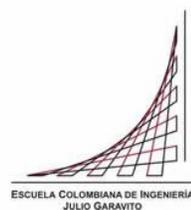


Maestría en Ingeniería Civil

Desarrollo de Mapas de Riesgo de Inundación para la Zona Comprendida desde la Laguna de Fúquene hasta las Compuertas de Tolón.

Juan Carlos Páez Contreras

Bogotá, D.C., 29 de Septiembre de 2015



**Desarrollo de Mapas de Riesgo de Inundación para la Zona
Comprendida desde la Laguna de Fúquene hasta las Compuertas
de Tolón.**

Trabajo de Grado

**Presentado como requisito para optar al título de
Magíster en Ingeniería civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y
Medio Ambiente**

Ing. Germán Santos

Director

Bogotá, D.C., 29 de Septiembre de 2015



La tesis de maestría titulada “Desarrollo de Mapas de Riesgo de Inundación para la Zona Comprendida desde la Laguna de Fúquene hasta las Compuertas de Tolón.”, presentada por Juan Carlos Páez Contreras, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Ing. Germán Santos

Jurado I

Ing. Germán Acero

Jurado II

Ing. Alfonso Rodríguez

Bogotá, D.C., 29 de Septiembre de 2015

Dedicatoria:

A mis padres por su apoyo y amor incondicional.

Agradecimientos:

A mi director de tesis Doctor Germán Santos por su guía y aportes con su conocimiento y experiencia a este trabajo.

A mis amigos, colegas y compañeros que de alguna manera me han colaborado en el transcurso de mi vida profesional.

Resumen

La Laguna de Fúquene es un cuerpo de agua dulce que ha sufrido en más de una ocasión desbordamientos que han afectado a las comunidades que habitan en sus zonas aledañas, provocando graves problemas sociales y económicos para el sector.

Con este estudio se pretende delimitar las áreas de inundación que se presentarían en un evento de precipitación extremo en las zonas aledañas a la laguna de Fúquene, y el tramo del río Suárez comprendido desde su inicio hasta las compuertas de Tolón, con el fin de poder plasmarlas en un mapa denominado “Mapa de riesgo de inundación”, para esto, se realiza una modelación hidrológica en la cuenca aferente a la laguna de Fúquene, basada en eventos de precipitación extrema, obteniendo un hidrograma de creciente para posteriormente realizar su tránsito a través de las secciones topográficas y batimétricas que representan el terreno de la laguna y del tramo en estudio.

Índice General

Dedicatoria:	4
Agradecimientos:	5
Resumen	6
Introducción	1
Capítulo I	2
Marco Teórico.....	2
1.1. Descripción e Importancia:	2
1.2. Contexto:	2
1.3. Problemática.....	3
1.4. Justificación del Estudio.....	4
Capítulo II	6
Antecedentes de Investigación	6
Capítulo III	9
Metodología.....	9
3.1. Recolección de Información.....	9
3.2. Estudio Hidrológico.....	10
3.3. Estudio Hidráulico.....	12
3.4. Delineamiento de Áreas de Inundación	13
Capítulo IV.....	14
Localización de la Zona de Estudio.....	14
Capítulo V	16
Estudio Hidrológico.....	16
5.1. Información Cartográfica.....	16
5.2. Información Hidroclimatológica	16
5.3. Homogeneización de Datos	17
5.4. Análisis de Precipitación	21
5.5. Preparación del Modelo Hidrológico	22
5.5.1. Modelo Digital de Elevación.....	22
5.5.2. Extracción de datos hidrológicos	23
5.6. Parámetros Morfométricos de la Cuenca.....	25

5.6.1.	Tiempo de Concentración.....	25
5.6.2.	Área.....	27
5.6.3.	Pendiente	27
5.6.4.	Estimación de Polígonos de Thiessen	27
5.7.	Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia.....	28
5.8.	Hietogramas de Aguaceros Puntuales.....	29
5.9.	Hietogramas de Aguaceros Espaciales	30
5.10.	Eventos año 2010-2011	31
5.11.	Análisis de Caudales.....	32
5.12.	Método del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service.....	33
5.12.1.	Número de Curva.....	34
5.13.	Modelo HEC-HMS para la Cuenca de la Laguna de Fúquene.....	36
5.14.	Componentes del Modelo	36
5.15.	Datos del Modelo Hidrológico.....	40
5.16.	Tránsito de Creciente para la Cuenca de la Laguna de Fúquene	41
5.17.	Hidrograma de Salida Resultante de la Modelación	43
5.18.	Resultados de la Modelación Hidrológica.....	44
Capítulo VI.....		45
Estudio Hidráulico.....		45
6.1.	Estudio Hidráulico de la Laguna de Fúquene y del río Suarez.....	45
6.2.	Descripción del Modelo Hec-Ras.....	45
6.3.	Geometría del Cauce en Estudio	49
6.4.	Coeficiente de Rugosidad Manning	49
6.5.	Parámetros del Modelo Hidráulico	57
6.6.	Cálculos y Resultados modelo hidráulico.....	58
6.6.1.	Secciones Transversales	58
6.6.2.	Perfil Longitudinal	58
6.6.3.	Tabla De Resultados.....	58
6.7.	Análisis de Resultados.....	59
Capítulo VII.....		69
Conclusiones		69
Capítulo VIII.....		72

Bibliografía.....	72
-------------------	----

Índice de Tablas

Tabla 1. Pérdidas presentadas en la temporada invernal 2011. (CAR 2009).	4
Tabla 2. Estaciones Hidrometeorológicas a usar. Registros Ideam.....	16
Tabla 3. Estaciones Hidrometeorológicas seleccionadas. Registros Ideam.	20
Tabla 4. Herramientas hidrológicas para extracción de datos. Elaboración Propia.	23
Tabla 5. Herramientas hidrológicas para extracción de datos. Elaboración propia.....	24
Tabla 6. Información de precipitaciones totales en los días más lluviosos del 2010 y 2011. (Elaboración Propia).	31
Tabla 7. Valores de CN asignados a las coberturas de la cuenca en estudio. Tomado de (Chow 1959).	35
Tabla 9. Valores de Precipitación Máxima de los Hidrogramas. Elaboración propia.	44
Tabla 10. Factores de Corrección de Cowan. Tomado de (Chow 1959).	51
Tabla 11. Factores de Corrección Laguna de Fúquene. Elaboración propia.	52
Tabla 12. Factores de Corrección Río Suarez Tramo 1 (Elaboración Propia).	53
Tabla 13. Factores de Corrección Río Suarez Tramo 2. Elaboración Propia.....	55
Tabla 14. Factores de Corrección Río Suarez Tramo 3. Elaboración Propia.....	56
Tabla 15. Puntos Verificación de Hidrograma. Elaboración Propia.	64
Tabla 16. Puntos Verificación de Hidrograma y Longitudes. Elaboración Propia.	65
Tabla 17. Porcentajes de Amortiguamiento Caudal Base 15m ³ /s. Elaboración Propia.	66
Tabla 18. Porcentajes de Amortiguamiento Hidrograma Teórico. Elaboración Propia.....	68

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de uso de suelo de la cuenca baja Laguna de Fúquene. CAR.	10
Figura 2. Fotografía de las Compuertas de Tolón. Elaboración propia.....	13
Figura 3. Localización de la Laguna de Fúquene y los municipios que comprenden su cuenca. (Tomada del Igac)	14
Figura 4. Localización del Río Suarez y de las compuertas de Tolón. (Tomada del Igac)	15
Figura 5. Ubicación de la zona de estudio y las estaciones hidrometeorológicas. (Elaboración propia).....	18
Figura 6. Ubicación de la zona de estudio y las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas. Elaboración propia.....	21
Figura 7: Modelación de la cuenca generada en Hec HMS. (Elaboración propia).	40
Figura 8. Almacenamiento durante el paso de una creciente. Tomado de (Aparicio 2004).	42
Figura 9. Resultados de la Modelación Hidrológica. Modelo hidrológico.	43
Figura 10. Hidrograma Resultate de la Modelación Hidrológica. Modelo hidrológico.	43
Figura 12. Diagrama De Canal Para Determinar Ecuación De Energía. Manual del usuario Hec- Ras 4.1.....	48
Figura 13. Zona de la Laguna de Fúquene (Elaboración Propia).	51
Figura 14. Sección típica del primer tramo del río Suarez. Elaboración Propia.	52
Figura 15. Primer tramo del río Suarez. Google Earth.	53
Figura 16. Primer tramo del río Suarez. Google Earth.	54
Figura 17. Sección típica del segundo tramo del río Suarez. Elaboración Propia.....	54
Figura 18. Tercer tramo del río Suarez (Tomado de Google Earth).	56
Figura 19. Sección típica del tercer tramo del río Suarez (Elaboración Propia).....	56
Figura 20. Perfil de flujo primer escenario. Modelo Hec Ras.....	60
Figura 21. Perfil de flujo segundo escenario. Modelo Hec Ras.	60
Figura 22. Perfil de flujo tercer escenario. Modelo Hec Ras.....	61
Figura 23. Perfil de flujo cuarto escenario. Modelo Hec Ras.	62
Figura 24. Curva de Calibración. Modelo Hec Ras	63
Figura 25. Perfil de flujo curva de calibración. Modelación Hec Ras.	63
Figura 28. Hidrograma en Punto de Verificación Caudal Base 15m ³ /s. Elaboración Propia.	66
Figura 29. Hidrograma Teórico en Punto de Verificación. Elaboración Propia.	67

Índice de Anexos

Anexo 1 Información Hidrometeorológica.

Anexo 2 Análisis de Datos de Precipitación.

Anexo 3 Gráficas de precipitaciones mensuales de las estaciones seleccionadas.

Anexo 4 Uso del suelo.

Anexo 5 Ubicación de estaciones.

Anexo 6 Curvas IDF y hietogramas de diseño.

Anexo 7 Pluviograma estación San Miguel de Sema.

Anexo 8 Datos de estaciones seleccionadas.

Anexo 9 Polígonos de Thiessen.

Anexo 10 Valores de área y tiempos de concentración.

Anexo 11 Cálculo de parámetros para el tránsito de la cuenca.

Anexo 12 Hidrogramas resultados del modelo hidrológico.

Anexo 13 Franjas de Inundación para diferentes restricciones aguas abajo.

Anexo 14 Franjas de inundación resultado del modelo permanente y no permanente evento 2011 y $Tr=100$ años.

Anexo 15 Franjas de inundación resultado del modelo permanente y no permanente $Tr=5, 10, 25, 50$ y 100 años.

Introducción

Con el estudio que se propone en este documento, se pretende determinar las áreas de inundación de las zonas aledañas a la laguna de Fúquene para eventos a diferentes periodos de retorno y para una lluvia de diseño seleccionada.

Para tal fin, se realiza un modelo hidrológico de la cuenca de la laguna encontrando con este los hidrogramas de diseño y caudales pico producto de las lluvias de diseño. Estos hidrogramas se transitan por un modelo hidráulico que contiene secciones topográficas y batimétricas de la laguna Fúquene y el río Suarez hasta las compuertas de Tolón, obteniendo como resultado las láminas de agua para cada caudal, presentando dicha información en un mapa, denominado mapa de riesgo de inundaciones.

Capítulo I

Marco Teórico

1.1. Descripción e Importancia:

La laguna de Fúquene (3.155 ha) pertenece al complejo de humedales del Valle del Río Ubaté del que forman parte también las lagunas de Cucunubá (221 ha), Palacio (36 ha), y un sinnúmero de humedales lineales a lo largo de la cuenca que quedaron aislados de los ecosistemas mayores debido a las intervenciones humanas. El complejo de lagunas tiene grandes valores ecológicos y socioeconómicos; es el hábitat de especies de aves (más de 100 especies registradas) y peces endémicos y focales, adicionalmente es visitada anualmente por 32 especies de aves migratorias.

Paralela a la importancia biológica de este complejo de Humedales sobresale la importancia ambiental y socioeconómica para la sociedad. Gracias a la presencia de Fúquene, Cucunubá y Palacio la región ha desarrollado una importante y próspera industria lechera que está sustentada por el clima benigno, la fertilidad de las tierras y la humedad del suelo. Asimismo la pesquería, el turismo y algunos cultivos que proporcionan ingresos las comunidades locales (Boyaca rural, 2010).

1.2. Contexto:

De 1930 a 1960 el Estado y los particulares, preocupados por incorporar vastos territorios a la producción, iniciaron la adecuación de las tierras de los Valles de Ubaté y Chiquinquirá para aprovechar su fertilidad en actividades de agricultura y ganadería. Este proceso inicialmente se ejecutó conjuntamente con la empresa ELECTROAGUAS, materializándose al fin en 1960 con la creación de la Corporación Autónoma Regional de los Valles de Ubaté y Chiquinquirá (CAR). Para entonces, el cauce de los meandros del Río Suárez que ocasionaba enormes pantanos se rectificó por la implementación de un canal recto de 18 kilómetros, conocido como «Canal París», por el cual se evacuarían las aguas de la Laguna de Fúquene hasta un punto final en el cual se implementaron unas compuertas o esclusas llamadas de «Tolón», mecánicamente accionadas por los operarios de la CAR y encargadas de regular el nivel de la Laguna.

Con la construcción de canales y desagües la CAR adecuó cientos de hectáreas pertenecientes a las planicies bajas adyacentes al Río Suárez, sus meandros y la Laguna, hasta convertirlas en tierras aptas para la actividad agropecuaria. El Estado tituló a ganaderos y agricultores sus posesiones y la CAR los reputó usuarios del distrito cobrándoles las tarifas correspondientes; por su parte los municipios, al percibir la tributación predial, se comprometieron a hacer transferencias porcentuales para engrosar los recursos presupuestales de la CAR.

Durante el último tercio del siglo XX estos fértiles valles se explotaron en forma anárquica, sin planes ni políticas estatales. Afloraron desordenadamente centros urbanos y factorías de transformación láctea que crecieron incontroladamente sin prevenir que el impacto ambiental que la polución y el crecimiento no planificado producirían al lecho de la Laguna de Fúquene, invadida por una especie vegetal foránea conocida como «*Elodea*», que se reproduce a partir de cualquier fragmento vegetal, especialmente cuando encuentra profundidades inferiores a 2 metros (Profundidad promedio en la Laguna), y más si se alimenta de los detritus y contaminantes. De esa manera la Laguna de Fúquene se colmató, perdió su ámbito y se saturó hasta pasar de tener una profundidad de entre 18 y 20 mts. A los 2,5 mts, con que cuenta desde finales del siglo pasado (Bustamante, 2010).

1.3. Problemática

La situación anteriormente descrita ha sido causante de varias inundaciones a lo largo del siglo XX, y conforme avanza el tiempo los daños producidos por estas han ido incrementando. La inundación más reciente se presentó en el invierno del 2010-2011, el cual se caracterizó por ser uno de los más críticos de la historia en la región central del país, afectando en algunos casos áreas productivas superiores a 9541 hectáreas. Los impactos económicos que se presentaron con dicha temporada invernal y afectaron la calidad de vida de los habitantes de la zona, se evidencian en la siguiente tabla las pérdidas presentadas en el evento:

Tabla 1. Pérdidas presentadas en la temporada invernal 2011. (CAR 2009).

SECTORES	PERDIDAS
AGRICOLA	\$ 36.799.213.000
PECUARIO PASTOS	\$ 220.091.483.000
AVICULTURA	\$ 69.180.000
FLORES	\$ 1.935.000.000
LECHE	\$ 16.886.250.000
TOTAL	\$ 275.781.126.000

En relación con el futuro de la Laguna de Fúquene, los estudios de la Agencia para la Cooperación Internacional del Japón (JICA, 2000), hicieron una proyección al año 2020 de la ocupación de este ecosistema por plantas acuáticas. Para ese tiempo, la laguna, de no cambiar las condiciones de entrada de nutrientes, estará ocupada en un 54% de Junco y en un 36% por Buchón -planta exótica-; es decir, un 90% de la laguna estaría cubierta por vegetación (JICA, 2000).

1.4. Justificación del Estudio

La Laguna de Fúquene es un cuerpo de agua dulce que ha sufrido en más de una ocasión desbordamientos que han afectado a las comunidades que habitan en sus zonas aledañas, provocando graves problemas sociales y económicos para el sector. Por sólo nombrar dos casos, tanto en 2006 como en 2011, por cuenta de una intensa ola invernal se inundaron más de 2000 ha, afectando a más de siete de los municipios aledaños. Esta situación pone de manifiesto la urgencia de articular labores desde distintas disciplinas para la gestión del riesgo de inundaciones en uno de los cuerpos acuáticos más importantes del centro del país.

En este sentido, la investigación propuesta se justifica en la medida en que ejercicios cartográficos de este tipo constituyen insumos primordiales para el manejo del riesgo y los daños provocados por inundaciones. En el marco de la gestión del riesgo como proceso por el cual se identifican, analizan y cuantifican las probabilidades de pérdidas y efectos secundarios que se desprenden de los desastres, así como de las acciones preventivas, correctivas y reductivas correspondientes que deben emprenderse (Keipi. 2005), estudios como este brindan aportes para una mejor comprensión de la zona afectada y de las consecuencias de una posible inundación.

La elaboración de un mapa de riesgo de la laguna y sus zonas aledañas proveerá información en función de dos variables: la amenaza y la vulnerabilidad, ambas condiciones necesarias para expresar el riesgo, o en otros términos, la probabilidad de pérdidas, en este punto geográfico y dentro de un tiempo específico. Mientras que los sucesos naturales no son siempre controlables, la vulnerabilidad sí lo es, lo cual indica que tener clara la determinación de la zona afectada con el mayor detalle posible, puede contribuir a generar medidas de prevención y minimización del riesgo en la zona. Como herramienta esencial en los procesos de planificación territorial, el trabajo que aquí se propone se puede considerar un insumo vital para los municipios que intervienen en la legislación territorial de la Laguna y sus zonas aledañas.

Además de la innegable pertinencia en la gestión del riesgo y el aporte al ordenamiento territorial de las entidades territoriales involucradas, este trabajo constituye un avance en términos de la investigación en el campo de los estudios hidráulicos y el medio ambiente, en tanto pone en práctica bases conceptuales, técnicas y metodológicas en función de trabajar objetos de estudio poco explorados en la actualidad.

Capítulo II

Antecedentes de Investigación

En 1997, Gerardo Adrián Riccardi publicó un artículo en el que aborda la pertinencia de la elaboración de mapas de riesgo de inundación por medio de la modelación matemática hidrodinámica. Los procesos de urbanización ocurridos en el mundo han producido importantes impactos hidroambientales. Actualmente, se ha convertido la problemática de las inundaciones de ríos incrementada por el escurrimiento de los drenajes pluviales urbanos, en un riesgo hidroambiental en continuo aumento. Ante la imposibilidad de solucionar la problemática de las inundaciones de ríos incrementada por el escurrimiento de los drenajes pluviales urbanos, se verifica que nuevos problemas aparecen a un ritmo mayor que la generación de soluciones. Por lo tanto acciones de tipo no estructurales son necesarias como el control de uso y ocupación del suelo en zonas con riesgo de inundación. La base técnica de estas soluciones es la construcción de mapas de riesgo inundación.

En 2000, la presidencia de República Dominicana publicó una primera versión de un documento titulado “Desarrollo de una Metodología para la Identificación de Amenazas y Riesgos a Inundaciones y Deslizamientos en la Cuenca del Río San Juan” ubicado al suroeste del país, cuyo trabajo consistió en la aplicación de diferentes metodologías para la zonificación de las amenazas y riesgos ante inundaciones y deslizamientos en la cuenca del río, identificando las áreas potenciales a ser afectadas por inundaciones y deslizamientos en la cuenca del río San Juan y los elementos que se encuentran bajo riesgo en las comunidades de Sabaneta y San Juan. Se plantearon como principales objetivos: 1) Contribuir al ordenamiento en el uso del suelo que evite los asentamientos en cauces y zonas con pendientes de alto riesgo; 2) Proveer una herramienta que posibilite la toma de decisiones para la gestión de riesgo en las comunidades de San Juan de la Maguana y Sabaneta; 3) Identificar áreas prioritarias para planes de manejo; 4) Intentar involucrar a las comunidades que integran el área de estudio en el proceso de identificación de amenazas y de los elementos bajo riesgo.

Con este trabajo se generaron recomendaciones orientadas a reafirmar la importancia de las campañas contra desastres naturales, a la potenciación de las capacidades gubernamentales para el seguimiento a este tipo de ejercicios que permiten tanto la prevención de desastres como su disminución, además de arrojar insumos para la identificación de amenazas y riesgos potenciales para las poblaciones cercanas a los ríos.

En 2004, Lluís Ribera Masgrau publica un trabajo titulado “Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad aportación de las innovaciones tecnológicas”. En él expone cómo los mapas de riesgo de inundaciones deberían mostrar las inundaciones en relación con los impactos potenciales que éstas pueden llegar a producir en personas, bienes y actividades. Por ello, es preciso añadir el concepto de vulnerabilidad al mero estudio del fenómeno físico. Así pues, los mapas de riesgo de daños por inundación son los verdaderos mapas de riesgo. *“Para su realización, por una parte, es preciso disponer de los mapas de áreas inundables y de mapas de peligrosidad, con el objetivo de localizar y caracterizar la inundación. Por la otra, es imprescindible contar también con los mapas de exposición y de vulnerabilidad para, a su vez, localizar y caracterizar los elementos en juego a través del conjunto de características que lo debilitan en mayor o menor medida frente al impacto de una inundación. La superposición de estos dos pares de mapas proporciona la cartografía de riesgo de daños por inundación”* (2004: pp, 166). El uso de las llamadas «nuevas tecnologías», como los SIG, la percepción remota, los sensores hidrológicos o Internet, representa un potencial de gran valor para el desarrollo de los mapas de riesgo de inundaciones, que es, hoy por hoy, un campo abierto a la investigación.

En 2012, Ruth Serrano presenta su tesis titulada “Gestión integrada del Riesgo de Inundaciones en Colombia” para recibir su título de Magíster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente en la Universidad Politécnica de Valencia. Su objetivo general consistió en el abordaje del problema de los desastres socio-naturales por inundaciones en Colombia a partir un marco conceptual para la gestión integrada del riesgo de inundaciones y de la revisión del estado del conocimiento actual sobre el tema. Su aporte consistió en documentar los problemas presentados a raíz de las inundaciones recientes, identificar las causas del desastre ocurrido en el periodo 2010 – 2011, y sentar las bases de una propuesta de sistema de gestión integrada del riesgo de inundaciones en La Victoria, Valle del Cauca, Colombia. En su trabajo concluye, entre otras cosas, que La

variabilidad climática y el cambio climático plantean problemas significativos, ya que las condiciones hidrometeorológicas están cambiando, generando un alto grado de incertidumbre en la gestión de los recursos hídricos. A diferencia de lo que ocurre en otros países, Colombia no cuenta con un instrumento legal para la evaluación y control del riesgo de inundaciones, a pesar de que estos eventos se repiten con frecuencia y su persistencia histórica hace que las pérdidas generadas sean comparables a las de los grandes desastres ocurridos por sismicidad y vulcanismo.

Recientemente se publicó en la Revista Luna Azul de la Universidad de Caldas, un estudio titulado “Análisis de la vulnerabilidad biofísica a los riesgos por inundación en la Zona Metropolitana de Toluca, México”. En su investigación, Mendoza y Orozco (2014) realizaron un análisis multicriterio de los factores físico-naturales de la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT), con la finalidad de definir el índice biofísico de exposición a los riesgos por inundación. Para la elaboración del trabajo se utilizó información institucional e información de campo, la cual fue procesada a través de los métodos estadísticos y multicriterio con el apoyo de los Sistemas de Información Geográfica y de percepción remota. En este sentido, los autores reconocen el aporte de este tipo de investigaciones a la toma de decisiones en los campos de la protección civil, el desarrollo regional y la seguridad pública, así como la incorporación en los planes de desarrollo urbano y ordenamiento territorial con una visión de riesgo; y sea de utilidad en los campos de la protección civil, el desarrollo metropolitano, la seguridad pública y el ordenamiento territorial

Capítulo III

Metodología

3.1. Recolección de Información

- Geográfica:

Con base en imágenes satelitales de la zona obtenidas de la NASA, se generó el modelo digital de elevación y con él se determinaron las principales características morfométricas de la cuenca hidrográfica (Área de la cuenca y subcuencas, Pendiente Media, Tiempo de Concentración y longitud de cauces).

- Climatológica:

Para el estudio climatológico se identificaron las estaciones con registros de precipitaciones y/o caudales, que son representativas de la cuenca en estudio.

- Topográfica:

Con el fin de realizar el modelo hidráulico, se gestionó ante la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR la batimetría de la Laguna de Fúquene, y secciones del Río Suarez.

- Uso del suelo:

Mediante información entregada por la CAR, e imágenes satelitales, se determinaron las características del suelo en la zona en estudio.

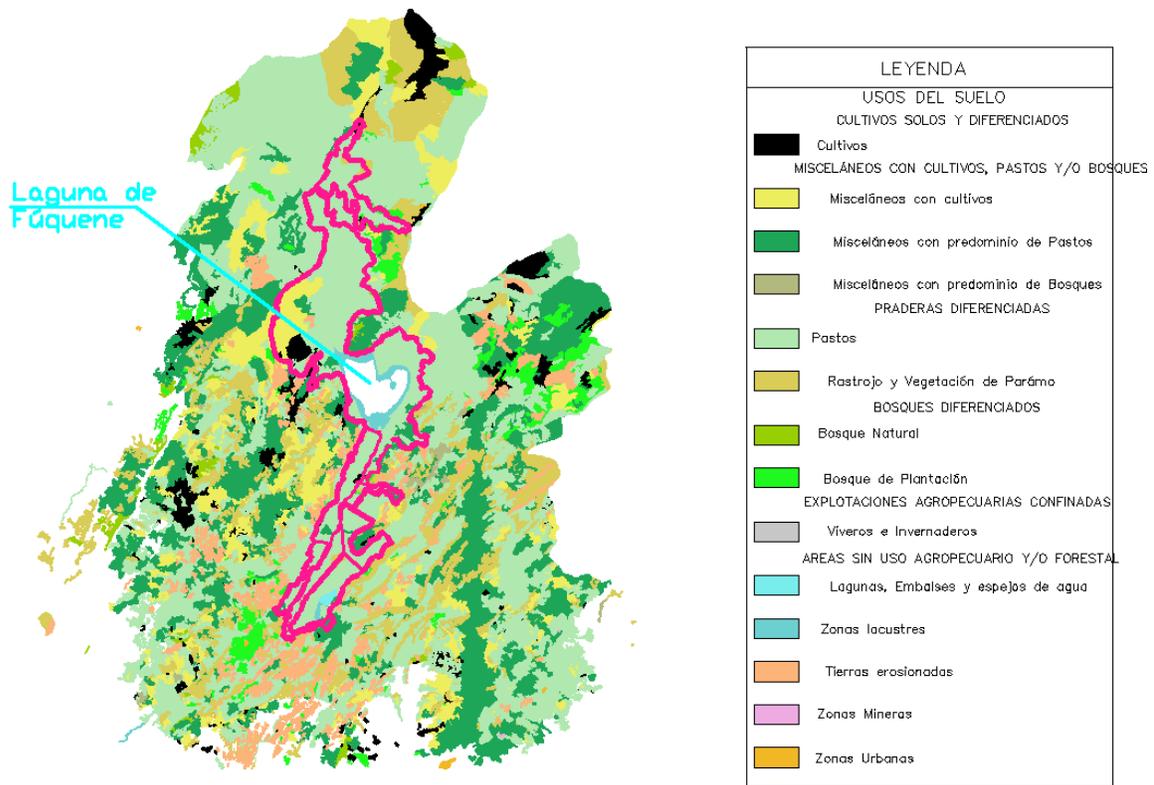


Figura 1. Mapa de uso de suelo de la cuenca baja Laguna de Fúquene. CAR.

- Modelo de Terreno

Las imágenes satelitales se exportaron al software ArcGis, estas imágenes contienen pixeles con el valor de la elevación. Como las imágenes satelitales cuentan con una buena resolución, se generaron curvas de nivel con intervalos de 2 a 20 metros para obtener una adecuada representación del terreno.

Integrando estas curvas de nivel con las topobatemétrías suministradas por la CAR, se obtuvo el modelo de terreno por el cual se hicieron transitar los hidrogramas de crecientes, y en el cual se delimitaron las áreas de inundación.

3.2. Estudio Hidrológico

Con las Imágenes satelitales se activará la extensión HecGEOHMS y con ayuda de este se creará un modelo de terreno que incluya el alineamiento de los drenajes y la dirección de los flujos. Esto con el fin de garantizar que la delimitación de las subcuencas se realizara teniendo en cuenta los cauces. Utilizando este mapa basado en las

direcciones de flujo y drenajes identificados, se identificaron las celdas aportantes a cada cauce y se delimitaron las cuencas y subcuencas.

Con base en el modelo anteriormente descrito, se determinaron las principales características geométricas de la cuenca en estudio (Área, Pendiente Media y Tiempo de Concentración), así mismo se ubicaron y seleccionaron las estaciones más representativas para dicha zona, con lo cual se trazaron las áreas de influencia de las estaciones mediante la realización de Polígonos de Thiessen.

Para estimar los valores de caudal esperados para varios periodos de retorno, fue necesario verificar el ajuste de los datos de la serie de precipitaciones máximas en 24 horas a una distribución de probabilidades adecuada.

Se determinaron las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencias (Curvas IDF) con base en las áreas de influencia por Polígonos de Thiessen, utilizando el método de Vargas M. R., Díaz - Granados D. M, luego se determinó el aguacero de diseño de acuerdo con las curvas IDF para diferentes periodos de retorno.

Adicionalmente a los aguaceros de diseño basados en las curvas IDF, se gestionó ante la CAR los pluviogramas de las estaciones seleccionadas, y se buscó el aguacero más intenso de los años 2010 y 2011.

Para estimar los hidrogramas de creciente, se empleó el Software HEC-HMS con el componente del Método del U.S. Soil Conservation Service, que estima la escorrentía producida por una tormenta en una cuenca, con base en la relación que existe entre humedad antecedente del terreno y el complejo suelo - cobertura vegetal, el cual es de amplio uso en nuestro medio y es adecuado para ser aplicado directamente en cuencas con áreas mayores a 1 km².

Para aplicar el método del Soil Conservation Service, fue necesario obtener el parámetro “Número de Curva (CN)”, el cual determinó el mapa de uso del suelo presentado en la figura 1, y teniendo en cuenta la siguiente clasificación:

- A = (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración. Arenas y gravas profundas.

- B = (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con ratas de infiltración moderadas, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas.
- C = (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos de infiltración lenta, con bajo contenido de materia orgánica y alto contenido de arcilla, arenas arcillosas poco profundas y arcillas.
- D = (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta. Suelos arcillosos con alto potencial expansivo, suelos salinos con nivel freático alto permanente.

3.3. Estudio Hidráulico

El Río Suarez, y por ende la Laguna de Fúquene se encuentran regulados por siete compuertas denominadas compuertas de Tolón, ubicadas en el Río Suarez. La función de dichas compuertas es mantener la cota del Río Suarez en la cota 2538.70msnm, con el fin de permitir que la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Chiquinquirá (Empochiquinquirá) capte el agua necesaria para el suministro del municipio. También tiene como función la evacuación de agua en periodos de invierno.

Las compuertas de Tolón cuentan con dos juegos de compuertas, uno de tres y otro de cuatro. Las cuales pueden ser abiertas una por una o todas en conjunto a diferentes aperturas. Estas compuertas operan de una manera simple y bajo el criterio del operario, si el nivel del agua supera la cota de 2538.70msnm, el operario abre un juego o ambos juegos de compuertas a la apertura que él considere más apropiada, pero siempre manteniendo la cota necesaria para la captación.



Figura 2. Fotografía de las Compuertas de Tolón. Elaboración propia.

Con el modelo de terreno obtenido se hizo transitar el hidrograma de creciente desarrollado en el análisis hidrológico mediante el programa Hec-Ras, y su módulo para flujo no permanente. Este tránsito tuvo como punto de control “las compuertas de Tolón”.

Con el Hidrograma de creciente de entrada desarrollado en el análisis hidrológico y con la restricción anteriormente mencionada se obtuvo el hidrograma de salida, y con este las alturas de lámina de agua resultantes en el modelo de terreno.

3.4. Delineamiento de Áreas de Inundación

Luego de encontrar las elevaciones del agua para las diferentes secciones, se procedió a delinear las áreas correspondientes a las zonas de inundación mediante la modelación en el software ArcGis.

Capítulo IV

Localización de la Zona de Estudio

La zona en estudio se localiza en la provincia de la Villa de San Diego de Ubaté, vía Ubaté-Chiquinquirá. La Cuenca de la laguna de Fúquene incluye los municipios de Carupa, Ubaté, Tausa, Sutatausa, Lenguaque, Guachetá y Cucunubá.

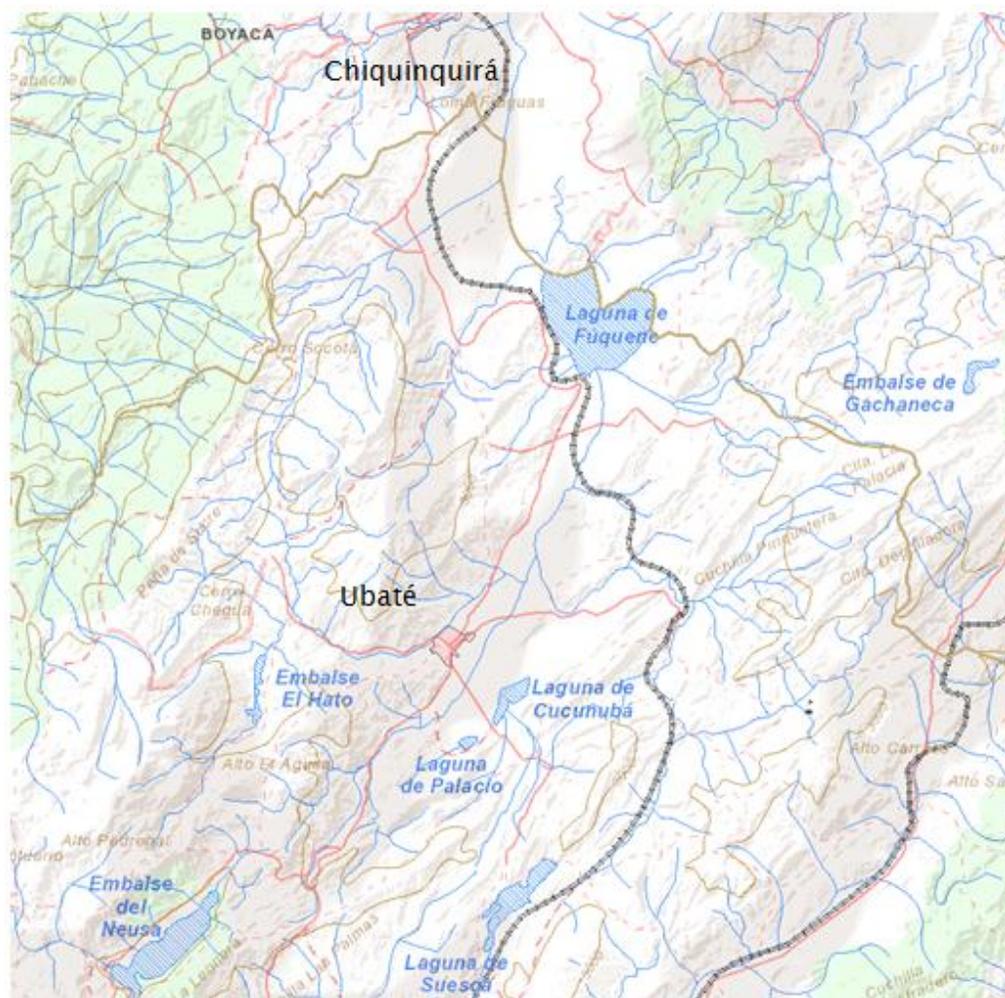


Figura 3. Localización de la Laguna de Fúquene y los municipios que comprenden su cuenca. (Tomada del Igac)

La Zona del río Suarez que se analiza atraviesa los municipios de Susa, Simijaca y San Miguel de Sema, hasta llegar a las compuertas de Tolón jurisdicción del municipio de Chiquinquirá.

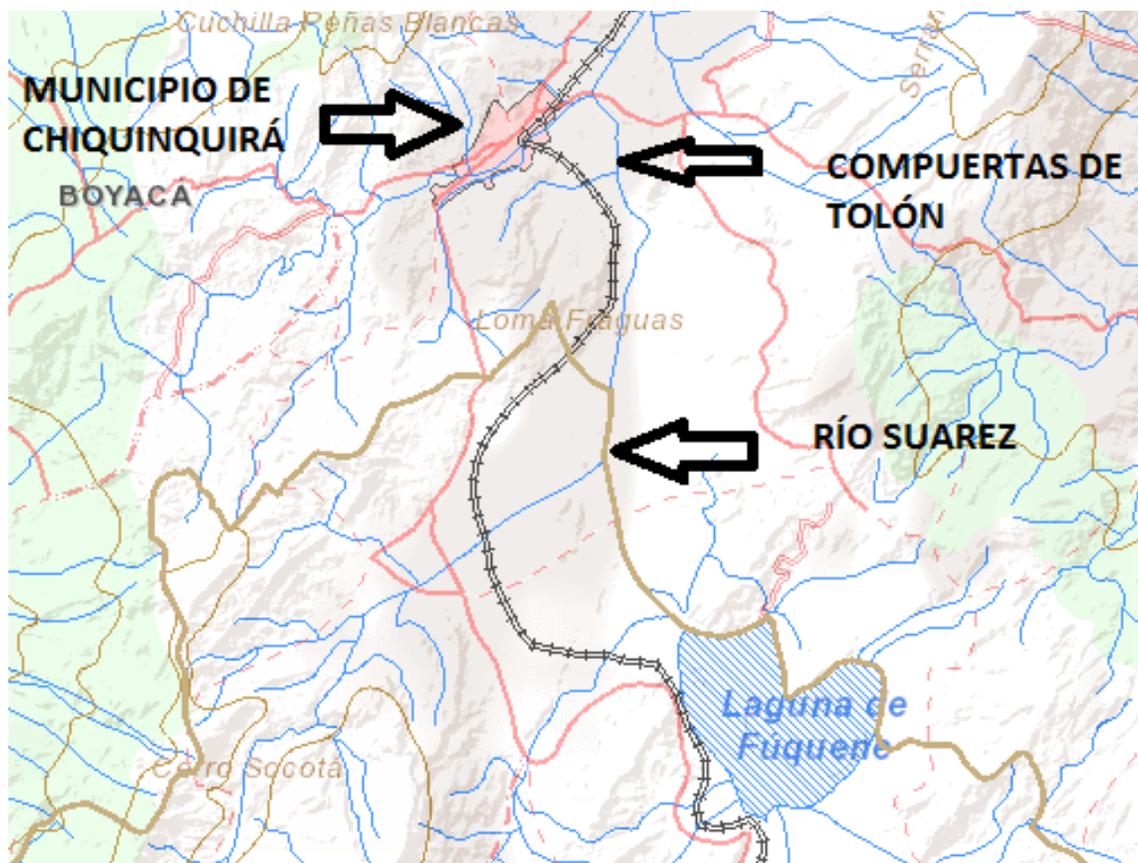


Figura 4. Localización del Río Suarez y de las compuertas de Tolón. (Tomada del Igac)

Capítulo V

Estudio Hidrológico

5.1. Información Cartográfica

El estudio se realizó con información cartográfica de la página web del IGAC, y con imágenes satelitales obtenidas de la página web de la NASA.

- Imagen Satelital zona: ASTGTM2_N05W074.tif

5.2. Información Hidroclimatológica

Se buscaron estaciones de precipitación tipo pluviométricas y pluviográficas, encontrando un listado de estaciones en las corrientes pertenecientes a la cuenca de la Laguna de Fúquene,

Una vez revisados los datos de dichas estaciones, se seleccionaron las que cuentan con registros suficientes para ser utilizadas en el análisis estadístico de datos.

Tabla 2. Estaciones Hidrometeorológicas a usar. Registros Ideam

No	CODIGO	NOMBRE	CORRIENTE	NORTE	ESTE	CENTRO POBLADO	ESTACIÓN	ELEV
1	21201380	ENCANTO EL	SUTA	1062772.784	1021907.012	TAUSA	PG	3150
3	21201930	GUANQUICA	QDA GUANQUICA	1064614.362	1016362.83	TAUSA	PM	2980
4	24010020	CARUPA	CARUPA	1083046.223	1020053.226	CARMEN DE CARUPA	PG	2960
5	24010270	PINO EL	SUTA	1071989.492	1025599.486	SUTATAUSA	PG	2575
7	24010330	ESPINO EL	LENGUAZAQUE	1081211.048	1038528.159	LENGUAZAQUE	PG	2550
9	24010360	MONSERRATE	LAG DE FUQUENE	1088579.717	1031134.992	FUQUENE	PM	2865
10	24010370	SOCOTA	SUTA	1088574.989	1018204.363	CARMEN DE CARUPA	PM	3080
11	24010380	PTE EL	TIBIRITA	1083058.748	1045916.757	GUACHETA	PG	2810
12	24010390	TRIANGULO EL	LENGUAZAQUE	1077533.276	1051463.184	LENGUAZAQUE	PG	2800
13	24010440	TRES ESQUINAS	SUSA	1086734.284	1025593.979	SUSA	PM	3130
14	24010490	PEDREGAL EL	SUTA	1070145.742	1023752.435	SUTATAUSA	PM	2900
15	24010520	HATO 1 EL	EL HATO	1075673.337	1018207.806	CARMEN DE CARUPA	PM	2985
16	24010530	HATO 2 EL	EL HATO	1073830.248	1018208.292	CARMEN DE CARUPA	PM	2974

20	24010570	HATO 6 EL	EL HATO	1070143.614	1016361.537	CARMEN DE CARUPA	PM	3105
21	24010580	HATO 7 EL	EL HATO	1070144.072	1018209.259	CARMEN DE CARUPA	PM	3271
23	24011100	ISLA DEL SANTUARIO	LAG DE FUQUENE	1095956.03	1038519.741	FUQUENE	PG	2580
24	24015150	CARRIZAL	LAG SUESCA	1066464.195	1034840.683	CUCUNUBA	CO	2860
25	24015190	NOVILLEROS	UBATE	1081208.147	1032985.815	VILLA DE SAN DIEGO DE UBATE	CO	2550
31	24015130	SIMIJACA	SIMIJACA	1099636.03	1025589.048	SIMIJACA	CP	2572
32	24015180	ESCLUSA TOLON	SUAREZ	1112541.16	1032970.288	CHIQUNQUIRA	CP	2545
33	24015310	SAN MIGUEL DE SEMA	TINJACA	1101486.518	1040363.428	SAN MIGUEL DE SEMA	CO	2600
34	21201700	LLANO EL	CHECUA	1064617.816	1027450.064	SUESCA	PG	2850
35	24010300	HATILLO EL	LAG SUESCA	1062776.258	1031146.641	SUESCA	PM	2885
36	24015110	BOYERA LA AUTOMATI	UBATE	1077939.55	1025403.29	VILLA DE SAN DIEGO DE UBATE	CO	2610

5.3. Homogeneización de Datos

El tratamiento estadístico de datos requiere, como condición básica, que éstos sean de la misma naturaleza, del mismo origen, obtenidos mediante observaciones y mediciones que hayan seguido procedimientos y métodos semejantes. Las estaciones seleccionadas han sido ubicadas, y se han determinado zonas donde se considera que existe alguna homogeneidad entre los datos registrados y los métodos de observación. Adicionalmente es importante evaluar la calidad de los datos registrados en las estaciones manuales, que en muchos casos se ven afectados tradicionalmente por diferentes fuentes de errores. La primera de ellas se encuentra relacionada con las malas mediciones visuales o con errores de escritura al anotar las cantidades registradas, una segunda fuente de error puede ser debida a la presencia de saltos en la medida o a la ausencia de datos en las series. Por lo tanto, para evaluar la confiabilidad, y complementar estos datos faltantes, se utilizó el método de las dobles masas, el cual además de detectar inconsistencias en la información, permite corregirlas.

El método de las dobles masas analiza la consistencia de una serie de valores de algún elemento hidrometeorológico medido en una estación cualquiera, con base en los datos tomados en otra estación o grupo de estaciones, situadas en una zona climática similar y cuya información se considere confiable. Este sistema de homogeneización de series se utiliza cuando puede suceder un cambio relativo en la variable observada,

medida o registrada en una estación meteorológica. El método también es útil para el relleno de datos faltantes y la extrapolación para extender una serie incompleta al periodo de comparación (Montealegre 2015).

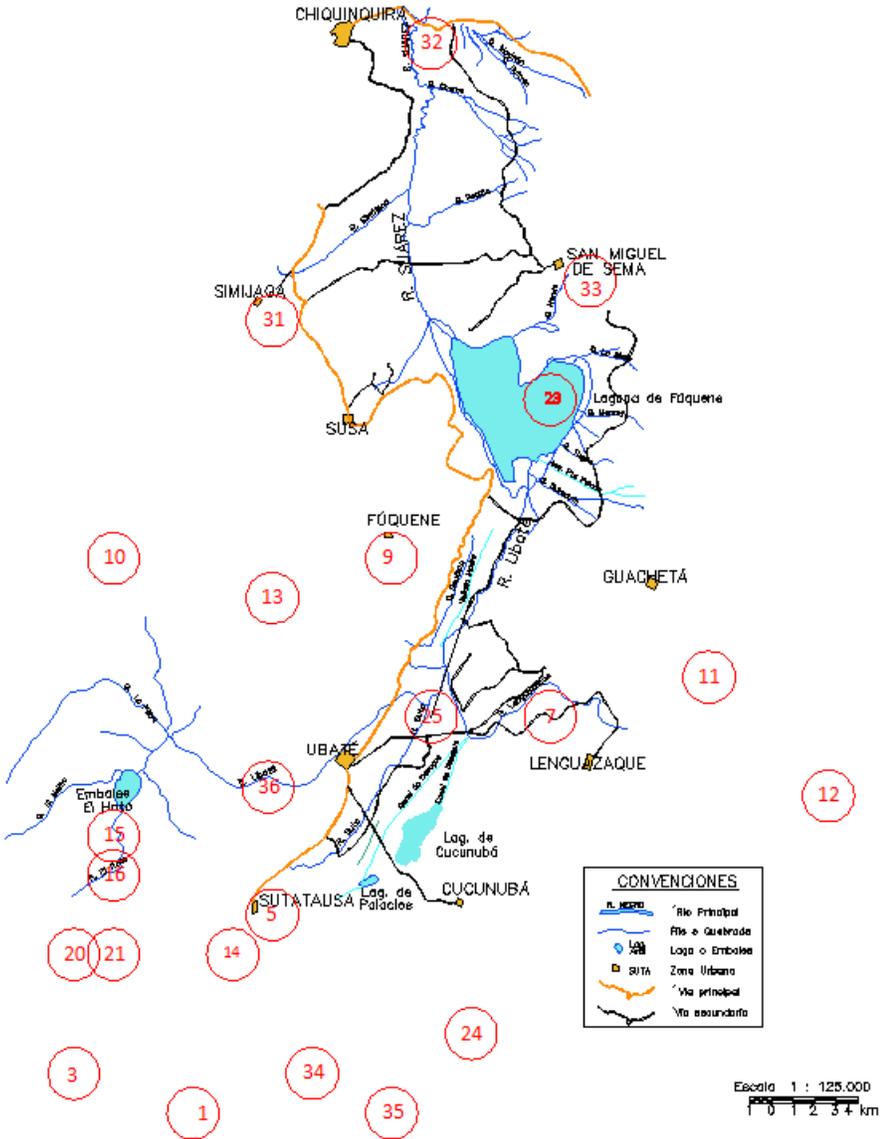


Figura 5. Ubicación de la zona de estudio y las estaciones hidrometeorológicas. (Elaboración propia).

Esta metodología se ha aplicado sobre los valores de precipitación anual para el conjunto de las estaciones empleadas en el desarrollo del trabajo. Los resultados son mostrados de forma gráfica en el anexo 2.

Para realizar el análisis mencionado se seleccionaron las estaciones base para las comparaciones, para tal fin visualmente se señalaron los datos atípicos, y se determinó la media de los datos, encontrando la desviación porcentual con respecto al promedio, seleccionando así las estaciones que menor porcentaje de desviación presentan con respecto a este, las cuales pueden ser consideradas estaciones con un buen nivel de confiabilidad. Se toman estas estaciones base y se ordenan de mayor a menor año, los datos son acumulados y luego promediados. Luego se aplica también la acumulación a la estación problema y se construye un diagrama cartesiano, tomando como abscisas los valores acumulados de la serie base y como ordenadas los de la estación problema. Si todos los puntos aparecen sobre una línea recta, los datos iniciales de la estación problema son válidos sin corrección.

En caso de presentarse cambio de pendiente es necesario restablecer la homogeneidad bajo las condiciones del tramo más confiable, generalmente es el primero, es decir, el correspondiente al último periodo, realizando el ajuste con base en la relación de las pendientes de los dos segmentos de la curva de dobles masas. La relación proporciona una constante K , que multiplicada por los valores inconsistentes de la estación analizada X , permite el ajuste de la serie (Montealegre 2015).

Como se mencionó con anterioridad, todos los datos y gráficas del análisis se presentan en el anexo 2. A continuación se presentan los datos de las estaciones seleccionadas y su ubicación.

Tabla 3. Estaciones Hidrometeorológicas seleccionadas. Registros Ideam.

N o	CODIGO	NOMBRE	CORRIENTE	NORTE	ESTE	CENTRO POBLADO	TIPO	ELEV
1	21201380	ENCANTO EL	SUTA	1062772.784	1021907.012	TAUSA	PG	3150
3	21201930	GUANQUICA	QDA GUANQUICA	1064614.362	1016362.83	TAUSA	PM	2980
7	24010330	ESPINO EL	LENGUAZAQUE	1081211.048	1038528.159	LENGUAZAQUE	PG	2550
9	24010360	MONSERRATE	LAG DE FUQUENE	1088579.717	1031134.992	FUQUENE	PM	2865
10	24010370	SOCOTA	SUTA	1088574.989	1018204.363	CARUPA	PM	3080
12	24010390	TRIANGULO EL	LENGUAZAQUE	1077533.276	1051463.184	LENGUAZAQUE	PG	2800
16	24010530	HATO 2 EL	EL HATO	1073830.248	1018208.292	CARUPA	PM	2974
21	24010580	HATO 7 EL	EL HATO	1070144.072	1018209.259	CARUPA	PM	3271
23	24011100	ISLA DEL SANTUARIO	LAG DE FUQUENE	1095956.03	1038519.741	FUQUENE	PG	2580
25	24015190	NOVILLEROS	UBATE	1081208.147	1032985.815	UBATE	CO	2550
33	24015310	SAN MIGUEL DE SEMA	TINJACA	1101486.518	1040363.428	SAN MIGUEL	CO	2600
34	21201700	LLANO EL	CHECUA	1064617.816	1027450.064	SUESCA	PG	2850

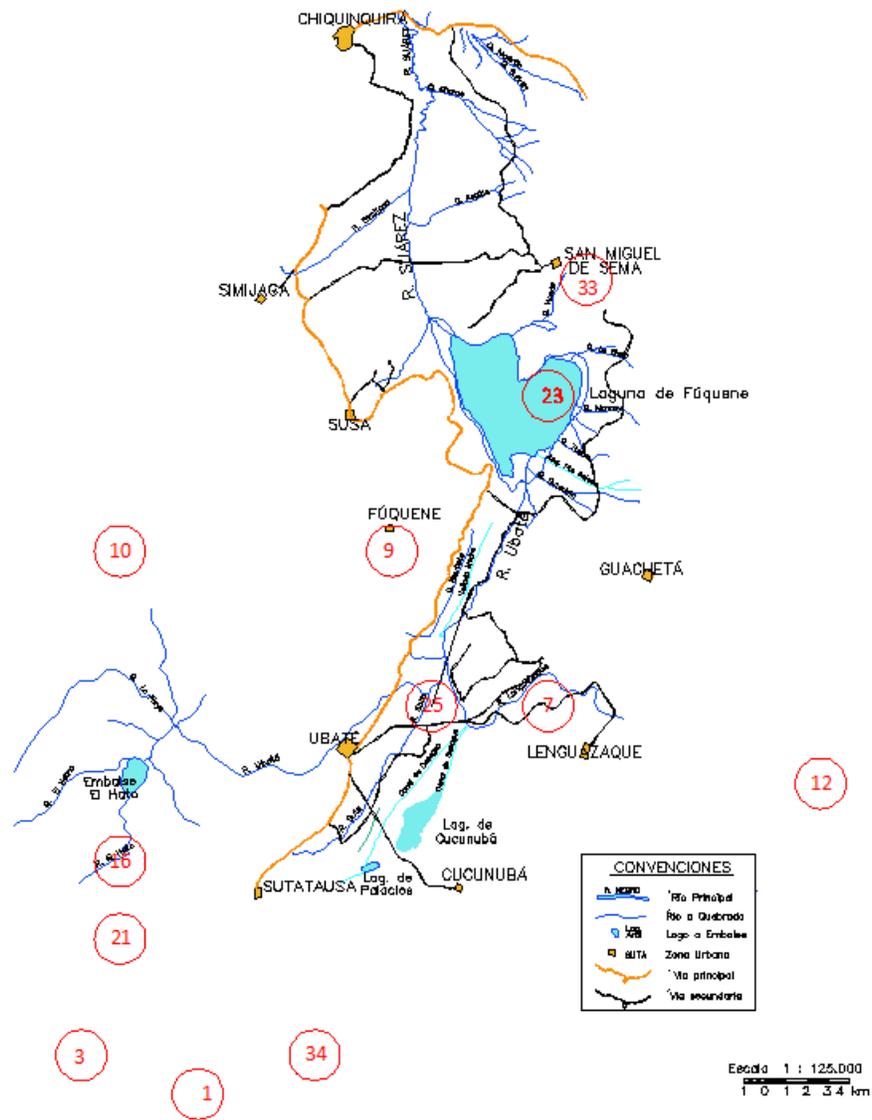


Figura 6. Ubicación de la zona de estudio y las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas. Elaboración propia.

5.4. Análisis de Precipitación

Se analizan los registros mensuales multianuales promedio de precipitación total de las siguientes cuatro estaciones distribuidas por la cuenca en estudio y con datos considerados confiables del análisis de homogeneización de datos:

- El Espino
- Socota

- San Miguel de Sema
- El Llano

Estas estaciones, en general, presentan dos épocas de valores menores al promedio y dos de valores mayores a lo largo del año, resultando un comportamiento bimodal. En promedio, los periodos de menores valores se extienden durante los meses de enero, febrero, julio, agosto y septiembre, mientras las épocas de mayores valores ocurren durante los meses de abril, octubre y noviembre.

Del análisis anterior se evidencia mayor precipitación en las estaciones ubicadas en la parte baja de la cuenca (San Miguel No 33 y Socata No 10), con valores máximos de 150 y 200mm y valores mínimos entre 40 y 45mm, y de menor precipitación en las estaciones de la parte alta de la cuenca (El Espino No 7 y El Llano No 34), con valores máximos de 90 y 100 mm, y valores mínimos entre 40 y 45mm. Se presentan en el anexo 3 los histogramas y resultados de las estaciones anteriormente mencionadas.

5.5. Preparación del Modelo Hidrológico

5.5.1. Modelo Digital de Elevación

Los datos digitales más comunes de la forma de la superficie de la tierra son los modelos digitales de elevación (DEM) basados en celdas. Estos datos se utilizan como entrada para cuantificar las características de la superficie del suelo. Un DEM es una representación de raster de una superficie continua, que en general hace referencia a la superficie de la tierra. La precisión de estos datos se determina principalmente por la resolución (la distancia entre los puntos de muestra).

Para obtener el modelo digital de elevación lo primero que se debe hacer es proveerse de una base que contenga la información necesaria para realizar el DEM, para este caso se hará mediante la descarga de imágenes satelitales a partir de rasters de la NASA.

Los archivos de la NASA son de 22600 cuadrados de la superficie terrestre, los cuales son divididos en grados de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ que aproximadamente cubren $111.11\text{km} \times 111.11\text{km}$ de área. La zona seleccionada se ubica en una sola cuadrícula de 1° .

La imagen satelital descargada fue procesada en el software ArcGis y su módulo ArcMap, en el cual se georeferenció el sistema de coordenadas Magna Sirgas Colombia y se establecieron sus unidades en metros. Adicionalmente se realizó un remuestreo para modificar los pixeles con valores nulos o vacíos, los cuales son marcados en los extremos de elevación (-32768 y 32768).

Estas modificaciones arrojan un modelo digital de terreno completo y confiable que constituye la base para el análisis hidrológico que se expone a continuación.

5.5.2. Extracción de datos hidrológicos

Como se menciona en la metodología se utilizaron las herramientas de hidrología de Hec GeoHMS para encontrar los parámetros morfométricos de la cuenca, y todos los datos necesarios para realizar el modelo hidrológico en Hec HMS.

Las herramientas de Hidrología se utilizan para modelar el flujo de agua a través de una superficie, estas básicamente permiten conocer de dónde viene el agua y hacia dónde va. Dicha información se extrae desde el modelo digital de elevación (DEM) anteriormente descrito. Para extraer la información hidrológica se utilizan herramientas (explicadas a continuación), las cuales pueden aplicarse de forma individual o utilizarse en secuencia para crear una red de corrientes y/o delinear cuencas hidrográficas.

Tabla 4. Herramientas hidrológicas para extracción de datos. Elaboración Propia.

Herramienta	Descripción
Relleno de Sumideros	Rellena sumideros en un ráster de superficie para quitar pequeñas imperfecciones en los datos.
Dirección de Flujo	Crea un ráster de dirección de flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada.
Acumulación de Flujo	Crea un ráster de flujo acumulado para cada celda. Opcionalmente, puede aplicar un factor de peso.
Demarcación de Drenajes	A partir de las grilla de celdas de

	acumulación de flujo se identifican cuáles de ellas pertenecen a una corriente.
Segmentación de Tramos de Drenaje	A los píxeles de cada tramo se les asigna un único valor numérico de identificación para su posterior vectorización.
Delimitación de Cuencas	Utilizando un mapa basado en las direcciones de flujo y drenajes identificados, identifica las celdas aportantes a cada cauce.
Creación de Polígonos de Cuencas	Generación vectorial desde la grilla raster Cat a polígono para cada cuenca.
Creación de Polilíneas de Drenaje	Generación vectorial desde la grilla raster Fdr a polilíneas.
Cuencas Adjuntas	Determina el área de contribución por sobre un conjunto de celdas de un ráster.

Para configurar el proyecto se ubica el punto donde se realizará el estudio (para este caso el punto donde desemboca el río Ubaté), indicando que dicho punto será el punto de proyecto, donde el software traza la cuenca y las subcuencas aferentes a dicho punto. El trazo de la cuenca aferente al punto seleccionado realizado por el software se verifica haciendo un trazo de la cuenca en los mapas disponibles en el geoportal del instituto geográfico Agustín Codazzi, verificando la existencia de una correlación entre la forma y el área de la cuenca.

Para la caracterización de la cuenca se utilizaron herramientas (descritas a continuación), las cuales pueden aplicarse de forma individual o utilizarse en secuencia para encontrar los datos hidrológicos.

Tabla 5. Herramientas hidrológicas para extracción de datos. Elaboración propia.

Herramienta	Descripción
Longitud de tramos de drenaje	Encuentra los valores de longitud del cauce de cada subcuenca,

Pendiente de cauces	Encuentra los valores de pendiente de los cauces de cada subcuenca, tomando los pixeles de los extremos de cada tramo realizando el cálculo $[(\text{cota superior} - \text{cota inferior}) / \text{longitud del tramo}]$
Ruta más larga de viaje en el flujo	Encuentra la distancia más larga que debe recorrer una gota de agua que cae en el extremo más alejado de la subcuenca.
Centroides de cuencas	Encuentra el punto medio o centroide de cada subcuenca.
Elevación de centroides	Calcula la cota de cada centroide y verifica valores, debido a que en algunos casos pueden presentarse errores en el modelo de terreno por nubosidad y pueden aparecer cotas con valores muy superiores a los de terreno o con valores nulos.

Con los procedimientos anteriores se obtuvieron varios parámetros morfométricos de las subcuencas como los son pendientes, longitudes de cauce y áreas, adicionalmente se obtuvo el insumo necesario para encontrar tiempo de concentración y número de curva, parámetros de la cuenca necesarios para el modelo.

5.6. Parámetros Morfométricos de la Cuenca

Para las cuencas en estudio se han evaluado los parámetros de tiempo de concentración, área y pendiente media, determinando las características morfométricas de la cuenca utilizando el software ArcGIS y su módulo HecGeoHMS (explicado en el capítulo anterior).

5.6.1. Tiempo de Concentración

Se define el tiempo de concentración, TC, como el tiempo requerido para que la escorrentía superficial llegue al punto bajo desde la parte más apartada del área de drenaje. Para encontrar este valor, existen diversas metodologías, HecGeoHms trae

incorporada la metodología del Tr-55 que realiza el proceso de cálculo estimando los tiempos de viaje desde el punto más lejano hasta el inicio del cauce principal, en el cauce principal y en la zona lateral a los cauces. Sin embargo el método no es muy conocido y es poco usado en este tipo de análisis, por lo que se utilizará la metodología recomendada por Kirpich, Temez y Ranser, las cuales se explica .a continuación.

- Fórmula de Kirpich

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (1)$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica, en horas.

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.

S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

- Formula de Temez

$$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (2)$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica, en horas.

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.

S: Pendiente total del cauce principal, en porcentaje

- Formula de SCS-Ranser

$$T_c = 0.947 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (3)$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica, en horas.

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.

H: Diferencia de cotas entre extremos de la cuenca.

Se selecciona la metodología de Kirpich por contar con un factor de seguridad alto, y por su amplio uso en este tipo de análisis, la cual permite calcular el tiempo de concentración en función de la longitud y la pendiente del cauce principal.

5.6.2. Área

El área de drenaje se obtiene a partir del acondicionamiento del modelo de terreno expuesto anteriormente. HecGeoHMS delimita la cuenca y la subdivide en varias subcuencas. En el anexo 8 se presenta esta delimitación. Los valores de área de cada subcuenca y los valores de tiempo de concentración se presentan en el anexo 10. El área total de la cuenca hasta el inicio de la laguna es de 961.04 Km².

5.6.3. Pendiente

Para el cálculo de la pendiente, HecGEOHMS toma los pixeles de los extremos de cada tramo de la subcuenca realizando el cálculo ((cota superior – cota inferior) / longitud del tramo). Al ser la cuenca subdividida en varias subcuencas y por ende, tratarse de tramos cortos de cauce, se considera apropiado el cálculo generado internamente por el programa. Los valores estimados se presentan en el anexo 10.

5.6.4. Estimación de Polígonos de Thiessen

Para evaluar la lluvia sobre un área determinada se puede realizar mediante el uso de la posición relativa de los pluviómetros o pluviógrafos respecto del área. Si sólo hay uno de estos en la zona, el área de la cuenca puede estar representada por este. Sin embargo, cuando existen varios pluviómetros o pluviógrafos, para evaluar cuál es el valor

de lluvia que se puede asociar al área en cuestión, se pueden utilizar varios métodos. Para cuencas de topografía suave o planas, como es el caso de la cuenca en estudio, se suele utilizar el método de los polígonos de Thiessen que se describe a continuación.

Los polígonos de Thiessen tratan de evaluar qué área de la cuenca le pertenece a cada pluviómetro o pluviógrafo. De esta manera se puede establecer una correspondencia de cada parte de la cuenca con un pluviómetro concreto, para ellos se sigue el siguiente procedimiento:

- Se unen los pluviómetros adyacentes con líneas rectas.
- Se trazan mediatrices a las líneas que unen los pluviómetros¹.
- Se prolongan las mediatrices hasta el límite de la cuenca

Con este procedimiento cada pluviómetro o pluviógrafo queda con un área de influencia dentro de la cuenca. Como el procedimiento que se tomó fue el análisis por subcuencas, se encuentra qué pluviómetro o pluviógrafo le corresponde a cada subcuenca, y en caso que a una subcuenca le correspondan dos o más de estos, se toma el de mayor valor de precipitación o el que mayor área de influencia tenga en la subcuenca,

ArcGis cuenta con una herramienta para el trazo de estos polígonos, construyendo un shape (capa) de puntos a partir de coordenadas XYZ que representa cada una de las estaciones, y utilizando la herramienta “análisis”, permite crear polígonos de Thiessen a partir del shape creado y la delimitación de la cuenca. El trazo de estos polígonos se muestra en el anexo 9.

5.7. Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia

Es importante, además de cuantificar la lluvia que cae registrada en pluviómetros, poder predecir cuánto podrá caer en un futuro y cuál puede ser la máxima precipitación, con el fin de analizar los caudales de agua que producen las cuencas en eventos extremos. Sin embargo, un evento de lluvia es un evento aleatorio y para estudiar su evolución y predicción ha de realizarse mediante conceptos probabilísticos. Las curvas

¹La Mediatriz es una línea recta perpendicular a un segmento de recta y que parte de su punto medio. Como las figuras formadas son triángulos, las mediatrices se encuentran en un punto dentro del mismo.

IDF pretenden exactamente eso, asociar la intensidad con la duración de la lluvia y la probabilidad de ocurrencia o frecuencia. De acuerdo con (INVIAS 2009), se calcularon las curvas intensidad - duración - frecuencia teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{(t/60)^c} \quad (4)$$

En donde:

I: Intensidad de precipitación, mm/h.

T: Periodo de retorno, años.

t: Duración de la lluvia, horas.

M: Promedio de la precipitación máxima anual en 24 horas, mm.

Según (INVIAS 2009), la zona de proyecto se encuentra en la región uno o región Andina, la cual es influenciada directamente por las condiciones de terreno y la altitud. En esta las lluvias pueden ir desde 1500mm anuales en los valles interandinos, hasta los 4000mm al año en los altiplanos y bosques alto andino. Como se dijo anteriormente, se caracteriza por presentar un ciclo bimodal en sus precipitaciones, con picos generalmente en los meses de marzo-abril y octubre-noviembre. Para esta región la referencia bibliográfica asigna a los parámetros a, b, c y d los valores de 0.94, 0.18, 0.66 y 0.83 respectivamente.

Se calculan curvas IDF para cada uno de los valores obtenidos de la zonificación descrita en los polígonos de Thiessen, con periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años y con una duración máxima de 300 minutos. Los valores y gráficos de dichas curvas se presentan en el anexo 6.

5.8. Hietogramas de Aguaceros Puntuales

En el análisis hidrológico de la cuenca, no es suficiente conocer el dato de la precipitación máxima para determinado tiempo y periodo de retorno. Es necesario conocer la evolución de esa precipitación a lo largo de ese determinado tiempo. Por tal motivo es necesario elaborar hietogramas de diseño.

Este hietograma refleja la distribución de la precipitación máxima en el tiempo determinado más lluvioso que se produce en un periodo de retorno. Para esto se realizó el siguiente procedimiento:

- Con base en las curvas intensidad – duración - frecuencia, presentadas anteriormente, se calculan las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 300 min y periodos de retorno entre 5 y 100 años.

- Como es usual en este tipo de análisis, mediante el método del Bloque Alternativo, se calculan los incrementos de lluvia. Estos fueron arreglados de la siguiente manera: el valor más bajo se colocó en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocó en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicó en segundo lugar, el cuarto valor se localizó en el penúltimo lugar, y así sucesivamente. Estos cálculos se presentan en los archivos y los Hietogramas de Diseño se presentan en el anexo 7.

5.9. Hietogramas de Aguaceros Espaciales

Los hietogramas de lluvia puntual se deben transformar a hietogramas de lluvia espacial, para tener en cuenta el hecho de la espacialidad de las cuencas, y que la precipitación promedio en un aguacero en una cuenca es menor a medida que aumenta su área de drenaje.

Para esto se utiliza la fórmula de Fhrüling, la cual arroja valores típicos del factor $f(a)$ de reducción de lluvia puntual por espacialidad de la cuenca.

$$i_m = i_0 (1 - 0.0054 A^{0.25}) \quad (5)$$

Dónde:

i_m : Intensidad promedio de lluvia en la cuenca hidrográfica, mm/h.

i_0 : Intensidad de lluvia puntual medida en la estación registradora, mm/h.

$(1 - 0.0054 A^{0.25})$: Coeficiente de reducción de la lluvia, $f(a)$, por el tamaño del área de drenaje A , estando esta última variable expresada en km^2 .

Sin embargo como se muestra en el anexo 10, las subcuencas delimitadas son de área reducida lo que conlleva a coeficientes de reducción de lluvia cercanos al valor unitario, por lo cual no se tuvo en cuenta dichos coeficientes y se emplaron los hietogramas de aguaceros puntuales.

5.10. Eventos año 2010-2011

El periodo comprendido entre los años 2010 y 2011 fue catalogado por expertos como “el peor invierno de los últimos tiempos en todo el país”, caracterizado por sus altas y prolongadas precipitaciones e inundaciones en todo el territorio nacional.

La cuenca en estudio no fue la excepción. Como ya se mencionó, se presentaron importantes inundaciones en la parte baja de la cuenca, produciendo importantes daños y pérdidas a las poblaciones aledañas. Es por lo anterior que se consideró importante incluir en el análisis el evento de mayor precipitación que se produjo en estos dos años.

Con la información de precipitaciones diarias se obtuvieron los días de mayor precipitación de los dos años y se organizaron en la siguiente tabla, donde se muestra: la fecha del evento, la cantidad de lluvia medida en milímetros, y el código de la estación que registró el evento.

Tabla 6. Información de precipitaciones totales en los días más lluviosos del 2010 y 2011. (Elaboración Propia).

Código Estación	Días de Mayor Precipitación de los años 2010 y 2011 (mm)							
	21/03/20 11	21/04/20 11	22/04/20 11	13/05/20 11	20/08/20 11	01/10/20 11	15/10/20 10	03/11/20 11
2120138	32.2	26.5	41.4	28.1	0.5	0.4	0	5.4
2120193	5.6	21.4	18.7	10.7	59.8	0	15.2	0
2401033	40	22.3	45.9	61.5	0.2	8.9	0	0
2401036	21	53	31	45	3	0	6	0
2401037	59	48	25	16	11	24	79	5
2401039	7.4	0	40.3	36	0	9.1	0.3	0
2401053	45	30	59	36	2	0	0	0
2401058	40	25	20	37	0	10	3	2
2401110	10.3	25.5	26.2	16.3	1	40	0.5	47.3
2401519	25.7	21	34.1	29	0	9	0	2.1
2401531	43	27.5	44.1	29.6	6.9	67.2	4.2	5.5
2120170	30.6	38.5	47	37.8	1.7	1.2	0	0

En esta tabla se evidencia que el día de mayor precipitación fue el 21 de abril del 2011, donde se registró un promedio de 44.0mm. Dicho esto se gestionó ante la CAR el suministro de los pluviogramas² disponibles de las estaciones seleccionadas para el análisis, encontrando que en su mayoría estos no cuentan con registro de esa semana o no registran eventos de precipitación, únicamente en la estación de código 2401033 de nombre San Miguel de Sema, y ubicada en el municipio del mismo nombre se registró un evento útil para el análisis.

En el Pluviograma suministrado se encontró que el evento seleccionado (22 de Abril del 2011), se extendió desde las 2:00pm del día anterior (21 de Abril del 2011), hasta las 6:00am del día siguiente (23 de Abril del 2011), es decir que los eventos del 21 de abril y 22 de abril (incluidos en la tabla 6 como los más intensos de los años 2010 y 2011), pertenecen a un solo evento de precipitación, el cual tiene una duración de 40 horas.

Este evento representa en forma acertada los aguaceros que se produjeron en el 2011, donde se caracterizaban por durar muchas horas variando su intensidad. Sin embargo como ya se mencionó, no se encontró información útil de las demás estaciones seleccionadas, y tomar el evento de la estación San Miguel de Sema como el evento de toda la cuenca, representaría una sobre estimación o subestimación de las precipitaciones en las demás estaciones. Por esta razón se tomó la sumatoria de las precipitaciones de los días 21 y 22 de Abril de 2011, y se arreglaron para que tuvieran la misma distribución temporal del evento de la estación San Miguel de Sema, y así obtener los hietogramas del evento de diseño. Dichos hietogramas se presentan en el Anexo 6.

5.11. Análisis de Caudales

Como se mencionó anteriormente la extensión de ArcGis, GeoHechHMS permite la construcción de un modelo hidrológico básico a partir de un modelo digital de terreno reacondicionado. A partir de este modelo se pueden extraer los datos necesarios para construir un modelo en HEC HMS y con este estimar los caudales pico en las cuencas y subcuencas de la zona de estudio.

²Un pluviograma es el registro en un gráfico de la cantidad de agua caída en un periodo de tiempo determinado, que permite establecer la distribución e intensidad de las lluvias, ya que permite conocer la hora de comienzo y finalización de las precipitaciones así como su intensidad en litros por metro cuadrado caídos en una hora.

5.12. Método del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service

El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia, considerada como uniforme en el espacio y variable en el tiempo. Este tipo de modelo tiene las siguientes condiciones:

- El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva y las tormentas seleccionadas para el análisis deben ser de corta duración.
- El exceso de precipitación está uniformemente distribuido en toda el área de drenaje; si ésta es muy grande, debe dividirse en subcuencas analizando tormentas que cubran toda la subárea.
- El tiempo base de la duración de la escorrentía directa resultante de un exceso de lluvia de una duración dada es constante.
- Las coordenadas de todas las duraciones de escorrentía directa de una base de tiempo común son directamente proporcionales a la cantidad total de escorrentía directa representada por cada hidrograma.

Para una cuenca dada el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características de la cuenca. El hidrograma unitario se considera único para la cuenca dada e invariable con respecto al tiempo y es aplicable solamente cuando no se presenten cambios ni almacenamientos apreciables en la cuenca estudiada.

Se ha tomado el tiempo de concentración para cada una de las subcuencas hidrográficas de acuerdo con esta metodología ya explicada y sus valores se presentan en el anexo 10.

El valor CN corresponde con el número de curva de la metodología del Soil Conservation Service, de acuerdo con las referencias bibliográficas.

La distribución temporal del hietograma de lluvia efectiva que causa escorrentía superficial y la magnitud de las abstracciones de una tormenta se pueden obtener por el método del Soil Conservation Service a partir de las siguientes relaciones empíricas:

$$Q = \frac{(P - 0.20S)^2}{P + 0.80S}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10.0$$

(6)

Dónde:

Q: Escorrentía total acumulada, pulgadas

P: Precipitación total del evento, pulgadas.

S: Infiltración potencial o retención potencial máxima, pulgadas.

CN: Curva número.

5.12.1. Número de Curva

Como se menciona en la primera parte del documento, una de las informaciones preliminares de la CAR es el recubrimiento de suelos de la cuenca de la laguna de Fúquene, este mapa cuenta con once (11) tipos diferentes de recubrimiento, a los cuales se les asignó un valor de número de curva según la metodología del Soil Conservation Service (SCS).

La metodología del SCS tabula el número de curva según el tipo de suelo y el uso de la tierra, definiendo 4 tipos de suelos, A, B, C y D.

Para el caso de la zona en estudio se encuentran tierras con alto contenido orgánico en su primer estrato, y contenido de arcillas y limos en los siguientes. Por tal motivo el grupo que más se ajusta a estas características es el grupo C. Basándose en la tabla 5.5.2 de (Chow 1959), el número de curva tendrían los siguientes valores para los tipos de cobertura encontrados en la laguna de Fúquene:

Tabla 7. Valores de CN asignados a las coberturas de la cuenca en estudio. Tomado de (Chow 1959).

Cobertura	Valor de CN
Bosques de Plantación	77
Bosques Naturales	70
Cultivos	88
Misceláneos de Cultivos	82
Misceláneos de Bosques	80
Misceláneos de Pastos	83
Pastos	74
Rastrojo y Vegetación de Paramo	70
Tierras Erosionadas	87
Zona Lacustre	95
Zona Urbana	90

Para incluir valores al modelo creado en ArcGis se crea una grilla de valores de CN a partir de los polígonos que aporta el archivo en formato dwg suministrado por la CAR y mostrado en el anexo 4. Como primera medida en ArcCatalog se crearon las entidades de polígonos para cada tipo de suelo con un atributo llamado CN, esto con el fin de poder asignarle los valores de la tabla anterior.

Los siguiente es importar el archivo dwg a Arcgis y una vez allí se exportan únicamente los polígonos previamente identificados por colores y que representan las áreas de cada cobertura. Hecho esto en la opción *edit* se deben combinar las capas exportadas con las entidades creadas y asignarle el valor CN correspondiente.

Finalmente para que los valores de CN puedan ser extraídos por la extensión Hec GeoHMS, los polígonos deben ser transformados a formato raster, lo cual se hace en las opciones *herramientas de conversión y conversión de polígonos a raster*, obteniendo así

la grilla de valores CN. Hec GeoHMS toma este archivo raster y asigna un valor de CN a cada subcuenca encontrada previamente.

5.13. Modelo HEC-HMS para la Cuenca de la Laguna de Fúquene

Como se mencionó anteriormente GeoHechMS permite exportar los datos de las subcuenca al programa HEC-HMS donde se pueden hacer modelos hidrológicos por diferentes métodos. Para la zona en estudio se usará el método del hidrograma unitario del Soil Conservation Service.

El cálculo del hidrograma total se realizó considerando el hidrograma unitario afectado por la escorrentía directa o precipitación efectiva en cada duración unitaria del hietograma, el cual se va desplazando a tal duración. El hidrograma total resultante es la suma de las ordenadas de los diversos hidrogramas unitarios para cada valor constante de tiempo. Para el presente estudio no se adicionó el caudal base, dado que no se posee información para su obtención y que su porcentaje es mínimo en relación al caudal pico.

Según (INVIAS 2009) El modelo computacional HEC-HMS ha sido diseñado para simular la escorrentía superficial en una corriente de agua en respuesta a un evento de precipitación como un sistema interconectado de componentes hidrológicas e hidráulicas. Cada componente se modela como un aspecto del proceso precipitación - escorrentía dentro de una porción de la cuenca hidrográfica, comúnmente referida como una subcuenca. Una componente puede representar una entidad de escorrentía superficial, un canal de una corriente, o un embalse. La representación de una componente requiere de un conjunto de parámetros que especifican las características particulares de tal componente y las relaciones matemáticas que describen los procesos físicos que ocurren y la involucran. El resultado del proceso de modelación es la determinación de los hidrogramas de creciente en puntos determinados de la cuenca hidrográfica.

5.14. Componentes del Modelo

A continuación se presenta la descripción teórica del modelo computacional HEC-HMS (INVIAS, 2009).

- **Red de Canales**

La cuenca hidrográfica se subdivide en un sistema interconectado de canales utilizando el modelo de terreno que describe las características existentes o proyectadas de la red de drenaje. En primer término, se delimita la cuenca hidrográfica, la cual se subdivide posteriormente en un número determinado de subcuencas de acuerdo con sus propias características, determinando el ejercicio anterior el número y tipos de componentes de canales que se usan en el modelo y su interrelación entre ellas.

- **Componente de Escorrentía Superficial del Terreno**

La componente de escorrentía superficial del terreno de las subcuencas se utiliza para representar el movimiento del agua sobre la superficie del terreno y en los canales de las respectivas subcuencas. El dato de entrada a esta componente es el hietograma de precipitación total. La precipitación efectiva que produce escorrentía superficial se calcula substrayendo al valor de la precipitación total la infiltración y las pérdidas por detención en el terreno con base en una función de la tasa de infiltración del agua en el suelo. Para los estimativos anteriores, se supone que la precipitación y la infiltración son uniformes sobre cada una de las subcuencas establecidas. Estas pérdidas debidas a la interceptación superficial del terreno, almacenamientos en depresiones e infiltración son denominadas en el modelo computacional HEC-HMS como las pérdidas de la precipitación, las cuales pueden ser estimadas a través del método de la curva número CN del Soil Conservation Service, SCS.

Los excesos de lluvia efectiva son posteriormente transitados a través del canal principal hasta la salida de la subcuenca, estimándose el hidrograma de escorrentía respectivo. La técnica del hidrograma unitario produce un hidrograma de escorrentía en el punto más aguas abajo de la subcuenca respectiva.

El modelo computacional HEC-HMS tiene en cuenta las siguientes metodologías de hidrogramas unitarios: Clark, Snyder y adimensional del SCS. Para las cuencas hidrográficas en consideración, también por su simplicidad y uso arraigado, se ha tenido en cuenta el método del hidrograma unitario adimensional del SCS, el cual se basa en las características del tiempo de desfase, el cual a su vez se basa en el tiempo de concentración, y en el área de drenaje de las subcuencas consideradas.

La transformación de la lluvia efectiva en escorrentía a través de métodos de tránsito permite una distribución uniforme de la escorrentía superficial sobre el terreno a lo largo de la longitud del canal principal.

Esta distribución uniforme de entradas de caudal localizadas es particularmente importante en cuencas hidrográficas en donde muchos canales laterales contribuyen al caudal a lo largo de la longitud del canal principal. La distribución uniforme de escorrentía desde una subcuenca se puede obtener utilizando combinaciones de tres elementos conceptuales: áreas de flujo sobre el terreno, canales colectores y un canal principal. La técnica de tránsito seleccionada es utilizada para transitar la lluvia efectiva sobre las áreas de flujo sobre el terreno, esta metodología es usada para crecientes laterales entrantes a un canal colector y aguas arriba de éste, y caudales laterales entrantes a través del canal principal. En esta teoría, el elemento de flujo sobre el terreno es un canal rectangular ancho de base unitaria, en el cual el valor de la rugosidad de Manning ha sido reemplazado por un factor de rugosidad de flujo sobre el terreno.

Cuando se aplica la teoría de tránsito a un elemento de flujo sobre el terreno, el caudal lateral entrante es la precipitación efectiva, y la salida es un caudal por unidad de ancho. Un elemento de flujo sobre el terreno se describe por medio de cuatro parámetros: su longitud típica de flujo sobre el terreno, su pendiente y factor de rugosidad, y el porcentaje del área de la subcuenca representados por estos elementos previos. Un área de flujo sobre el terreno es utilizada para modelar la escorrentía proveniente de usos de tierra permeables y otra área es utilizada para modelar superficies impermeables. La creciente desde los elementos de flujo sobre el terreno viaja hasta la salida de la subcuenca a través de uno o dos elementos de canales sucesivos. Un canal se define por su longitud, pendiente, rugosidad, forma, ancho o diámetro, y talud de la sección transversal. El último canal en una subcuenca es llamado el canal principal, y cualquier canal intermedio entre los elementos de flujo sobre el terreno y el canal principal es llamado canal colector.

- **Componente de Tránsito en Canales**

Se utiliza una componente de tránsito del hidrograma de escorrentía en los canales para representar la transformación de la onda de creciente a lo largo de ellos. El dato de entrada a esta componente es un hidrograma de creciente en el punto más aguas arriba, resultante de contribuciones individuales o combinadas de escorrentía de las

subcuencas y de su tránsito en canales o embalses. Si se utiliza el método de la onda cinemática, la escorrentía distribuida de los elementos de subcuenca localizadas dentro de la propia subcuenca en consideración es también un dato de entrada, el cual se combina con el hidrograma de creciente más aguas arriba mencionado previamente, para ser transitados hasta el final del tramo de canal. El hidrograma es transitado hasta punto más aguas abajo del canal en estudio con base en las características geométricas y de rugosidad de éste.

El tránsito de crecientes es utilizado para simular el movimiento de la onda de creciente a través de tramos de canales y embalses. La mayoría de los métodos de tránsito de crecientes disponibles en el modelo computacional HEC-HMS están basados en la ecuación de continuidad y alguna otra relación entre el caudal y el almacenamiento o el nivel de agua. Los métodos que utiliza este modelo son: Muskingum, Muskingum - Cunge, onda cinemática, Puls modificado, de trabajo R y D, y tránsito de embalse nivel - almacenamiento. En todos estos métodos, el tránsito procede sobre la base de un tramo de canal independiente desde aguas arriba hacia aguas abajo; no se consideran efectos de remanso ni discontinuidades en la superficie del agua tales como resaltos hidráulicos u ondas de creciente de flujo rápidamente variado.

- **Uso Combinado de las Componentes de Tránsito en Canales y Escorrentía Superficial de las Subcuencas**

Se puede representar cualquier tipo de conexión de procesos de precipitación - escorrentía en las subcuencas y el tránsito en canales en la cuenca hidrográfica en estudio a través de una combinación adecuada de las componentes de escorrentía superficial en las subcuencas y de tránsito en canales. La conexión de las componentes de la red de canales está implicada por el orden en el cual las componentes de los datos están arregladas. La simulación debe siempre comenzar en la parte más aguas arriba de la subcuenca considerada en un ramal de la red de canales. La simulación procede hacia aguas abajo hasta que se alcanza la confluencia respectiva. Antes de simular los procesos aguas abajo de una confluencia, todas las crecientes hasta tal confluencia deben ser calculadas y transitadas hasta ese punto.

Respecto al número de subdivisiones del tramo la metodología más usada para calcular dicho valor, es multiplicar el valor del tiempo de recorrido por 60, teniendo en cuenta que dicho valor no podrá ser inferior a 1 ni mayor a 99.

5.15. Datos del Modelo Hidrológico

Como se mencionó anteriormente HecGeo_HMS cuenta con un módulo que permite exportar todos los datos de las subcuencas a HEC-HMS, el cual, teniendo en cuenta los parámetros de cada subcuenca define los aportes, canales de tránsito y salidas. A continuación se presenta la figura donde se visualiza el modelo exportado desde HecGeoHMS a HEC-HMS.

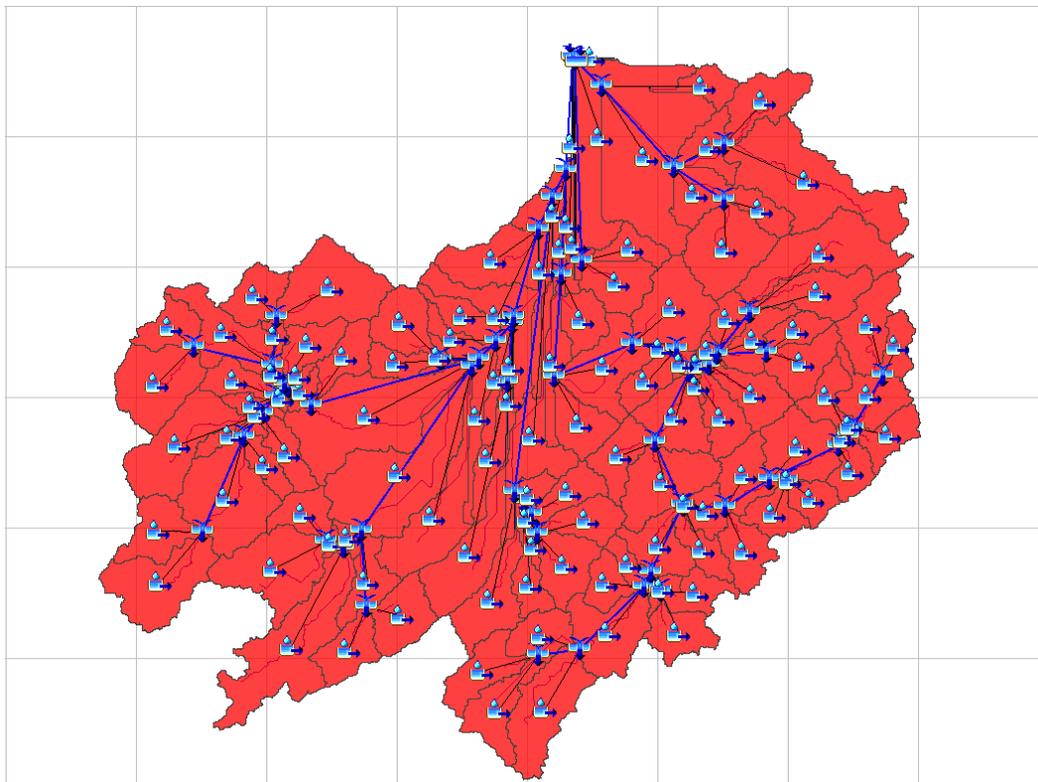


Figura 7: Modelación de la cuenca generada en Hec HMS. (Elaboración propia).

Con el modelo realizado se asignó a cada subcuenca el hietograma basados en las IDF de 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno de la estación correspondiente³ y una duración de 300 minutos, y el hietograma producto del evento seleccionado.

Definidos los hietogramas de diseño, se definen los parámetros para el tránsito de caudales que se explican a continuación. La modelación anteriormente descrito se puede verificar en los anexos digitales.

5.16. Tránsito de Creciente para la Cuenca de la Laguna de Fúquene

La función del tránsito hidrológico es determinar ese hidrograma de salida teniendo en cuenta las condiciones de almacenamiento y tiempo de recorrido. Para el caso en estudio se utilizará el método de Muskingum al no tener los suficientes datos de entrada para realizarlo por otro método.

El método de Muskingum según (Aparicio 2004), utiliza la ecuación de continuidad y una relación algebraica entre el almacenamiento en el tramo en estudio y las entradas y salidas del mismo.

$$V = K0 + kx(I - O) = K[xI + (1 - x)O] \quad (7)$$

Donde K es una constante llamada parámetro de almacenamiento y x es un factor de peso que expresa la influencia relativa de las entradas y las salidas del almacenamiento en el tramo. La anterior ecuación esta planteada pensando en que el almacenamiento de un río se puede dividir en dos parte. El primero es un almacenamiento en prisma (K0), que depende solamente de las salidas y sería el único si el nivel de la superficie libre el agua fuera paralelo al fondo del río. El otro tipo de almacenamiento llamado almanecamiento en cuña se debe al efecto de la pendiente de la superficie libre del agua, el cual depende tanto de las entradas como de las salidas.

³ En la metodología de los polígonos de Thiessen se determino que estación le corresponde a cada subcuenca, y a cada estación se le estimaron curvas IDF y hietogramas de diseño para cada periodo de retorno. Es decir que cada subcuenca cuenta con su propio hietograma de diseño.

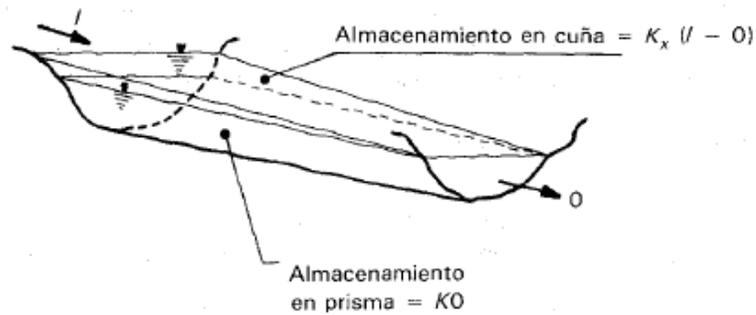


Figura 8. Almacenamiento durante el paso de una crecida. Tomado de (Aparicio 2004).

Con base a estas condiciones el método de Muskingum esquematiza las condiciones del tránsito de crecidas de la siguiente forma:

$$O_i = C_0 I_i + C_1 I_{i-1} + C_2 O_{i-1} \quad (8)$$

Donde:

I_{i-1} , O_{i-1} , son caudales de entrada y saliente al inicio del incremento de tiempo.

I_i , O_i , son caudales de entrada y salida al final del incremento de tiempo.

$$C_0 = (-KX + 0,5 * t) / (K - KX + 0,5 * t)$$

$$C_1 = (KX + 0,5 * t) / (K - KX + 0,5 * t)$$

$$C_2 = (K - KX - 0,5 * t) / (K - KX + 0,5 * t)$$

K = Tiempo de recorrido en horas.

X = Factor de atenuación de la onda.

Los parámetros requeridos por HechMS para el tránsito hidrológico por el método de Muskingum son las constantes que dependen de cada tramo del cauce K y X , y el número de tramos.

Los valores para X están restringidos entre 0 y 0.5. Cuando $X=0$ el método de Muskingum se convierte en el tránsito de crecidas a través de embalses, y cuando $X=0.5$ la onda de crecida se traslada aguas abajo sin cambio en forma. Algunos autores sugieren usar valores entre 0.20 y 0.25. Para el caso en estudio se usó un valor de 0.2.

Para el caso de K se divide la longitud de cada tramo entre una celeridad media de 2m/s y convirtiéndolo en horas, los cálculos respectivos se presentan en el anexo 11.

5.17. Hidrograma de Salida Resultante de la Modelación

Como resultado de la modelación, se obtienen los hidrogramas de salida de los hidrogramas insertados en cada subcuenca, la transformación lluvia-escorrentía por el método del SCS y el tránsito de los mismos a través de la cuenca. Se obtienen seis hidrogramas de salida producto de los hidrogramas realizados, los cuales se presentan en el Anexo 12.

A continuación se presenta el hidrograma resultante del hidrograma obtenido del evento seleccionado del año 2011.

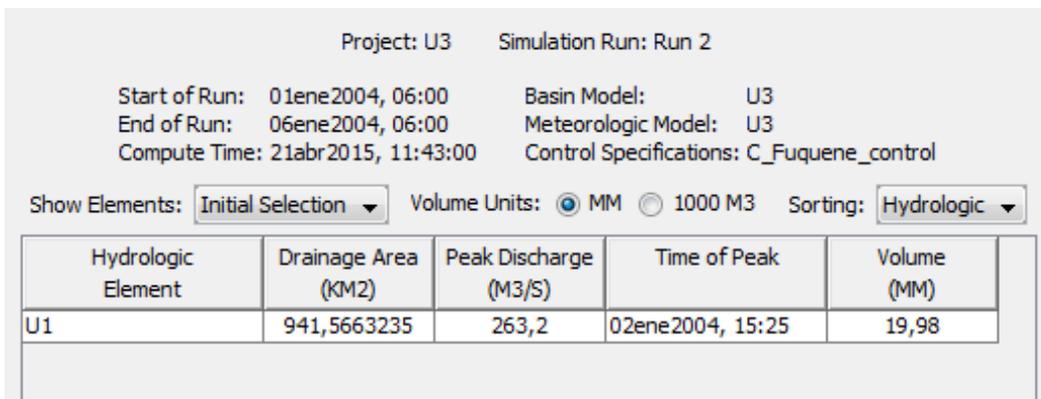


Figura 9. Resultados de la Modelación Hidrológica. Modelo hidrológico.

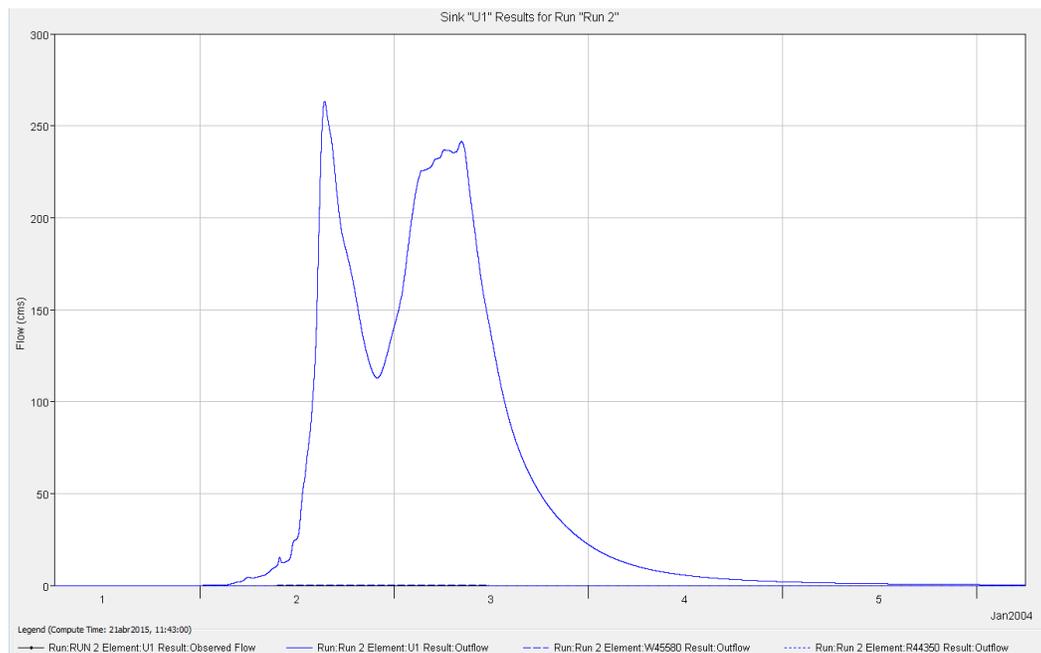


Figura 10. Hidrograma Resultate de la Modelación Hidrológica. Modelo hidrológico.

Estos hidrogramas resultantes se transitan a través de la laguna de Fúquene y del tramo del río Suarez en estudio con ayuda del software HEC RAS mediante flujo permanente y no permanente.

5.18. Resultados de la Modelación Hidrológica

El hidrograma resultado del evento seleccionado obtuvo dos picos de 262.5 y 241.3 m³/s respectivamente, con una duración de dos días y medio, resultado de un evento de cuarenta horas de lluvia con una precipitación total de 71.60mm.

En la siguiente tabla se presentan los caudales pico de los hidrogramas resultado de los eventos de precipitación teóricos representados por los hietogramas a diferentes periodos de retorno con una duración total de 5 horas.

Tabla 8. Valores de Precipitación Máxima de los Hidrogramas. Elaboración propia.

Hidrograma	Valor de Caudal Pico
Hidrograma 5 Años	307.0 m ³ /s
Hidrograma 10 Años	406.0 m ³ /s
Hidrograma 25 Años	580.5 m ³ /s
Hidrograma 50 Años	745.9 m ³ /s
Hidrograma 100 Años	955.7 m ³ /s

La diferencias en los picos entre el hidrograma del evento 2011 y los hidrogramas del evento teórico son esencialmente debidos a la duración de los eventos de precipitación, mientras que para el evento 2011 la duración es de cuarenta horas, la duración de los eventos teóricos es tan solo de cinco horas.

Sin embargo verificando el volumen de escorrentía resultado de las modelaciones, para el evento 2011 es de 19.98mm valor cercano al volumen de escorrentía producido por el evento teórico a 25 años de periodo de retorno que es de 19.25mm. Por lo cual se puede considerar que el evento seleccionado del año 2011 es cercano a un periodo de retorno de 25 años.

Capítulo VI

Estudio Hidráulico

6.1. Estudio Hidráulico de la Laguna de Fúquene y del río Suarez

Los cálculos hidráulicos para el tramo en estudio, se enfocaron en determinar la altura de la lámina de agua, la cota correspondiente y la velocidad de flujo, para los caudales e hidrogramas de diseño anteriormente determinados. Con el objeto de disponer de la información necesaria en los cálculos, se usó la topografía de la laguna, las secciones del río disponibles, y se complementó dicha información con curvas de nivel obtenidas mediante imágenes satelitales, adicionalmente se visitó la zona en estudio para evaluar las condiciones actuales del río y la laguna.

Con base en tal información se determinó la pendiente longitudinal del cauce y el coeficiente de rugosidad se estimó con base en las observaciones efectuadas durante las visitas de campo. Para analizar el comportamiento de flujo en el río, se empleó el modelo HEC-RAS 4.1, para el cual se describe a continuación los aspectos teóricos más relevantes.

Los análisis hidráulicos tuvieron como propósito proporcionar la información hidráulica básica requerida para determinar el nivel máximo de agua para diferentes períodos de retorno, y para el evento 2010-2011 seleccionado. Considerando lo anterior, se procedió a determinar a lo largo del tramo, los parámetros como nivel, profundidad, velocidad, esfuerzo cortante, radio hidráulico, pendiente de la línea de energía, número de Froude, etc.. Para tal efecto, se calcularon los perfiles hidráulicos a lo largo del tramo utilizando el modelo HEC-RAS, tal como se describe a continuación.

6.2. Descripción del Modelo Hec-Ras

El modelo HEC RAS es un modelo desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (HEC). El modelo permite calcular los perfiles hidráulicos para flujo permanente gradualmente variado en el tramo de un río tanto en régimen sub-crítico como supercrítico o mixto. El procedimiento computacional se basa en la solución de la ecuación de energía, en el que las pérdidas de energía se calculan mediante la ecuación de Manning, y las pérdidas por expansión y contracción se avalúan afectando el cambio en cabezas de velocidad por el coeficiente correspondiente.

El modelo permite considerar el efecto de obstrucciones del flujo de estructuras como puentes, alcantarillas o vertederos. Como se describe en el manual de hidráulica del modelo (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual), los perfiles hidráulicos se calculan de una sección transversal a la siguiente aplicando el método de los pasos estándar. En el manual de hidráulica del modelo (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual), se presenta una descripción detallada de las ecuaciones y procedimientos utilizados por el modelo en el cálculo de los perfiles hidráulicos y de los diferentes parámetros hidráulicos de interés para la modelación.

El programa HEC-RAS es considerado en la actualidad como el modelo más ampliamente usado en la determinación de perfiles de flujo en canales naturales o construidos. El procedimiento básico de cálculo que emplea, está sustentado en la solución de la ecuación de energía unidimensional, y evalúa la pérdida de energía debida a la fricción por medio de la ecuación de Manning. Lo expresado en esta sección se basa en el manual de referencia hidráulica del programa HEC-RAS⁴.

El modelo permite entre otros, obtener el perfil de las láminas de agua en un tramo y secciones transversales de un río o canal, correspondientes a diferentes caudales para condiciones de flujo, subcrítico, crítico o supercrítico, así como conocer la distribución de las velocidades de cada sección. Este modelo simula la hidráulica del flujo para canales de cualquier tipo de sección transversal bajo condiciones de flujo gradualmente variado, opera de acuerdo con la siguiente ecuación de energía:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + He \quad (10)$$

Dónde:

- Y_1, Y_2 = Profundidades del agua, aguas abajo (1) y aguas arriba (2) del tramo considerado, este término denominado cabeza de presión, en m.
- Z_1, Z_2 = Nivel del fondo de canal aguas abajo (1) y aguas arriba (2) del tramo considerado, este término cabeza de posición, en m.

⁴ Para una discusión más profunda y detalle específico de la modelación de algunas estructuras, se recomienda profundizar los aspectos técnicos en dicho manual.

- $V^2/2g$ = Cabeza de velocidad aguas abajo (1) y aguas arriba (2) del tramo considerado, este término cabeza de velocidad, en m.
- α = Factor de corrección de la energía cinética.
- H_e = Pérdidas de energía en el tramo; se dividen en pérdidas por fricción (h_f) y pérdidas localizadas (h_l), en m.

El modelo puede expresar las pérdidas por fricción (h_f) en un tramo de longitud (L) para flujo gradualmente variado utilizando la pendiente de fricción media:

$$\bar{S}_f = \frac{h_f}{L} \quad (11)$$

$$h_f = \bar{S}_f \cdot L \quad (12)$$

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (13)$$

Dónde:

- $S_{f1} + S_{f2}$ corresponden a los valores de pendiente de la línea de energía aguas arriba (2) y aguas abajo (1) del tramo de longitud L considerado. Estos valores el modelo los expresa por medio de la ecuación de Manning para flujo uniforme en cada sección del tramo según la siguiente expresión:

$$S_f = \left(\frac{\eta \cdot V^2}{R^{\frac{4}{3}}} \right) \quad (14)$$

Dónde:

- N = Coeficiente de rugosidad de Manning.

- v = Velocidad promedio del agua en la sección, en m/s.
- R = Radio hidráulico, en m; $R = A/P$; A = Área hidráulica, en m^2 .
- P = Perímetro mojado, en m.

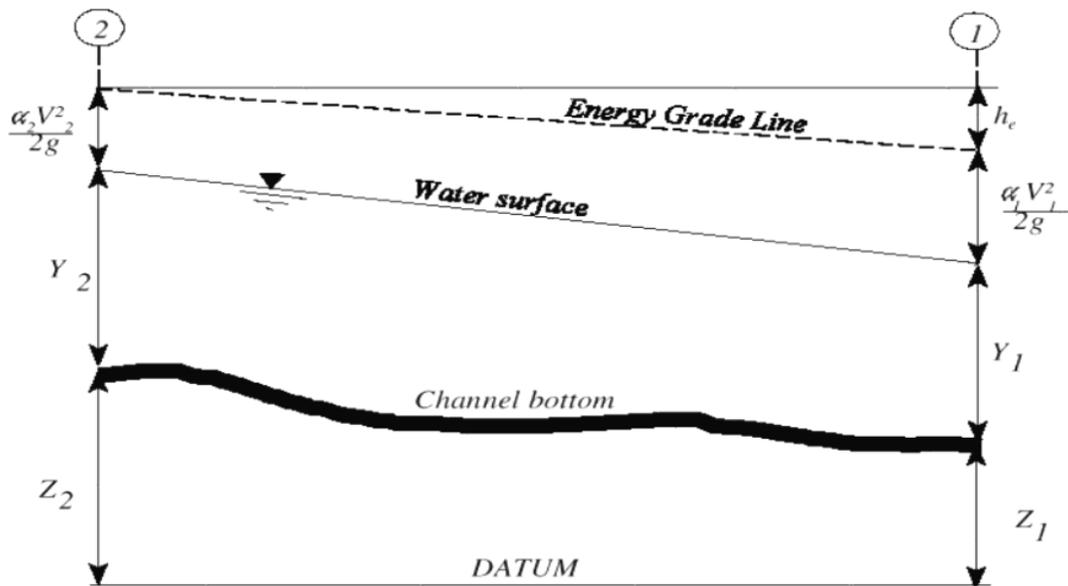


Figura 11. Diagrama De Canal Para Determinar Ecuación De Energía. Manual del usuario Hec- Ras 4.1.

Las pérdidas localizadas por contracción o expansión se expresan mediante la expresión:

$$h_L = C \cdot \left| \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right| \quad (15)$$

Dónde:

- C = Coeficiente de pérdidas por contracción o expansión, adimensional.
- V = La velocidad promedio del agua, aguas arriba (2) y aguas abajo (1).

El coeficiente de pérdidas localizadas por contracción gradual y expansión gradual de la corriente de agua se tomaron iguales a 0.10 y 0.30 respectivamente para las transiciones abruptas, los coeficientes expansión y contracción son 0.30 y 0.50.

6.3. Geometría del Cauce en Estudio

Para generar la geometría del modelo hidráulico de la laguna de Fúquene y del tramo del río Suarez en estudio, se utilizaron las secciones de la topografía de la laguna de Fúquene, y las secciones del río Suarez entregadas por la CAR. En los archivos entregados por esta entidad se cuenta con aproximadamente 176 secciones desde la finalización de la Laguna hasta las compuertas de Tolón.

Se realizó un modelo inicial utilizando las secciones de la laguna, y la totalidad de las secciones del río, aplicándole al modelo el caudal pico del hidrograma resultante del evento 2010-2011 seleccionado (263.20 m³/s). Este modelo presentó errores debido a que la franja derecha e izquierda de cada sección no eran lo suficientemente extensas para cubrir la mancha de inundación, generando que el programa por falta de información a partir del final de cada franja tome una restricción que supone el comportamiento de un dique.

Para solventar la falta de información se utilizaron curvas de nivel extraídas de imágenes satelitales para complementar la franja izquierda y derecha tanto de la laguna como del río, estas debieron extenderse varios kilómetros hasta la zona montañosa de la cuenca con el fin de evitar nuevamente carencia de información al momento de correr el modelo.

Sin embargo, al extender estas secciones se presentaban cruces entre sí, lo que generó un nuevo error al modelo, por lo que se debió eliminar varias secciones y trabajar únicamente con las más representativas.

6.4. Coeficiente de Rugosidad Manning

Para realizar una estimación del coeficiente de rugosidad en cauces naturales deben tenerse en cuenta los siguientes factores:

- Aspereza del lecho y de las paredes.
- Presencia de vegetación y cambios estacionales de ésta.

- Irregularidad del cauce, principalmente en el perímetro mojado o variaciones de sección, forma, tamaño, etc. A lo largo del canal.
- Alineamiento del canal (curvas)
- Tendencia al embancamiento o a la socavación.
- Obstrucciones.
- Tamaño y forma del canal.
- Cambios de niveles y caudales que hacen participar riberas de inundación generalmente más rugosas que el canal principal.
- Presencia de material sólido en suspensión o arrastrado por el fondo.

Para tomar en cuenta el efecto provocado por estos factores Cowan propuso la siguiente ecuación:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (16)$$

Donde,

- n_0 : Valor de n para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.
- n_1 : Corrección por irregularidades del perímetro mojado a lo largo del tramo estudiado.
- n_2 : Corrección por variación de forma y de dimensiones de las secciones.
- n_3 : Corrección por obstrucciones: troncos, rocas, etc.
- n_4 : Corrección por presencia de vegetación.
- m : Factor que mide la frecuencia de meandros o curvas.

Los valores de n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , m , recomendados por Chow (1959) son los mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 9. Factores de Corrección de Cowan. Tomado de (Chow 1959).

CORRECCION POR EFECTO DE :	CORRECCIÓN	LEVE O DESPRECIABLE	MODERADO	MARCADO	MUY MARCADO
1. Grado de Irregularidad	n_1	0.000	0.005	0.010	0.020
2. Cambios en las secciones	n_2	0.000	0.005	0.010	0.0145
3.Obstrucciones	n_3	0.000	0.010-0.015	0.020-0.030	0.040-0.060
4. Vegetación	n_4	0.005-0.0010	0.010-0.025	0.025-0.050	0.050-0.100
5. Meandros.	m	1.000	1.000	1.150	1.300

Para la elección de n_0 se hace uso de los valores de n dados en el capítulo 5-10 de Ven te Chow, donde se muestran fotografías de cierto número de canales comunes y se selecciona el más similar al cauce en estudio. Para el caso se selecciona el valor de 0.024, el cual corresponde a un cauce excavado en marga arcillosa y/o limosa. Para aplicar los coeficientes de corrección se toma la laguna, y se divide el río Suarez en tres partes como se muestra en las figuras 15, 16 y 18.

La laguna de Fúquene, (como se muestra en la figura 13) se caracteriza por tener secciones muy irregulares en las que hay cambios abruptos en la profundidad, y obstrucciones muy marcadas producto del “*buchón*” característico de este cuerpo de agua.



Figura 12. Zona de la Laguna de Fúquene (Elaboración Propia).

Para la Laguna se tomaron los siguientes factores de corrección según los valores presentados en la tabla 10:

Tabla 10. Factores de Corrección Laguna de Fúquene. Elaboración propia.

LAGUNA DE FÚQUENE	
CORRECCIÓN POR EFECTO DE:	CORRECCIÓN
1. Grado de Irregularidad	0.010
2. Cambios en las secciones	0.010
3. Obstrucciones	0.025
4. Vegetación	0.005
5. Meandros	1.000
Manning base	0.024
Manning Resultado	0.074

El primer tramos (Como se muestra en la figura 14 y 15) corresponde desde la finalización de la laguna, hasta el inicio de la zona sinuosa, se caracteriza por ser un tramo relativamente recto, de cauce bien conformado, y orillas en las que predominan pastos.



Figura 13. Sección típica del primer tramo del río Suarez. Elaboración Propia.



Figura 14. Primer tramo del río Suarez. Google Earth.

Para este tramo se tomaron los siguientes factores de corrección según los valores presentados en la tabla 10.

Tabla 11. Factores de Corrección Río Suarez Tramo 1 (Elaboración Propia).

TRAMO 1 RÍO SUAREZ	
CORRECCIÓN POR EFECTO DE:	CORRECCIÓN
1. Grado de Irregularidad	0.000
2. Cambios en las secciones	0.000
3. Obstrucciones	0.010
4. Vegetación	0.005
5. Meandros	1.000
Manning base	0.024
Manning Resultado	0.039

El segundo tramos (Como se muestra en las figuras 16 y 17) corresponde a la zona sinuosa del río Suarez, este presenta irregularidades leves y los cambios de sección no son abruptos.



Figura 15. Primer tramo del río Suarez. Google Earth.



Figura 16. Sección típica del segundo tramo del río Suarez. Elaboración Propia.

Para este tramo se tomaron los siguientes factores de corrección según los valores presentados en la tabla 10.

Tabla 12. Factores de Corrección Río Suarez Tramo 2. Elaboración Propia.

TRAMO 2 RÍO SUAREZ	
CORRECCIÓN POR EFECTO DE:	CORRECCIÓN
1. Grado de Irregularidad	0.005
2. Cambios en las secciones	0.000
3. Obstrucciones	0.010
4. Vegetación	0.005
5. Meandros	1.150
Manning base	0.024
Manning Resultado	0.050

El tercer tramos (Como se muestra en las figuras 18 y 19) corresponde desde la finalización de la zona sinuosa, hasta las compuertas de Tolón, se caracteriza por ser un tramo relativamente recto, de cauce bien conformado, y orillas en las que predominan pastos.

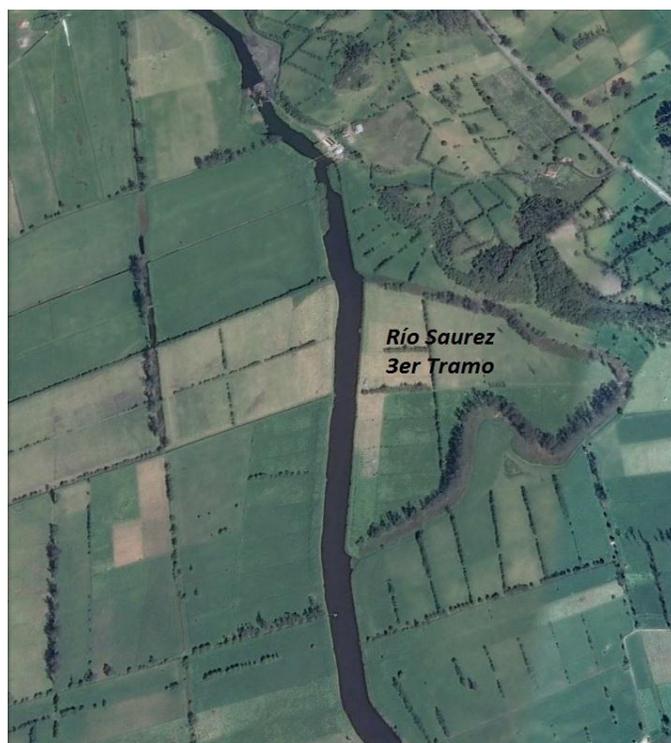


Figura 17. Tercer tramo del río Suarez (Tomado de Google Earth).



Figura 18. Sección típica del tercer tramo del río Suarez (Elaboración Propia).

Para este tramo se tomaron los siguientes factores de corrección según los valores presentados en la tabla 10.

Tabla 13. Factores de Corrección Río Suarez Tramo 3. Elaboración Propia.

TRAMO 3 RÍO SUAREZ	
CORRECCIÓN POR EFECTO DE:	CORRECCIÓN
1. Grado de Irregularidad	0.000
2. Cambios en las secciones	0.005
3. Obstrucciones	0.010
4. Vegetación	0.005
5. Meandros	1.000
Manning base	0.024
Manning Resultado	0.044

Para el valor de la planicie de inundación, según (Chow 1959) varía con el nivel de sumergencia de la vegetación del lecho, este muestra en la tabla 5-4 valores de n para

varios niveles de inundación de acuerdo con el tipo de cubierta vegetal y la profundidad de la inundación. Para el caso del estudio se tomará un valor de 0.04 para la planicie de inundación.

6.5. Parámetros del Modelo Hidráulico

Se realizaron dos modelaciones con la idea de compararlas entre si y hacer un análisis de sus diferencias:

La primera a flujo permanente subcrítico introduciendo únicamente el caudal pico de cada hidrograma (hidrogramas teóricos 5, 10, 25, 50 y 100 años, e hidrograma del evento seleccionado), y la cota de aguas impuesta por las compuertas como condición de frontera aguas abajo.

Como datos de entrada adicionales del modelo además de la geometría del cauce se usaron los siguientes:

- Coeficiente de rugosidad en la planicie de inundación: 0.04
- Coeficiente de rugosidad del cauce principal Laguna : 0.074
- Coeficiente de rugosidad del cauce principal tramo 1 río Suarez : 0.039
- Coeficiente de rugosidad del cauce principal tramo 2 río Suarez : 0.050
- Coeficiente de rugosidad del cauce principal tramo 1 río Suarez : 0.044

La segunda a flujo no permanente introduciendo el hidrograma completo como condición de frontera aguas arriba (hidrogramas teóricos 5, 10, 25, 50 y 100 años, e hidrograma del evento seleccionado), la cota de agua impuesta por las compuertas como condición de frontera aguas abajo y dada como un “Stage Hydrograph”, y un flujo inicial de $70\text{m}^3/\text{s}$.

Como datos de entrada adicionales del modelo además de la geometría del cauce se usaron los siguientes:

- Coeficiente de rugosidad en la planicie de inundación: 0.04
- Coeficiente de rugosidad del cauce principal Laguna : 0.074
- Coeficiente de rugosidad del cauce principal tramo 1 río Suarez : 0.039

- Coeficiente de rugosidad del cauce principal tramo 2 río Suarez : 0.050
- Coeficiente de rugosidad del cauce principal tramo 1 río Suarez : 0.044

6.6. Cálculos y Resultados modelo hidráulico.

Dado el volumen de resultados, se presentan los archivos de resultados en los anexos digitales. Para los archivos de HEC-RAS se tiene la siguiente descripción:

- Los resultados de las modelaciones hidráulicas se presentan en los Anexos digitales.
- Los archivos de HEC-RAS se presentan en los anexos digitales.

6.6.1. Secciones Transversales

Corresponde a cada una de las secciones transversales levantadas en la laguna de Fúquene y en el río Suárez empleadas para el modelo hidráulico; en ellas se muestra gráficamente la altura de lámina de agua, la altura crítica y la altura de la línea de energía; para cada uno de los hidrogramas de diseño.

6.6.2. Perfil Longitudinal

Es la sección longitudinal del cauce entre la sección más aguas arriba y más aguas abajo.

En este perfil se muestran, igualmente, la altura de lámina de agua, la altura crítica y la altura de la línea de energía para cada uno de los caudales modelados de manera gráfica.

6.6.3. Tabla De Resultados

En la tabla de resultados se muestra, de manera numérica los resultados de la modelación. La tabla está compuesta por los siguientes cuadros:

- River Sta: Número de sección transversal, la sección primera corresponde a la de aguas arriba.
- W.S. Elev: Cota de lámina de agua expresada en m.s.n.m.
- Min Ch El: Cota del punto más bajo del terreno de la sección transversal en m.s.n.m.
- Crit W.S.: Cota de la altura crítica en m.s.n.m.
- Vel Chnl: Velocidad media en la sección transversal en m/s.
- Froude # Chl: Número de Froude.

En el anexo 13 y en el modelo en Hec-Ras adjuntos, se presentan los resultados de niveles de aguas para todas las modelaciones.

6.7. Análisis de Resultados.

Como se puede observar en el anexo 13, el modelo tuvo como resultado una franja de inundación alrededor de la laguna, que como se esperaba al presentarse un evento extremo, esta retoma en parte su área inicial, esta mancha se extiende tanto por la laguna como por el río Suarez desde su inicio hasta aproximadamente 8.0Km, en donde la franja comienza a disminuir hasta desaparecer.

Finalmente, en el último tramo, en donde se esperaba que por la restricción de las compuertas se generara una franja importante de inundación, esta no se presenta, Por tal motivo se realiza un análisis de la influencia que tiene la restricción de cota de aguas en este punto, realizando evaluaciones con varios escenarios en los que se varía este parámetro, y los cuales se muestran a continuación:

El primero, el escenario inicial, en donde la restricción tiene una cota de 2538.70msnm, como se evidencia en la siguiente figura se presenta un remanso en el último tramo del río desde la cota 2440.25msnm a la cota impuesta aguas abajo, y como se dijo anteriormente la franja de inundación abarca desde el inicio de la laguna hasta 8.0km del río Suarez.

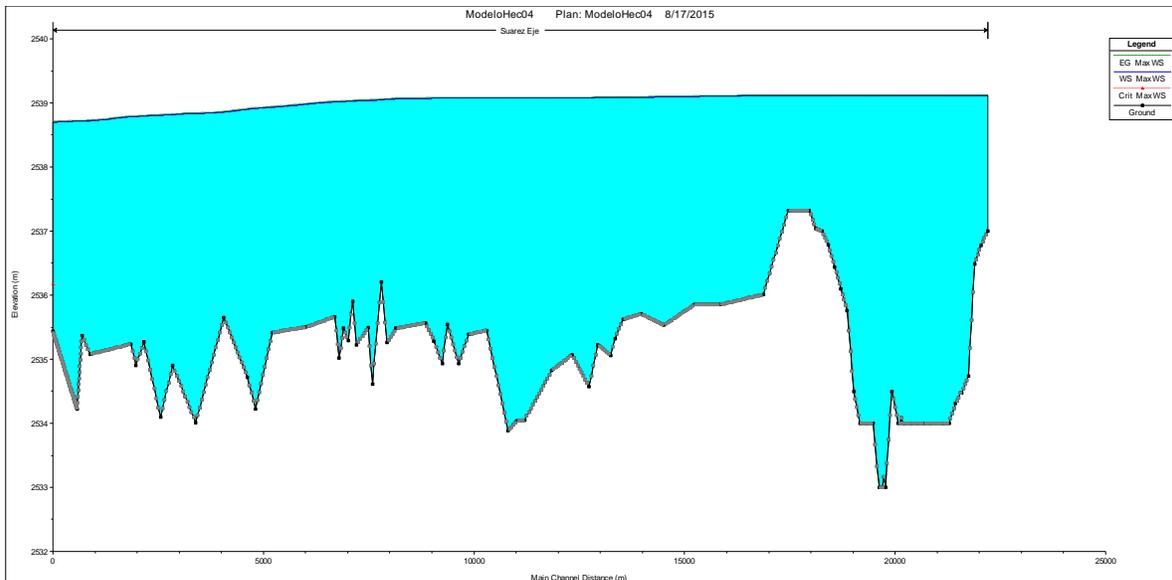


Figura 19. Perfil de flujo primer escenario. Modelo Hec Ras.

En el segundo escenario, se ha modificado la restricción aguas abajo a un valor de 2537.00 msnm, menor que el del escenario inicial. En este, como se puede observar en la siguiente figura, se presenta un descenso en el nivel de la lámina de agua en todo el tramo de río en estudio disminuyendo considerablemente la franja de inundación como se evidencia en el anexo 13.

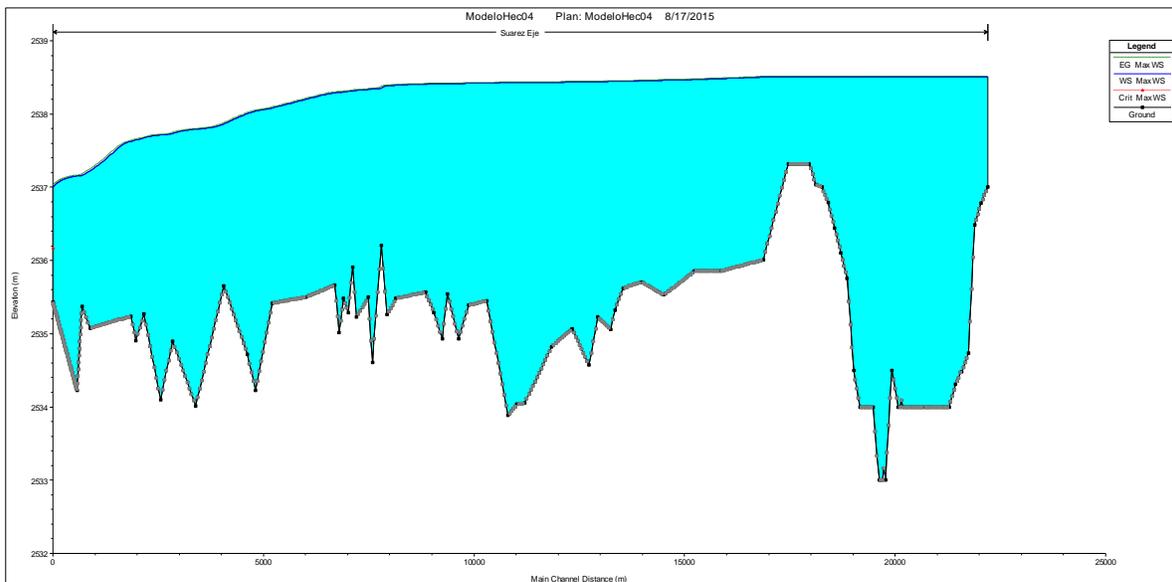


Figura 20. Perfil de flujo segundo escenario. Modelo Hec Ras.

En el tercer escenario se ha modificado el valor de la restricción por 2540.00 msnm, valor superior al del escenario inicial, y cercano al valor de cota de aguas que se presenta a lo largo de la laguna y del tramo inicial y medio del río en el primer escenario. Como se muestra en la siguiente figura el nivel de agua prácticamente permanece constante en todo el modelo, solo disminuyendo 0.25 m en el último tramo del río. Sin embargo la franja de inundación se extiende considerablemente.

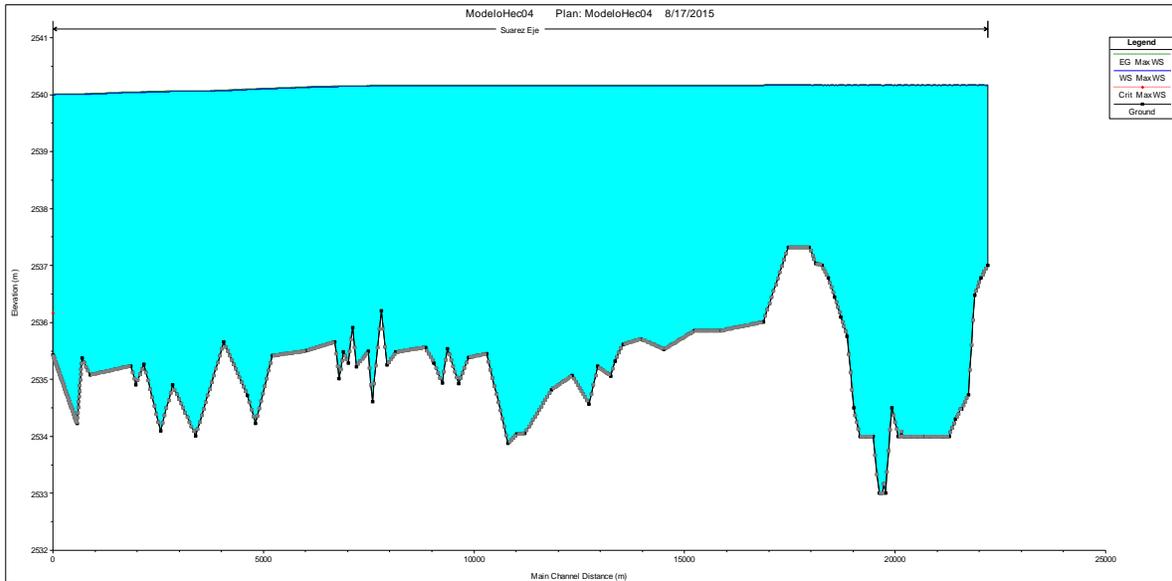


Figura 21. Perfil de flujo tercer escenario. Modelo Hec Ras.

En el cuarto escenario se ha modificado el valor de la restricción por 2542.00 msnm, valor superior al del escenario inicial y mayor al valor de cota de aguas que se presenta a lo largo de la laguna y del tramo inicial y medio del río en el modelo inicial. Como se muestra en la siguiente figura, con una restricción con esta cota, se presentaría un aumento en la cota de aguas en todo el tramo en estudio produciendo un embalsamiento de agua, y por ende un aumento en la franja de inundación, que básicamente abarca todo el tramo en estudio.

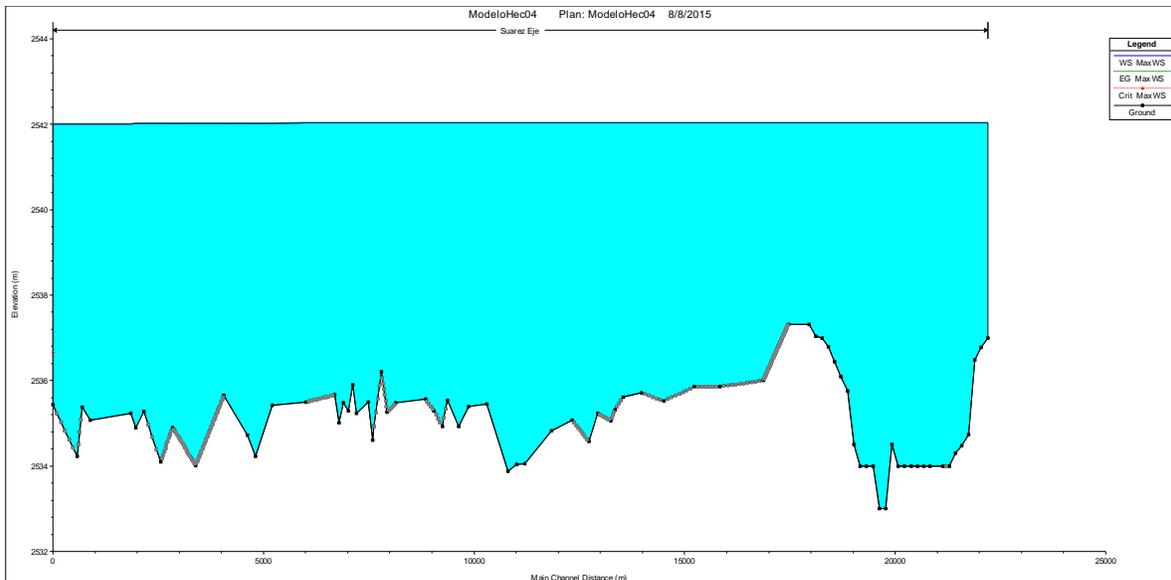


Figura 22. Perfil de flujo cuarto escenario. Modelo Hec Ras.

Según los resultados anteriores se puede concluir que la restricción de las compuertas aguas abajo es una de las causas del aumento en la franja de inundación, como se precisó en un principio, esta restricción provoca un embalsamiento en toda la franja de río analizada, y en la totalidad de la Laguna.

Viendo la influencia que tienen las compuertas en el comportamiento de la lámina de agua, se realiza un análisis verificando que sucedería si en lugar de las compuertas existiera una descarga libre, es decir que se presente un flujo crítico. Para esto en una modelación en flujo no permanente se debe realizar una curva de calibración de caudales, la cual se obtienen de correr varios valores de caudal en flujo permanente con condición de flujo crítico aguas abajo, y verificar las cotas de la lámina de agua en la última sección.

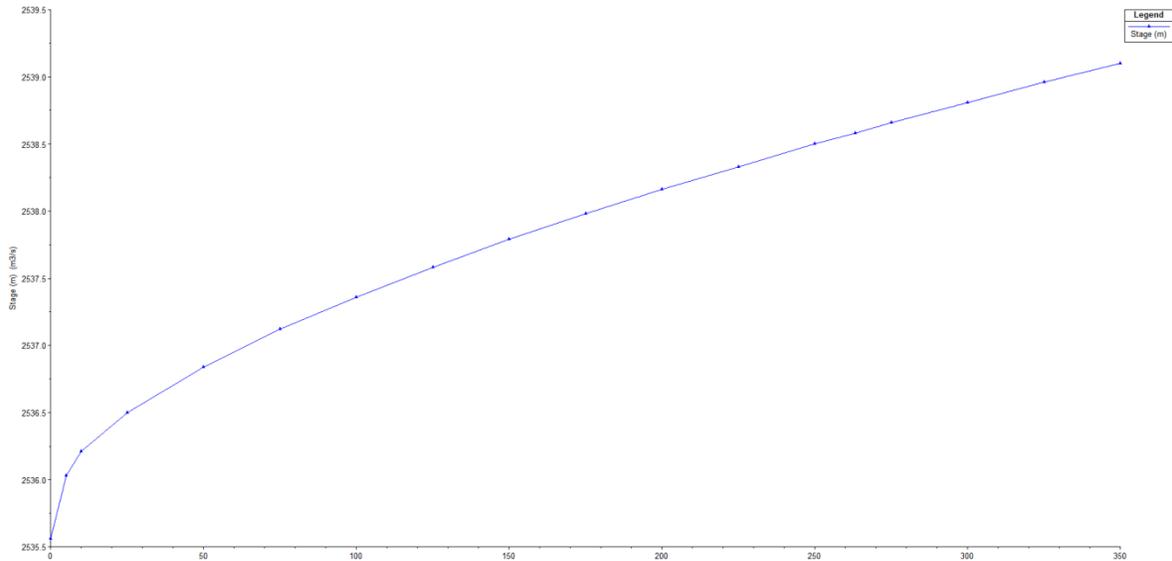


Figura 23. Curva de Calibración. Modelo Hec Ras

Realizada esta modelación, se obtiene una altura de lámina de agua en la laguna de 2538.54 msnm, bajando a 2538.44msnm en la parte media del río, y de allí descendiendo hasta llegar a la cota de 2536.54 msnm en su última sección. La franja de inundación se presenta en la laguna y en el primer tramo del río de manera leve (Ver Anexo 13).

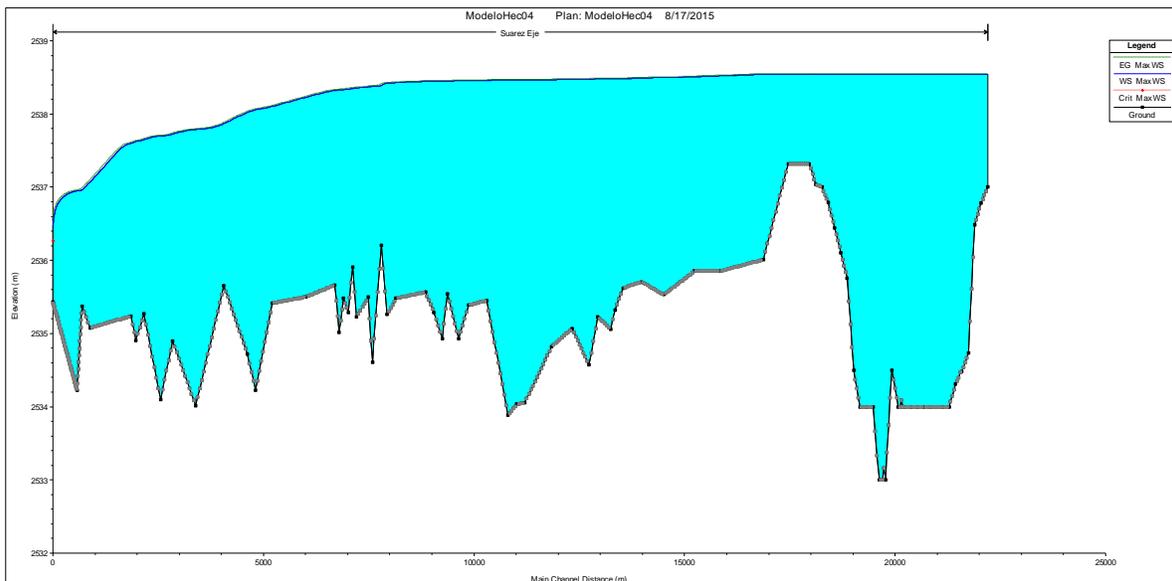


Figura 24. Perfil de flujo curva de calibración. Modelación Hec Ras.

Realizando un análisis a los valores de caudal base en el modelo a flujo permanente, se observó que valores mayores a $20\text{m}^3/\text{s}$ producen franjas de inundación en la laguna y en el tramo inicial del río, lo que no permitiría observar realmente el efecto que produce el hidrograma de creciente introducido. Por lo cual, se corrieron varios valores menores a $20\text{m}^3/\text{s}$, con el fin de obtener un valor que el modelo este en la capacidad de transportar sin presentar franjas de inundación, obteniendo como resultado un valor de $15\text{m}^3/\text{s}$ de caudal base.

Otro resultado interesante de la modelación realizada, fue el amortiguamiento de la creciente, que como ya se mencionó, el hidrograma de salida muestra que la creciente fue amortiguada casi por completo, por tal motivo resulta conveniente revisar algunos puntos intermedios, y verificar el hidrograma resultante en estos puntos, con el fin de evaluar en qué puntos se genera el mayor amortiguamiento de la creciente. Para tal fin se tomaron los siguientes puntos de verificación:

Tabla 14. Puntos Verificación de Hidrograma. Elaboración Propia.

Punto	Nombre Sección	Lugar
L1	-2114.41	Laguna
L2	-4378.02	Laguna
R1	-7110.76	Río
R2	-10003.7	Río
R3	-13284.3	Río
R4	-16318.3	Río
R5	-18947.9	Río
R6	-22349.1	Río

Tabla 15. Puntos Verificación de Hidrograma y Longitudes. Elaboración Propia.

PTO1	PTO2	ΔD (m)	ΔD (Km)	D(Km)	D(Km) Laguna	D(Km) Río
L0	L1	1963.05	1.96	1.96	1.96	
L1	L2	2263.39	2.26	4.23	4.23	
L2	R1	2723.62	2.72	6.95	6.95	
R1	R2	2902.02	2.90	9.85		2.90
R2	R3	3280.59	3.28	13.13		6.18
R3	R4	3033.97	3.03	16.17		9.22
R4	R5	2629.59	2.63	18.80		11.85
R5	R6	3401.25	3.40	22.20		15.25

Se verificaron los hidrogramas en estos puntos y se presentaron en un único gráfico (Figura 28), con el fin de observar el amortiguamiento que se genera en cada uno de estos puntos de verificación.

Observando la figura 28, se puede evidenciar que el mayor amortiguamiento se presenta en la laguna, aproximadamente un 82.0%, que solo hasta el punto R3 correspondiente a 6.18Km de río se amortigua un 8.0% adicional, y de este punto en adelante no se presentan diferencias significativas en los hidrogramas, llegando a un amortiguamiento total de 90%.

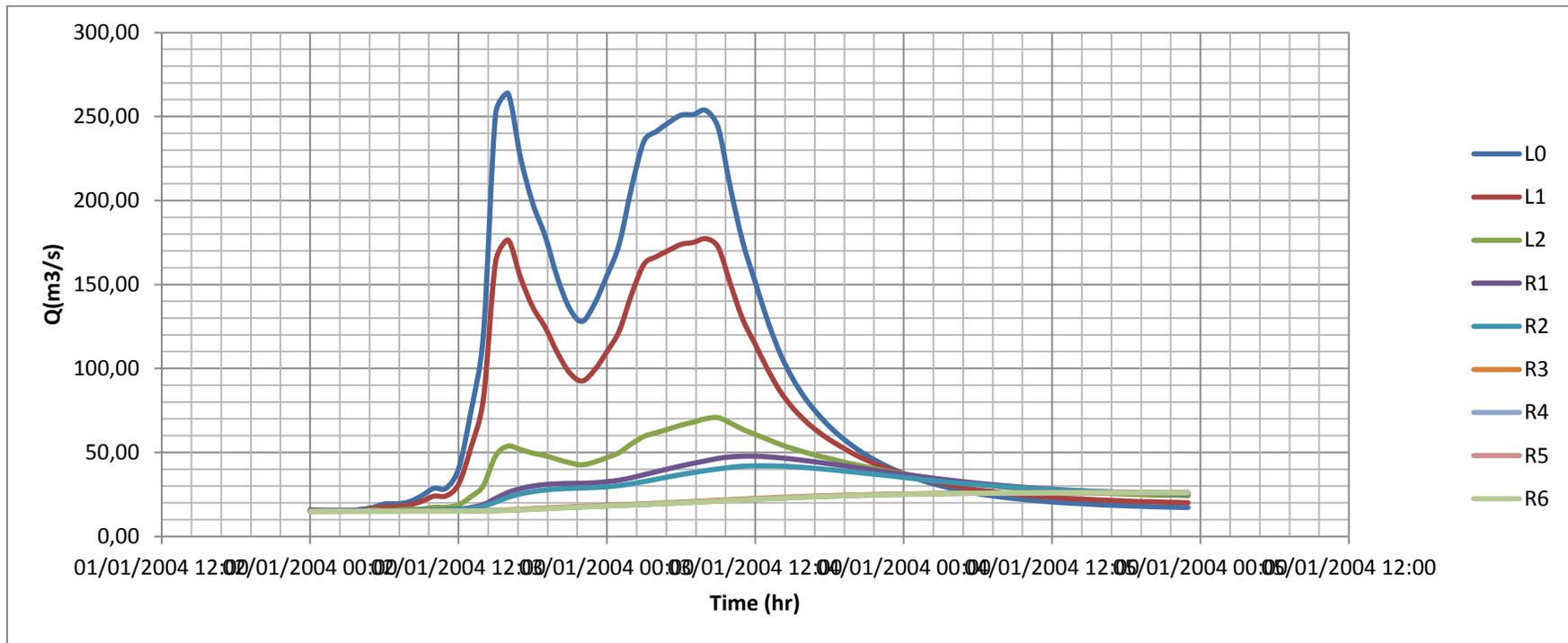


Figura 25. Hidrograma en Punto de Verificación Caudal Base $15m^3/s$. Elaboración Propia.

Tabla 16. Porcentajes de Amortiguamiento Caudal Base $15m^3/s$. Elaboración Propia.

	L0	L1	L2	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Qpico	263.80	177.27	70.70	47.72	42.01	26.03	26.02	26.02	26.02
%Que queda	100%	67%	27%	18%	16%	10%	10%	10%	10%
%Perdido	0%	33%	73%	82%	84%	90%	90%	90%	90%

Se evidencia como es de esperarse que la laguna a pesar de su poca profundidad, y su pérdida constante de área, logra amortiguar el 82% de la crecida, lo que causa que la mayor franja de inundación se presente en los sectores aledaños a la laguna que en un principio pertenecieron a la misma.

También se verifico el amortiguamiento que sucedería con un hidrograma de menor duración como lo son los hidrogramas teóricos obtenidos en el capítulo de hidrología, para este caso se usó el hidrograma con periodo de retorno de cinco años, el cual es el más cercano al valor pico del hidrograma del evento seleccionado, y se obtuvieron los siguientes resultados:

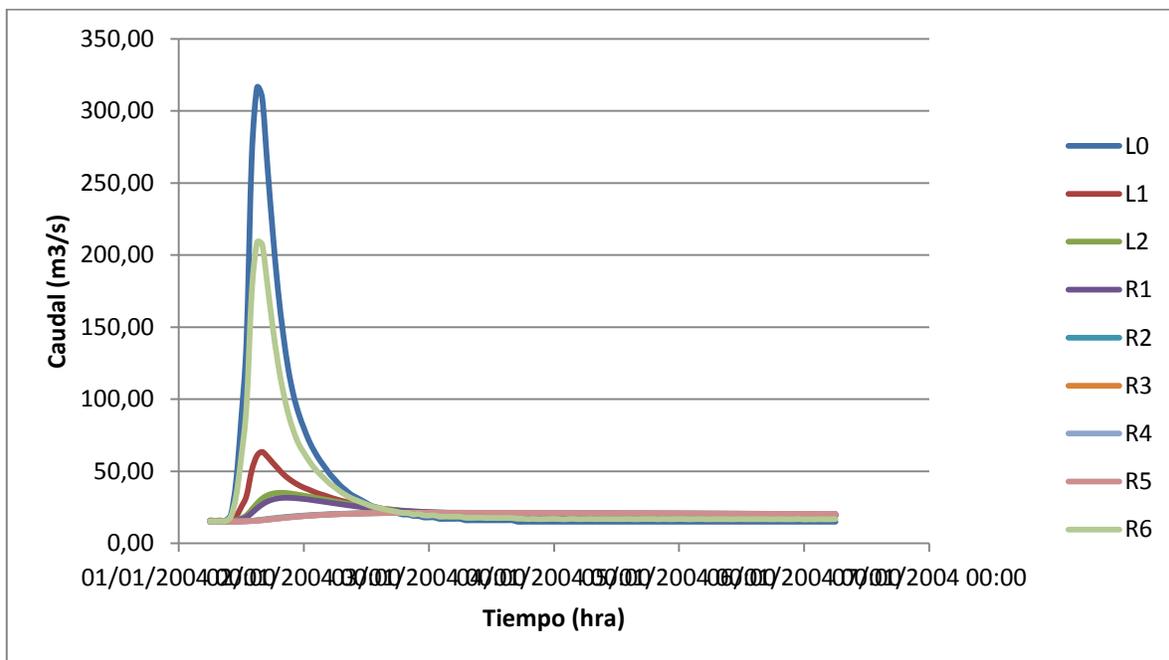


Figura 26. Hidrograma Teórico en Punto de Verificación. Elaboración Propia.

Tabla 17. Porcentajes de Amortiguamiento Hidrograma Teórico. Elaboración Propia.

	L0	L1	L2	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Qpico	316.00	208.67	63.40	35.08	31.60	21.25	21.25	21.25	21.25
%Que queda	100%	66%	20%	11%	10%	7%	7%	7%	7%
%Perdido	0%	34%	80%	89%	90%	93%	93%	93%	93%

Observando la figura 29, se puede evidenciar que el mayor amortiguamiento se presenta en la laguna, aproximadamente un 89.0%, que solo hasta el punto R3 correspondiente a 6.18Km de río se amortigua un 4.0% adicional, y de este punto en adelante no se presentan diferencias significativas en los hidrogramas, llegando a un total de 93.0% de amortiguamiento, siendo relativamente mayor al del hidrograma del evento.

Adicionalmente comparando el hidrograma de salida del evento y el teórico, se observa que el pico del primero es mayor que el del segundo, a pesar que el valor pico del hidrograma de entrada del segundo es mayor que el del primero, esto indica que la laguna y el tramo de río en estudio tienen la capacidad de amortiguar mejor crecientes de corta duración que crecientes de larga duración.

Por último se analizó la diferencia entre el modelo de flujo permanente con el modelo de flujo no permanente, encontrando como se evidencia en el anexo 14 grandes diferencias en las franjas de inundación y en los perfiles de flujo debido a la gran capacidad de la laguna de amortiguar crecientes. Este resultado demuestra la necesidad de tener en cuenta el amortiguamiento de crecientes en estudios y diseños de obras civiles en cauces.

Capítulo VII

Conclusiones

- Se observó que los caudales pico de los eventos teóricos difieren considerablemente del evento seleccionado del año 2011 debido a la duración de los eventos de precipitación.
- El modelo hidráulico, tuvo como resultado una franja de inundación alrededor de la laguna, que como se esperaba al presentarse un evento extremo, esta retoma en parte su área inicial, esta mancha se extiende tanto por la laguna como por el río Suarez desde su inicio hasta aproximadamente 8.0Km, en donde la franja comienza a disminuir hasta desaparecer.
- Según los resultados de la modelación hidráulica, variando la restricción aguas abajo se puede concluir que esta es una de las causas del aumento en la franja de inundación, como se precisó en un principio, esta restricción provoca un embalsamiento en toda la franja de río analizada, y en la totalidad de la Laguna.
- Es imperativo que la CAR y El Acueducto de Chiquinquirá (Empochiquinquirá) lleguen a un acuerdo en otros métodos de captación que no restrinjan la cota del río, ya que como se observo en el presente estudio, las compuertas de Tolón son unas de las principales causantes del aumento en las franjas de inundación en las zonas aledañas al río Suarez
- El tramo en estudio es capaz de amortiguar la creciente analizada en todos los escenarios evaluados, ya que de un hidrograma inicial con un pico de $263.80 \text{ m}^3/\text{s}$, luego de su tránsito por el tramo en estudio, finaliza con un hidrogramas de picos cercanos al valor del caudal base.
- Se evidencia como es de esperarse que la laguna a pesar de su poca profundidad, y su pérdida constante de área, logra amortiguar el 82% de la creciente, lo que

causa que la mayor franja de inundación se presente en los sectores aledaños a la laguna que en un principio pertenecieron a la misma.

- Comparando el hidrograma de salida del evento y el teórico ($T_r = 5$ años), se observa que el pico del primero es mayor que el del segundo, a pesar que el valor pico del hidrograma de entrada del segundo es mayor que el del primero, esto indica que la laguna y el tramo de río en estudio tienen la capacidad de amortiguar mejor crecientes de corta duración que crecientes de larga duración.
- Se analizó la diferencia entre el modelo de flujo permanente con el modelo de flujo no permanente, encontrando grandes diferencias en las franjas de inundación y en los perfiles de flujo debido a la gran capacidad de la laguna de amortiguar crecientes. Este resultado demuestra la necesidad de tener en cuenta el amortiguamiento de crecientes en estudios y diseños de obras civiles en cauces.
- Como se menciona anteriormente el amortiguamiento de crecientes provocado por la laguna es mayor al 80% en todas las crecientes analizadas. Por lo que se evidencia la importancia de la laguna de Fúquene en este sector, de no existir las franjas de inundación en las zonas aledañas al río Suárez sería de gran magnitud, y provocarían mayores daños a los que se presentan en la actualidad en épocas invernales, por lo que es imperativo preservar, mantener y evitar que se continúe perdiendo este cuerpo de agua.
- Realizado el tránsito con los hidrogramas teóricos a diferentes periodos de retorno, y con el hidrograma del evento 2011 seleccionado, se concluye que el más apropiado para obtener un mapa de riesgo de inundación es el del evento 2011, puesto que es un análisis con datos de precipitación reales y típicos de la cuenca en estudio.
- A partir de este mapa de riesgo de inundaciones se tendrá la información en función de la amenaza y la vulnerabilidad que existe en este punto geográfico, delimitando la zona afectada para poder generar medidas de prevención y minimización de riesgo en la zona.

- Este estudio aportará herramientas esenciales en los procesos de planificación territorial en los municipios que pertenecen a la zona en estudio.

Capítulo VIII

Bibliografía

- Alcocer, V. (2011). Construcción de mapas de riesgo de inundación en ríos en la zona del Sonocusco. Ponencia presentada en el marco del Tercer Seminario Internacional de Potamología “Jose Antonio Maza”. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Aparicio Mijares, F. (2004). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, Editorial Limusa.
- Bustamante, S. (2010). Modelado de especies invasoras, caso de estudio: pérdida del espejo de agua en la laguna de Fúquene por invasión del buchón (*Eichhornia crassipes*).
- Boyacá Rural. (2010). *Laguna de Fúquene, salvemos la laguna*. Recuperado de <http://www.boyacarural.com.co/cultura/circuito1/lqndfgne.html>. (Mayo 10 de 2015).
- Chow Ven Te. (1959). *Open Channel Hydraulics*. U.S.A.: Editorial McGraw-Hill Kogakusha Ltd.
- Chow V.T. Maidment D.R., Mays L.W. (1988). *Applied Hydrology*. New York, U.S.A.: Editorial McGraw-Hill International Editions Civil Engineering.
- Corporación autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. (2009). Formular la Propuesta de Declaratoria como Área Protegida de carácter Regional del complejo lagunar Fúquene, Cucunubá y Palacio, junto con el Plan de Manejo Ambiental. Bogotá, D.C.
- Corporación autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. (s.f.) Historia de Fúquene. CAR: Bogotá.
- Ganancias, F. (2010). Evaluación de metodologías de Regionalización Hidrológica: Aplicación a los Caudales Máximos de Cuencas Representación de la Región Suroeste de la Provincia de Córdoba, Argentina. Tesis presentada para optar al título de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba.

González, D. (s.f.). Una Laguna Inundada de Potreros.

JICA. Agencia de cooperación internacional del Japón, CAR Corporación Autónoma regional de Cundinamarca Colombia. El estudio sobre plan de mejoramiento ambiental regional para la cuenca de la laguna Fúquene. Informe Final, Informe Principal. CTI Engineering interantional co., Ltda. 2000.

Keipi K. (2005). *Gestión del riesgo de amenazas naturales en proyectos de desarrollo*. Recuperado de <http://www.cne.go.cr/CEDO-Riesgo/docs/2845/2845.pdf>. El día 10 de Mayo de 2015.

Mendoza, J y Orozco, M. (2014). Análisis de la vulnerabilidad biofísica a los riesgos por inundación en la Zona Metropolitana de Toluca, México. Revista Luna Azul. Número 38. 86-104.

Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. Bogotá D.C.: Subdirección de Apoyo Técnico.

Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería 2ª Edición*. Bogotá D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Montealegre. F. (Sin Fecha). *Contenido básico de meteorología y climatología*. Recuperado de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000134>. (El día 15 de Mayo de 2015).

Organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura (Unesco). (2000). Desarrollo de una metodología para la identificación de amenazas y riesgos a deslizamientos en la cuenca del rio San Juan, republica dominicana. Recuperado de <http://www.itc.nl/external/unescorapca/publicaciones%20rapca%5crepublica%20dominicana%5cestudio%20cuenca%20rio%20san%20juan%20republica%20dominicana.pdf> el día 15 de abril del 2015.

Olcina, J. (2012). De los mapas de zonas afectadas a las cartografías de riesgo de inundación en España. Revista Anales de Geografía. Volumen 32. 91-131.

- Pérez, A. (2012). Estado actual de la cartografía de los riesgos de inundación y su aplicación en la ordenación del territorio. El caso de la Región de Murcia. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. Número 58. 57-81.
- Ribera, Ll. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad aportación de las innovaciones tecnológicas. Rev. Doc. Anal. Geograf. Núm. 43. 153-171.
- Riccardi, A. (1997). Elaboración de mapas de riesgo de inundación por medio de la modelación matemática hidrodinámica. Revista Ingeniería del Agua. Volumen 4. 45-56.
- Serrano, R. (2012). Gestión integrada del Riesgo de Inundaciones en Colombia”. Tesis presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Silva, G. (1998). *Hidrología Básica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas, M. R., Díaz - Granados D. M. (Sin Fecha). Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad - Duración - Frecuencia para Colombia. Universidad de Los Andes.