8	92.3	58.7	14.3	116.8
2012	1	01	.0	.0	.0	6.6	67.3	19.3	.0	28.4	58.3	38.8	28.5	.0	67.3
2013	1	01	.0 3	.0	.0	.0 3	.0 3			53.7					53.7 3

Tabla 14. Información Hidroclimática Estación Ernesto Cortissoz

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
VALORES MAXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACION (mms) EN 24 HORAS											SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL				
FECHA DE PROCESO : 2012/11/07											ESTACION : 29045020 APTO E CORTISSOZ				
LATITUD	1053 N	TIPO EST	SP	DEPTO	ATLANTICO						FECHA-INSTALACION	1940-MAY			
LONGITUD	7446 W	ENTIDAD	01 IDEAM	MUNICIPIO	SOLEDAD						FECHA-SUSPENSION				
ELEVACION	0014 m.s.n.m	REGIONAL	02 ATLANTICO	CORRIENTE	MAGDALENA										
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1980	2	01	.0	.0	.0	.5	19.2	40.7	44.9	61.0	49.4	48.0	13.0	3.2	61.0
1981	2	01	.0	.0	.9	41.0	60.7	19.5	54.6	54.8	49.4	29.0	35.0	118.4	118.4
1982	2	01	1.4	.0	.0	40.8	43.2	28.6	47.6	7.5	70.2	40.8	7.2	.0	70.2
1983	2	01	.0	6.2	3.6	15.7	8.6	17.0	31.7	5.4	29.3	54.3	9.9	.0	54.3
1984	2	01	.0	.0	.0	5.2	54.2	51.2	87.2	47.6	50.5	31.9	16.6	.0	87.2
1985	2	01	.0	.0	.0	42.6	35.8	39.4	56.4	12.2	66.3	91.8	10.2	3	91.8
1986	2	01	.0	.0	.0	13.0	12.6	23.5	1.1	22.0	19.5	103.5	23.6	2.1	103.5
1987	1	01	1.0	1.8	.0	46.8	82.0	20.8	5.6	20.7	68.5	67.6	4.9	70.0	82.0
1988	1	01	.0	.0	.0	1.0	50.0	87.6	51.0	65.0	11.3	31.1	67.1	1.4	87.6
1989	1	01	.0	.0	.0	.0	.0	19.4	18.3	47.3	77.2	30.0	22.3	69.6	77.2
1990	1	01	.0	.0	.0	.5	12.0	4.2	20.0	77.6	25.2	81.6	44.5	14.4	81.6
1991	1	01	.0	.3	.2	1.2	31.1	43.5	1.8	45.5	52.5	48.3	11.1	.0	52.5
1992	1	01	.0	.0	.0	4.0	48.3	46.9	37.8	67.0	38.1	38.9	22.2	.0	67.0
1993	1	01	1.7	.0	.0	54.6	81.4	47.0	100.6	51.1	25.2	29.8	35.3	3.6	100.6
1994	1	01	.0	.0	8.0	9.5	87.9	.7	42.3	30.0	16.2	19.5	26.4	.0	87.9
1995	1	01	1.7	.0	3	.0	54.6	81.4	47.0	63.7	50.8	72.5	75.3	18.0	81.4
1996	1	01	6.7	.0	11.5	.1	52.2	18.9	38.4	15.2	50.4	71.5	14.1	.0	71.5
1997	1	01	20.4	.0	1.7	2.9	15.1	31.6	8.8	37.4	37.0	38.2	54.6	.0	54.6
1998	1	01	.0	2.2	3.4	4.0	96.7	48.5	21.8	44.0	63.9	61.3	52.1	90.2	96.7
1999	1	01	.0	2.3	.0	24.5	50.3	53.1	22.3	27.6	32.6	32.9	67.1	3	67.1
2000	1	01	.0	.0	.0	3.1	26.8	46.6	45.0	19.7	53.0	64.0	48.5	40.0	64.0
2001	1	01	.0	.0	.0	.0	32.9	6.5	23.1	17.5	32.9	99.3	76.0	19.6	99.3
2002	1	01	.0	.0	.0	6.5	39.7	25.1	77.2	41.6	70.6	69.8	3.6	13.5	77.2
2003	1	01	.0	1.5	.0	26.6	18.5	35.8	25.0	39.5	37.8	54.1	56.1	103.8	103.8
2004	1	01	.0	.0	.0	6.5	20.5	20.8	77.5	16.8	58.5	53.2	38.4	.0	77.5
2005	1	01	.0	.0	.0	6.0	55.5	37.7	51.9	80.7	58.1	36.8	46.4	.0	80.7
2006	1	01	2.5	.0	.7	11.1	76.7	29.6	45.0	27.4	49.3	40.7	59.8	.0	76.7
2007	1	01	.0	.0	.9	56.9	63.5	55.0	70.6	48.6	3	52.8	15.9	23.2	70.6
2008	1	01	.0	.0	.0	39.2	25.5	58.2	14.3	53.9	34.2	29.9	3	140.7	140.7
2009	1	01	.0	.0	.0	.0	31.6	10.9	23.9	131.7	15.5	62.8	13.9	4.5	131.7
2010	1	01	.0	.0	5.3	55.5	62.2	34.5	44.7	32.0	27.3	35.7	43.0	51.4	62.2
2011	1	01	.0	.0	.1	24.3	62.8	18.1	33.4	38.8	37.9	82.8	36.6	29.6	82.8

8.10. DATOS DUDOSOS

Los datos dudosos se hicieron siguiendo la metodología del Water Resources Council, determinando valores altos y bajos como forma de rango para descartar los valores por fuera de esta y así realizar una buena obtención de resultados, para la estación las flores se descartó el valor de 2007 mientras que la estación Ernesto Cortissoz no se descartó ningún valor.

Tabla 15. Datos Dudosos Estación Las Flores

PRUEBA DE DATOS DUDOSOS LAS FLORES				
Orden	P	Log P	muestra	valores de k
1	151.3	2.17983893	10	2.036
2	142.6	2.15411953	11	2.088
3	140.2	2.14674801	12	2.134
4	138.8	2.14238947	13	2.175
5	130	2.11394335	14	2.213
6	121	2.08278537	15	2.247
7	116.8	2.06744284	16	2.279
8	107	2.02938378	17	2.309
9	100.1	2.00043408	18	2.335
10	94.9	1.97726621	19	2.361
11	92.7	1.96707973	20	2.385
12	92.5	1.96614173	21	2.408
13	89.3	1.95085146	22	2.429
14	87.8	1.94349452	23	2.448
15	83.5	1.92168648	24	2.467
16	81	1.90848502	25	2.486
17	80.5	1.90579588	26	2.502
18	80.5	1.90579588	27	2.519
19	79.5	1.90036713	28	2.534
20	79	1.89762709	29	2.549
21	78.1	1.89265103	30	2.563
22	78	1.8920946	31	2.577
23	77.5	1.8893017	32	2.591
24	77	1.88649073	33	2.604
25	75.7	1.87909588	34	2.616
26	68.5	1.83569057	35	2.628
27	67.3	1.82801506	36	2.639
28	67	1.8260748	37	2.65
29	66.5	1.82282165	38	2.661
30	61.5	1.78887512	39	2.671
31	53.7	1.72997429	40	2.682
32	52.2	1.7176705	41	2.692
33	48.1	1.68214508	42	2.7
Media	89.70	1.93	43	2.71
Desv. Est	27.31	0.13	44	2.719
			45	2.727
			46	2.736
			47	2.744
			48	2.753
			49	2.76
			50	2.768
			55	2.804
			60	2.837
			65	2.866
			70	2.893
			75	2.917
			80	2.94
			85	2.961
			90	2.981
			95	3
			100	3.017
			110	3.049
			120	3.078
			130	3.104
			140	3.129

$y_H =$	2.2666459	$P_H =$	184.776146
$y_L =$	1.60199516	$P_L =$	39.9940289
<i>se descarta valor el valor de 2007</i>			

			n=	33
			$K_n =$	2.604

Tabla 16. Datos Dudosos Estación Ernesto Cortissoz

PRUEBA DE DATOS DUDOSOS ERNESTO CORTIZO				
Orden	P	Log P	muestra	valores de k
1	140.7	2.1482941	10	2.036
2	131.7	2.11958577	11	2.088
3	118.4	2.0733517	12	2.134
4	103.8	2.01619735	13	2.175
5	103.5	2.01494035	14	2.213
6	100.6	2.002598	15	2.247
7	99.3	1.996949	16	2.279
8	96.7	1.985426	17	2.309
9	91.8	1.96284268	18	2.335
10	87.9	1.94398888	19	2.361
11	87.6	1.94250411	20	2.385
12	87.2	1.94051648	21	2.408
13	82.8	1.91803034	22	2.429
14	82	1.91381385	23	2.448
15	81.6	1.91169016	24	2.467
16	81.4	1.9106244	25	2.486
17	80.7	1.90687353	26	2.502
18	77.5	1.8893017	27	2.519
19	77.2	1.8876173	28	2.534
20	77.2	1.8876173	29	2.549
21	76.7	1.88479536	30	2.563
22	71.5	1.85430604	31	2.577
23	70.6	1.8488047	32	2.591
24	70.2	1.84633711	33	2.604
25	67.1	1.82672252	34	2.616
26	67	1.8260748	35	2.628
27	64	1.80617997	36	2.639
28	62.2	1.79379038	37	2.65
29	61	1.78532984	38	2.661
30	54.6	1.73719264	39	2.671
31	54.3	1.73479983	40	2.682
32	52.5	1.7201593	41	2.692
Media	83.17	1.91	42	2.7
Des Estan	20.99	0.10	43	2.71
			44	2.719
			45	2.727
			46	2.736
			47	2.744
			48	2.753
			49	2.76
			50	2.768
			55	2.804
			60	2.837
			65	2.866
			70	2.893
			75	2.917
			80	2.94
			85	2.961
			90	2.981
			95	3
			100	3.017
			110	3.049
			120	3.078
			130	3.104
			140	3.129

$y_H = 2.17903643$	$P_H = 151.020682$
$y_L = 1.63579209$	$P_L = 43.2306819$

<i>No se descarta valor</i>	
-----------------------------	--

8.11. CURVAS IDF

Las curvas intensidad, duración y frecuencia se determinaron utilizando la metodología propuesta por el manual de drenaje para carreteras, Colombia 2009, que rige la intensidad para cada una de las regiones que conforman al país.

Tabla 17. Formula de intensidad a utilizar para curvas IDF

		$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{(t/60)^c}$		[2.103]
Donde:	i:	Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).		
	T:	Periodo de retorno, en años.		
	M:	Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual		
	t:	Duración de la lluvia, en minutos (min).		
	a, b, c, d:	Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados como se presenta en la Figura 2.13, y sus valores se presentan en la Tabla 2.12.		
<p>Tabla 2.12. - Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia</p>				
REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

a =	24.85
b =	0.22
c =	0.50
d =	0.10
M =	89.7

Tabla 18. Datos correspondientes para generar curvas IDF Estación Las Flores

CURVAS I-D-F ESTACIÓN LAS FLORES						
TIEMPO (Min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	25	50	100
10	111.15	135.97	158.37	193.74	225.66	262.83
20	78.59	96.15	111.99	137.00	159.57	185.85
30	64.17	78.50	91.44	111.86	130.28	151.75
40	55.57	67.99	79.19	96.87	112.83	131.42
50	49.71	60.81	70.83	86.64	100.92	117.54
60	45.38	55.51	64.66	79.10	92.13	107.30
70	42.01	51.39	59.86	73.23	85.29	99.34
80	39.30	48.07	55.99	68.50	79.78	92.93
90	37.05	45.32	52.79	64.58	75.22	87.61
100	35.15	43.00	50.08	61.27	71.36	83.12
110	33.51	41.00	47.75	58.42	68.04	79.25
120	32.09	39.25	45.72	55.93	65.14	75.87
130	30.83	37.71	43.92	53.73	62.59	72.90
140	29.71	36.34	42.33	51.78	60.31	70.25
150	28.70	35.11	40.89	50.02	58.27	67.86
160	27.79	33.99	39.59	48.44	56.42	65.71
170	26.96	32.98	38.41	46.99	54.73	63.75
180	26.20	32.05	37.33	45.67	53.19	61.95
190	25.50	31.19	36.33	44.45	51.77	60.30
200	24.85	30.40	35.41	43.32	50.46	58.77
210	24.25	29.67	34.56	42.28	49.24	57.36
220	23.70	28.99	33.77	41.31	48.11	56.04
230	23.18	28.35	33.02	40.40	47.05	54.80
240	22.69	27.76	32.33	39.55	46.06	53.65
250	22.23	27.19	31.67	38.75	45.13	52.57
260	21.80	26.67	31.06	38.00	44.26	51.55

a =	24.85
b =	0.22
c =	0.50
d =	0.10
M =	83.17

Tabla 19. Datos correspondientes para generar curvas IDF Estación Ernesto Cortissoz

CURVAS I-D-F ESTACIÓN LAS FLORES						
TIEMPO (Min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	25	50	100
10	110.31	134.95	157.18	192.29	223.96	260.85
20	78.00	95.42	111.14	135.97	158.36	184.45
30	63.69	77.91	90.75	111.02	129.30	150.60
40	55.16	67.47	78.59	96.14	111.98	130.43
50	49.33	60.35	70.29	85.99	100.16	116.66
60	45.03	55.09	64.17	78.50	91.43	106.49
70	41.69	51.01	59.41	72.68	84.65	98.59
80	39.00	47.71	55.57	67.98	79.18	92.23
90	36.77	44.98	52.39	64.10	74.65	86.95
100	34.88	42.67	49.70	60.81	70.82	82.49
110	33.26	40.69	47.39	57.98	67.53	78.65
120	31.84	38.96	45.37	55.51	64.65	75.30
130	30.60	37.43	43.59	53.33	62.12	72.35
140	29.48	36.07	42.01	51.39	59.86	69.72
150	28.48	34.84	40.58	49.65	57.83	67.35
160	27.58	33.74	39.30	48.07	55.99	65.21
170	26.75	32.73	38.12	46.64	54.32	63.27
180	26.00	31.81	37.05	45.32	52.79	61.48
190	25.31	30.96	36.06	44.11	51.38	59.84
200	24.67	30.18	35.15	43.00	50.08	58.33
210	24.07	29.45	34.30	41.96	48.87	56.92
220	23.52	28.77	33.51	41.00	47.75	55.61
230	23.00	28.14	32.77	40.09	46.70	54.39
240	22.52	27.55	32.08	39.25	45.72	53.25
250	22.06	26.99	31.44	38.46	44.79	52.17
260	21.63	26.47	30.83	37.71	43.92	51.16

Figura 41. Curvas IDF Estación Las Flores

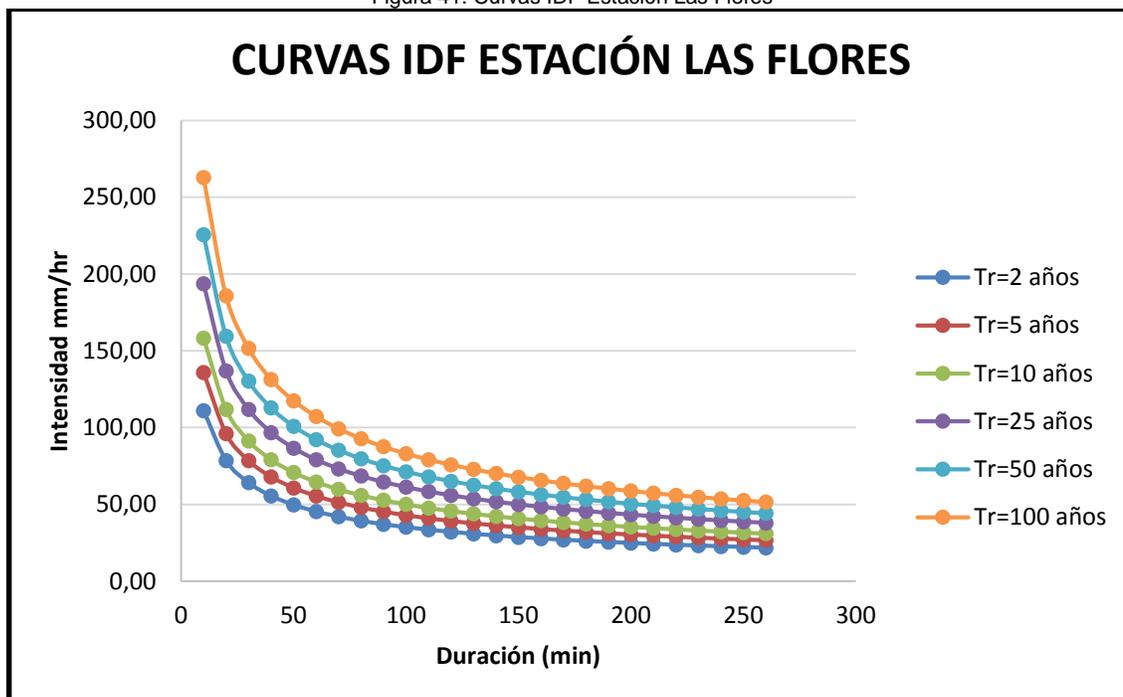
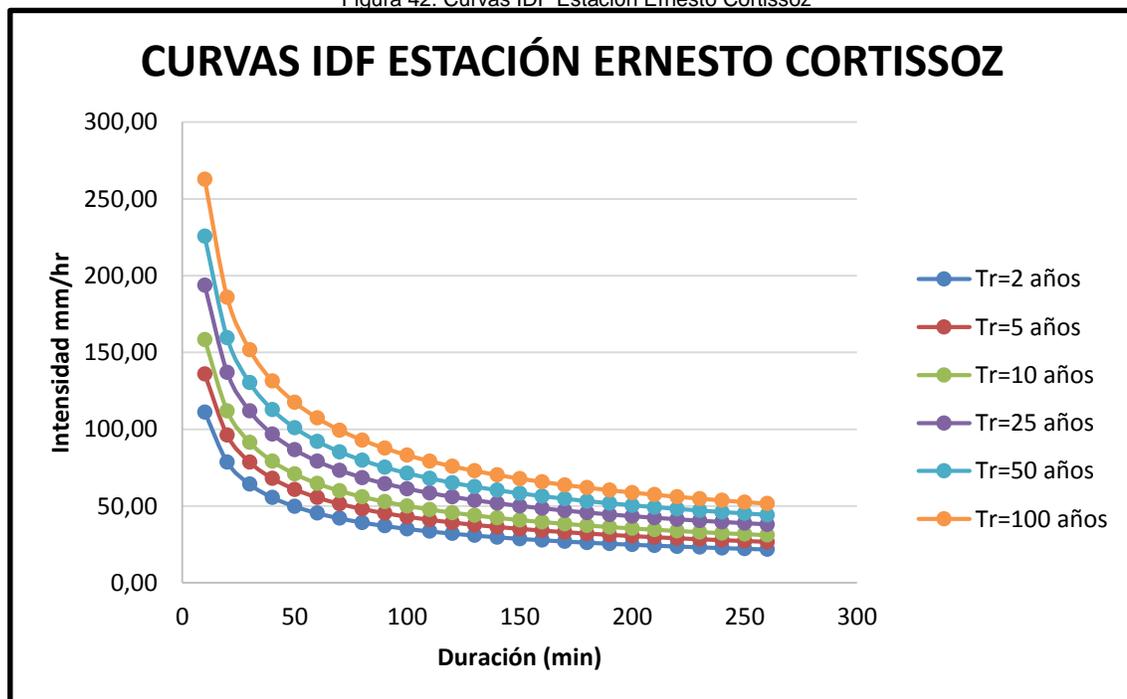


Figura 42. Curvas IDF Estación Ernesto Cortissoz



8.12. CONSTRUCCIÓN DE HIETOGRAMAS

Los hietogramas definen la cantidad de lluvia caída durante cierto tiempo representados en gráficos, se utilizó la metodología de bloques alternos para cada uno de los siguientes periodos de retornos, a continuación se muestra la tabulación y gráficos de cada uno de los hietogramas de las estaciones de estudio. Cabe recordar que de aquí en adelante todo lo relacionado a las precipitaciones se hará con las mencionadas en la información hidroclimática de la estación las flores por razones explicada anteriormente.

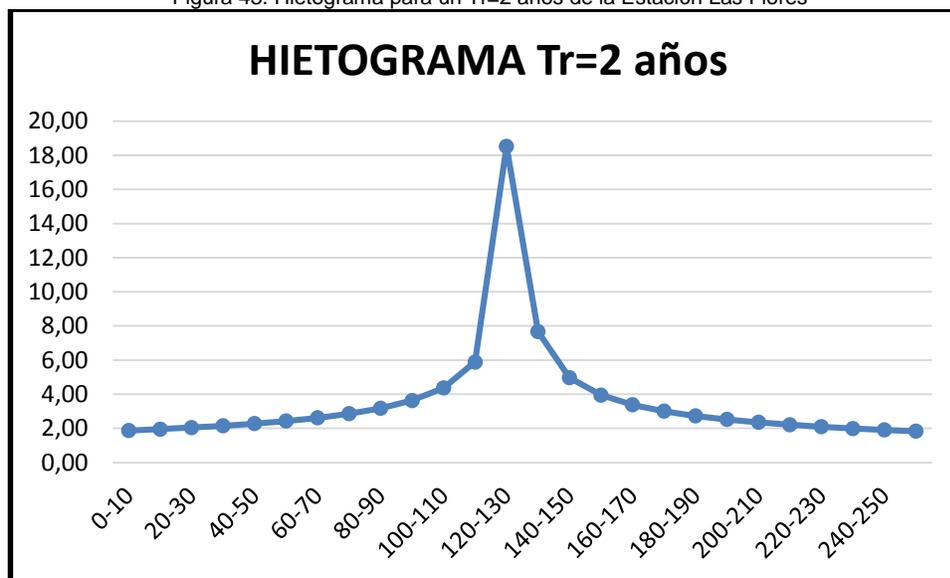
8.12.1. CONSTRUCCIÓN DE HIETOGRAMAS ESTACIÓN LAS FLORES.

Los hietogramas representados se realizaron con la información de las precipitaciones y por su puesto de curvas IDF de esta estación pluviométrica. En la tabla 20 se representa los cálculos realizados para la construcción del hietograma correspondiente a un periodo de recurrencia de 2 años y la figura 43 está la conformación del hietograma en forma de gráfica, con esta metodología se construyen el resto de hietogramas.

Tabla 20. Datos Correspondiente al Hietograma para un Tr=2 años Estación las Flores

Núm.	DURACIÓN (min)	DURACIÓN (hr)	INTESIDAD (mm/hr)	BLOQUES ALTERNOS Tr=2 Años		TIEMPO (min)	PRECIPITACIÓN (mm)	Pac (mm)
				PRECIPITACIÓN ACUMULADA (mm)	PRECIPITACIÓN INCREMENTAL (mm)			
1	10	0.167	111.15	18.52	18.52	0-10	1.87	1.87
2	20	0.333	78.59	26.20	7.67	10--20	1.95	3.82
3	30	0.500	64.17	32.09	5.89	20-30	2.05	5.87
4	40	0.667	55.57	37.05	4.96	30-40	2.15	8.02
5	50	0.833	49.71	41.42	4.37	40-50	2.28	10.30
6	60	1.000	45.38	45.38	3.95	50-60	2.43	12.74
7	70	1.167	42.01	49.01	3.64	60-70	2.62	15.36
8	80	1.333	39.30	52.40	3.38	70-80	2.86	18.22
9	90	1.500	37.05	55.57	3.18	80-90	3.18	21.40
10	100	1.667	35.15	58.58	3.01	90-100	3.64	25.03
11	110	1.833	33.51	61.44	2.86	100-110	4.37	29.40
12	120	2.000	32.09	64.17	2.73	110-120	5.89	35.29
13	130	2.167	30.83	66.79	2.62	120-130	18.52	53.82
14	140	2.333	29.71	69.31	2.52	130-140	7.67	61.49
15	150	2.500	28.70	71.75	2.43	140-150	4.96	66.45
16	160	2.667	27.79	74.10	2.35	150-160	3.95	70.41
17	170	2.833	26.96	76.38	2.28	160-170	3.38	73.79
18	180	3.000	26.20	78.59	2.21	170-180	3.01	76.80
19	190	3.167	25.50	80.75	2.15	180-190	2.73	79.53
20	200	3.333	24.85	82.85	2.10	190-200	2.52	82.05
21	210	3.500	24.25	84.89	2.05	200-210	2.35	84.40
22	220	3.667	23.70	86.89	2.00	210-220	2.21	86.62
23	230	3.833	23.18	88.84	1.95	220-230	2.10	88.72
24	240	4.000	22.69	90.75	1.91	230-240	2.00	90.71
25	250	4.167	22.23	92.62	1.87	240-250	1.91	92.62
26	260	4.333	21.80	94.46	1.83	250-260	1.83	94.46

Figura 43. Hietograma para un Tr=2 años de la Estación Las Flores



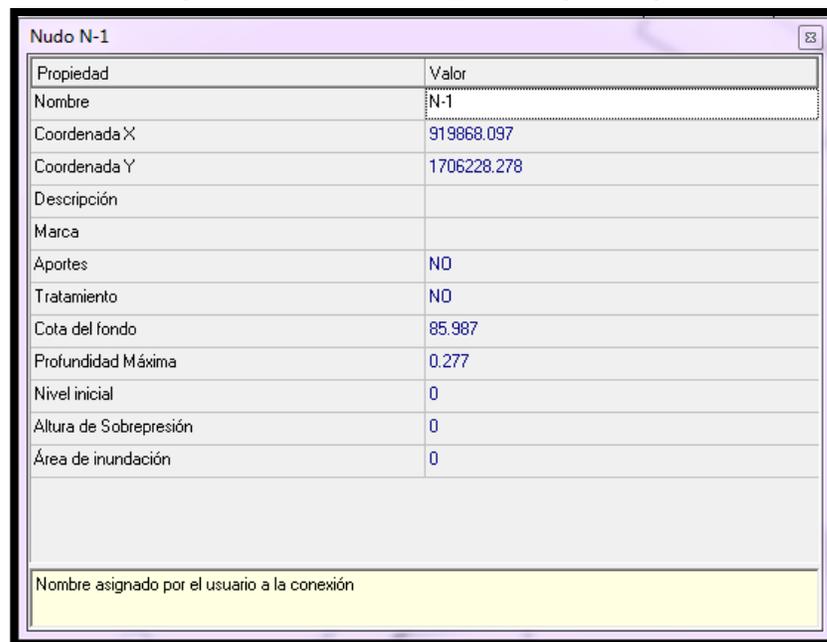
8.13. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Una vez procesada la información preliminar se lleva a cabo la construcción del modelo en swmm para su evaluación, hay que seguir una serie de pasos lógicos para ir dando cuerpo al patrón de prueba y se desarrollan en el transcurso de este ítem.

8.13.1. INTRODUCCIÓN DE NUDOS

La información de los nodos se suministró de la topografía que se le hizo al cauce del arroyo obteniendo en cada intercepción una coordenada X y Y. y la cota de fondo y la profundidad máxima como la diferencia entre la máxima menos la mínima de las cotas de las secciones transversales. Aquí se denotan las secciones que se tomaron a principio.

Figura 44. Nudo inicial del Arroyo de la Segunda Brigada



Propiedad	Valor
Nombre	N-1
Coordenada X	919868.097
Coordenada Y	1706228.278
Descripción	
Marca	
Aportes	NO
Tratamiento	NO
Cota del fondo	85.987
Profundidad Máxima	0.277
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0
Nombre asignado por el usuario a la conexión	

8.13.2. SECCIONES TRANSVERSALES

Las secciones mostradas acá también fueron tomadas como las de cambio de dirección y se detallan con mayor visualización en el visor del SWMM.

Figura 45. Datos correspondientes a la primera sección transversal

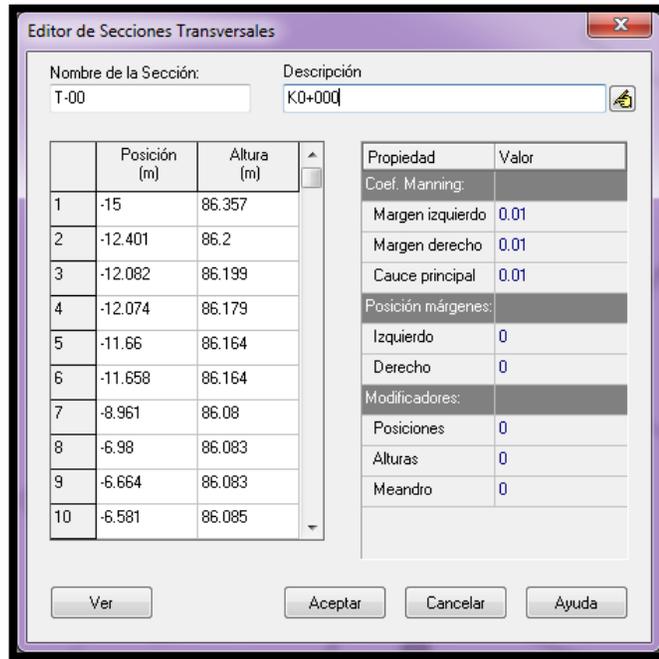
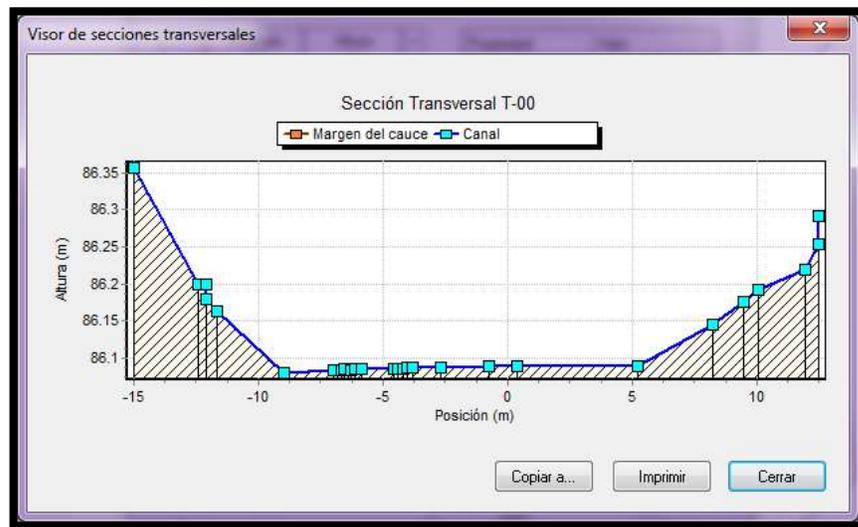


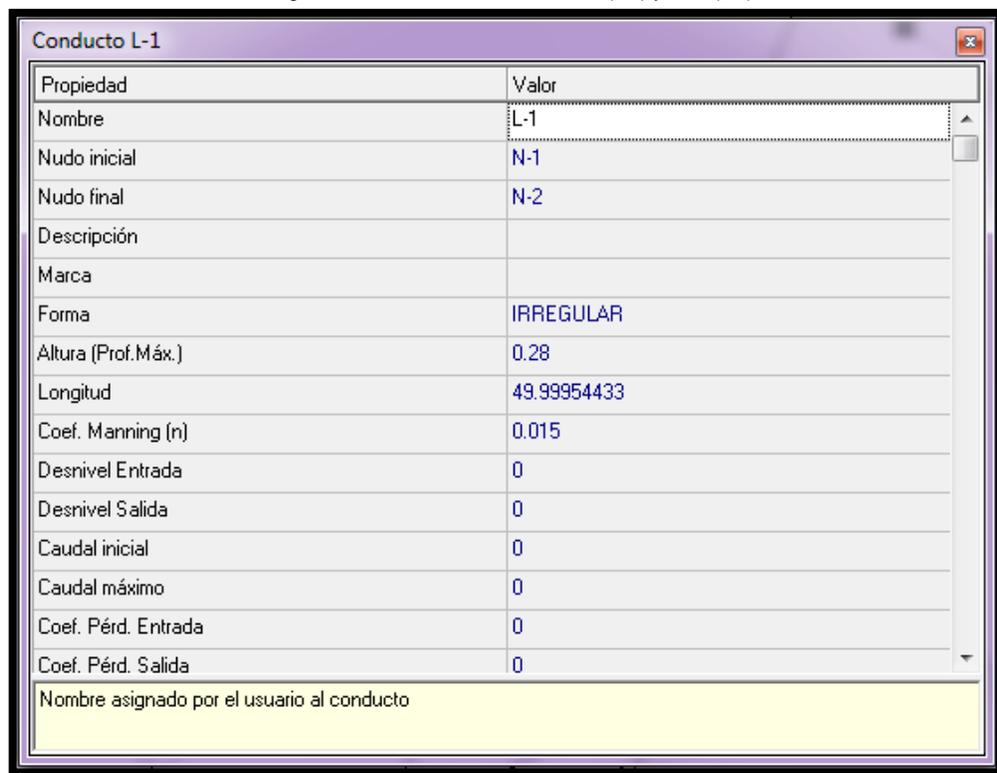
Figura 46. Sección transversal representada en SWMM



8.13.3. UNIÓN DE NODOS POR LINEAS

Cuando ya se ha conseguido finalizar la parte de introducción de secciones transversales, el paso a seguir es unir las para que queden funcionando como un canal de aguas pluviales. En la figura 47 se muestran los valores correspondientes a ingresar para tener en cuenta este aspecto.

Figura 47. Unión entre una sección (N1) y otra (N2)



Propiedad	Valor
Nombre	L-1
Nudo inicial	N-1
Nudo final	N-2
Descripción	
Marca	
Forma	IRREGULAR
Altura (Prof.Máx.)	0.28
Longitud	49.99954433
Coef. Manning (n)	0.015
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0

Nombre asignado por el usuario al conducto

8.13.4. SERIES TEMPORALES

Los hietogramas construidos anteriormente en la tabla 20 y figura 43 son introducidos en el software de tal manera como se construyeron es decir para sus respectivos periodos de retorno.

Figura 48. Valores del Hietograma introducidos en swmm

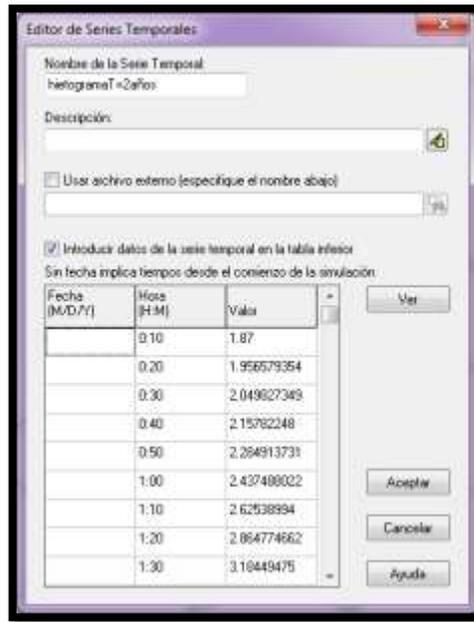
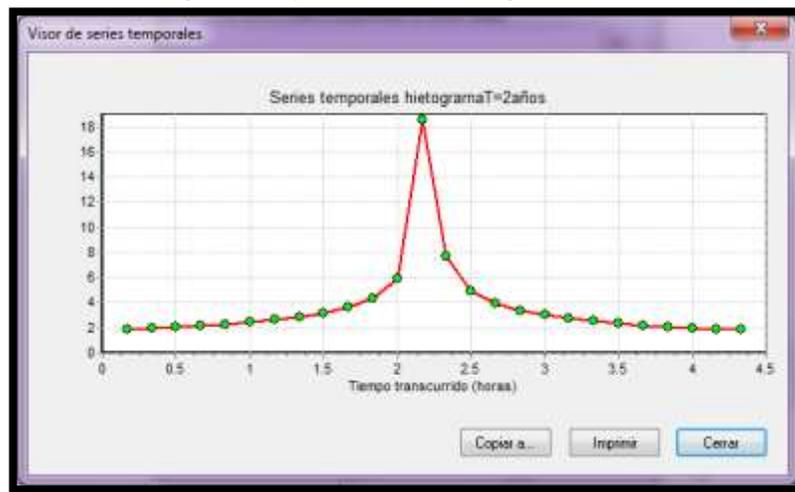


Figura 49. Representación del Hietograma en swmm



8.13.5. INTRODUCCIÓN DE LA LLUVIA

Cuando se ha finalizado de construir los histogramas el paso a seguir es integrar la lluvia al modelo creando pluviómetros que representen los eventos de precipitaciones dentro del software, un pluviómetro por cada periodo de retorno así en su orden el número uno corresponde a un periodo de retorno de 2 años y así sucesivamente el número 2 corresponde a un tiempo de recurrencia de 5 años hasta completarlos todos.

Figura 50. Pluviómetro 1 corresponde al $T_r=2$ AÑOS

Propiedad	Valor
Nombre	pluviómetro1
Coordenada X	921079.388
Coordenada Y	1706453.661
Descripción	
Marca	
Formato de lluvia	VOLUME
Intervalo de lluvia	0.10
Factor de corrección de nevadas	1.0
Origen de datos	TIMESERIES
SERIE TEMPORAL:	
- Nombre de la Serie	HistogramaT=2años
ARCHIVO:	
- Nombre del Archivo	*
- ID Estación	*
- Unidades de lluvia	MM

Nombre asignado por el usuario al pluviómetro:

Figura 51. Pluviómetro 2 corresponde al Tr=5 AÑOS

Propiedad	Valor
Nombre	pluviometro2
Coordenada X	821076.900
Coordenada Y	1706233.560
Descripción	
Marca	
Formato de lluvia	VOLUME
Intervalo de lluvia	0.10
Factor de corrección de nevadas	1.0
Órden de datos	TIMESERIES
SERIE TEMPORAL:	
- Nombre de la Serie	histogramaT=5años
ARCHIVO:	
- Nombre del Fichero	*
- ID Estación	*
- Unidades de lluvia	MM

Intervalo de registro de datos de lluvia

Figura 52. Pluviómetro 3 corresponde al Tr=10 AÑOS

Propiedad	Valor
Nombre	pluviometro3
Coordenada X	821218.726
Coordenada Y	1706253.512
Descripción	
Marca	
Formato de lluvia	VOLUME
Intervalo de lluvia	0.10
Factor de corrección de nevadas	1.0
Órden de datos	TIMESERIES
SERIE TEMPORAL:	
- Nombre de la Serie	histogramaT=10años
ARCHIVO:	
- Nombre del Fichero	*
- ID Estación	*
- Unidades de lluvia	MM

Intervalo de registro de datos de lluvia

Figura 53. Pluviómetro 4 corresponde al Tr=25 AÑOS

Propiedad	Valor
Nombre	pluviometro4
Coordenada X	921214.372
Coordenada Y	1706192.402
Descripción	
Marca	
Formato de lluvia	VOLUME
Intervalo de lluvia	0.10
Factor de corrección de nevadas	1.0
Origen de datos	TIMESERIES
SERIE TEMPORAL	
- Nombre de la Serie	hetogramaT=25años
ARCHIVO	
- Nombre del Archivo	*
- ID Estación	*
- Unidades de lluvia	MM

Intervalo de registro de datos de lluvia

Figura 54. Pluviómetro 5 corresponde al Tr=50 AÑOS

Propiedad	Valor
Nombre	pluviometro5
Coordenada X	921070.679
Coordenada Y	1706079.109
Descripción	
Marca	
Formato de lluvia	VOLUME
Intervalo de lluvia	0.10
Factor de corrección de nevadas	1.0
Origen de datos	TIMESERIES
SERIE TEMPORAL	
- Nombre de la Serie	hetogramaT=50años
ARCHIVO	
- Nombre del Archivo	*
- ID Estación	*
- Unidades de lluvia	MM

Intervalo de registro de datos de lluvia

Figura 55. Pluviómetro 6 corresponde al Tr=100 AÑOS

Propiedad	Valor
Nombre	pluviómetro6
Coordenada X	-921210.017
Coordenada Y	1705083.544
Descripción	
Marca	
Formato de lluvia	VOLVIME
Intervalo de lluvia	0.10
Factor de corrección de nevadas	1.0
Orden de datos	TIMESERIES
SERIE TEMPORAL	
- Nombre de la Serie	histogramaT=100años
ARCHIVO	
- Nombre del Fichero	*
- ID Estación	*
- Unidades de lluvia	MM

Intervalo de registro de datos de lluvia

8.13.6. CONSTRUCCIÓN DE SUBCUENCAS

Cuando todo el proceso de información topográfica fue introducido en el swmm se procede a construir las subcuencas con parámetros obtenidos por la misma. En la ventana de subcuencas aparece un parámetro muy importante el porcentaje de áreas impermeables, dentro de las limitaciones esta explicado que fue un problema al cual se le dio solución, dentro de este espacio se explicará el procedimiento que se realizó para obtener dicho valor.

Como se necesitaba saber el porcentaje de áreas impermeables por subcuencas y medirlos en campo sería muy tedioso hacerlo casa por casa o lote por lote por ello se decide consultar al ente que regula la disponibilidad de predios y lo que ocurre

en torno a ellos, al IGAC (instituto geográfico Agustín Codazzi), ellos en su página web cuentan con un visor donde se encuentra alojado un mapa de catastro que detalla la información de áreas tanto de lote como la construida, lo que se decide hacer es tomar varios polígonos en distintas posiciones de las respectivas subcuencas para ponderar este valor por lo extenso de este proceso, dentro de estos se tomaría casa por casa para obtener dicha información. El procedimiento matemático para resolver esta incógnita se describe a continuación, como es conocida el área de los polígonos por el plano urbanístico que se tiene de la ciudad de Barranquilla y la información de áreas de lotes sacada del sitio web, la diferencia de los dos daría como resultado el área de calles este sumado al total del área construida es el total de áreas impermeables, pero como se necesita el valor de cuanto es con relación al área del polígono simplemente se divide el área dura entre el área de la figura de estudio y da como resultado el valor correspondiente al porcentaje de áreas duras en la tabla 21, se observan los valores para las distintas subcuencas.

Tabla 21. Valores de áreas impermeables

PORCENTAJE DE ÁREAS IMPERMEABLES	
SUBCUENCAS	PORCENTAJE
SUBCUENCA 1	76%
SUBCUENCA 2	76%
SUBCUENCA 3	71%

8.13.6.1. DATOS DE SUBCUENCAS PARA INGRESAR AL MODELO

Con los datos anteriormente mencionados y los que se presentan en la tabla 22 se procede a darle forma a las subcuencas y poder modelar el arroyo en el software, todo lo que se ha hecho con anticipación fue supervisado por los docentes asesores para una mejor realización y confiabilidad. Las figuras 56, 57 y 58 son las subcuencas ya construidas con cada una de sus parámetros para pasar al siguiente capítulo.

Tabla 22. Datos a ingresar a SWMM

DATOS PARA SWMM			
AREA (Ha)	Lc (m)	S (%)	ANCHO (m)
130	937.08	1.81	563.43
162	1387.9	1.8	675.13
246	3368.31	2.19	796.63

Figura 56. Características Subcuenca número 1

Cuenca subcuenca1	
Propiedad	Valor
Nombre	subcuenca1
Coordenada X	920245.224
Coordenada Y	1706882.251
Descripción	
Marca	
Pluviómetro	pluviometro1
Descarga	N-1
Área	130
Ancho	563.43
Pendiente (%)	1.81
Área impermeable (%)	76
Coef. n (Impermeable)	0.015
Coef. n (Permeable)	0.1
Alm. Dep. (Impermeable)	0.05
Alm. Dep. (Permeable)	0.05
(%) Área Imperm. sin Alm.Dep.	25
Flujo entre subáreas	OUTLET
(%) escorrentía transportada	100
Infiltración	GREEN_AMPT
Aguas Subterráneas	NO
Capa de nieve	
Usos del suelo	0
Acumulación inicial	NONE
Longitud Cauce	937.08
Nombre asignado por el usuario a la cuenca	

Figura 57. Características Subcuenca número 2

Cuenca subcuenca2	
Propiedad	Valor
Nombre	subcuenca2
Coordenada X	921741.245
Coordenada Y	1706783.138
Descripción	
Marca	
Pluviómetro	pluviometro1
Descarga	N-34
Área	162
Ancho	675.13
Pendiente (%)	1.8
Área impermeable (%)	76
Coef. n (Impermeable)	0.015
Coef. n (Permeable)	0.04
Alm. Dep. (Impermeable)	0.05
Alm. Dep. (Permeable)	0.05
(%) Área Imperm. sin Alm.Dep.	25
Flujo entre subáreas	OUTLET
(%) escorrentía transportada	100
Infiltración	GREEN_AMPT
Aguas Subterráneas	NO
Capa de nieve	
Usos del suelo	0
Acumulación inicial	NONE
Longitud Cauce	1387.9
Nombre asignado por el usuario a la cuenca	

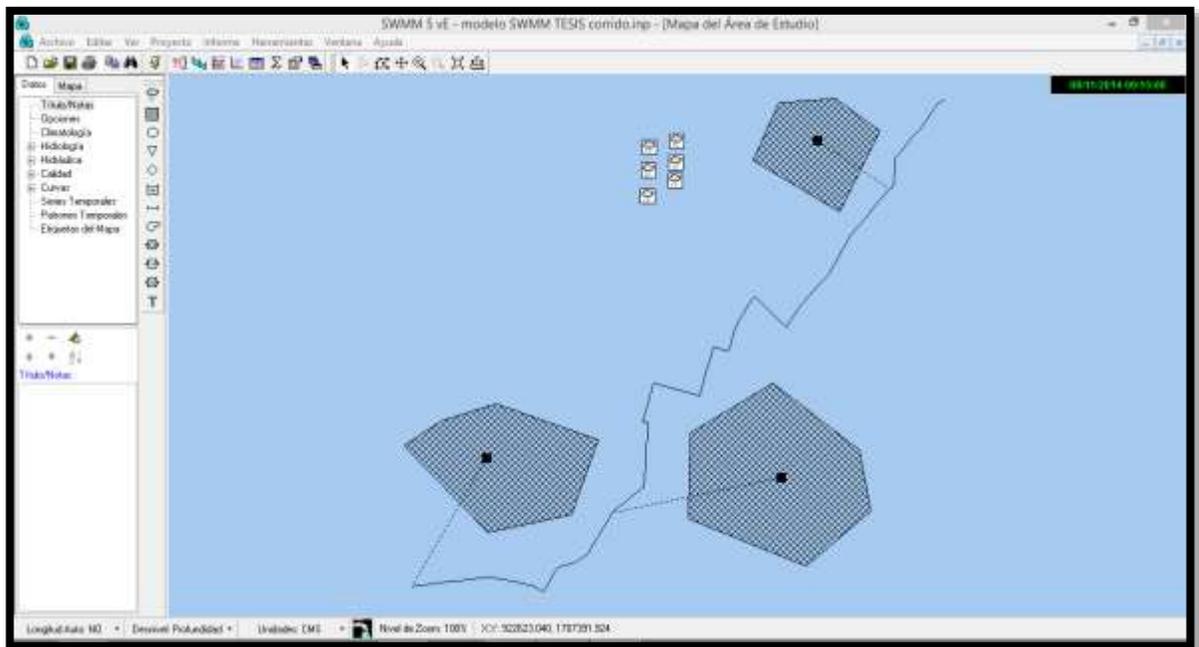
Figura 58. Características Subcuenca número 3

Cuenca subcuenca3	
Propiedad	Valor
Nombre	subcuenca3
Coordenada X	921924.126
Coordenada Y	1708489.742
Descripción	
Marca	
Pluviómetro	pluviometro1
Descarga	N-105
Área	246
Ancho	796.63
Pendiente (%)	2.19
Área impermeable (%)	71
Coef. n (Impermeable)	0.015
Coef. n (Permeable)	0.04
Alm. Dep. (Impermeable)	0.05
Alm. Dep. (Permeable)	0.05
(%) Área Imperm. sin Alm.Dep.	25
Flujo entre subáreas	OUTLET
(%) escorrentía transportada	100
Infiltración	GREEN_AMPT
Aguas Subterráneas	NO
Capa de nieve	
Usos del suelo	0
Acumulación inicial	NONE
Longitud Cauce	3368
Nombre asignado por el usuario a la cuenca	

8.13.7. PRESENTACIÓN DEL ARROYO CON TODOS SUS COMPONENTES EN EL MODELO.

Se presenta la parte final de la construcción del modelo con todas sus figuras y demás, las tres subcuencas unidas en los nodos donde comienzan a hacer sus respectivos aportes, el cauce con todas sus características y los pluviómetros ubicados en distintas zonas, hay que resaltar que por efectos de visión los tamaños de las cuencas solo se generalizan como imágenes, pues es sabido que tiene características diferentes es decir que una sea más grande que la otra en visor no quiere decir que lo sea, solo las características ingresadas son las que definen cada una dentro del software.

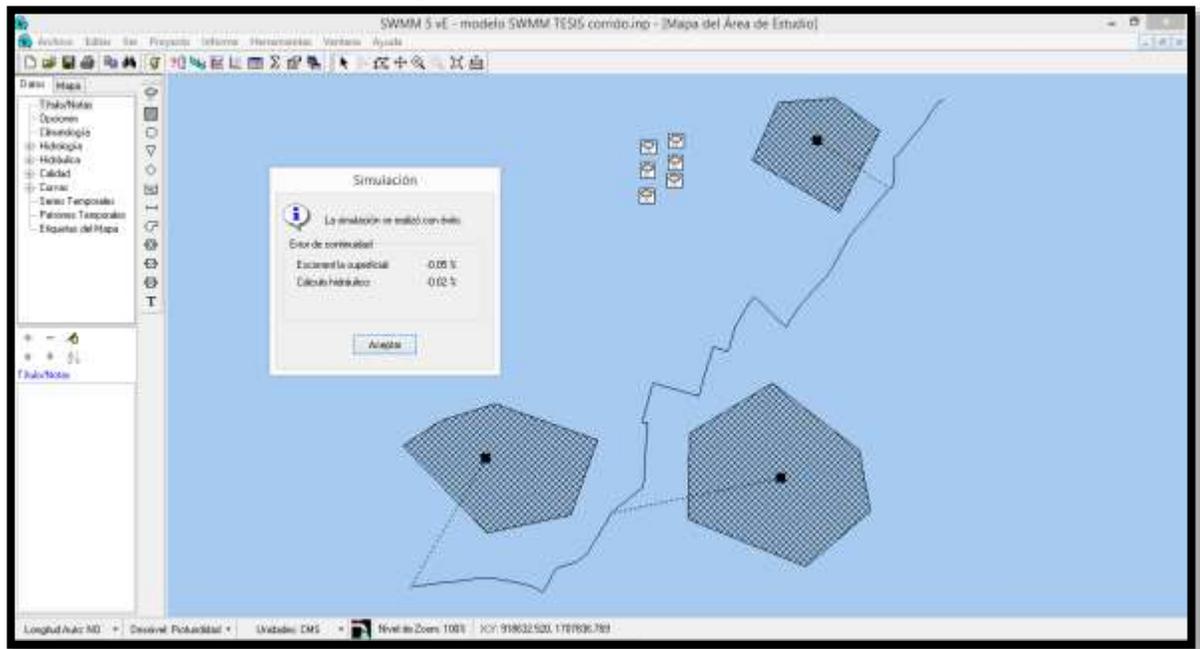
Figura 59. Estructura del Arroyo con sus respectivas Características



8.13.8. CORRIDA DEL MODELO

Se concluye la modelación con la corrida con éxito esperando que todo ingresado sea confiable y que arroje los resultados esperados, una simulación exitosa no quiere decir que todo este de la mejor manera para eso existe el capítulo posterior a este de análisis de los resultados y debatir si lo encontrado tiene o no pertinencia.

Figura 60. Corrida del modelo con Éxito

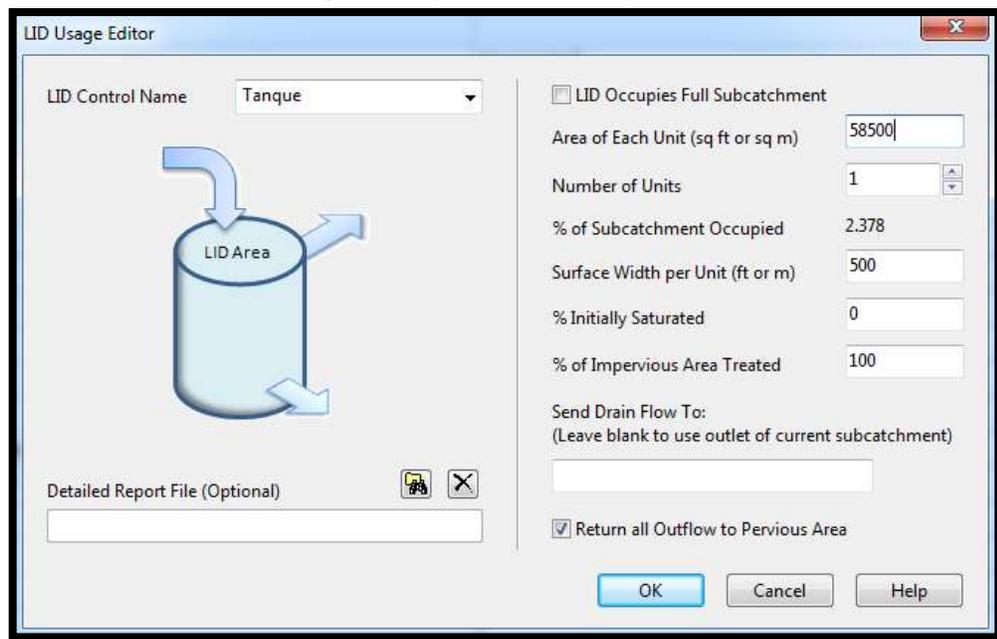


Cuando se hizo la respectiva modelación para cada uno de los periodos de retorno, el software arrojo que para los tiempos de 50 y 100 años el arroyo se desborda, por lo que se opta colocar tanques que trabajen de manera virtual, es decir que almacenen el agua durante cierto tiempo y después la descargasen al

cauce, es de tener en cuenta que el EPA SWMM no modela inundaciones y es lo que eventualmente para esos periodos se está presentando.

Para eso lo que se hace es calcular el volumen que se está perdiendo y se dimensiona el tanque que sea capaz de retener el agua que se está perdiendo durante el evento de precipitación, en la figura 61 se muestra la estructuración de un tanque ubicado para el $T_r = 50$ años en la subcuenca #3, con sus respectivas dimensiones y parámetros.

Figura 61. Representación de tanque virtual



8.14. MONTAJE DEL MODELO EN HEC-RAS

El HEC-RAS es un software netamente hidráulico, su utilización dentro de esta investigación se debe a que con él se puede observar dentro de su modelación el comportamiento de la lámina de agua en las diferentes secciones transversales que conforman a este arroyo y poder analizar desde el punto de vista de desbordamiento si esto se está presentando como lo arroja SWMM. Se podrá observar el procedimiento que se realizó para dicha prueba en el transcurso de este ítem.

8.14.1. SECCIONES TRANSVERSALES

Al igual que con el EPA SWMM deben ingresarse las secciones transversales, indicando cual es la longitud en la bancada izquierda (LOB), el eje del canal (Channel) y la bancada derecha (ROB), para indicar la distancia a la cual estará la otra sección y por supuesto el n de Manning. Las figuras 62 y 63 muestran la información correspondiente y pertinente para poder modelar el arroyo en cuanto a la información topográfica.

Figura 62. Sección transversal correspondiente al k0+000 parte aguas arriba del arroyo

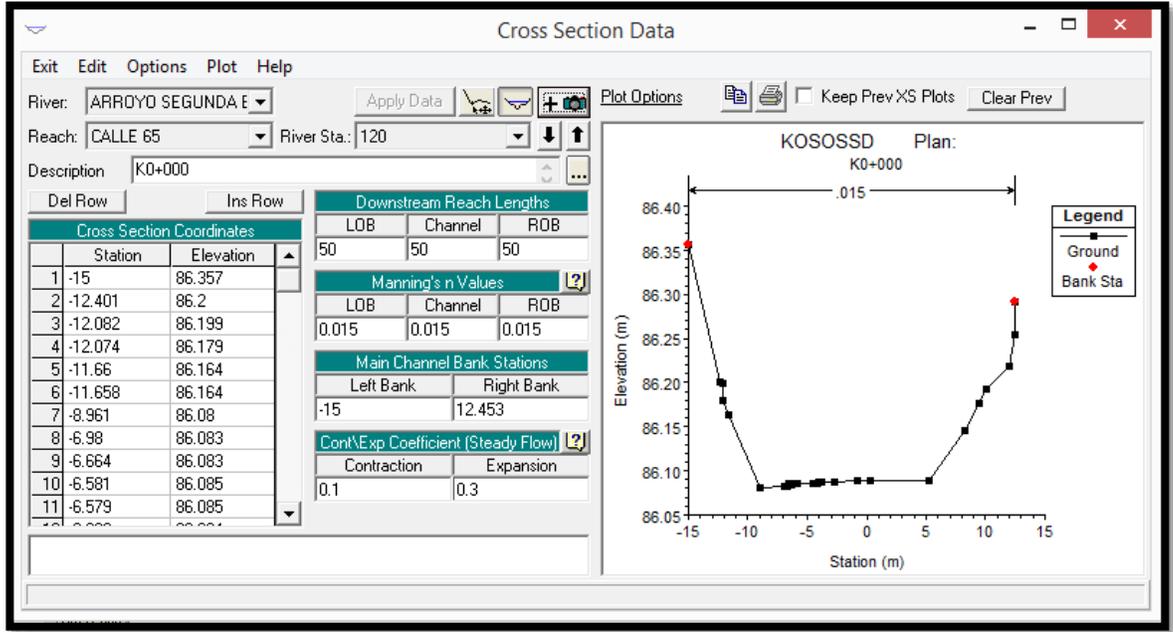
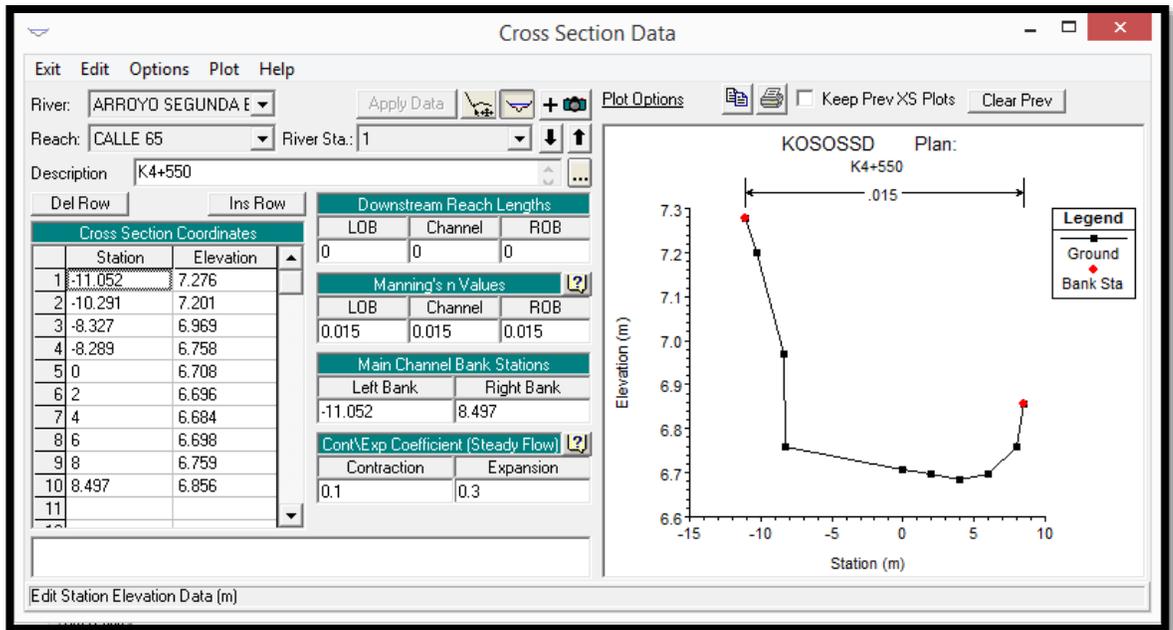


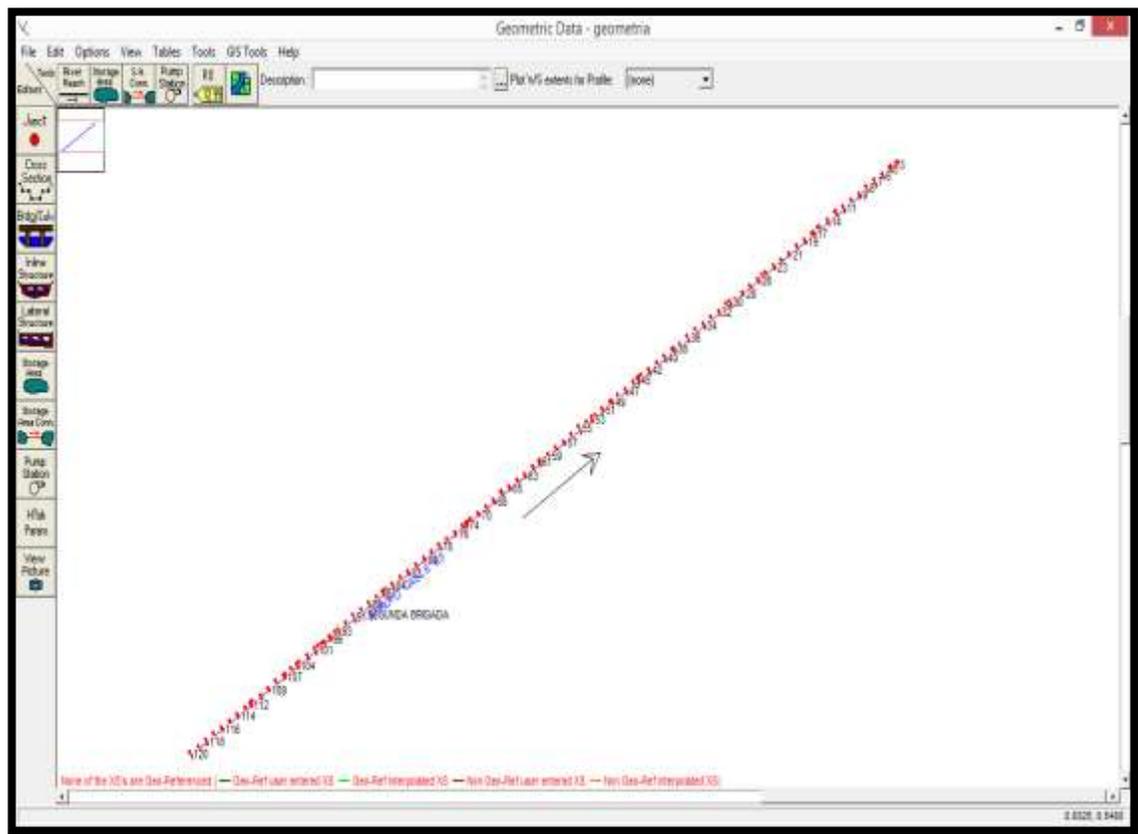
Figura 63. Sección transversal correspondiente al k4+550 par aguas abajo del arroyo



8.14.2. ESTRUCTURA COMPLETA DE LAS SECCIONES DEL ARROYO DENTRO DEL HEC-RAS.

Cuando ya se han logrado ingresar todas las secciones con sus parámetros y la dirección a favor de la pendiente, dentro del visor aparecerá esta imagen que simboliza al arroyo en su totalidad, el HEC-RAS dentro de su analogía asume que el cauce no es recto, este lo que hace es modelarlo con respecto a las condiciones naturales, que vienen amarradas a la topografía de la corriente.

Figura 64. Trazado de la Arroyo Representado en el HEC-RAS



8.14.3. INTRODUCCIÓN DE CAUDALES EN EL HEC-RAS

En la estimación que se hizo de SWMM se obtuvieron los caudales para los diferentes periodos de retorno que era el objetivo principal para introducirlos en el HEC-RAS, además se ingresó la pendiente con tirante normal aguas arriba y aguas abajo, las figuras 65 y 66 muestran lo anteriormente detallado.

Figura 65. Pendientes aguas arriba y aguas abajo con tirante normal

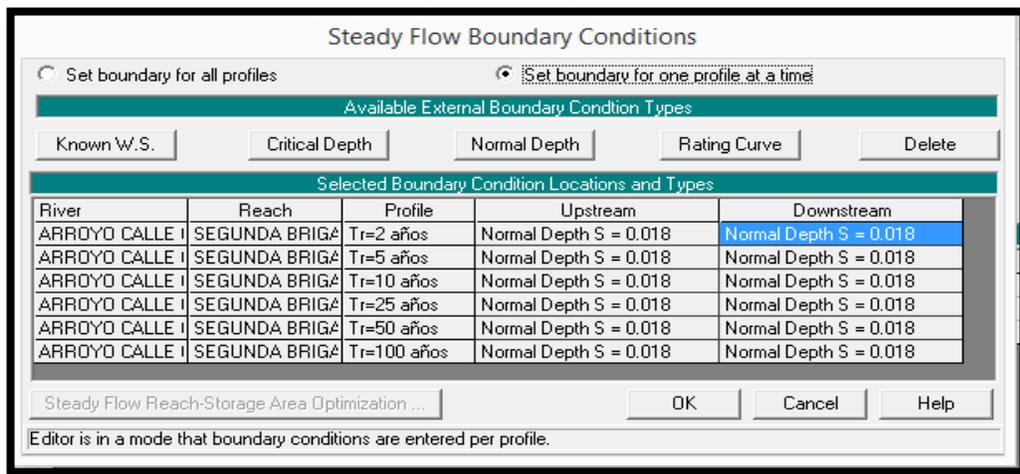
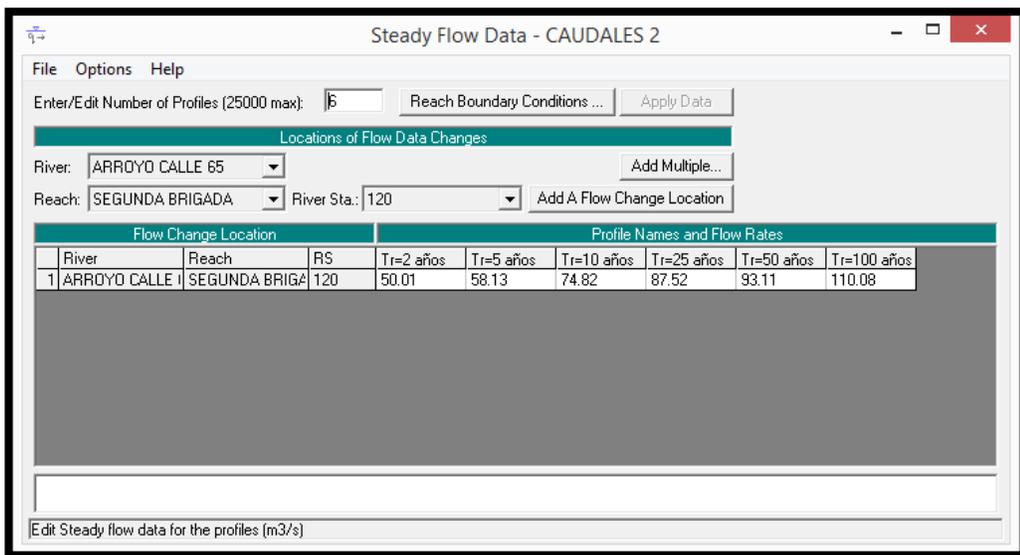


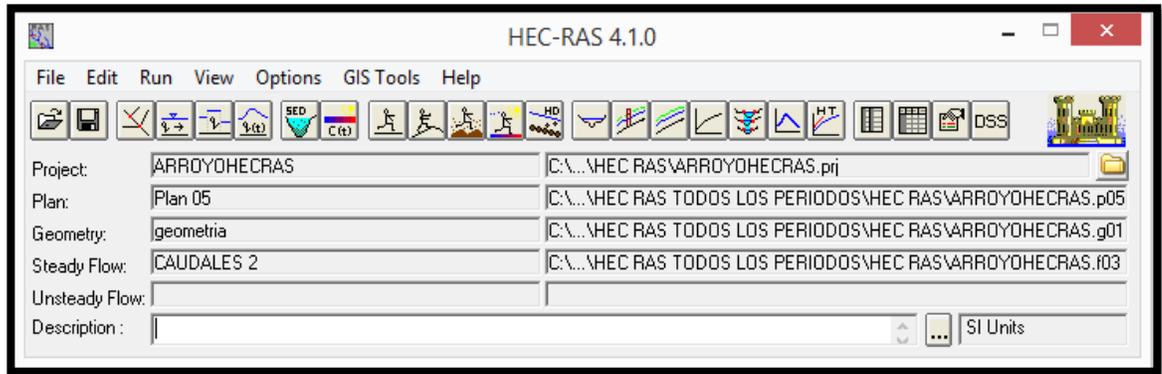
Figura 66. Caudales por subcuencas en los nudos donde inician estas



8.14.4. MODELACIÓN DEL ARROYO EN HEC-RAS

La ventana muestra todos los elementos que se necesitan para poder correr el programa.

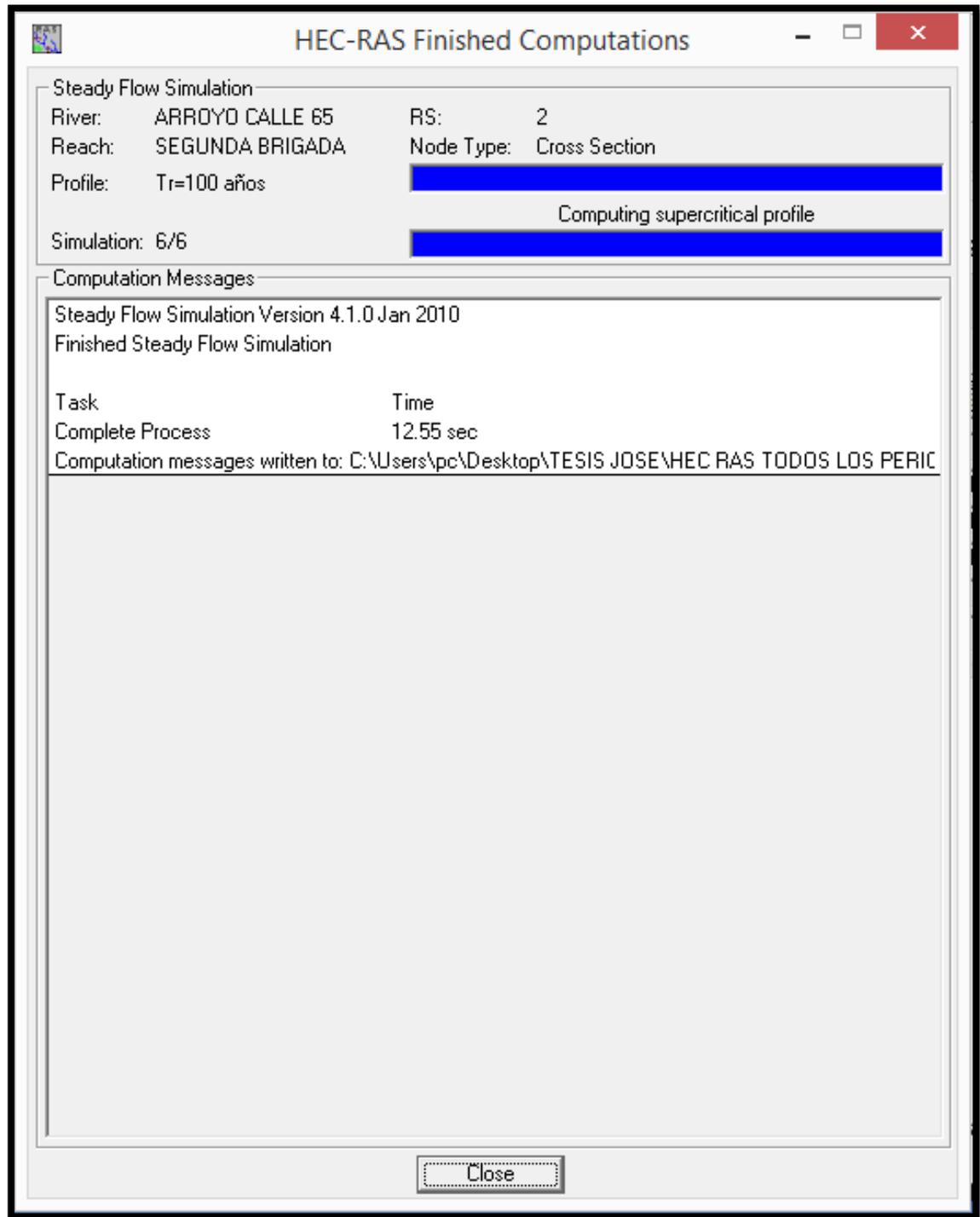
Figura 67. Ventana principal con los componentes para la modelación



8.14.5. SIMULACIÓN DEL ARROYO

Una vez hecho la inclusión de los parámetros dentro de HEC-RAS se hace la corrida del modelo indicando que el tipo de flujo que predomina es mixto puesto que a ciencia cierta no sabemos el tipo de flujo que predominara.

Figura 68. Simulación arrojada por HEC-RAS



9. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la investigación para su análisis, se mostrara la simulación realizada para los tiempos de retorno estudiados (ver figura 69, 70, 71, 72, 73 y 74). Dicha imagen muestra el flujo identificado con un color que representa un rango de valor correspondiente a los caudales que se están presentando durante dicha modelación, como es sabido que se estimaron caudales para los diferentes periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, se presenta además en la tabla 22 los resultados correspondientes a dichos tiempos de recurrencia y serán comparados con datos obtenidos de otra investigación y por consiguiente con una estimación que se hizo con base a la hidrología enseñada en las aulas que está regida por el manual de drenaje para carreteras INVIAS 2009.

Figura 69. Representación de los caudales para un periodo de retorno $Tr=2$ años

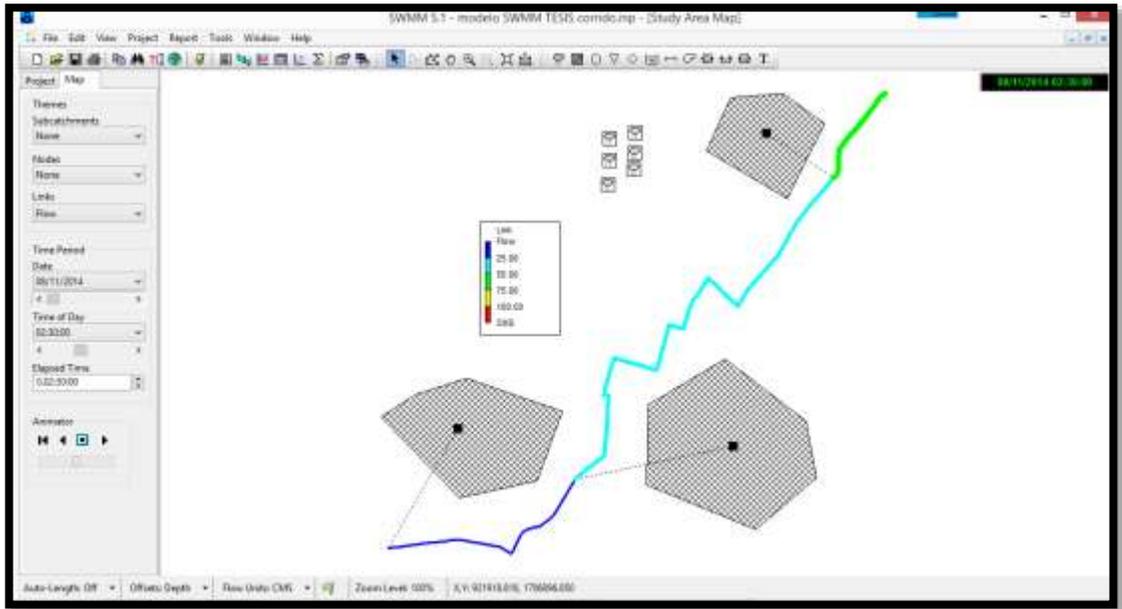


Figura 69-II. Representación de los caudales para un periodo de retorno $Tr=2$ años

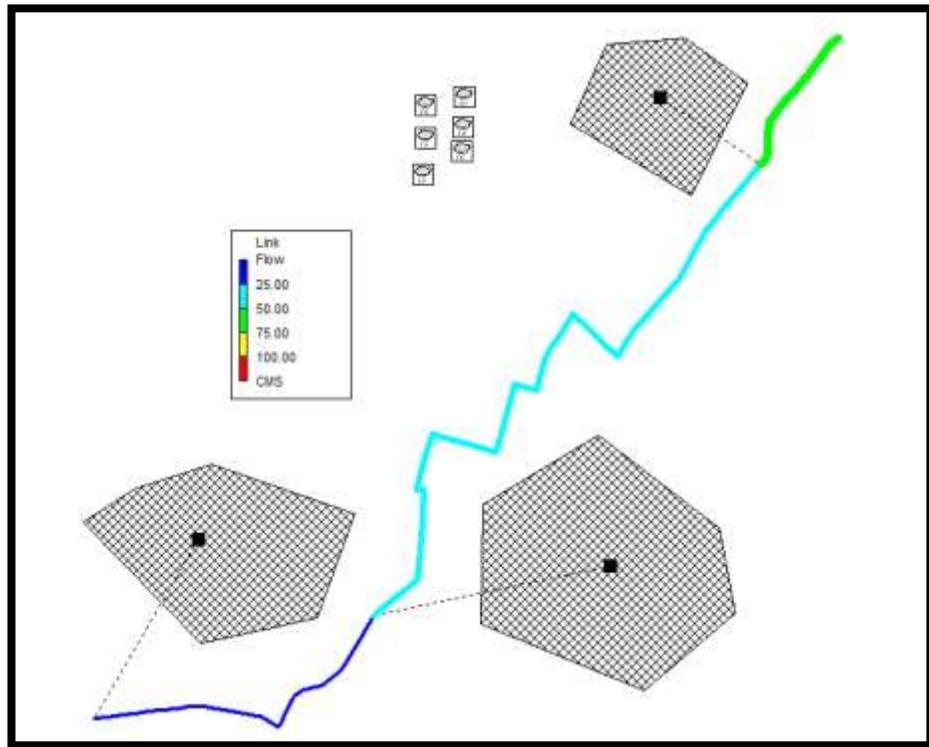


Figura 70. Representación de los caudales para un periodo de retorno $Tr=5$ años

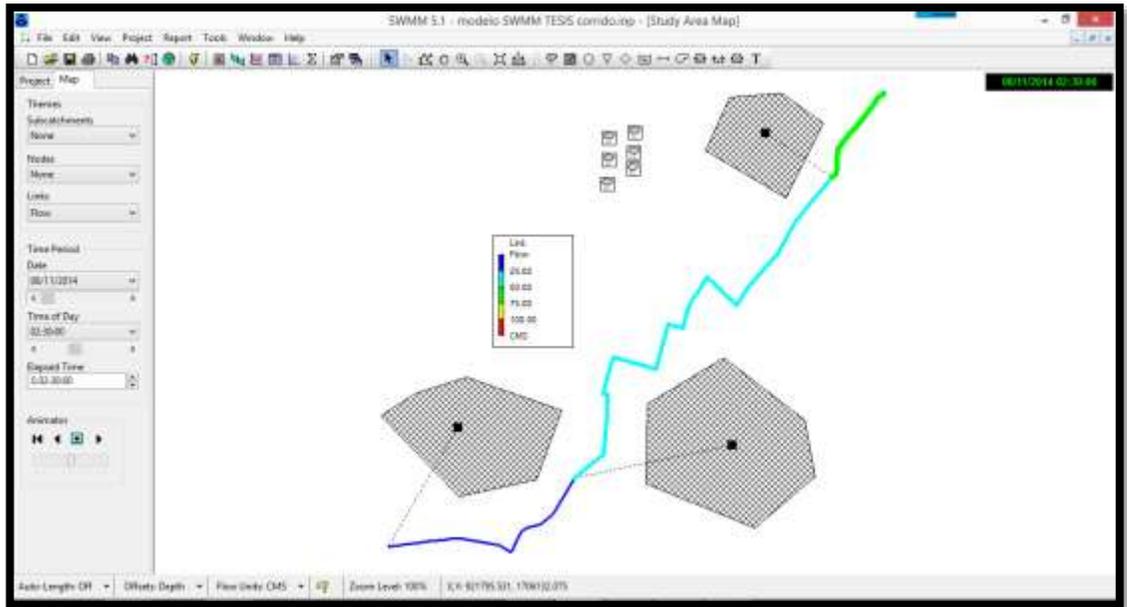


Figura 70-II. Representación de los caudales para un periodo de retorno $Tr=5$ años

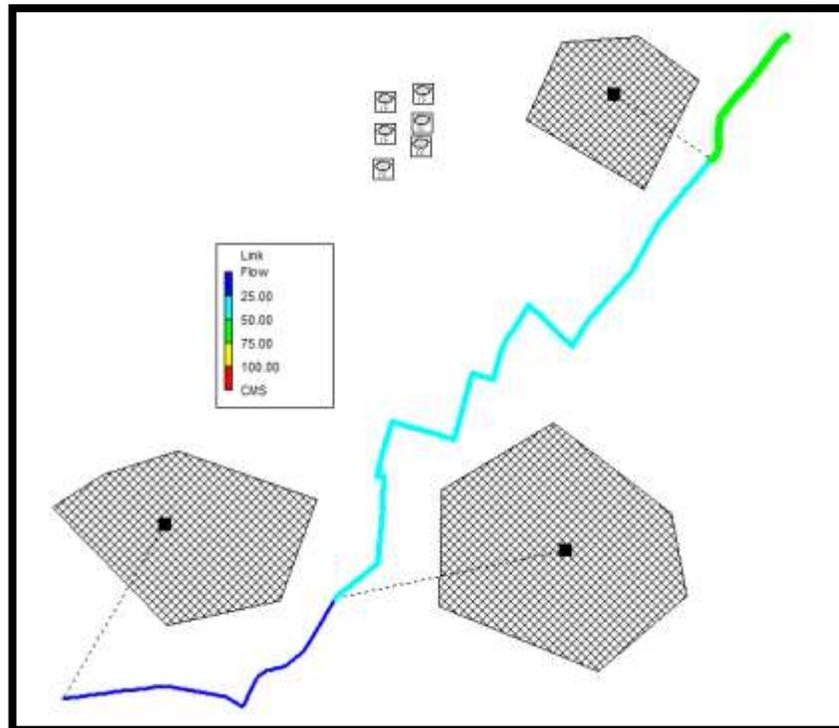


Figura 71. Representación de los caudales para un periodo de retorno $T_r=10$ años

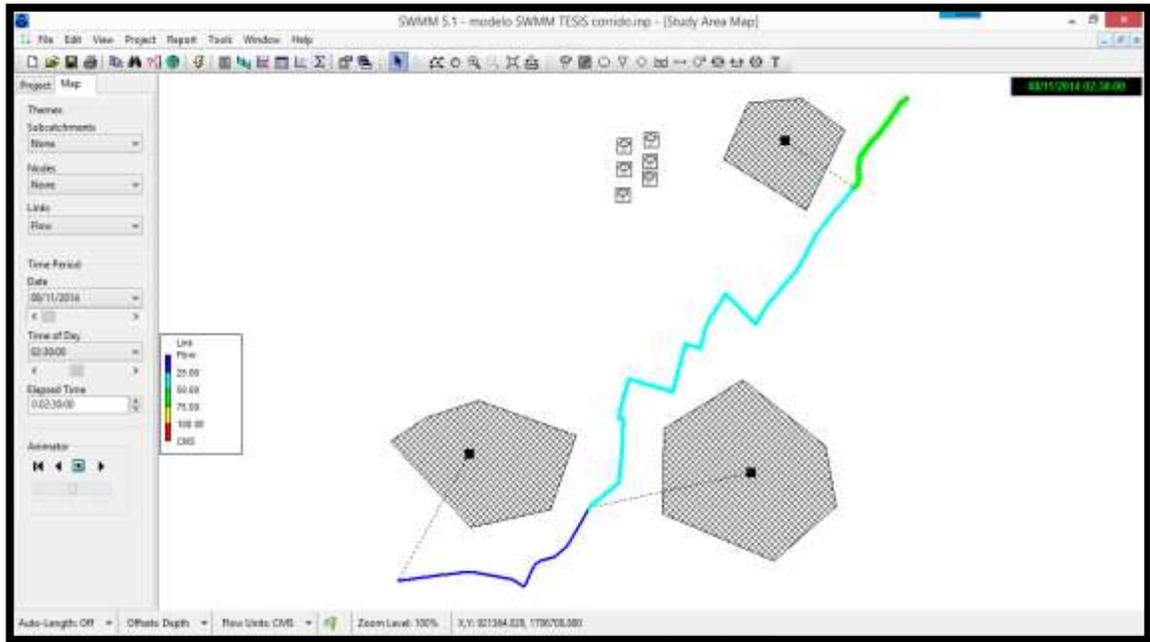


Figura 71-II. Representación de los caudales para un periodo de retorno $T_r=10$ años

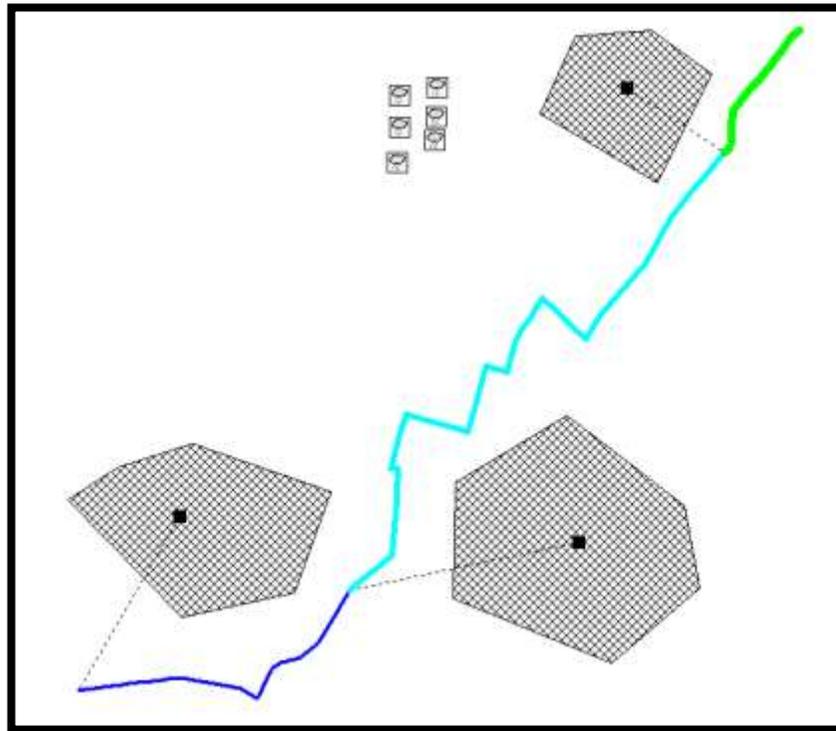


Figura 72. Representación de los caudales para un periodo de retorno $T_r=25$ años

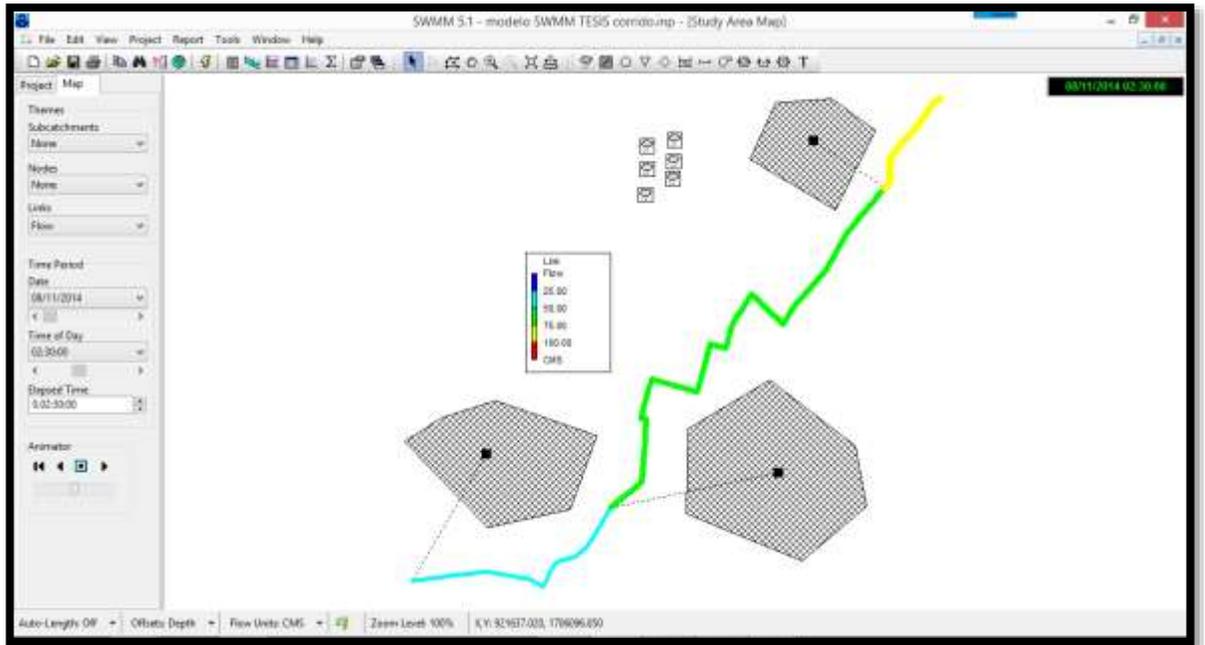


Figura 72-II. Representación de los caudales para un periodo de retorno $T_r=25$ años

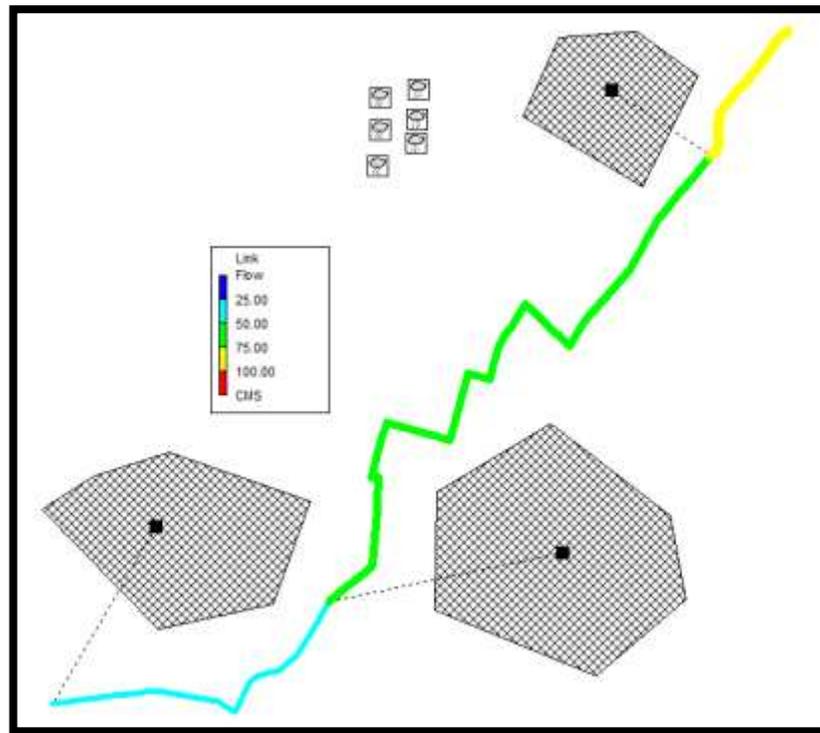


Figura 73. Representación de los caudales para un periodo de retorno $Tr=50$ años

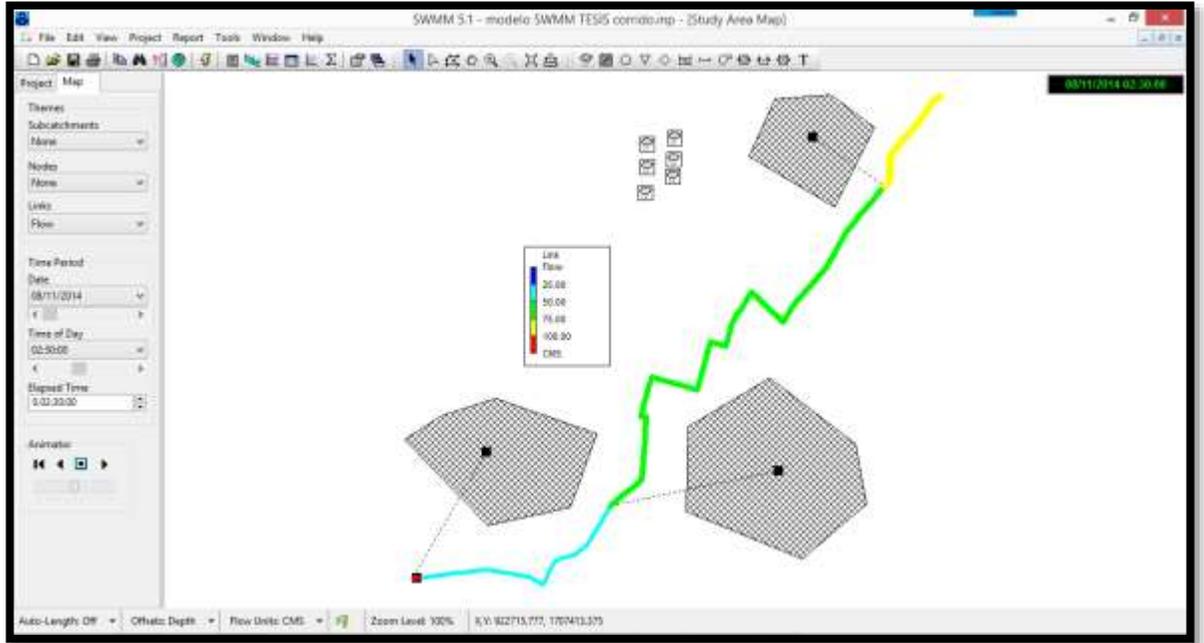


Figura 73-II. Representación de los caudales para un periodo de retorno $Tr=50$ años

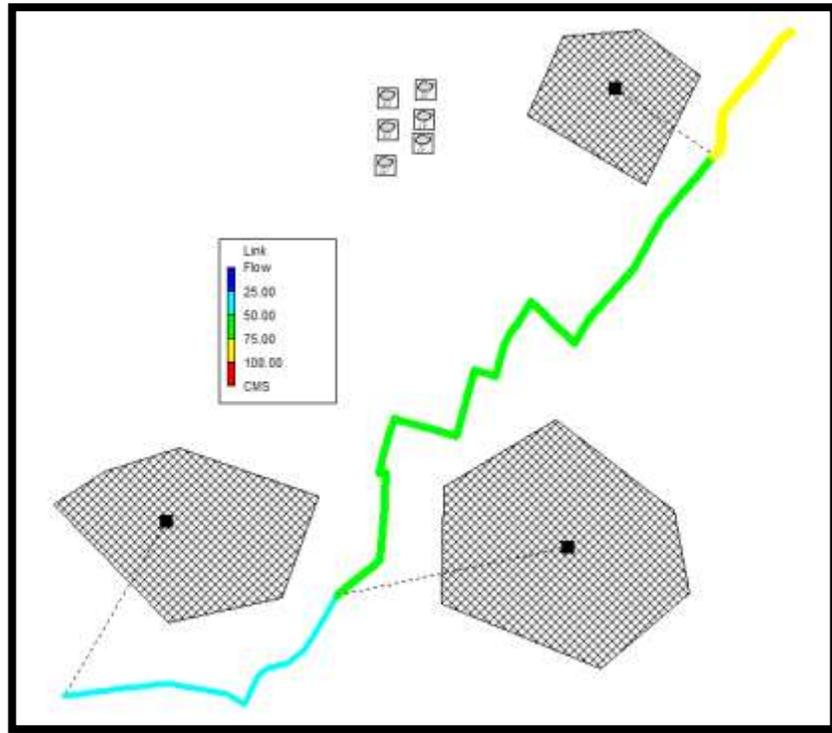


Figura 74. Representación de los caudales para un periodo de retorno $T_r=100$ años

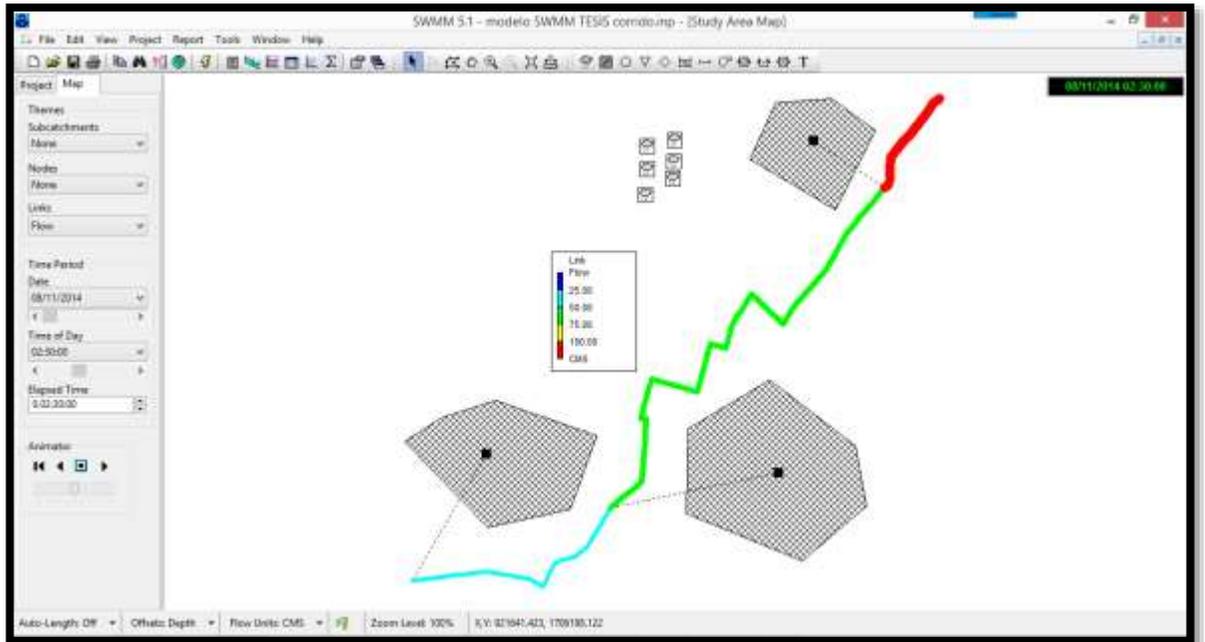


Figura 74-II. Representación de los caudales para un periodo de retorno $T_r=100$ años

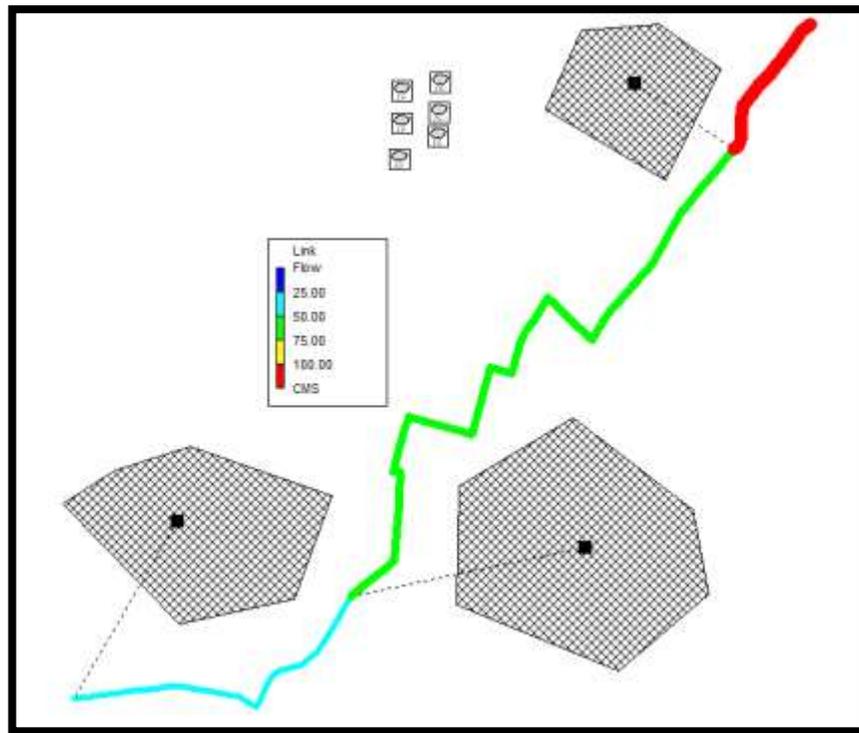


Tabla 23. Caudales estimados por el EPA SWMM

CAUDALES OBTENIDOS	
PERIODO DE RETORNO (Años)	OBTENIDO EN SWMM (M3/S)
2	50.01
5	58.13
10	74.82
25	87.52
50	93.11
100	110.08

Se presente las variabilidad de las velocidades en este caso las máximas encontradas dentro de la modelación en swmm, se muestra la figura 75 con el color definido para dicha velocidad, en la tabla 24 se particulariza de manera precisa el valor que corresponde a la celeridad del flujo de agua para los diferentes periodos de retorno que se estudian dentro de esta investigación.

Figura 75. Velocidades presentes durante el transcurso del agua en el modelo

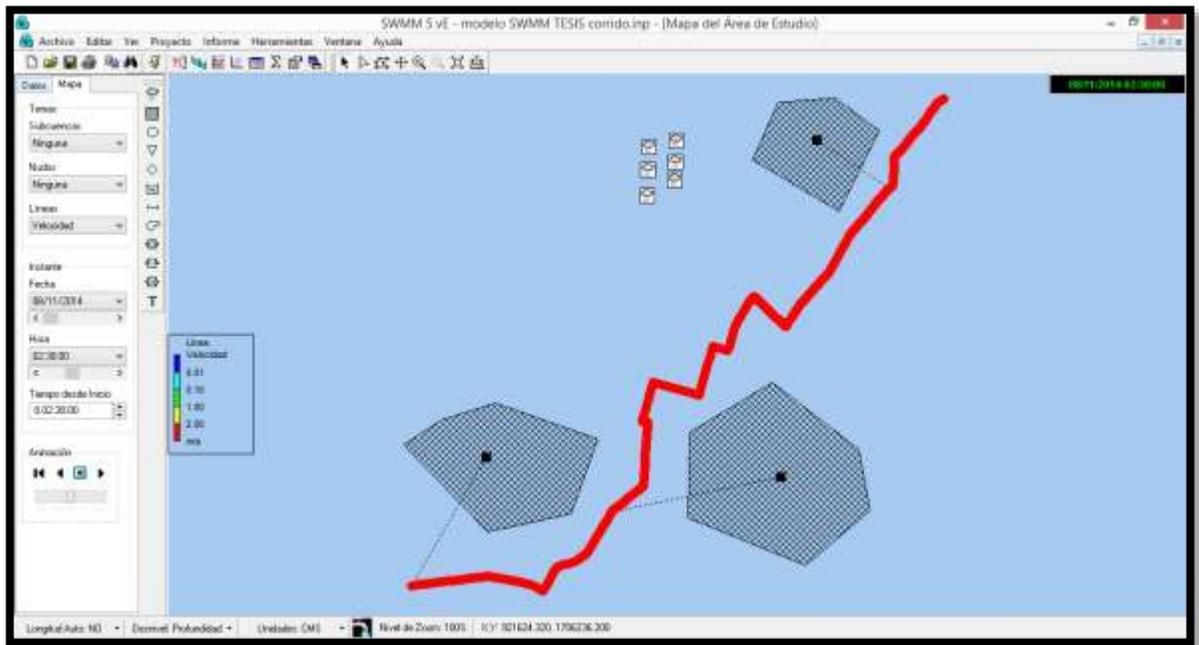


Tabla 24. Velocidades máximas encontradas en el modelo

VELOCIDADES PRESENTES EN EL ARROYO						
Velocidad Máxima (m/s)	Tr=2años	Tr=5años	Tr=10años	Tr=25años	Tr=50años	Tr=100años
	6.86	7.32	7.59	7.85	8.12	8.32

Una vez obtenido los caudales, se hace la correspondiente modelación en el software HEC-RAS para detallar el perfil del arroyo con la lámina de agua que representa los caudales estimados y su altura correspondiente para cada una de las secciones transversales que constituyen al torrente de agua, el HEC-RAS analiza de manera continua el tránsito de los caudales introducidos. En constancia se muestran los respectivos perfiles para los periodos de retornos que se están utilizando.

Figura 76. Perfil correspondiente para un periodo de retorno de 2 años obtenido en HEC-RAS

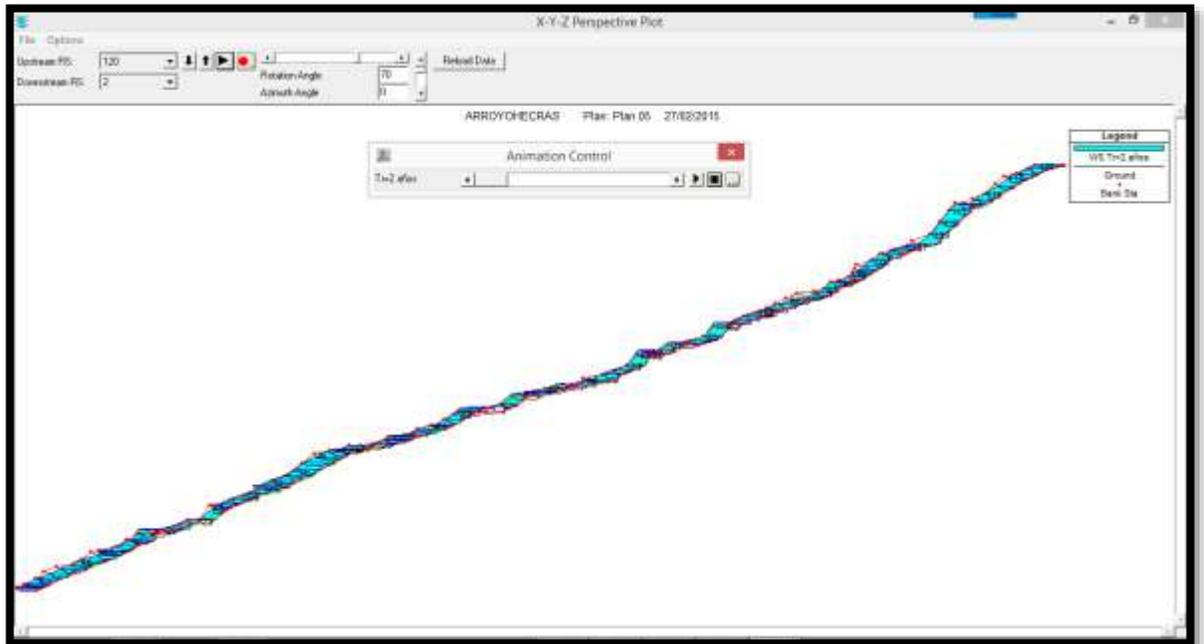


Figura 77. Perfil correspondiente para un periodo de retorno de 5 años

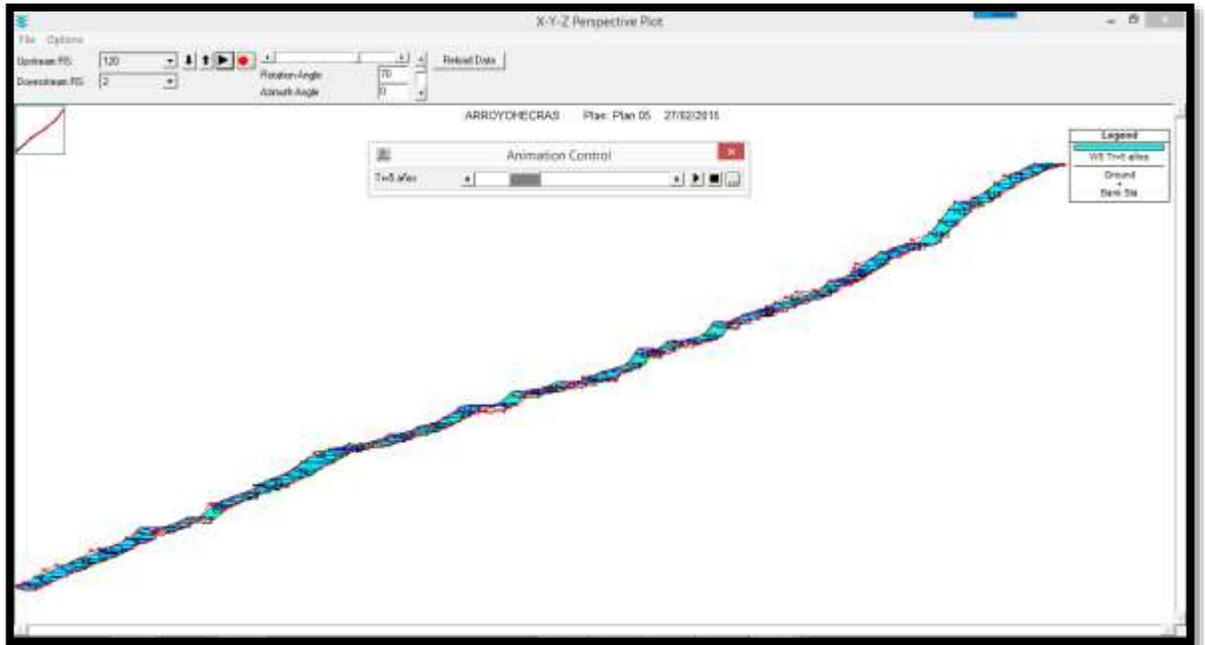


Figura 78. Perfil correspondiente para un periodo de retorno de 10 años

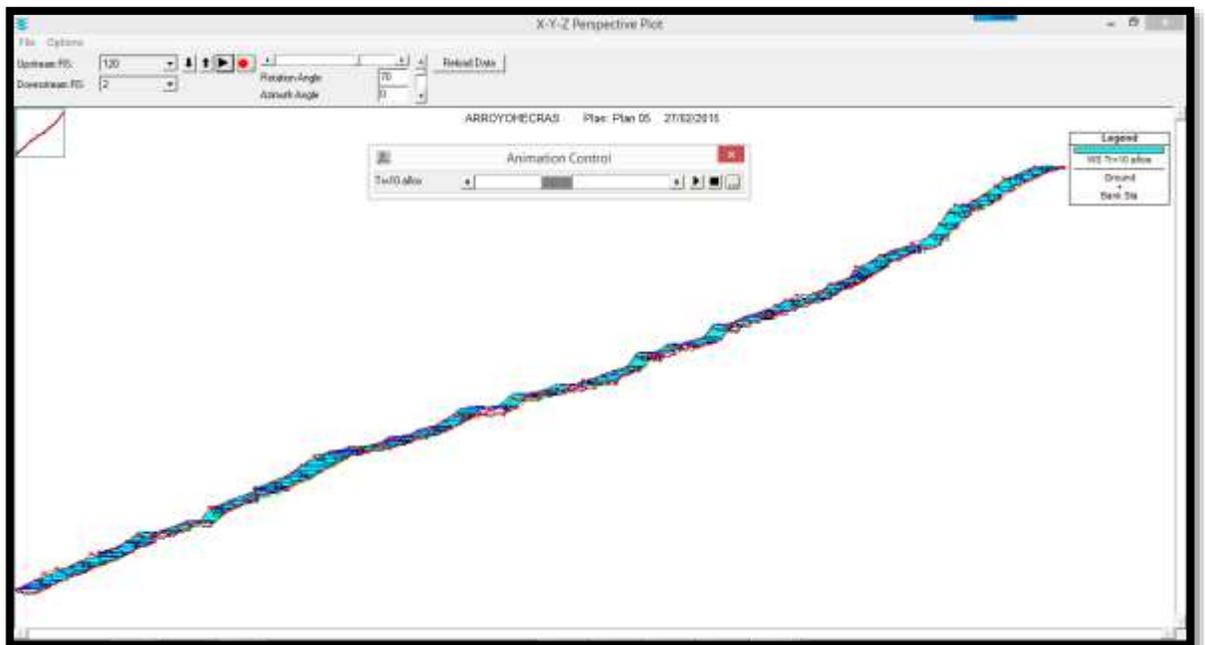


Figura 79. Perfil correspondiente para un periodo de retorno de 25 años

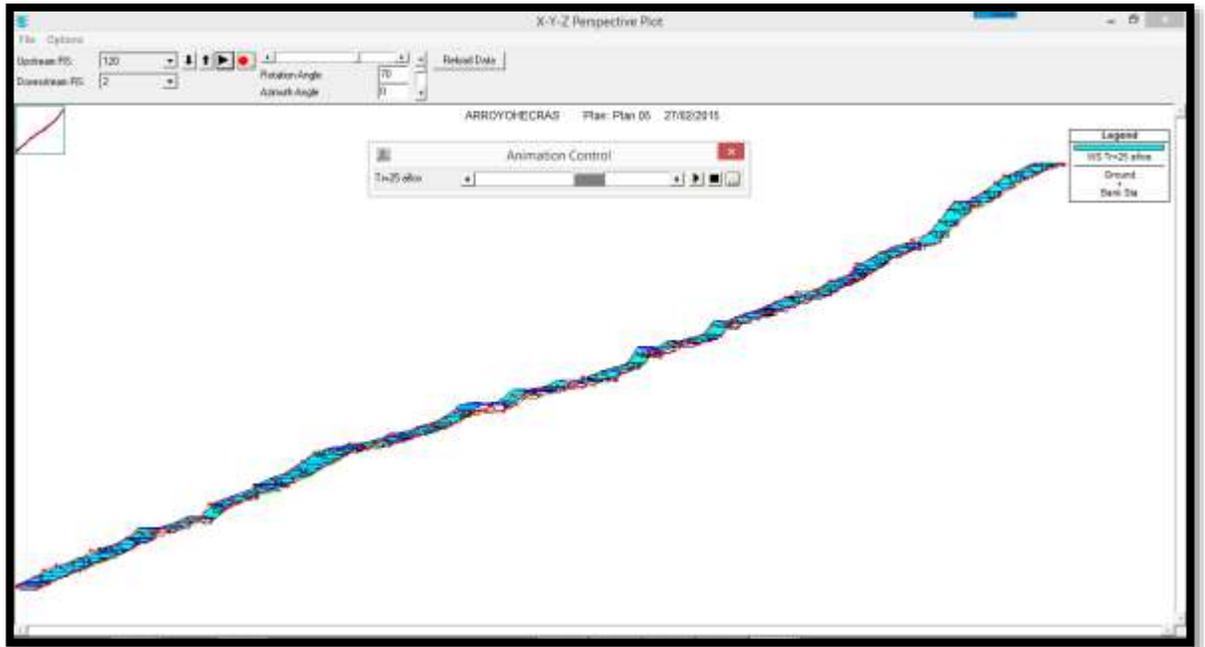


Figura 80. Perfil correspondiente para un periodo de retorno de 50 años

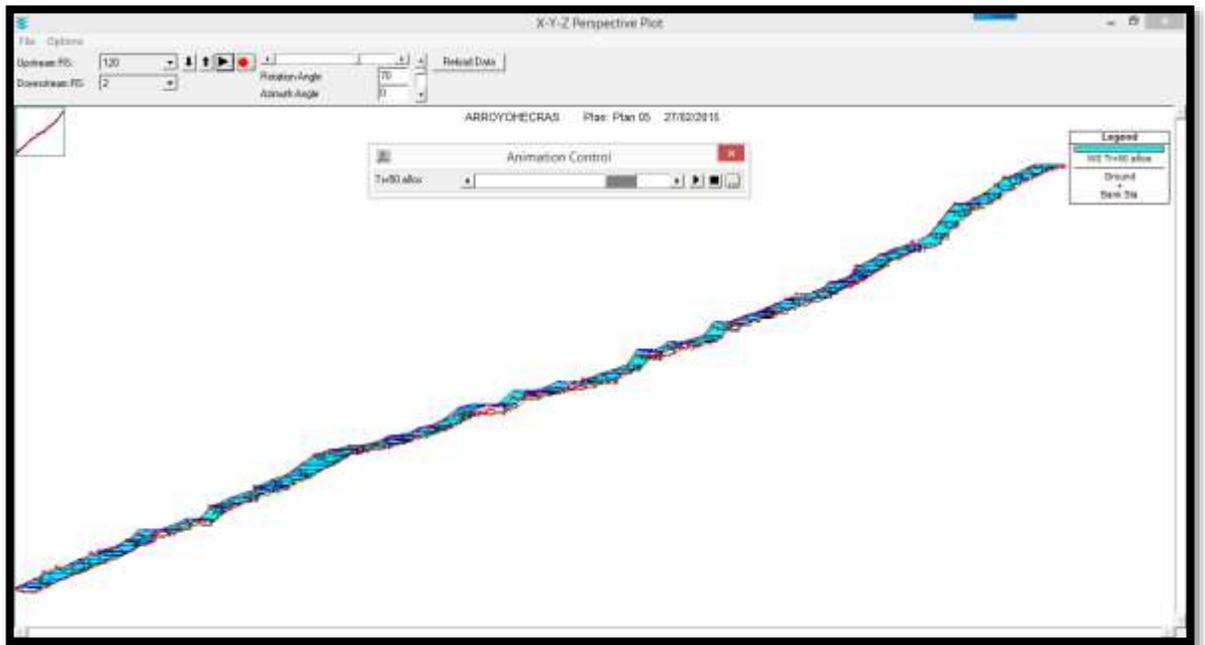
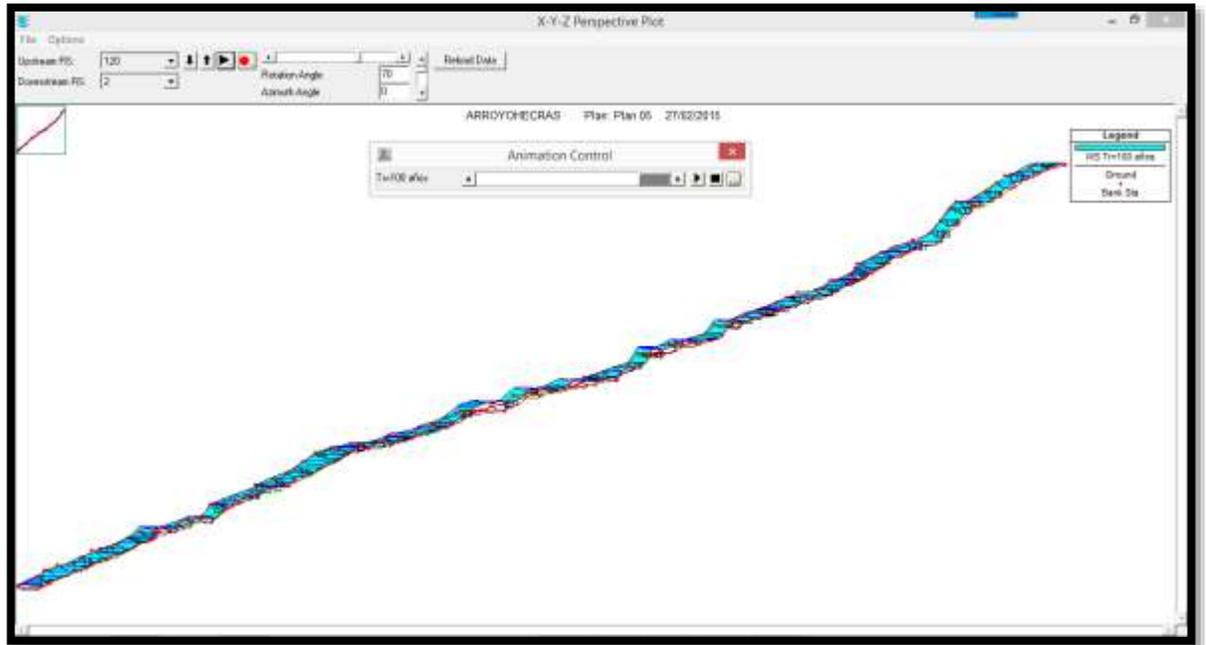


Figura 81. Perfil correspondiente para un periodo de retorno de 100 años



En las siguientes figuras se muestra como se detalla el comportamiento del perfil de la tirante de agua y la línea de energía y tirante crítica con respecto a los diferentes periodos de retorno.

Figura 82. Perfil del arroyo con línea de energía y línea de tirante crítica para un $T_r=2$ años

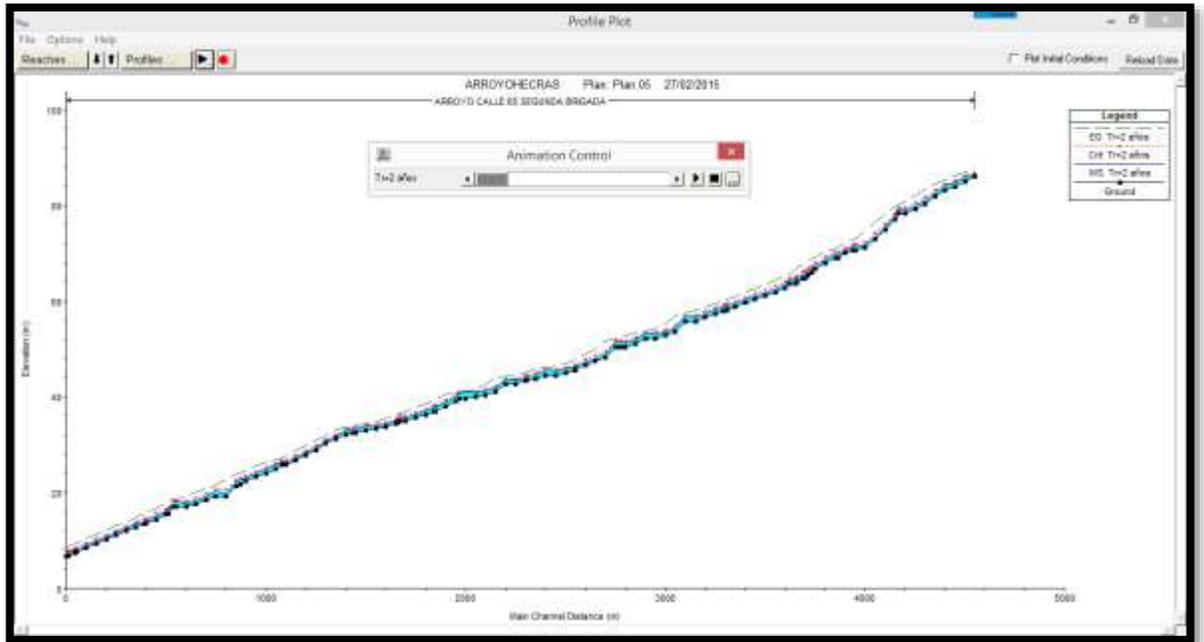


Figura 83. Perfil del arroyo con línea de energía y línea de tirante crítica para un $T_r=5$ años

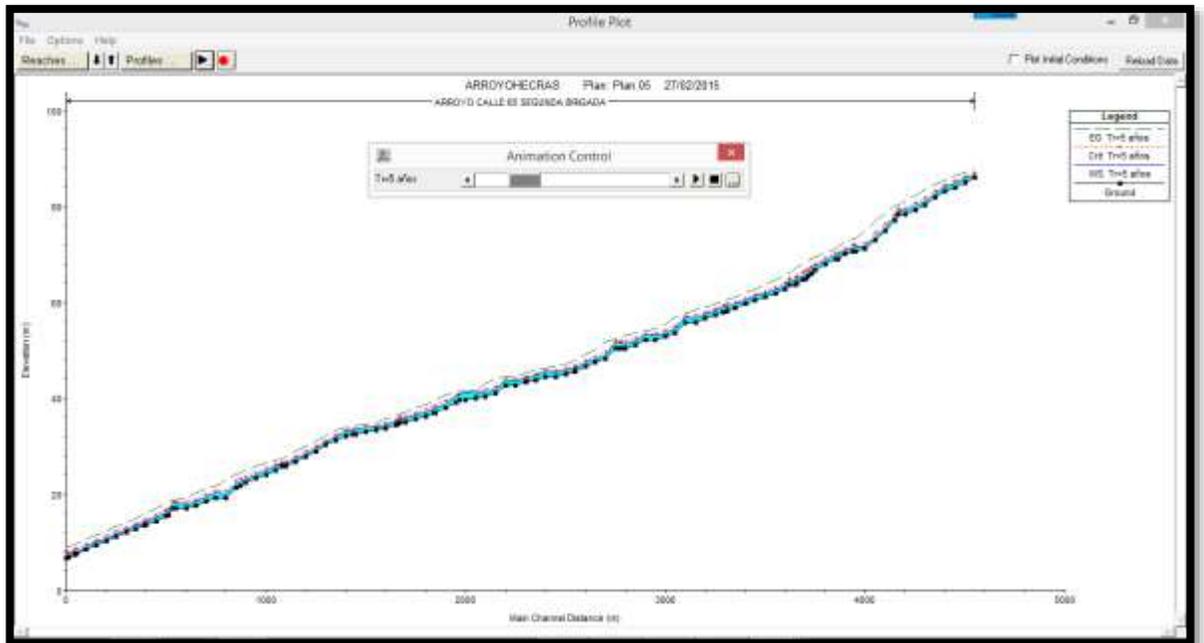


Figura 84. Perfil del arroyo con línea de energía y línea de tirante crítica para un $Tr=10$ años

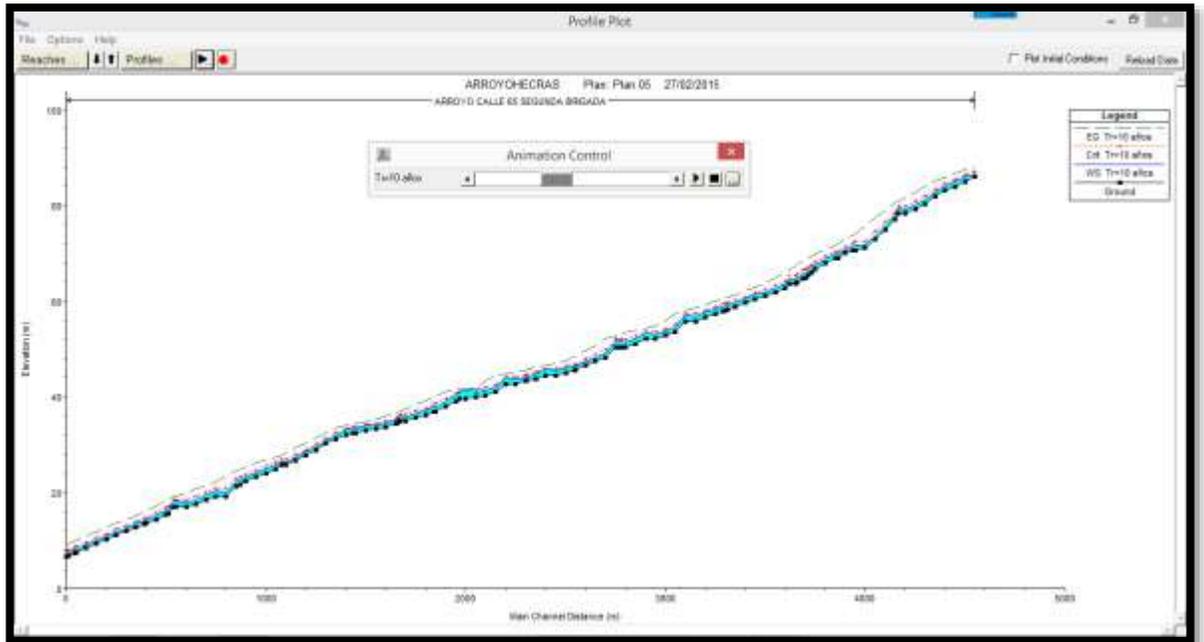


Figura 85. Perfil del arroyo con línea de energía y línea de tirante crítica para un $Tr=25$ años

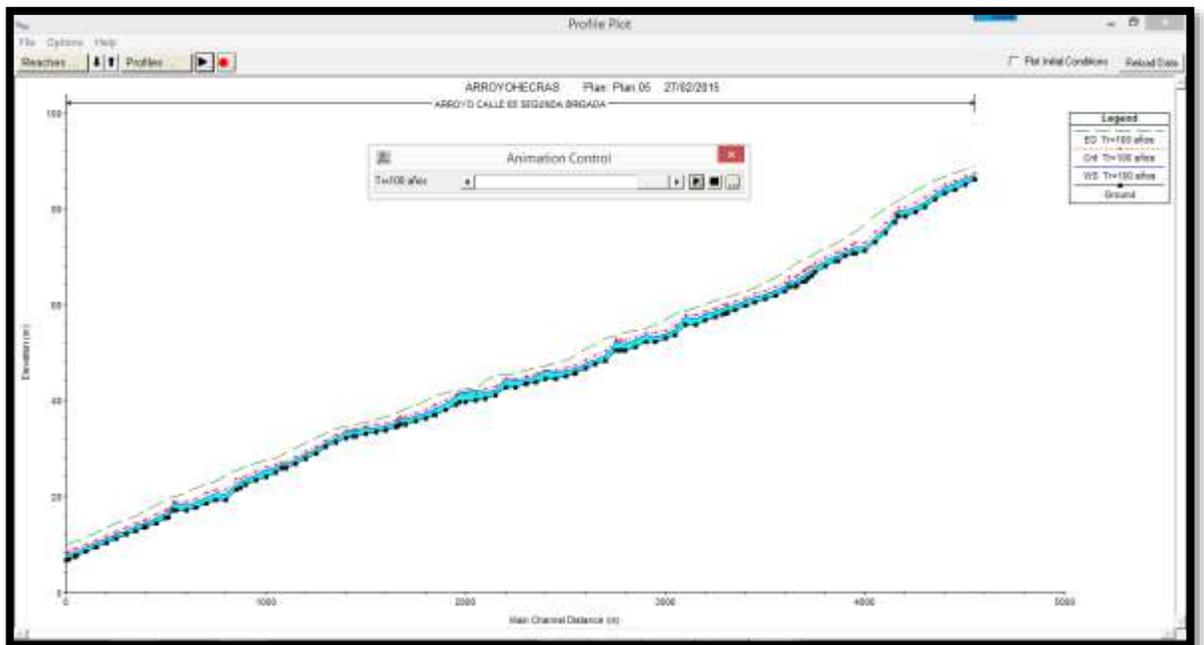


Figura 86. Perfil del arroyo con línea de energía y línea de tirante crítica para un $Tr=50$ años

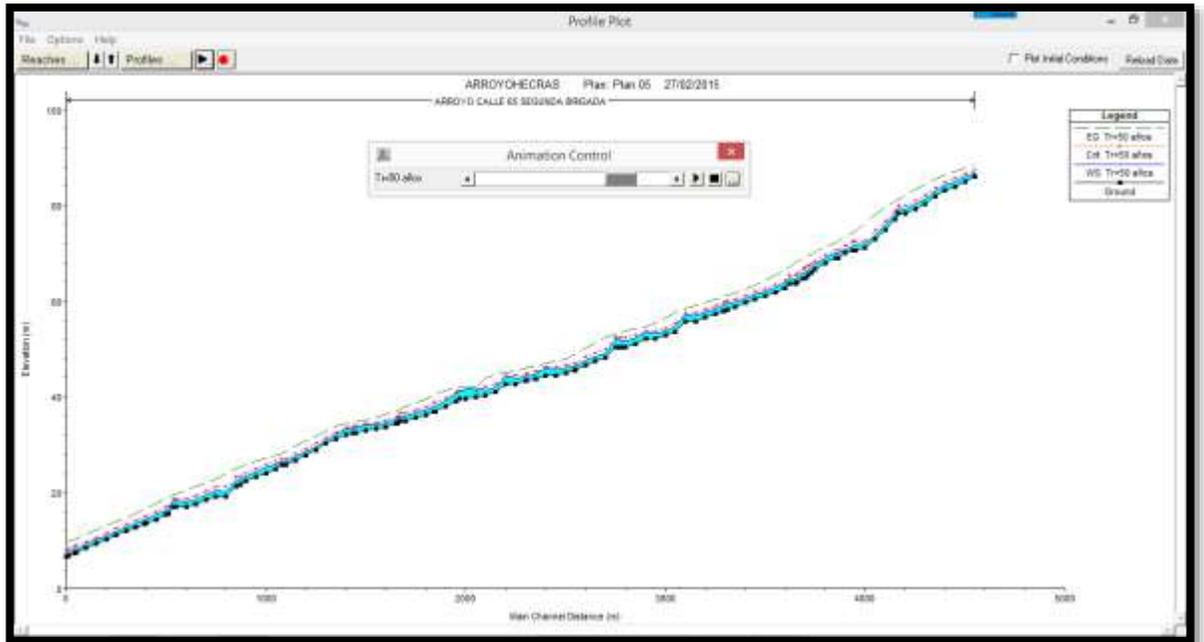
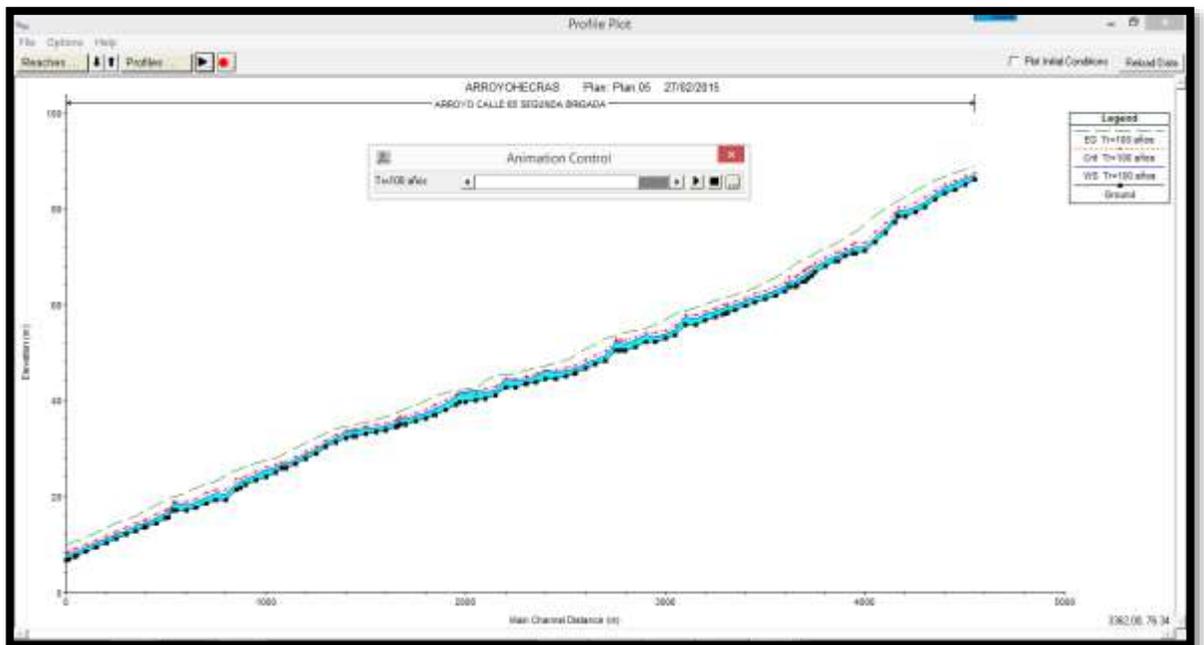


Figura 87. Perfil del arroyo con línea de energía y línea de tirante crítica para un $Tr=100$ años



La modelación en el HEC-RAS arroja como resultado también el comportamiento de la lámina de agua con respecto a las secciones es decir muestra la altura de la tirante de agua para dicho caudal, en las figuras que se observan posteriormente se describen la anterior afirmación, observándose además la altura de la línea de energía y tirante crítica correspondiente para dicho flujo en la sección presente. Todo esto para secciones del arroyo con los respectivos periodos de retorno. Para ver una completa estructura de las secciones en el ANEXO 1 se verá detallada de manera total todo lo referente a la modelación del HEC-RAS.

Figura 88. Corresponde a la sección para un periodo de retorno de 2 años

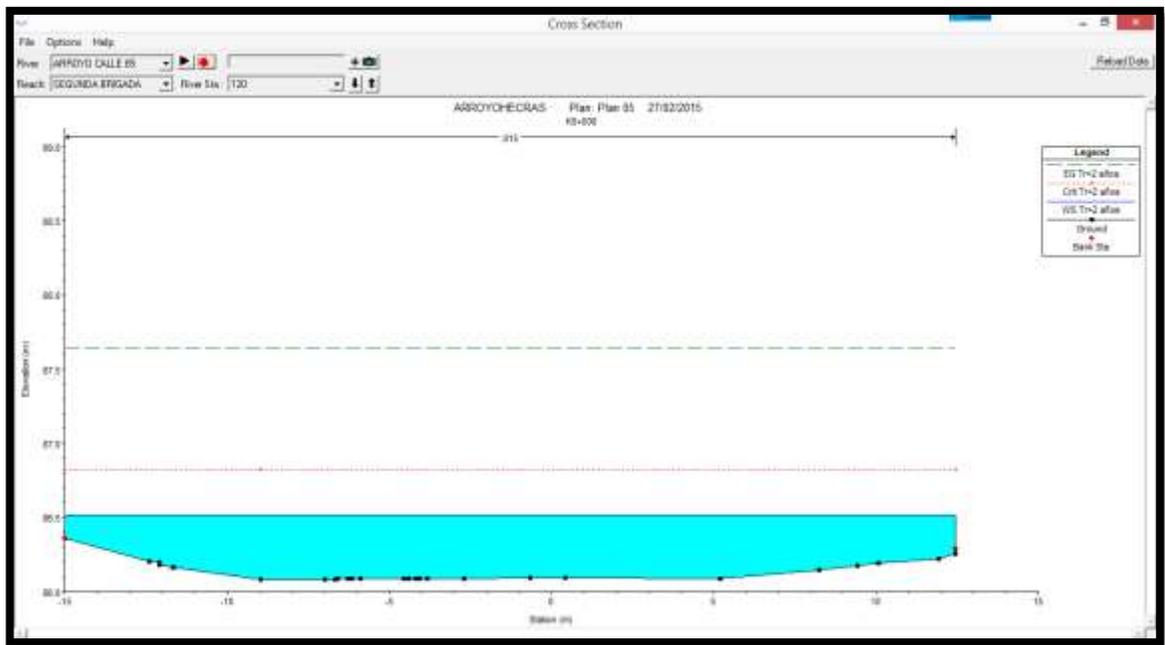


Figura 89. Corresponde a la sección para un periodo de retorno de 5 años

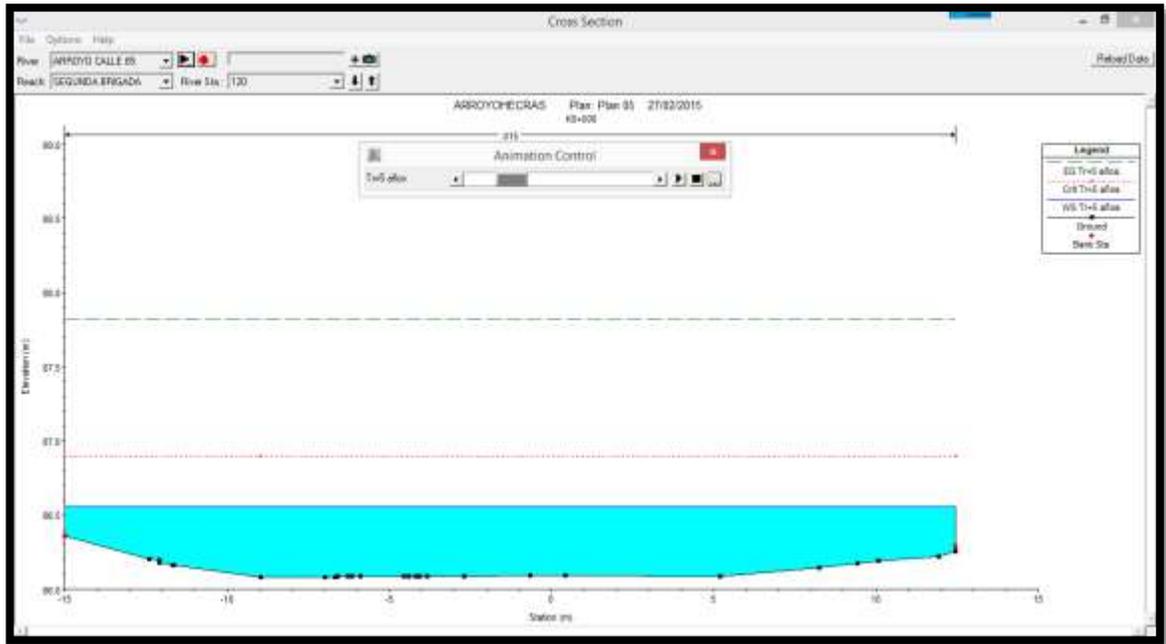


Figura 90. Corresponde a la sección para un periodo de retorno de 10 años

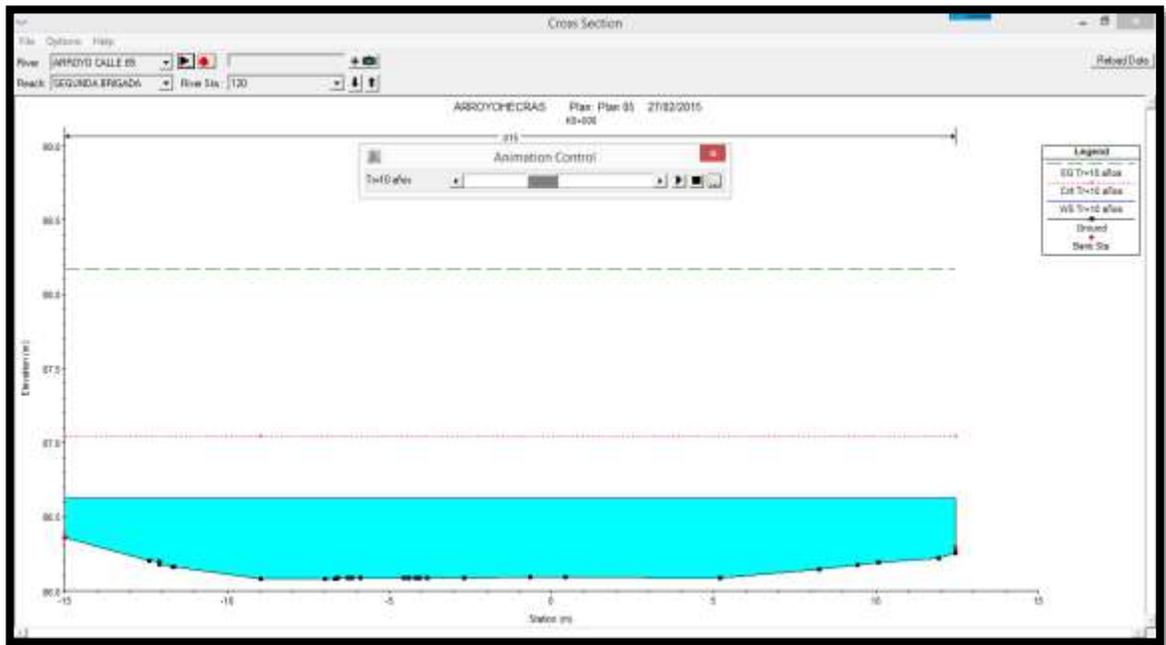


Figura 91. Corresponde a la sección para un periodo de retorno de 25 años

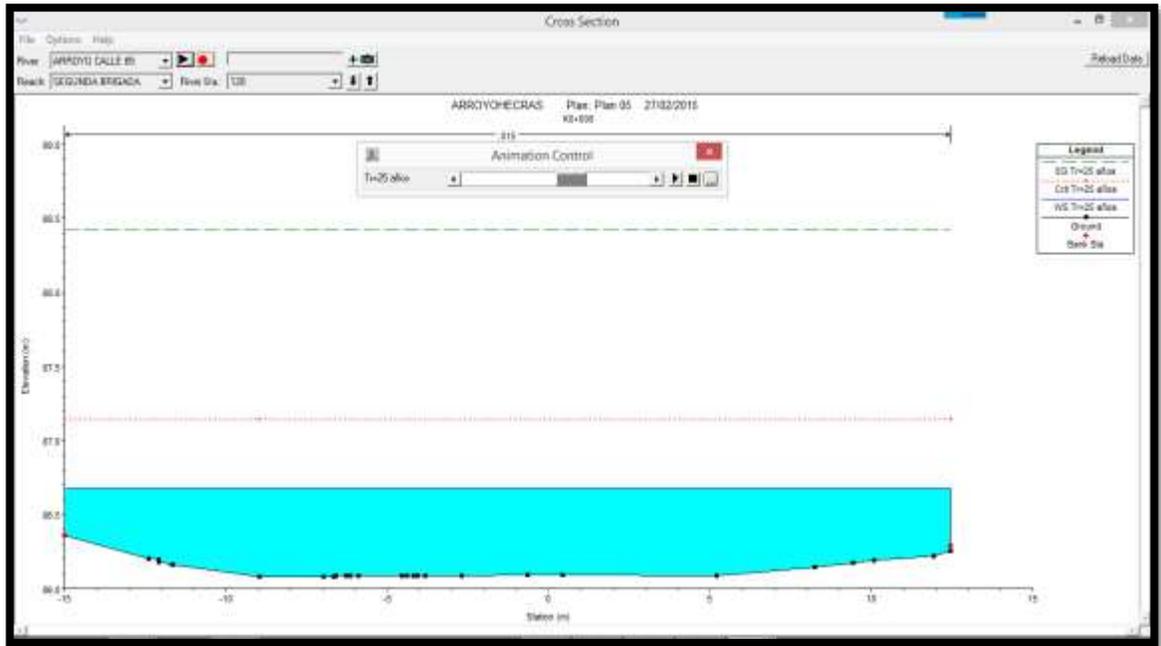


Figura 92. Corresponde a la sección para un periodo de retorno de 50 años

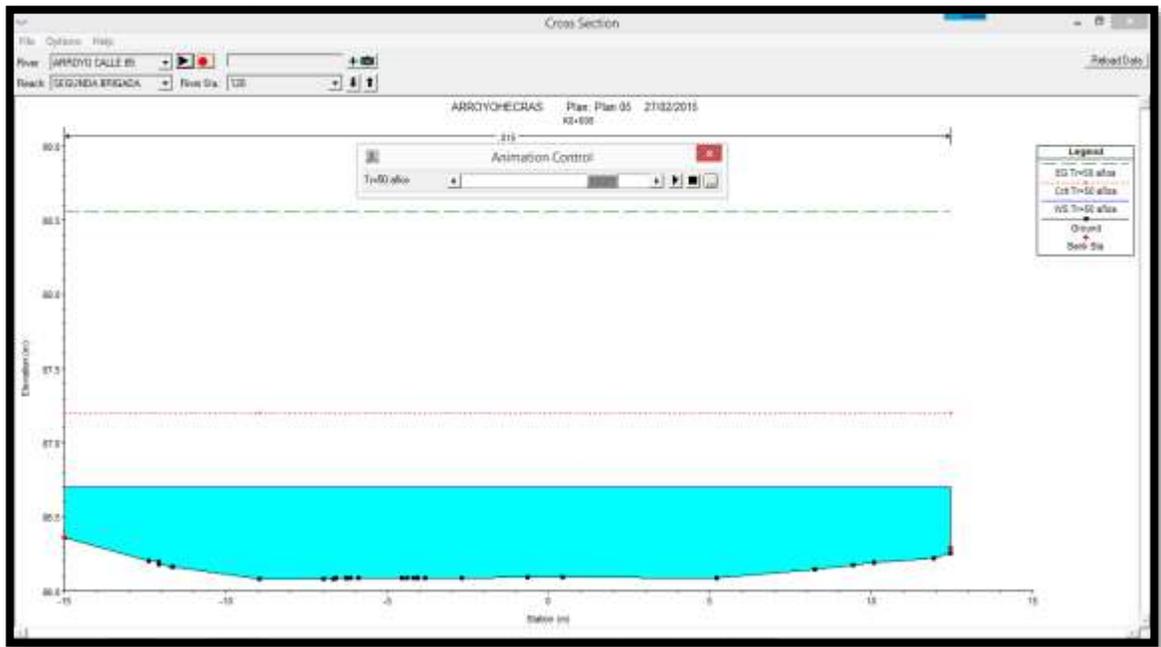
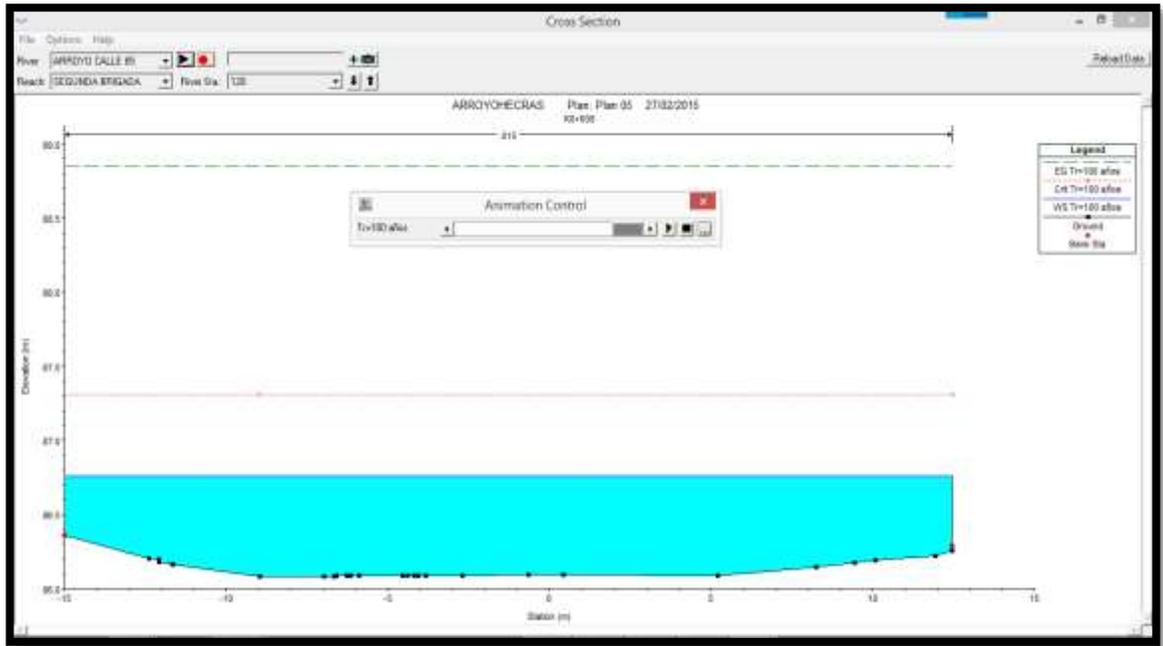


Figura 93. Corresponde a la sección para un periodo de retorno de 100 años



10. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez obtenido los caudales en el EPA-SWMM se hace el análisis de los resultados encontrados en dicha simulación, detallando los valores tanto de caudal y velocidad comparándolos con un artículo publicado en el trabajo realizado por Ingeniero Humberto Ávila³⁸, y los Métodos de estimación tradicionales mencionados en el marco referencial de esta investigación, dichos valores fueron tabulados y graficados para una mejor interpretación, a continuación se plasma las observaciones encontradas:

- Durante la simulación del modelo se detectó que algunos nudos presentan valores de inundación, hecho que implica una afectación directa al sistema, ya que el exceso de agua no puede ser desalojada y el swmm como tal permite el retorno de esa agua al modelo pero no se ve reflejado el ingreso de ese volumen de agua represado, esto ocurre en la realidad en las intersecciones de las calles del arroyo en estudio tal, como se muestra en la figura 94. por lo que para los periodos de retorno 50 y 100 años se optó por ubicar unos tanques virtuales que almacenasen el agua y después de cierto tiempo la descarga como sucede cuando se está presentando un evento de precipitaciones. Dichos tanques fueron introducidos a partir de la figura 95 puesto que el volumen que de escorrentía que se pierde hace que se genere el hidrograma de color azul, este represamiento o desbordamiento hace que dicho hidrograma presente un meseta en su pico y en la parte inferior un

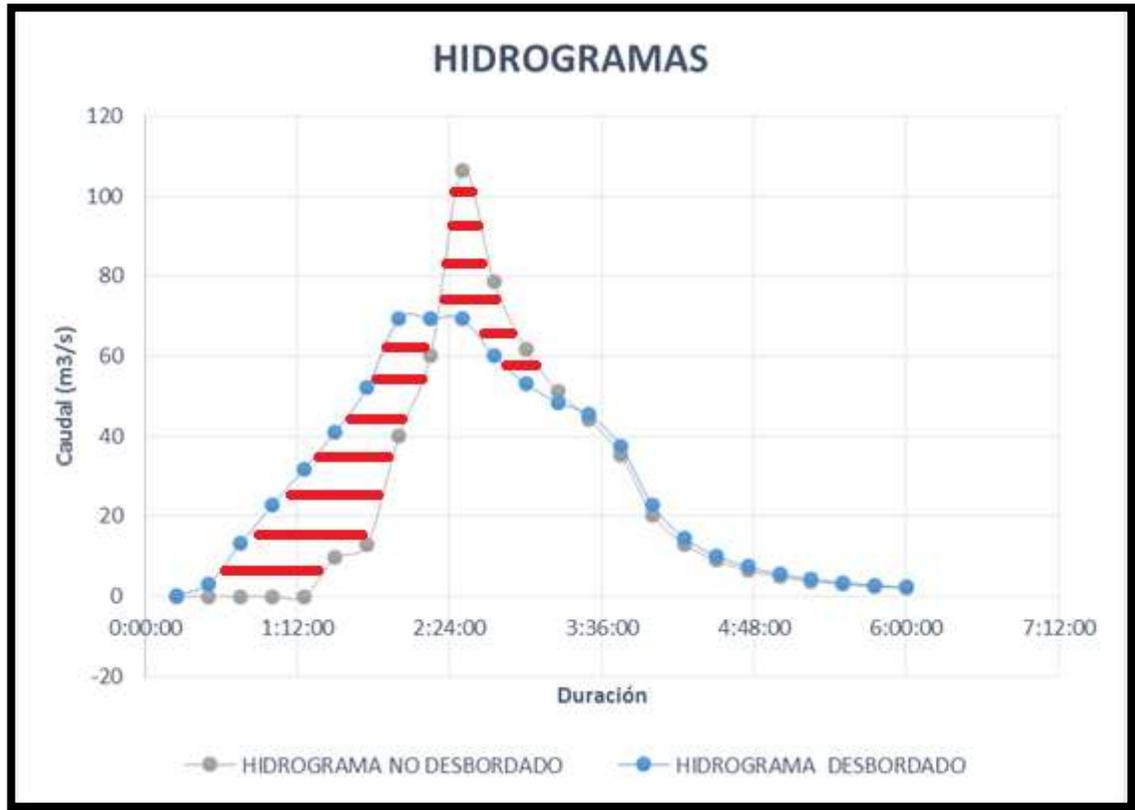
³⁸Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

aumento de caudal detallado con las franjas rojas al lado izquierdo, una vez hecha la simulación utilizando los LID (Low Impact Development o desarrollo de bajo impacto) en este caso tanques los resultados se ven reflejados en el hidrograma de color gris, y se muestran los volúmenes que se estaban perdiendo a causa de la crecida.

Figura 94. Inundación de intersección de una calle por causa de la escorrentía.



Figura 95. Comparación de Hidrogramas con tanques



- Los caudales arrojados con SWMM se encuentran tabulados en la tabla 25, y son similares a los estimados con los otros métodos, aunque se estimaron con parámetros diferentes y sabiendo que presentan limitaciones en cuanto a el área de drenaje de la cuenca como es conocido para el método racional que solo debe utilizarse para áreas menores a 2.5Km² mas sin embargo se obtuvieron resultados favorables. Hay que resaltar que la estimación realizada en el trabajo hecho por Ávila³⁹ utiliza datos hidroclimáticos de la estación Ernesto Cortissoz, un ancho promedio de calles de 10 m, una pendiente longitudinal del 2%, un número de

³⁹Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

curvas CN de 85, Tiempos de concentración de 15 a 40 minutos, un n de Manning de 0.0015, mientras que la utilizada en esta investigación fue tomada a partir de las precipitaciones de la estación las flores por la razones explicadas anteriormente y por supuesto una topografía detallada con secciones y demás que se explicaron en ítems pasados.

Tabla 25. Valores de caudales a comparar

CAUDALES				
PERIODO DE RETORNO (Años)	OBTENIDO EN SWMM (M ³ /S)	OBTENIDO POR HUMBERTO ÁVILA ⁴⁰ (M ³ /S)	SCS (M ³ /S)	MÉTODO RACIONAL (M ³ /S)
2	50.01	45	41.16	49.91
5	58.13	61	59.35	61.06
10	74.82	72	71.60	71.12
25	87.52	86	87.22	87.01
50	94.69	99	98.88	101.34
100	110.08	113	110.50	118.04

- Los porcentajes de error que se muestran en la tabla 26 manifiestan una comparación entre los datos de caudales encontrados en swmm con respecto a los demás valores con los cuales se están comparando. Si se observan los porcentajes por tiempos de retorno se ve reflejada la minoría de error en su mayoría de intervalos de recurrencia en el método del soil conservation service (SCS), aunque presenta el valor expresado para un Tr=2 años como el mayor de

⁴⁰ ⁴¹Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

todos. Luego le sigue el método racional y por último los datos presentados en el trabajo del Ingeniero Ávila⁴¹

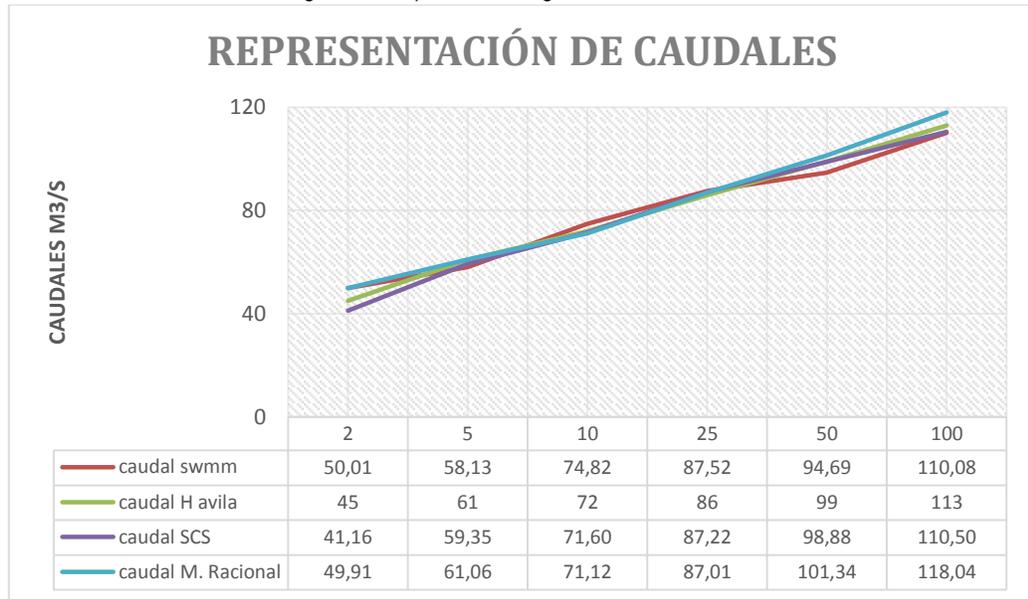
Tabla 26. Errores porcentuales de swmm con respecto a otros caudales

ERROR EN PORCENTAJE DE SWMM RESPECTO A LOS CAUDALES			
PERIODO DE RETORNO (Años)	OBTENDO POR HUMBERTO ÁVILA ⁴² (M3/S)	SCS (M3/S)	MÉTODO RACIONAL (M3/S)
2	10.02%	17.70%	0.20%
5	4.70%	2.05%	2.80%
10	3.77%	4.31%	4.95%
25	1.74%	0.34%	0.58%
50	0.21%	0.33%	2.43%
100	2.58%	0.38%	6.39%

- En la figura 96 se representan en modo de grafica todos los caudales comparados teniendo un comportamiento lineal como era de esperarse, predominado en la mayoría de los tiempos de retorno el método racional. Con respecto a los estimados por swmm no se encuentran tan diferentes en cuanto a valores, están cercanos los unos a los otros, lo que se afirma que se hizo una modelación exitosa.

⁴²Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

Figura 96. Representación gráfica de los caudales



- Dentro las áreas impermeables obtenidas con ayuda del IGAC (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI) se obtuvo un porcentaje representado en la tabla 21, dicha relación representa el área dura de la cuenca, por consiguiente el valor restante para completar el 100% corresponde a una zona mixta entre zonas verdes entre estos jardines, patios, parques etc. y zonas duras consideradas permeables como los adoquines. Según la teoría el valor de n de Manning que representa a estas zonas corresponde a 0.040⁴³.
- Si se observan los hidrogramas de las figuras 97, 98, 99, 100, 101 y 102 se establece una comparación entre el hidrograma arrojado por swmm y el hidrograma unitario triangular, de todos hay una leve diferencia en el

⁴³Martínez M. Eduardo, "Hidráulica Fluvial" principios y prácticas. 1era edición, editorial BELLISCO, año 2001,

correspondiente a intervalo de recurrencia $Tr=2$ años, pero relevante e importante es la característica casi triangular del hidrograma arrojado por el software, teniendo en cuenta que el intervalo de tiempo es mucho mayor.

Figura 97. Hidrogramas para $Tr=2$ años

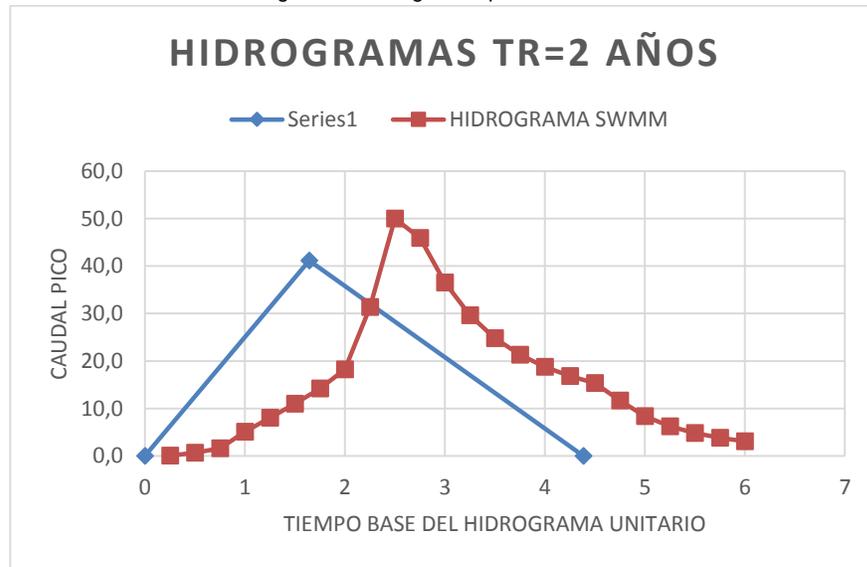


Figura 98. Hidrogramas para $Tr=5$ años

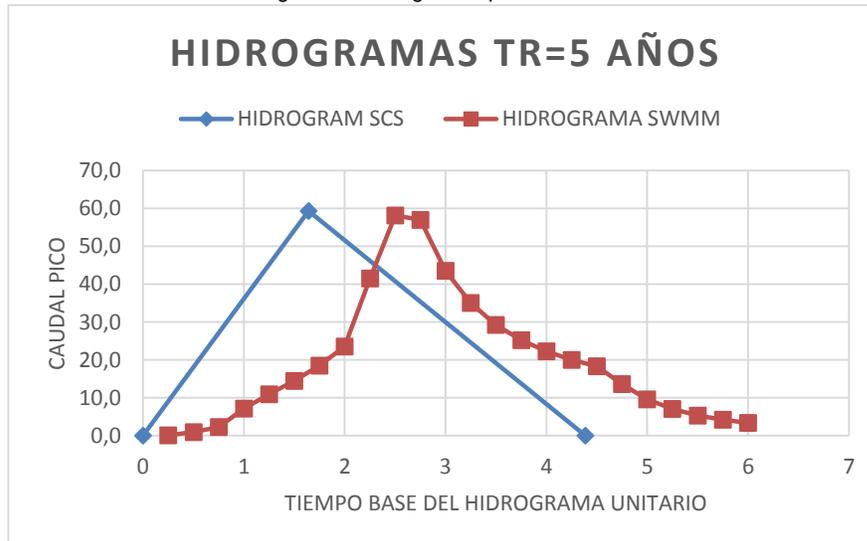


Figura 99. Hidrogramas para Tr=10años

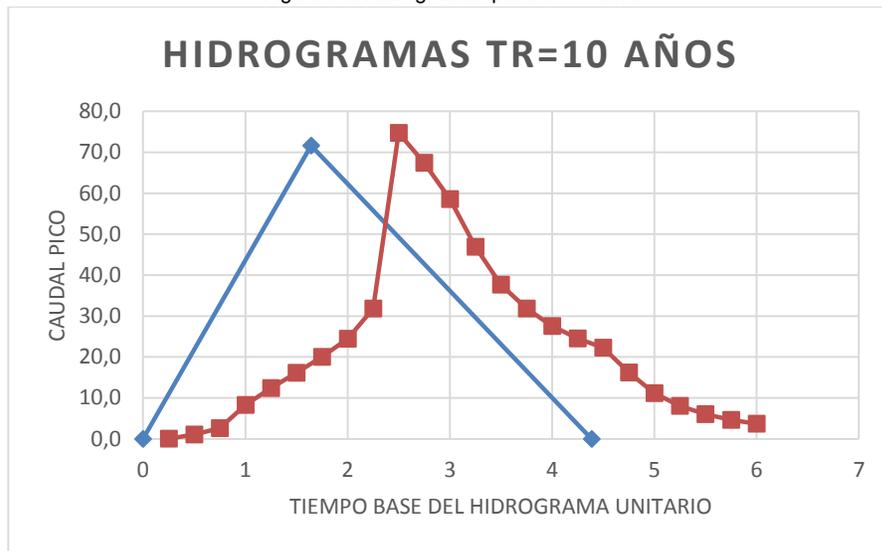


Figura 100. Hidrogramas para Tr=25años

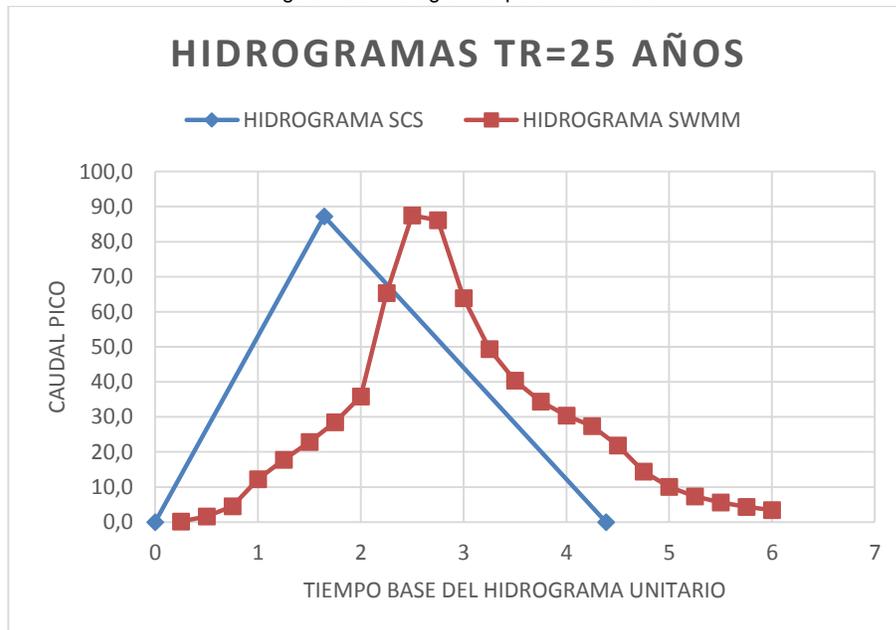


Figura 101. Hidrogramas para Tr=50años

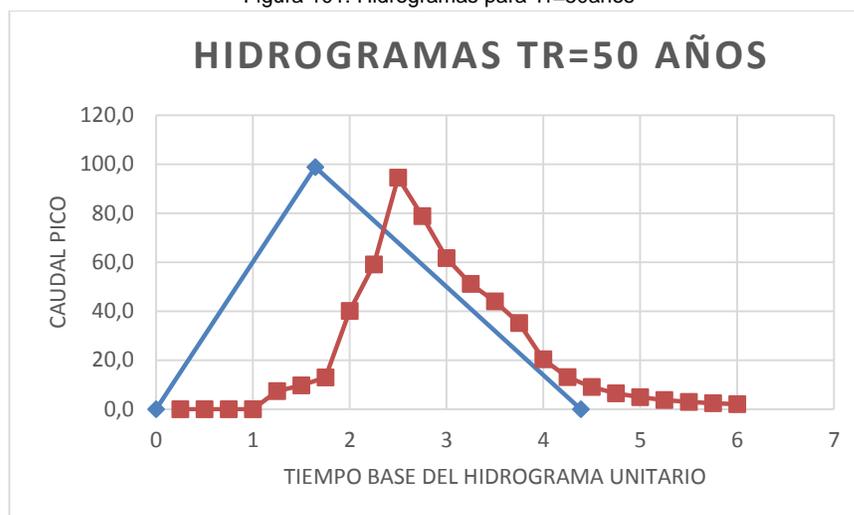
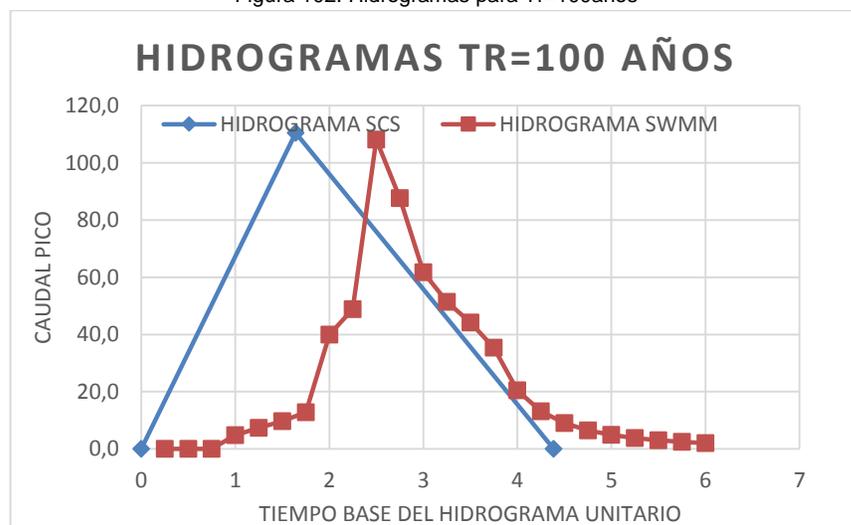


Figura 102. Hidrogramas para Tr=100años



- Las velocidades encontradas en el modelo muestran una similitud con respecto a las mostradas en el trabajo realizado por el Ingeniero Ávila, aunque para los periodos 2, 5, 10, 25 años no supera a las velocidades mostradas en el swmm, mientras que para los tiempos de 50 y 100 años lo hace, por consiguiente se deduce que los tanques tienen que ver en que estas velocidades no sean

mayores, ya que en el instante de almacenamiento esta de una u otra forma disminuye.

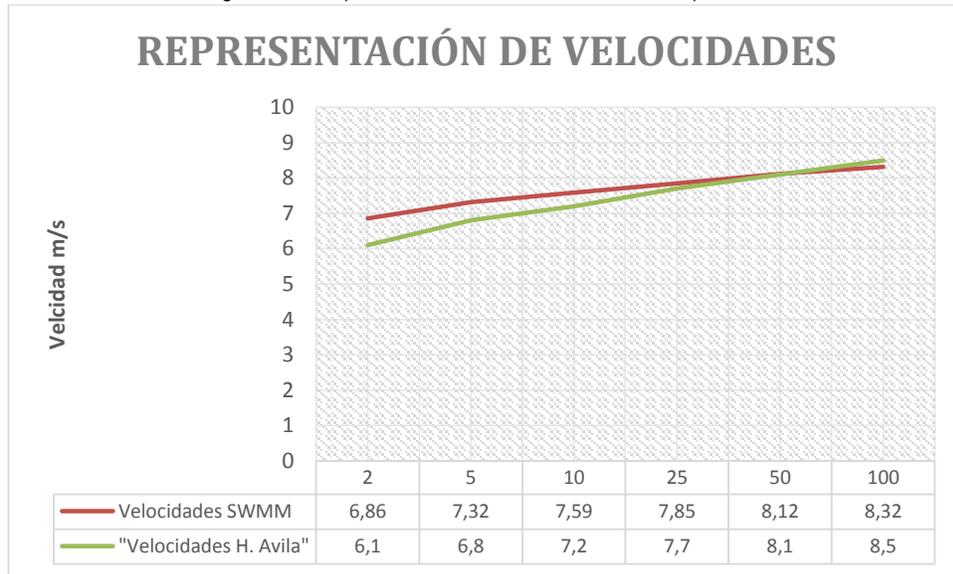
Tabla 26. Valores de velocidades a comparar

VELOCIDADES		
PERIODO DE RETORNO (Años)	OBTENIDO EN SWMM (M/S)	OBTENIDO POR HUMBERTO ÁVILA ⁴⁴ (M/S)
2	6.86	6.1
5	7.32	6.8
10	7.59	7.2
25	7.85	7.7
50	8.12	8.1
100	8.32	8.5

- Si se observa la gráfica de velocidades (ver figura 103) el comportamiento de estas es lineal, es decir va aumentando a medidas que se mayoran los intervalos de retorno y se muestra el punto donde estas líneas se cruzan aproximadamente en el Tr=50años, predominando como es saber las velocidades estimadas en el software que se usa en esta investigación.

⁴⁴Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

Figura 103. Representación de las velocidades comparadas



Los errores mostrados en la tabla 27 para las velocidades de swmm con respecto a las mostradas en el trabajo de investigación del Ingeniero Humberto Ávila⁴⁵ representan una baja diferencia no superando la gran mayoría la barrera del 10% de tolerancia, para un $Tr=2$ años representa un valor superior al antes mencionado pero está muy cercano a este. De lo que se afirma que estos porcentajes resaltan la confiabilidad de la estimación realizada por swmm.

⁴⁵Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

Tabla 27. Errores representados para las velocidades

ERROR PORCENTUAL PARA VELOCIDADES	
PERIODO DE RETORNO (Años)	OBTENDO POR HUMBERTO ÁVILA ⁴⁶ (M/S)
2	11.08%
5	7.10%
10	5.14%
25	1.91%
50	0.25%
100	2.12%

- Con respecto a la modelación en HEC-RAS se puede observar y corroborar lo que ocurre en SWMM, es decir evidentemente con los caudales estimados para los periodos de retorno 50 y 100 años este se desborda pero no en su totalidad, de echo también lo hace por secciones cosa que en SWMM ocurre en los nodos, cabe anotar que para los otros periodos se rebosa pero en menor cantidad, pues debido a que hay secciones que no están del todo completas y las pendientes entre secciones son mínimas, esto hace que exista un aumento en la tirante de agua.

⁴⁶Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

- Con respecto a las velocidades encontradas en HEC-RAS los valores redundan alrededor de los mostrados por el EPA-SWMM y la investigación de Ávila⁴⁷, lo que se concluye que la modelación del arroyo en este software fue del todo un éxito.

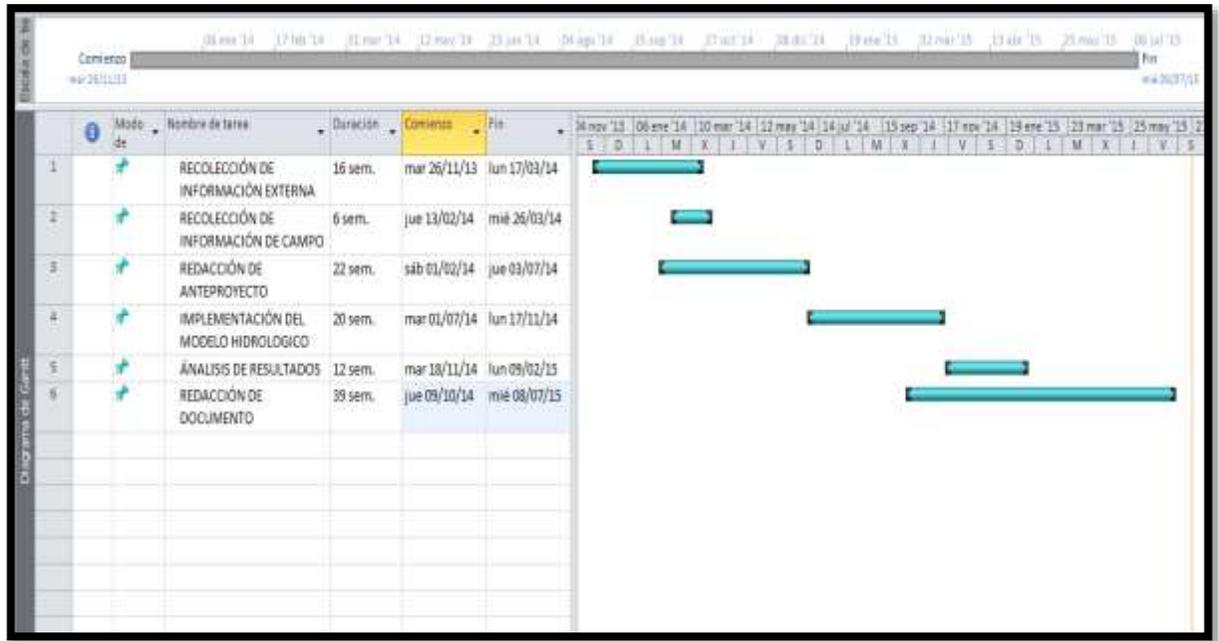
⁴⁷Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

11. RECURSOS

Para esta investigación se contó con los siguientes recursos

- Equipo de topografía.
- Software de EPA-SWMM
- Software HEC-RAS
- Software ARC GIS 9.3
- Cámara fotográfica.
- Computadores.
- Material Bibliográfico

12. CRONOGRAMA



13. PRESUPUESTO

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNID.	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
1	Orto fotografías del IGAC	Gl	1	\$ 1.000.000.00	\$ 1.000.000.00
2	Movilización	Mes	18	\$ 250.000.00	\$ 4.500.000.00
3	Alquiler equipo de topografía	Día	7	\$ 100.000.00	\$ 700.000.00
4	Compra de información al IDEAM	Un	3	\$ 15.000.00	\$ 45.000.00
5	Gasto en papelería	Gl	1	\$ 200.000.00	\$ 200.000.00
	Costo Total				\$ 6.445.000.00

14. CONCLUSIONES

- El software EPA SWMM, es una herramienta que permite el modelamiento dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido.
- Se realizó la estimación para los diferentes periodos de retornos 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, y se efectuó la respectiva comparación con los métodos tradicionales de estimación y con el trabajo realizado por el ingeniero Ávila citado anteriormente, obteniendo resultados favorables para cada uno de ellos.
- El software EPA SWMM dentro de su análisis hidráulico y de escorrentía superficial no modela inundaciones, por lo cual se implementaron tanques virtuales para almacenar el agua que se estaba represando para los periodos de 50 y 100 años donde se estaba presentando dicho inconveniente.
- Para observar el comportamiento de la lámina de agua para los diferentes tiempos de recurrencia, se acudió al software HEC-RAS que modela el comportamiento del flujo y permite el cálculo en régimen permanente de la superficie libre del agua en sus cauces, tanto en régimen subcrítico como supercrítico.
- Los valores de velocidades obtenidos, al ser comparados son muy parecidos entre sí, se recomienda para afirmar si dichos valores son

verdaderamente confiables, hacer las respectivas mediciones en campo para corroborar lo que se planteó en esta investigación.

- Se recomienda el empleo del modelo de cálculo hidráulico de onda dinámica, puesto que se obtienen resultados más precisos, en una modelación, además como es más versátil contempla efectos de flujo inverso y presurizado.

15. BIBLIOGRAFÍA

- República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico. "manual de drenaje para carreteras" INVIAS, Colombia, 2009.
- Monsalve Sáenz, German. Hidrología en la ingeniería, Edición 2. Santafé de Bogotá, alfa omega, año 1999.
- Ven Te Chow; Maidment, David R., y Mays, Larry W. "Hidrología aplicada". Editorial McGraw Hill, 1994.
- Francisco Javier Aparicio Mijares. Fundamentos de hidrología de superficie. Editor, Limusa, 1989.
- Olegario castillo. Universidad de Cádiz en España, departamento de ingeniería industrial e ingeniería civil, área de ingeniería hidráulica. Año de publicación 2013.
- McGhee, Terence J. Abastecimiento de agua y Alcantarillado, Colombia, 6ª Edic. Edit. McGrawHill, 1999, Pág... 268.)
- Kazmann, Rápale G. Hidrología Moderna, México-España-Argentina-Chile, Edit. (C.E.S.S.A.), Pag.26.

- Estudio de la cuenca de La Riereta en Sant Boi de Llobregat, España mediante un modelo de drenaje dual utilizando EPA SWMM Autor: Murcia Balaguer, Anna. Tutor: Gómez Valentín, Manuel.
- Proyecto de inversión del sistema de drenaje de barranquilla, plan integral de la cuenca calle 84.
- Pedro c. Fernández; Sergio Fattorelli. Diseño Hidrológico, segunda edición en español, edición digital. Año 2011.
- Fernando Oñate Valdivieso. Hidrología, Universidad técnica particular de Loja. 2010.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Republica de Colombia. “Taller de lanzamiento fortalecimiento de las capacidades nacionales en estadísticas y cuentas del agua para la generación de basadas en evidencia”, sistema de información del recurso hídrico – SIRH. IDEAM mayo de 2011. Pag 1-4
- Revisión del sistema de alcantarillado de la zona deportiva dentro de ciudad universitaria, utilizando el software epa swmm. REF: TESIS. Autor: Gustavo Alan Bonilla Jaime, Tutor: Cristian Emmanuel González Reyes. Año 2012
- Martínez M. Eduardo, “Hidráulica Fluvial” principios y prácticas. 1era edición, editorial BELLISCO. ANEJO D, año 2001.

- Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, octubre de 2012.

ANEXOS



Universidad de la Costa
CESIÓN DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO
A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD DE LA COSTA

Yo, _____, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Corporación Universitaria de la Costa los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982, del trabajo final de grado denominado

_____, producto de mi actividad académica para optar el título de _____ en la Corporación Universitaria de la Costa, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y publicación. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento en el momento mismo que hago entrega del trabajo final a la Biblioteca Central de la Corporación Universitaria de la Costa, CUC.

NOMBRE

CÉDULA

FIRMA

Barranquilla, D.E.I.P., a los _____ días del mes de _____ de 20____.
"Los derechos de autor recaen sobre las obras científicas, literarias y artísticas en las cuales se comprenden las creaciones del espíritu en el campo científico, literario y artístico, cualquiera que sea el modo o forma de expresión y cualquiera que sea su destinación, tales como: los libros, folletos y otros escritos; las conferencias, alocuciones, sermones y otras obras de la misma naturaleza; las obras dramáticas o dramático-musicales; las obras coreográficas y las pantonimias; las composiciones musicales con letra o sin ella; las obras cinematográficas a las cuáles se asimilan las obras expresadas por procedimiento análogo a la cinematografía, inclusive los video gramas, las obras de dibujo, pintura, arquitectura, escultura, grabado, litografía; las obras fotográficas a las cuales se asimilan las expresas por procedimiento análogo o la fotografía; las obras de artes plásticas; las ilustraciones, mapas, planos, croquis y obras plásticas relativas a la geografía, a la topografía, a la arquitectura o a las ciencias, en fin, toda producción del dominio científico, literario o artístico que puedan producirse o definirse por cualquier forma de impresión o de reproducción, por fonografía o radiotelefonía o cualquier otro medio conocido o por conocer". (Artículo 2 de la Ley 23 de 1982).



Universidad de la Costa
CESIÓN DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO
A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD DE LA COSTA

Yo, _____, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Corporación Universitaria de la Costa los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982, del trabajo final de grado denominado

_____, producto de mi actividad académica para optar el título de _____ en la Corporación Universitaria de la Costa, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y publicación. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento en el momento mismo que hago entrega del trabajo final a la Biblioteca Central de la Corporación Universitaria de la Costa, CUC.

NOMBRE

CÉDULA

FIRMA

Barranquilla, D.E.I.P., a los _____ días del mes de _____ de 20____.

"Los derechos de autor recaen sobre las obras científicas, literarias y artísticas en las cuales se comprenden las creaciones del espíritu en el campo científico, literario y artístico, cualquiera que sea el modo o forma de expresión y cualquiera que sea su destinación, tales como: los libros, folletos y otros escritos; las conferencias, alocuciones, sermones y otras obras de la misma naturaleza; las obras dramáticas o dramático-musicales; las obras coreográficas y las pantonimias; las composiciones musicales con letra o sin ella; las obras cinematográficas a las cuáles se asimilan las obras expresadas por procedimiento análogo a la cinematografía, inclusive los video gramas, las obras de dibujo, pintura, arquitectura, escultura, grabado, litografía; las obras fotográficas a las cuales se asimilan las expresas por procedimiento análogo o la fotografía; las obras de artes plásticas; las ilustraciones, mapas, planos, croquis y obras plásticas relativas a la geografía, a la topografía, a la arquitectura o a las ciencias, en fin, toda producción del dominio científico, literario o artístico que puedan producirse o definirse por cualquier forma de impresión o de reproducción, por fonografía o radiotelefonía o cualquier otro medio conocido o por conocer". (Artículo 2 de la Ley 23 de 1982).