

**EVALUACIÓN Y CONTROL DE INUNDACIONES EN EL BARRIO PABLO
NERUDA, MUNICIPIO DE SIBATÉ, DEBIDAS AL DESBORDAMIENTO DE LA
QUEBRADA LA CHACUA**

JUAN SEBASTIAN PARRA LUQUE

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2018**



**EVALUACIÓN Y CONTROL DE INUNDACIONES EN EL BARRIO PABLO
NERUDA, MUNICIPIO DE SIBATÉ, DEBIDAS AL DESBORDAMIENTO DE LA
QUEBRADA LA CHACUA**

JUAN SEBASTIAN PARRA LUQUE

Trabajo de Grado Para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

M. Sc. Luís Efrén Ayala Rojas

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2018**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

TEXTO DE DEDICATORIA

A DIOS

Por brindarme la oportunidad de contar en mi vida con los pilares que rigen mi vida, mi horizonte, por haberme asignado la familia que tengo, por darme la oportunidad de poder lograr este nuevo logro, que no fue fácil de alcanzar, pero gracias a si guía y discernimiento logré culminar esta etapa llena de conocimientos y experiencias que me complementan para contribuir a la comunidad.

A MIS PADRES GLORIA Y RAFAEL

En Especial a ellos, por haberme dado las fuerzas y el apoyo necesario para continuar cada día con mi carrera, por acompañarme en cada momento de alegría o tristeza, por ser el apoyo incondicional, por la paciencia que me tuvieron a lo largo de este camino, por tener la dicha de verlos sonreír cada día, por brindarme un aliento de fuerza cuando lo necesitaba, por ser mi bastón, mi guía y en esencial mi ejemplo a seguir, porque gracias a ellos he alcanzado cada una de mis metas y sé que con su apoyo lograre las que me restan.

A MI HERMANANA MILENA Y ABUELOS

A mi hermana, por todos los consejos recibidos, por el apoyo y soporte brindado, por cumplir su papel de hermana y preocuparse por mí y mi futuro, por demostrarme que las metas son alcanzables, por preocuparse por mí.

A mis abuelos por brindarme mis padres, por apoyarme al igual que ellos lo hacen, por creer en mí y ser mi compañía, aunque en su mayoría estén en el cielo siento el apoyo y la energía que me envían para continuar. A mi abuelita Carmen con quien aún hoy en día tengo la dicha de contar a mi lado por ser mi guía, uno de mis más grandes apoyos, mi concejera, esa parte de alegría que me hace seguir adelante y lograr objetivos, como este.

TEXTO DE AGRADECIMIENTO

En primera instancia, agradezco a Dios y a la vida por esta maravillosa oportunidad que viví a lo largo de mi carrera, por permitirme estudiar y crecer en conocimientos, conocer personas que aportaron a mi vida personal y profesional.

A mis padres quienes cada día me dieron el aliento para continuar, me brindaron siempre su apoyo, fueron mi guía, mi modelo a seguir para alcázar cada una de mis metas, por brindarme consejos, por estar ahí siempre que los necesito y compartir.

A mi Hermana y abuelos por acompañarme en este camino, por los consejos, por el apoyo y la confianza depositada en mí.

A mis compañeros, profesores y a la Universidad La Gran Colombia quienes ayudaron en este camino de aprendizaje, quienes me apoyaron y fueron complemento de cada una de las experiencias vividas.

A la Universidad Distrital por haberme permitido obtener mi primer título universitario como Topógrafo, ya que gracias a este pude continuar mis estudios y afianzar más mis conocimientos.

Al Ing. José Vergara y a la Ingeniera Sandra Forero, quienes me acogieron en su empresa y me brindaron la posibilidad de estudiar y aplicar algunos conocimientos, además de propiciarme los espacios necesarios para culminar mis estudios, por su apoyo y confianza.

GLOSARIO

Inundación: Con base en lo indicado por la UNESCO¹, se encuentran dos definiciones para este término, es el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua o acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas.

Caudal: “Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en una unidad de tiempo (RT).”²

Hoya o cuenca hidrográfica: “Una Hoya Hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple.”³

Precipitación: “La precipitación es, en general, el término que se refiere a todas las formas de humedad emanada de la atmosfera y depositada en la superficie terrestre, tales como lluvia, granizo, rocío, nieve, neblina o helada. Pueden ser clasificadas de acuerdo con las condiciones que producen movimiento vertical del aire: convectivas, orográficas y de convergencia.”⁴

Periodo de Retorno: Según la UNESCO⁵, es el intervalo medio de tiempo a largo plazo, o número de años al cabo de los cuales se igualará o superará un suceso, por ejemplo, caudal máximo de crecida.

¹ UNESCO, et al. International Glossary of Hydrology, Suiza, 2012. p. 127

² Ibid., p. 89

³ MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la Ingeniería., 2 ed. Colombia. Alfaomega grupo editor, S.A., 1999. p. 33.

⁴ Ibid., p. 79.

⁵ UNESCO, Op. cit., p. 127.

Tiempo de concentración: “Es el tiempo que la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de agua de una hoya toma para llegar a una sección determinada de dicha corriente. El tiempo de concentración mide el tiempo que se necesita para que toda la hoya contribuya con escorrentía superficial en una sección considerada.”⁶

Hidrograma: Según Monsalve Saénz⁷, es la representación gráfica de la variación del caudal en relación con el tiempo.

Hietograma: Según la UNESCO⁸ es Distribución de la intensidad de lluvia a lo largo del tiempo

Modelo Lluvia Escorrentía: Con base a la UNESCO⁹ se refiere a todo modelo matemático que relacione los datos de escorrentía con los de lluvia.

Balance Hídrico: Según la UNESCO¹⁰ es la evaluación de los aportes y descargas de agua en un acuífero o una cuenca hidrográfica para un periodo de tiempo determinado.

⁶ MONSALVE, Op. cit., p. 180.

⁷ Ibid., p. 180.

⁸ UNESCO, Op. cit., p. 268.

⁹ Ibid., p. 269.

¹⁰Ibid., p. 332

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2 JUSTIFICACIÓN	28
3 OBJETIVOS	30
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	30
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
4 ANTECEDENTES.....	31
5 MARCO TEÓRICO	35
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	35
5.1.1 Crecientes e Inundaciones.....	35
5.1.2 Registros Pluviómetros	36
5.1.3 Morfometría Cuencas.....	38
5.1.4 Lluvia-Escorrentía	39
5.1.5 Ecuaciones Hidrodinámica.....	42
5.1.6 Software Modelación.....	44
5.2 MARCO GEOGRÁFICO	50
5.3 MARCO LEGAL	52
6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	53
6.1 ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN	54
6.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN BASE.....	54
6.2.1 Información Datos Hidrometeorológicos	55
6.2.2 Topografía.....	62

6.3	PROCESAMIENTO DE DATOS	63
6.3.1	Montaje Modelo Hidrológico HEC-HMS	63
6.3.2	Montaje Modelo Hidráulico Iber.....	68
7	RESULTADOS	74
7.1	SELECCIÓN REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS	74
7.1.1	Complementación De Series Hidrológicas	74
7.1.2	Análisis de Doble Masa.....	79
7.2	CUENCA HIDROGRÁFICA	83
7.2.1	Delimitación.....	83
7.2.2	Morfometría.....	85
7.2.3	Número de Curva.....	91
7.2.4	Tiempo de Concentración	95
7.3	ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	95
7.3.1	isoyetas y Precipitación Media Máx. 24 Hrs.....	96
7.3.2	Curvas IDF sintéticas	97
7.3.3	hietogramas	98
7.3.4	Modelo HEC-HMS.....	104
7.3.5	Hidrograma Tr 2,33 Años	104
7.3.6	Hidrograma Tr 50 Años	105
7.3.7	Hidrograma Tr 100 Años.....	106
7.4	MODELACIÓN HIDRÁULICA	107
7.4.1	Escenario 1: Tr 2,33 Años – Diagnóstico	108
7.4.2	Escenario 2: Tr 50 Años – Diagnóstico	108
7.4.3	Escenario 3: Tr 100 Años – Diagnóstico	109
7.4.4	Escenario 4: Tr 100 Años – Alternativa de Solución	112
8	CONCLUSIONES	126

9 SUGERENCIAS..... 128
11. BIBLIOGRAFÍA 130

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Parámetros de Regionalización IDF Sintéticas	40
Tabla 2 Métodos y Modelos Hidrodinámicos ordenados de forma ascendente según complejidad hidráulica	45
Tabla 3 Estaciones IDEAM	55
Tabla 4 Estaciones La CAR Cundinamarca.....	56
Tabla 5 Datos Crudo Estación Apostólica.....	57
Tabla 6 Datos Crudo Estación El Bosque	58
Tabla 7 Datos Crudo Estación El Fute	59
Tabla 8 Datos Crudo Estación Peñas Blancas	60
Tabla 9 Datos Crudo Estación Doña Juana.....	61
Tabla 10 Datos Crudo Estación Paraíso Perdido.....	61
Tabla 11 Datos Faltantes Estación Apostólica.....	75
Tabla 12 Datos Faltantes Estación El Bosque	75
Tabla 13 Datos Faltantes Estación El Fute	76
Tabla 14 Datos Faltantes Estación Peñas Blancas	77
Tabla 15 Datos Faltantes Estación Doña Juana.....	78
Tabla 16 Datos Crudo Estación Paraíso Perdido.....	78
Tabla 17 Precipitación máxima a nivel multianual 24 Hrs	79
Tabla 18 Precipitación Acumulada máxima a nivel multianual 24 Hrs	80
Tabla 19 Estaciones Homogéneas	81
Tabla 20 Reclasificación MDE	87
Tabla 21 Reclasificación MDE	87
Tabla 22 Hipsometría de La Cuenca	88
Tabla 23 Clase de Pendientes	89
Tabla 24 Resumen Parámetros Morfometría	91
Tabla 25 Coberturas de Suelo	93

Tabla 26 Número de curva Cuenca	94
Tabla 27 Tiempos de concentración	95
Tabla 28 Intensidades.....	97
Tabla 29 Tabulación Hietograma Tr 2,33 Años.....	99
Tabla 30 Tabulación Hietograma Tr 50 Años	101
Tabla 31 Tabulación Hietograma Tr 100 Años.....	102
Tabla 32 Periodos de Retorno (tabla 16)	114

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización cuenca la Chacua.....	23
Figura 2. Registro Inundaciones 2010	24
Figura 3. Mapa Localización Registro	25
Figura 4. Estado Actual del Cauce de la quebrada La Chacua.....	26
Figura 5. Regionalización Curvas IDF Sintéticas	40
Figura 6. Localización Municipio de Sibaté	51
Figura 7. Metodología	53
Figura 8. Estaciones CAR Cundinamarca.....	57
Figura 9. Topografía EPC-C-073	62
Figura 10. Importación Cuenca HEC-HMS	63
Figura 11. Parámetros Cuenca La Chacua	64
Figura 12. Series de Tiempo Tr 2,33 Años.....	64
Figura 13. Series de Tiempo Tr 50 Años.....	65
Figura 14. Series de Tiempo Tr 100 Años.....	65
Figura 15. Modelo Meteorológico Tr 2,33 Años	66
Figura 16. Modelo Meteorológico Tr 50 Años	66
Figura 17. Modelo Meteorológico Tr 100 Años	67
Figura 18. Modelo Meteorológico Tr 100 Años	67
Figura 19. Modelo Ejecutados.....	68
Figura 20. Importación Triangulación Topografía.....	69
Figura 21. Coeficientes de Rugosidad (Manning)	69
Figura 22. Parámetros de Modelación	70
Figura 23. Parámetros de Entrada	71
Figura 24. Parámetros de Salida.....	71
Figura 25. Mallado	72

Figura 26.	Procesamiento de Información	73
Figura 27.	Análisis de Doble Masa	81
Figura 28.	Ajuste Estación El Bosque.....	83
Figura 29.	Modelo Digital de Elevaciones – MDE	84
Figura 30.	Cuenca Quebrada La Chacua	85
Figura 31.	Reclasificación Elevaciones.....	86
Figura 32.	Curva Hipsométrica Cuenca La Chacua.....	89
Figura 33.	Mapa de Pendientes	90
Figura 34.	Cobertura de Suelos	92
Figura 35.	Geología	93
Figura 36.	Isoyetas.....	96
Figura 38.	Regionalización Curvas IDF Sintéticas	98
Figura 39.	Hietograma Tr 2,33 Años	100
Figura 40.	Hietograma Tr 50 Años	102
Figura 41.	Hietograma Tr 100 Años	103
Figura 42.	Resumen Tr 2,33 Años	104
Figura 43.	Hidrograma Tr 2,33 Años.....	104
Figura 44.	Resumen Tr 50 Años	105
Figura 45.	Hidrograma Tr 50 Años.....	105
Figura 46.	Resumen Tr 100 Años	106
Figura 47.	Hidrograma Tr 100 Años.....	106
Figura 48.	Hidrogramas.....	107
Figura 49.	Resultado Tr 2,33 Años	108
Figura 50.	Resultado Tr 50 Años	109
Figura 51.	Resultado Tr 100 Años	110
Figura 52.	Sección Transversal Tr 100 Años	110
Figura 53.	Velocidades Tr 100 Años	111
Figura 54.	Validación Zonas Inundadas.....	112
Figura 55.	Pre-dimensionamiento sección canal de diseño	116
Figura 56.	Trazado Horizontal Diseño Canal	117

Figura 57.	Perfil de Diseño.....	118
Figura 58.	Borde Libre	120
Figura 59.	Sección Típica de Diseño	121
Figura 60.	Terreno Proyectado	121
Figura 61.	Sección Terreno Proyectado.....	122
Figura 62.	Coeficientes de Manning Modelo.....	122
Figura 63.	Modelo Hidráulico Diseño	123
Figura 64.	Modelo Hidráulico Niveles en Curvas	123
Figura 65.	Modelo Hidráulico Máximo tirante	124
Figura 66.	Sobrelevación Tirante en curva	124
Figura 67.	Sección Tirante Máximo.....	125
Figura 68.	Sección Hidráulica Segundo 14250	125

RESUMEN

El estudio de cuerpos de agua ha tomado una gran relevancia a nivel mundial, el cambio climático ha azotado diversos países generando grandes pérdidas no solo económicas sino también humanas, posicionando a los eventos hidrometeorológicos como los desastres naturales que más les han costado a las distintas naciones, siendo este el caso de Colombia, en donde este tipo de eventos ocupan el 88% de los desastres, fenómenos como La Niña o El Niño, son grandes referentes de estos índices. El barrio Pablo Neruda, localizado en el municipio de Sibaté, departamento de Cundinamarca es el caso particular que tratar dentro de esta monografía, debido a que se han presentado diferentes eventos referentes a altas precipitaciones que han traído consigo el desbordamiento de la quebrada La Chacua, afectando el asentamiento poblacional aledaño, el desbordamiento de este cuerpo de agua el 18 de Noviembre de 2010 debido al fenómeno de La Niña y el del 26 de abril de 2012 debido al fenómeno del Niño, son muestra de la importancia de esta monografía.

Esta investigación comprende un desarrollo progresivo de diferentes etapas que inicia desde la recopilación de información disponible, hasta el procesamiento de los datos hidrológicos e hidráulicos, la correlación y análisis de la información, que permiten obtener como resultado el análisis de una alternativa de solución.

Se determinaron los aspectos hidrológicos de la cuenca de estudio, como las características geomorfológicas, precipitaciones multianuales medias con base a los registros históricos, elaboración de curvas IDF sintéticas, determinación de hietogramas e hidrogramas para los periodos de retorno de 2,33 años, 50 años y 100 años, mediante la metodología del Soil Conservation Service (SCS). Respecto el análisis hidráulico se realizaron 3 modelos de diagnóstico en Iber respecto a cada periodo de retorno y uno en donde se valida la alternativa de solución expuesta.

Se encontró que a partir del periodo de retorno de 50 años se presentan los desbordamientos del cauce de la quebrada La Chacua, la alternativa de solución estudiada expone un diseño de canal revestido en concreto, con una pendiente longitudinal de 0,3% con la capacidad hidráulica de transportar el caudal para un periodo de retorno de 100 años, sin presentar desbordamientos del cauce sobre la corona del canal proyectado.

Palabras Clave: Cuerpos de agua, El Niño, La Niña, cuenca, precipitaciones, IDF, hietogramas, hidrogramas, SCS, Iber, retorno, desbordamientos, canal, Chacua, revestido, concreto, pendiente, capacidad, caudal.

ABSTRACT

The water bodies studies has taken a great relevance worldwide, climate change has hit several countries generating great losses not only economic, human losses too, positioning the hydrometeorological events as the natural disasters that have cost the nations the most, this is the case of Colombia, where this type of events occupy 88% of disasters, phenomena such as La Niña or El Niño, are great referents of these indices. The Pablo Neruda neighborhood, located in the municipality of Sibaté, department of Cundinamarca, is the particular case to be dealt with in this monograph, due to the fact that different events have been presented regarding high rainfall that have brought with it the overflow of the La Chacua stream, affecting the surrounding population settlement, the overflow of this body of water on November 18, 2010 due to the phenomenon of La Niña and the April 26, 2012 due to the phenomenon of El Niño, are proof of the importance of this monograph.

This research includes a progressive development of different stages that starts from the collection of available information, to the processing of hydrological and hydraulic data, the correlation and analysis of information, which allow obtaining as result the analysis of a solution alternative.

The hydrological aspects of the study basin were determined, such as geomorphological characteristics, average multiannual precipitation based on historical records, elaboration of synthetic IDF curves, determination of hietograms and hydrographs for the return periods of 2.33 years, 50 years and 100 years, through the methodology of the Soil Conservation Service (SCS). Regarding the hydraulic analysis, 3 diagnostic models were made in Iber for each return period and one in which the alternative solution was validated.

It was found that from the return period of 50 years, the overflows of the channel La Chacua occur, the studied solution alternative exposes a channel design covered in

concrete, with a longitudinal slope of 0,3% with the capacity hydraulic to transport the flow for a period of return of 100 years, without presenting overflow on the top of the projected channel.

Keys words: Water bodies, El Niño, La Niña, Basin, rainfall, IDF, hietograms, hydrographs, SCS, Iber, return, overflow, channel, Chacua, covered, concrete, slope, capacity, flow.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones en temporadas de lluvias generadas por el desbordamiento de quebradas se han ido convirtiendo en objeto de análisis, debido a la gran afectación que pueden ocasionar a poblaciones aledañas, diversos eventos acontecidos alrededor del mundo y estadísticas señalan que los eventos hidrometeorológicos son la principal causa de pérdidas debidas a desastres naturales, Mejía¹¹, señala que la frecuencia de los desastres en el mundo se ha triplicado desde los años ochenta, encontrando que cerca del 90% de los desastres están asociados a eventos hidrometeorológicos que generan el 74% del total de las pérdidas económicas a nivel mundial, Colombia no es indiferente ante esta situación, según Mejía¹², el 88% de los desastres naturales que ocurren en Colombia son de origen hidrometeorológico, pasando de 508 desastres de este tipo en el año 1998 hasta llegar 3334 en el 2016, presentando un alza significativa en el periodo comprendido entre el 2010 y 2012 en donde se logra mitigar un poco estos eventos mediante la implementación de la ley 1523 de 2012. Los dos fenómenos hidrometeorológicos que más han afectado a la población colombiana corresponden a La Niña y el Niño, el fenómeno de La Niña fue el más relevante alcanzando a dejar en el 2010-2011 alrededor de 400 muertos y 300 mil viviendas afectadas por año.

El desbordamiento de la quebrada la Chacua en el Municipio de Sibaté es una clara evidencia de esto, al verse afectada la población en temporadas invernales, como la presentada en el año 2010 debidas al fenómeno de La Niña, en donde el agua

¹¹ MEJÍA, Luis Fernando. Departamento Nacional de Planeación (DNP). Índice Municipal de riesgo de desastres de Colombia, Colombia, 2018. p. 4.

¹² Ibid., p. 10.

alcanzó en algunas zonas 1,30 m de altura, ocasionando pérdidas de bienes inmuebles, afectación de salud y damnificación de familias del barrio Pablo Neruda.

El fin de esta investigación fue basada en la evaluación de una propuesta para el control de inundaciones en el Barrio Pablo Neruda, debido al desbordamiento de la Quebrada La Chacua, mediante el análisis hidrológico e hidráulico de la quebrada. Para lo cual se implementó un estudio hidrológico de la cuenca aferente mediante el software HEC-HMS, determinando caudales para distintos periodos de retorno mediante modelos de lluvia escorrentía generado a partir de los registros históricos de las estaciones hidrometeorológicas cercanas, según lo descrito en la metodología de la Soil Conservation Service (SCS).

Con base en los resultados obtenidos del estudio hidrológico, se procedió a la realización de la modelación del escenario actual del sistema de drenaje con el software IBER, determinando así las zonas de desbordamiento, permitiendo definir y modelar la alternativa de solución planteada en este trabajo, como solución al desbordamiento de la quebrada la Chacua.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis de zonas con altos índices de vulnerabilidad a inundaciones como lo indica Montaña Forero¹³ es un problema que ha tomado fuerza debido a los cambios climatológicos que se han presentado a lo largo del país. El analizar y evaluar dichos procesos para dar una solución temprana al manejo y disposición de aguas, asegura diversas posibilidades en pro de la conservación de la vida. Factores como el aprovechamiento de los recursos hídricos mediante la separación de aguas lluvias respecto a las aguas residuales, control y manejo de estas ante eventos de altas precipitaciones que no se tienen previstas, para periodos de retorno con baja probabilidad de ocurrencia e incluso la conservación de vidas humanas. De lo anterior, parte la necesidad de analizar los cuerpos de agua que son formados por accidentes geográficos naturales o en algunos casos artificiales, entorno a su comportamiento y posibles eventos hidrológicos que generan crecidas y desbordamientos del cauce del drenaje, afectando a zonas de asentamientos urbanos vecinas a las rondas hídricas, las cuales se ven directamente afectadas ante la ausencia de un debido estudio que dé solución a dichos problemas.

El barrio Pablo Neruda, localizado en el Municipio de Sibaté, departamento de Cundinamarca, como se muestra en la Figura 1, se encuentra en la parte baja de la descarga de la Cuenca alta de la Quebrada la Chacua, la cual reúne aguas de distintos barrios localizados aguas arriba, como los son el barrio la Chacua y García.

¹³ MONTAÑA FORERO, Luis Esteban. Calibración de los modelos hidrológico e hidráulico para el sistema de alerta temprana para inundación por desbordamiento para la quebrada Chiguaza. Tesis de Maestría en ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil, 2015. 3 p

Figura 1. Localización cuenca la Chacua



Fuente: Autor, 2018

Como se observa en la anterior figura, las inundaciones se presentan debido a la geomorfología de la cuenca, abarcando una gran área de aporte de aguas lluvias, encausando todo el caudal de esorrentía sobre la quebrada La Chacua, que excede su capacidad generando los desbordamientos del cauce ante eventos de crecientes. En la figura 2 se muestran comparaciones de los eventos de inundación registrados en el 2010 versus registros en condiciones sin inundación de los mismos sectores tomadas en el 2015.

Figura 2. Registro Inundaciones 2010

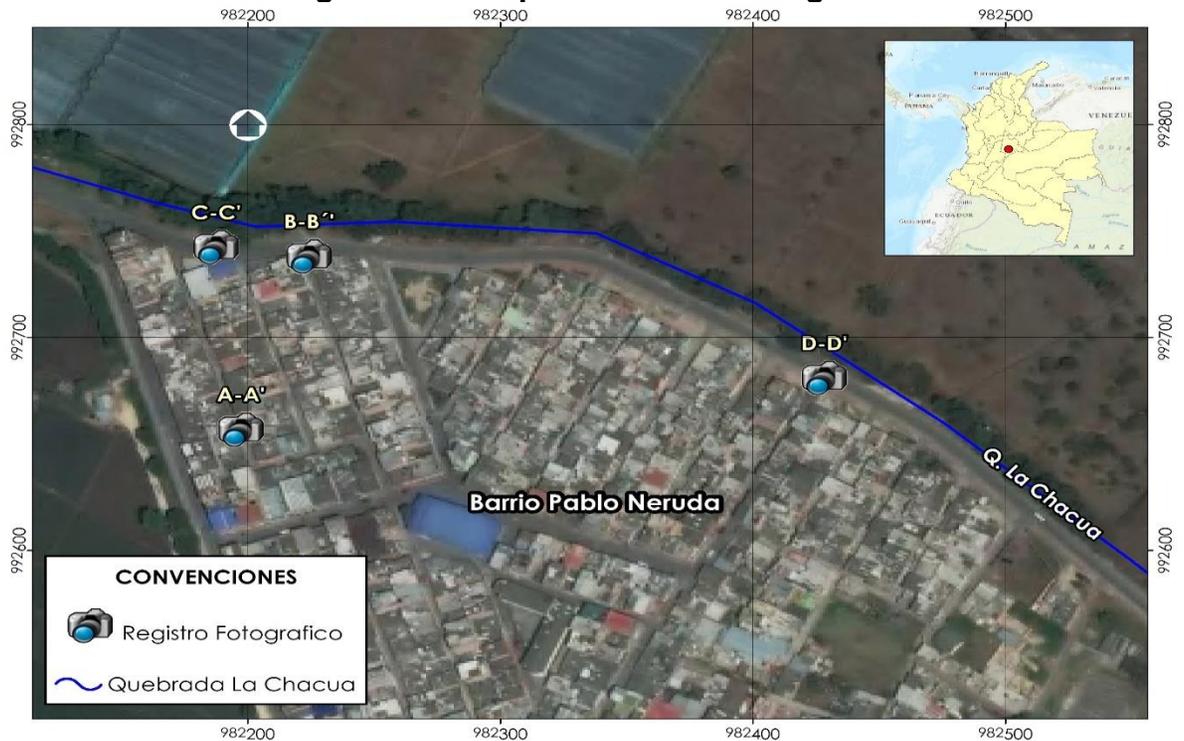




Fuente: Contacto TV - Google Earth, 2018

Para una mejor interpretación de los registros antes mostrados, en la figura 3, se muestran la ubicación de los registros fotográficos.

Figura 3. Mapa Localización Registro



Fuente: Autor, 2018

Entre otros factores que aportan, se encuentra que la quebrada está totalmente descuidada, con una alta vegetación y gran cantidad de desechos arrojados por la misma comunidad, condiciones que impiden el adecuado flujo del agua sobre el cauce, aumentando la lámina de agua hasta generar el desbordamiento del drenaje, lo anterior se sustenta en la siguiente imagen obtenida en campo sobre el drenaje de estudio. Figura 4.

Figura 4. Estado Actual del Cauce de la quebrada La Chacua



Fuente: Autor, 2018

Otro problema de manejo de aguas en este barrio es la ausencia de una adecuada red de alcantarillado, ya que cuenta con un sistema de desagüe combinado, colmatando el sistema existente por capacidad, como lo muestra el estudio realizado en el 2013 para Empresas Públicas de Cundinamarca (EPC), dentro del contrato EPC-C-073, de 2013. Es de resaltar que el alcance del proyecto se refiere al desbordamiento de la quebrada la Chacua y no del análisis del sistema de alcantarillado, solo se tendrá en cuenta la descarga que puede incidir en el aumento y posible remanso del canal, considerándose mínima debido a que el área aproximada del barrio corresponde a 12,16 Ha, mientras el área aferente de la

cuenca corresponde aproximadamente a 1281,3 Ha, dejando un aporte de aguas lluvias del barrio sobre el canal del 0,95% aproximadamente, con base a los datos determinados en la información obtenida de la elaboración de cartografía base mediante el software Arc GIS.

Con base a lo descrito, se plantea la siguiente pregunta de investigación.

1.1. PREGUNTA INVESTIGACIÓN

¿Cómo controlar el desbordamiento de la quebrada la Chacua, con base a la evaluación del comportamiento hidrometeorológico e hidrodinámico del sistema respecto a una propuesta base de diseño con el fin de evitar las inundaciones del barrio Pablo Neruda, en el municipio de Sibaté departamento de Cundinamarca?

2 JUSTIFICACIÓN

La evaluación hidrodinámica e hidrometeorológica de la quebrada La Chacua, permitirá arrojar como resultado el comportamiento del drenaje ante eventos climatológicos extremos. Lo anterior con el fin de conocer las posibles zonas de inundación generados ante distintos periodos de retorno respecto eventualidades de precipitación, determinando las cotas de las láminas de agua que se pueden llegar a generar.

Al evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas del drenaje, se podrá proponer un sistema que permita evacuar adecuadamente el agua lluvia, impidiendo el desbordamiento de la quebrada en tiempo húmedo y seco. La información resultante de esta monografía adicionalmente servirá directamente a la población aferente como estudio base para realizar otros análisis de igual forma importantes, como el poder implementar el mejoramiento de aguas y recuperación de las mismas, actualización y protección de rondas hídricas dentro del POT de Sibaté, para el manejo de asentamientos poblacionales, definición de zonas vulnerables, gestión del riesgo, mapas de inundación, capacidad de infiltración de los suelos, usos de suelo, zonas de expansión, proyección de descargas de sistema de alcantarillado pluvial, conservación de estructuras, posibles soluciones alternas a la solución base planteada, lo más importante ayudara a salvar vidas, ya que como las estadísticas lo indican estos tipos de eventos son los que lideran la lista de catástrofes naturales.

Es así, que se pretende generar una propuesta de modelación correspondiente que represente la condición actual de la quebrada versus la condición de solución recomendada mediante la implementación de software, capaz de evaluar dichos procesos como lo son HEC-RAS y/o Iber, esto con el fin de llegar a visualizar los resultados obtenidos a partir del planteamiento una solución a la problemática que

aqueja al barrio Pablo Neruda, con lo cual dicha población se verá favorecida al poder contar con un diseño, que de materializarse permita controlar, encauzar y descargar el agua lluvia en temporadas de altas precipitaciones, sin que se generen desbordamientos del cauce ni afectaciones a los bienes inmuebles, salud, o posibilidad de damnificación de los habitantes del barrio. El análisis de diseño del canal se llevará a cabo desde las coordenadas 4°31'44.92"N y 74°14'5.13"O (fin del Barrio Pablo Neruda), hasta las coordenadas 4°31'51.53"N y 74°14'23.10"O (inicio del Barrio Pablo Neruda – Vía Sibaté Soacha).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar una alternativa de solución que permita controlar las inundaciones ocasionadas en el Barrio Pablo Neruda, debidas al desbordamiento de la Quebrada La Chacua, Municipio de Sibaté, ocasionadas en temporadas de altas precipitaciones para distintos periodos de retorno.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las condiciones hidrológicas y topográficas de la zona de estudio.
- Determinar los caudales mediante un modelo lluvia-escorrentía en la quebrada La Chacua para distintos periodos de retorno.
- Modelar las condiciones hidráulicas del canal, para diferentes escenarios de periodos de retorno.
- Proponer una alternativa de solución, de acuerdo con los resultados obtenidos, que permita controlar las inundaciones debidas al desbordamiento de la quebrada la Chacua, en el Barrio Pablo Neruda.

4 ANTECEDENTES

La modelación de canales es un tema que ha tomado fuerza debido a los cambios climáticos que se han presentado y generan grandes problemas, que afectan directamente la calidad de vida, salud y bienestar de la población que se ve perjudicada, teniendo en cuenta que generalmente son asentamientos urbanos de bajos recursos económicos, en dónde un evento de inundación puede llevar a la damnificación total y/o parcial de los afectados. Situaciones como el no contar con sistemas adecuados que generan una alerta temprana del riesgo, o la falta de elaborar estudios sobre el comportamiento de los cuerpos de agua, son los detonantes de grandes tragedias.

Por lo anterior, se han realizado varios estudios sobre distintos cauces, con el fin de determinar las problemáticas y de esta forma poder plantear alternativas, bajo varios tipos de análisis, los cuales permitan dar una idea clara de solución.

Dentro del estado de los antecedentes investigativos la modelación de canales, se encuentran diversos trabajos realizados; en este documento se referirán algunos de ellos, con el fin de entender un más del tema y reconocer los avances que se han tenido del mismo.

En primera instancia, como indica Vera Ruiz¹⁴ la poca aplicación de software en Colombia, que modelen la hidrodinámica de canales mediante algoritmos matemáticos complejos en dos dimensiones, a partir de las ecuaciones de Saint-

¹⁴ VERA RUIZ, Daniel Armando. Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca alta del río Bogotá, en el municipio de Villapinzón, utilizando modelación hidrológica HEC-HMS e hidráulica 1d y 2d HEC-RAS e íber. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Facultad Ingeniería Civil, 2015. p. 2.

Venant 2D, ha sido uno de los causantes de la poca aplicación de conocimiento ingenieriles en la solución de problemas hidráulicos, especialmente en lo que se refiere a canales, estas representaciones permiten dar una mejor idea de distintas alternativas de solución. Este trabajo consistió en el análisis del Fenómeno de la Niña, debido a la época invernal presentada en la zona de la Cuenca Alta del Río Bogotá, en donde como resultado se obtuvieron mapas de amenazas y vulnerabilidad para distintas zonas rurales y urbanas localizadas dentro de esta cuenca, mediante la obtención de caudales máximos, determinados a partir de un modelo lluvia escorrentía, respecto a distintos periodos de retorno, obtenido en el software HEC-HMS, por la metodología del SCS (Soil Conservation Service), a partir de las coberturas de suelo respecto al CN (Número de Curva). Dicha metodología es la que se pretende implementar en la obtención de caudales máximos del drenaje en estudio.

Por otra parte, como lo indica el título de la tesis de referencia, se implementó el software HEC-RAS e Iber para la modelación hidráulica, mediante uno de estos dos software se presentó el análisis correspondiente de las condiciones actuales y la posible solución al desbordamiento de la quebrada la Chacua. Dentro de las conclusiones se encuentra, que se exalta el uso de Iber sobre el HEC-RAS, ya que este permite modelar en 2D, mediante las ecuaciones de Saint Venant 2D, además de otros factores como el poder analizar remansos de agua, lo cual generaría un aumento en la lámina de agua en este modelo.¹⁵

Cabe mencionar que, en el mismo estudio se exalta la importancia de la aplicación de estos programas modernos que poco auge han tenido en el país, invitando a la utilización de estos, siendo este una motivación para implementar los mismos dentro del presente trabajo.

¹⁵ Ibid., p. 2.

Montaña Forero ¹⁶, realizó un trabajo sobre la quebrada Chinguaza ubicada en las localidades de Rafael Uribe, San Cristóbal y Tunjuelito, donde se simularon las características del cauce con el fin de identificar zonas de inundación, encontrando que la capacidad máxima antes de desbordamiento corresponde a los caudales máximos, obtenidos para a un periodo de retorno de 10 años mediante la modelación en HEC-HMS, demostrando que la quebrada no lograría contener el agua para periodos de retorno mayores, lo que supone un riesgo significativo para la población aferente, debido a que un periodo de retorno mayor a 10 años trae consigo una alta probabilidad de ocurrencia. De ahí la importancia de modelar y poder prevenir estas circunstancias mediante el planteamiento de una solución otorgada mediante la ingeniería.

Otros factores importantes mencionados por Montaña Forero¹⁷, son la importancia de la existencia de alcantarillados de sistema pluvial, que en temporada de lluvias brindan un gran aporte de la disposición y manejo de éstas, de igual forma, se resalta la importancia del análisis de cuerpos de agua para el reconocimiento de alertas tempranas ante eventos de inundaciones. Se menciona que el modelo hidrológico se llevó a cabo con el software HEC-HMS y el hidráulico con el HEC-RAS.

Por último, se referencia el aporte brindado por Ochoa García, et al.,¹⁸ que muestra y resalta la importancia de la modelación de drenajes como una herramienta fundamental, en el estudio de zonas de inundación en épocas invernales o de alta precipitación, respecto a dimensiones espaciales, los cuales permiten una adecuada identificación del problema y la planeación de posibles soluciones más

¹⁶ MONTAÑA FORERO. Op cit., p. 110

¹⁷ Ibid., p. 1.

¹⁸ OCHOA GARCÍA, Sergio Aurelio, *et al.* Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, provincia de Córdoba. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Serie A. Córdoba, Argentina. Septiembre, 2016, vol. 3, no. 2. ISSN 2362 - 2539 (Versión electrónica). p 98.

concretas y acertadas. Para la elaboración de la investigación en mención se implementaron 2 software el HEC-RAS (modelación 1D) y el Iber (Modelación en 2D).

Ochoa García, *et al.*¹⁹ Mencionan que obtuvo mejores resultados mediante el modelo Iber, respecto a los valores de calado (alturas de lámina de agua) y velocidad, con un error promedio por debajo del 5% en comparación al HEC-RAS con valores del 15% de error, en comparación a estudios previos realizados en campo.

Con base a los antecedentes anteriormente mencionados los distintos trabajos que se han realizado entorno a los modelos de inundación, se logra extraer la importancia de las modelaciones de cuerpos de agua, con el fin de determinar el periodo de retorno para el cual se podría presentar el desbordamiento del cauce principal, lo cual, permite generar acciones adecuadas antes de que se presente dichos fenómenos de la naturaleza, logrando analizar mediante una estación de computo las posibles causas y soluciones.

Por otra parte, se resalta la gran capacidad y precisión del software de modelación hidráulica, el cual permite simular diversos escenarios, los cuales representan de una manera muy acertada, las consecuencias que se podrían llegar a presentar ante un evento de alta precipitación, que, de no tenerse previsto, podría conllevar al desbordamiento del cauce natural del cuerpo de agua, ocasionando pérdidas económicas y en el peor de los casos la pérdida de vidas humanas. La posibilidad de poder prevenir estos eventos con antelación modelando las distintas alternativas de solución desde una estación de computo, permite tomar decisiones que lograrían salvaguardar el entorno que rodea el drenaje de estudio.

¹⁹ Ibid., p. 100.

5 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los marcos del trabajo realizado con el fin de dar a entender los soportes teóricos y legales, además de los distintos conceptos que abarcan el estudio llevado a cabo.

5.1 MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual presenta los diferentes conceptos teóricos de distintos autores, los cuales permiten desarrollar el trabajo de grado entorno procedimientos científicamente aprobados, teniendo el sustento de los procesos realizados en el desarrollo de la investigación.

5.1.1 CRECIENTES E INUNDACIONES

En este marco se pretende dar a entender las diversas definiciones que rodean las crecientes que en la mayoría de las ocasiones terminan en inundaciones.

Creciente: Con base a lo especificado por Monsalve Sáenz²⁰, una creciente es un fenómeno de ocurrencia de caudales relativamente grandes, el cual se puede presentar respecto diferentes periodos de retorno, siendo estos una posibilidad de ocurrencia la cual generalmente se brinda en años. Las crecientes trae consigo la mayoría de las veces inundaciones, ya que generan un aumento de la lámina de agua del cauce principal de un drenaje.

²⁰ MONSALVE SÁENZ. Op. cit., p. 225.

Existen dos causas principales para que se genere una creciente: el exceso de lluvia y el desbordamiento de cualquier volumen de agua acumulado aguas arriba.

Inundación: Como lo especifica Monsalve Sáenz²¹, una inundación se caracteriza por la ocurrencia de altos caudales que se desbordan del cauce del drenaje, generando la afectación de zonas aledañas. Una creciente solo causa inundaciones cuando el volumen de agua que la ocasiona se vierte por fuera del canal, existiendo dos causas principales para que se presente una inundación: exceso de la lluvia y existencia aguas debajo del área inundada de cualquier obstrucción que impida el paso adecuado del caudal de creciente.

5.1.2 REGISTROS PLUVIÓMETROS

El adecuado análisis de los registros históricos de los pluviómetros permite obtener resultados adecuados respecto los distintos procesos que se llevan a cabo sobre los mismos, por lo cual se definen los procedimientos realizados en torno a esta información.

Datos Faltantes: Corresponde a la metodología descrita por Monsalve Sáenz²² en donde se establece la fórmula que permite determinar el valor de registros faltantes con base a estaciones cercanas que cuenten con información de la fecha de registro faltante. La fórmula corresponde a:

$$P_x = 1/n \{(N_x/N_1)P_1 + (N_x/N_2)P_2 + \dots + (N_x/N_n)P_n\}$$

En Donde:

²¹ Ibid., p. 225.

²² Ibid., 84.

n: Número de estaciones pluviométricas con datos de registros continuos cercanas a la estación “x”, la cual va a ser complementada en su registro.

P_x: Precipitación de la estación “x” durante el periodo de tiempo por completar

P₁ a P_n: Precipitación de las estaciones 1 a n durante el periodo de tiempo por completar.

N_x: Precipitación media anual a nivel multianual de la estación “x”.

N₁ a N_n: Precipitación media anual a nivel multianual de las estaciones de 1 a n.

Análisis de Doble Masa: El fin de esta metodología según lo indicado por Monsalve Sáenz²³, es el poder realizar el ajuste de la serie de datos respecto a una curva doble acumulativa que permita relacionar los totales anuales acumulados de precipitación de un determinado lugar y la media acumulada de los totales anuales de todas las estaciones denominadas homogéneas.

En caso de cambio de pendiente no existe homogeneidad. Por consiguiente, sus datos deben ser corregidos para las condiciones actuales (suponiendo que los datos actuales son homogéneos), de la siguiente manera.

$$P_{aj} = (M_a/M_0) P_0$$

En donde:

P_{aj}: Observaciones de precipitación ajustadas a las condiciones actuales de localización, exposición o métodos de observación del puesto pluviométrico

P₀: Datos observados que deben ser corregidos

M_a: Pendiente de la recta durante el periodo correcto de toma de datos

M₀: Pendiente de la recta en el periodo en que se hicieron las observaciones P₀

²³ Ibid., p. 84.

5.1.3 MORFOMETRÍA CUENCAS

La morfometría de la cuenca permite brindar características principales de las condiciones geométricas respecto la topografía y geomorfología de la zona de estudio, a partir de las cuales se pueden aplicar diversos conceptos teóricos que permitan pronosticar futuros escenarios.

Curva Hipsométrica: Monsalve Saénz²⁴, define la curva hipsométrica como la variación de la elevación de los varios terrenos de la hoya con referencia al nivel medio del mar. Esta es representada por un gráfico que muestra el porcentaje de área de drenaje que existe por encima o por debajo de varias elevaciones.

La representación se puede realizar por el método de cuadrículas o mediante la planimetría de las áreas entre curvas de nivel.

Para su definición se deben determinar el área entre rangos de curvas de igual diferencia de nivel, tomando la elevación media de cada rango, respecto al peso que tiene por área.

La moda de la curva hipsométrica es el valor más frecuente (mayor área) del intervalo de clase de cota que se encuentra en la cuenca de estudio.

Pendiente: Monsalve Sáenz²⁵, la establece como la característica que controla en buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta por lo tanto el tiempo que lleva el agua lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenajes de la cuenca objeto de estudio. Se describe una

²⁴ Ibid., p. 45.

²⁵ Ibid., p. 44.

metodología para la determinación de la pendiente media ponderada a partir de áreas entre curvas y la longitud entre los límites de las mismas.

5.1.4 LLUVIA-ESCORRENTÍA

Los modelos de lluvia escorrentía permiten determinar la escorrentía superficial para distintos periodos de retorno, estableciendo la relación de equivalencia entre la cantidad de lluvia que cae sobre una hoya y la cantidad de caudal que esta representa a lo largo del cauce o drenaje.

Curvas IDF Sintéticas: Para Colombia se propone el método de curvas sintéticas Vargas y Granados²⁶, debido a la ausencia de sistemas de registros a lo largo del territorio colombiano, como una alternativa regionalizada para la obtención del comportamiento de los modelos lluvia escorrentía, para la estimación de volúmenes de drenaje superficial.

En este estudio se dedujeron curvas intensidad duración frecuencia por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas

Vargas y Granados²⁷, plantean la siguiente ecuación:

$$i = \frac{axT^b xM^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$$

Donde:

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

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 hrs a nivel multianual

²⁶ VARGAS R. y GRANADOS M.D. Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. Universidad de Los Andes, 1998. p. 187-200

²⁷ *Ibíd.*, p. 192

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

a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados y sus valores se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1 Parámetros de Regionalización IDF Sintéticas

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

Fuente: Vargas y Granados, 1998

La regionalización establecida por los autores se muestra a continuación, encontrando que el sector de estudio corresponde a la región R1.

Figura 5. Regionalización Curvas IDF Sintéticas



Figura 1.

Ubicación de las estaciones pluviográficas utilizadas en los análisis.

Fuente: Vargas y Granados, 1998

Soil Conservation Service (SCS): Según Ven te Chow, *et al*²⁸, el Soil Conservation Service (1972) desarrolló un método para calcular las abstracciones de una tormenta. Para la Tormenta como un todo, profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa P_e es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P . De manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad inicial del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación (Abstracción inicial antes del encharcamiento= I_a), para la cual no ocurrirá escorrentía. Luego la escorrentía potencial es $P-I_a$. La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales potenciales son iguales, es decir.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

En donde:

Fa= Profundidad adicional del agua retenida en la cuenca

S= Retención potencial máxima

Pe= Escorrentía directa

P= Profundidad de precipitación

Ia= Abstracción inicial antes de encharcamiento

Del principio de Continuidad

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando las anteriores ecuaciones y resolviendo para P_e .

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

²⁸ VEN TE, Chow. Hidrología Aplicada., Colombia.: McGraw-Hill, 2000. p. 150

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

Número de Curva (CN): Ven te Chow et al²⁹, especifica en su libro que el SCS encontró curvas para estandarizar los procesos de modelos lluvia escorrentía, donde se define un número adimensional de curva CN, tal que $0 \leq CN \leq 100$, para superficies impermeables y superficies de agua $CN=100$, para superficies naturales $CN < 100$.

Las curvas número permiten determinar las pérdidas por infiltración que se presentan en la cuenca o área de estudio, debidas a las coberturas de suelo. Los Números de Curva han sido tabulados por el SCS con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra, definiéndose 4 grupos de suelo: grupo A, Grupo B, Grupo C y Grupo D.

5.1.5 ECUACIONES HIDRODINÁMICA

Respecto el alcance del proyecto se decide implementar un modelo hidrodinámico basado en las ecuaciones de Saint Venant 2D, las cuales se exponen a continuación:

ECUACIONES SAINT VENNAT 2D: como lo muestra Ochoa García³⁰, las ecuaciones de Saint Venant 2D son una simplificación del modelo Navier Stokes y Reynolds en donde se deben considerar tres aspectos:

²⁹ Ibid., p. 152.

³⁰ OCHOA GARCÍA, Sergio Aurelio, et al. Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, provincia de Córdoba. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Serie A. Córdoba, Argentina. Septiembre, 2016, vol. 3, no. 2. ISSN 2362 - 2539 (Versión electrónica). p. 97.

- Profundidad del agua pequeña con relación a las otras dimensiones del problema.
- Distribución hidrostática de presiones en la vertical.
- Pendiente de solera reducida.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = Cvh + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh(S_{0x} - S_{fx}) + S_{t1},$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = -Cuh + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + gh(S_{0y} - S_{fy}) + S_{t2},$$

donde h es el calado o la profundidad del fluido, u y v son las componentes del vector velocidad en las direcciones x y respectivamente, en cada punto de Ω , g es la aceleración de la gravedad, C refleja el efecto de la fuerza de Coriolis, τ_{sx} y τ_{sy} están asociados con el efecto del viento en la superficie del fluido. Los términos $S_{0x} = -\partial z / \partial x$ y $S_{0y} = -\partial z / \partial y$ miden la pendiente del terreno en las direcciones x y respectivamente, si z es una función que describe el fondo o terreno. Las expresiones.

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad \text{y} \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}},$$

reflejan el efecto de fricción del fluido con el terreno, donde n es el coeficiente de Manning, y

$$S_{t1} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right),$$

$$S_{t2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

representan los efectos turbulentos del flujo, siendo ν_t la viscosidad turbulenta. La forma vectorial del modelo de Saint-Venant simplifica mucho la notación para el tratamiento numérico, así que se da enseguida:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial y} = \mathbf{G},$$

Donde

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}_1 = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}_2 = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix},$$

Y

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ Cvh + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh(S_{0x} - S_{fx}) + S_{t1} \\ -Cuh + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + gh(S_{0y} - S_{fy}) + S_{t2} \end{pmatrix}.$$

Son necesarias condiciones iniciales y de contorno para la resolución del sistema de Saint-Venant, aunque en situaciones generales no existen soluciones analíticas del problema. Ante esto, una opción es recurrir a los métodos numéricos.

5.1.6 SOFTWARE MODELACIÓN

La representación virtual de eventos hidrodinámico ha ido avanzando con el fin de obtener resultados más precisos con menos incertidumbre de error, sin embargo

como lo menciona Rodríguez Rincón³¹, la incertidumbre es un aspecto muy importante para la elaboración de estos modelos, la cual a veces no se tiene en cuenta, despreciando ciertos aspectos que son de vital importancia, el generar varias escenas para una modelación la cual incluya variaciones de diferentes aspectos daría una cobertura mayor de la incertidumbre y por consiguiente resultados más precisos. Rodríguez Rincón³², muestra un cuadro comparativo del avance tecnológico llevado a cabo, a partir de diferentes modelos hidrodinámicos, organizados respecto su complejidad hidráulica, el cual se toma como base y se complementa respecto al IBER y HEC-RAS, además de las modelaciones 3D.

Tabla 2 Métodos y Modelos Hidrodinámicos ordenados de forma ascendente según complejidad hidráulica

Método	Descripción	Código (ejemplos)	Aplicaciones
Superficie libre del agua	Se define una superficie libre del agua (plana) a través de los valores de nivel obtenidos de estaciones hidrométricas en los ríos. Esta superficie se superpone a un MDE para obtener la inundación.	Ninguno	(Priestnall, Jaafar and Duncan 2000)
Celda de almacenamiento(grande)	El río y la llanura se modelan de forma independiente, la llanura se discretiza como celdas de inundación y el flujo en el río se describe a través de ecuaciones basadas en el flujo uniforme (ej.		(Cunge 1975, De Jonge, Kok and Hogeweg 1996, Cruickshank 1992)

³¹ RODRIGUEZ RINCON, Juan Pablo. Estimación probabilística de mapas de inundación: una metodología basada en ensambles. Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil, énfasis en hidráulica. México D.F.: UNAM,2016. p. 4.

³² Ibid., p. 45.

Método	Descripción	Código (ejemplos)	Aplicaciones
Celda de almacenamiento (pequeña)	<p>Manning).</p> <p>Similar a la anterior, pero en lugar de discretizar la llanura en celdas asignadas, éstas se determinan en función del MDE. El río es modelado de forma unidimensional.</p>	FLOODSIM, LISFLOOD-FP	(Bechteler, Hartmaan and Otto 1994); (Bates and De Roo 2000)
Modelos hidrodinámicos de una dimensión (1D)	<p>Resuelven las ecuaciones de Saint-Venant (1D) por medio de una serie de secciones transversales del río y llanura de inundación, perpendiculares al flujo del río. Los niveles de agua resultantes en puntos 1D, pueden ser dibujados en 2D por medio de una interpolación espacial de los resultados.</p>	HEC-RAS, ISIS, MIKE11, SOBEK, HEC-RAS	(Tate and Maidment 1999) (Penning Rowsell and Tunstall 1996) (Gourbesville 1998) (Werner 2001)
Modelos hidrodinámicos de dos dimensiones (2D)	<p>Resuelven las ecuaciones de aguas someras en 2D, en algunos casos con modelos de cierre de turbulencia. Es posible discretizar la llanura de inundación por medio de mallas regulares (rectángulos) o adaptables (triángulos).</p>	TELEMAC-2D, MIKE21, DELFT FLS, DELFT3D, TUFLOW, DIVA T, TRENT, IBER, HEC-RAS	(Hervouet 2000) (McCowan and Collins 2001) (McCowan y Collins (1999); (Beffa and Connell 2001) (Stelling and Duinmeijer 2003); Stelling y Duinmeijer (2003)
Modelos hidrodinámicos de tres dimensiones (3D)	<p>Resuelven las ecuaciones de Navier Stokes 3D, mediante CFD, sobre</p>	FLOW 3D, DELFT3D, ANSYS,	(Driver, D.M. and Seegmiller,

Método	Descripción	Código (ejemplos)	Aplicaciones
	cualquier superficie, adicionalmente se pueden modelar gases, manejan un costo computacional elevado	OPEN FOAM, FENICS	H.L., 1985), (Harlow, F.H. and Nakayama, P.I., 1967), Kolmogorov, A.N., 1942

Fuente: Adaptado Rodríguez Rincón, 2016

Se resaltan los tres últimos modelos señalados en la tabla anterior, modelos 1D, 2D y 3D, cada uno precedente del otro. Una característica principal de estos tipos de modelación es que los modelos 1D y 2D son simplificaciones del modelo 3D el cual resuelve ecuaciones de Navier Stokes mediante CFD, mientras el 1D y el 2D resuelven por el método water shallow, o mediante ecuaciones de Saint Venant 1D y 2D, respectivamente. El modelo 1D toma el vector de velocidad en la dirección perpendicular a la sección transversal analizada, mientras el modelo 2D toma los dos vectores de velocidad, promediando el valor de la profundidad, por otra parte, el modelo 3D cuenta con los tres vectores, es importante mencionar que entre mayor sea el nivel de modelación mayor será el costo computacional.

Como se apreció, existen diversidad de software capaces de realizar modelaciones hidrodinámicas, para el presente documento se determina implementar el modelo Iber 2D, debido a que principalmente es un software libre (gratis), no se implementa modelos 3D debido al alto costo computacional de estos, además de ser en su mayoría softwares con licencia.

A continuación, se hace una descripción de los programas empleados en la modelación hidrológica e hidráulica, llevadas a cabo para la elaboración del proyecto.

Iber: Es un software gratuito que permite modelar cuerpos de agua mediante las ecuaciones de Saint venant 2D.

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios.

El modelo Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas al cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con distinto grado de complejidad. Iber es gratuito y de libre uso³³.

HEC-RAS: Según el US Army Corps Of Engineers³⁴, Centro de Ingeniería Hidrológica, Este software permite al usuario realizar un flujo continuo unidimensional, cálculos de flujo inestable de una y dos dimensiones, cálculos de transporte de sedimentos / lecho móvil y modelado de la temperatura del agua / calidad del agua.

El sistema HEC-RAS contiene varios componentes de análisis fluvial para: cálculos de perfil de superficie de agua de flujo constante; simulación de flujo inestable de una y dos dimensiones; cálculos de transporte de sedimentos límite móvil; y análisis de calidad del agua. Un elemento clave es que los cuatro componentes utilizan una representación de datos geométricos comunes y rutinas de cálculos geométricos e hidráulicas comunes. Además de estos componentes de análisis de ríos, el sistema

³³ GOBIERNO DE ESPAÑA, *et al.* Modelación bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de Referencia Hidráulico. España, p. 5.

³⁴ US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, HEC-RAS river analysis System, Hydraulic Reference Manual, Estados Unidos, 2016. p. 15.

contiene varias características de diseño hidráulico que se pueden invocar una vez que se computan los perfiles básicos de la superficie del agua.

HEC-HMS: Con base a lo especificado por la US Army Corps Of Engineers³⁵, Centro de Ingeniería Hidrológica, el sistema de modelado hidrológico (HEC-HMS) está diseñado para simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas dendríticas. El software incluye muchos procedimientos tradicionales de análisis hidrológico, como la infiltración de eventos, los hidrogramas unitarios y el enrutamiento hidrológico. HEC-HMS también incluye los procedimientos necesarios para la simulación continua, incluida la evapotranspiración, el deshielo y la contabilidad de la humedad del suelo. También se proporcionan capacidades avanzadas para la simulación de escorrentía en cuadrícula utilizando la transformación de escorrentía cuasi-distribuida lineal (ModClark). Se proporcionan herramientas de análisis complementarias para la optimización del modelo, el flujo de flujo de predicción, la reducción del área de profundidad, la evaluación de la incertidumbre del modelo, la erosión y el transporte de sedimentos, y la calidad del agua.

El software presenta un entorno de trabajo completamente integrado que incluye una base de datos, utilidades de entrada de datos, un motor de cálculo y herramientas de informe de resultados. Una interfaz gráfica de usuario permite al usuario un movimiento sin interrupciones entre las diferentes partes del software. Los resultados de simulación se almacenan en HEC-DSS (sistema de almacenamiento de datos) y se pueden usar junto con otros programas para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de flujo, impacto de urbanización futura, diseño de aliviaderos de embalses, reducción de daños por

³⁵ US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC MODELING SYSTEM, HEC-HMS, User`s Manual, Estados Unidos, 2010. p. 1.

inundación, regulación de llanuras de inundación y operación de sistemas. Debido a que la metodología determinada a utilizar para el modelo de lluvia-escorrentía, es la establecida por el SCS, las ecuaciones que rigen el programa para este módulo son las mismas descritas en el capítulo 5.1.4. Lluvia-Escorrentía.

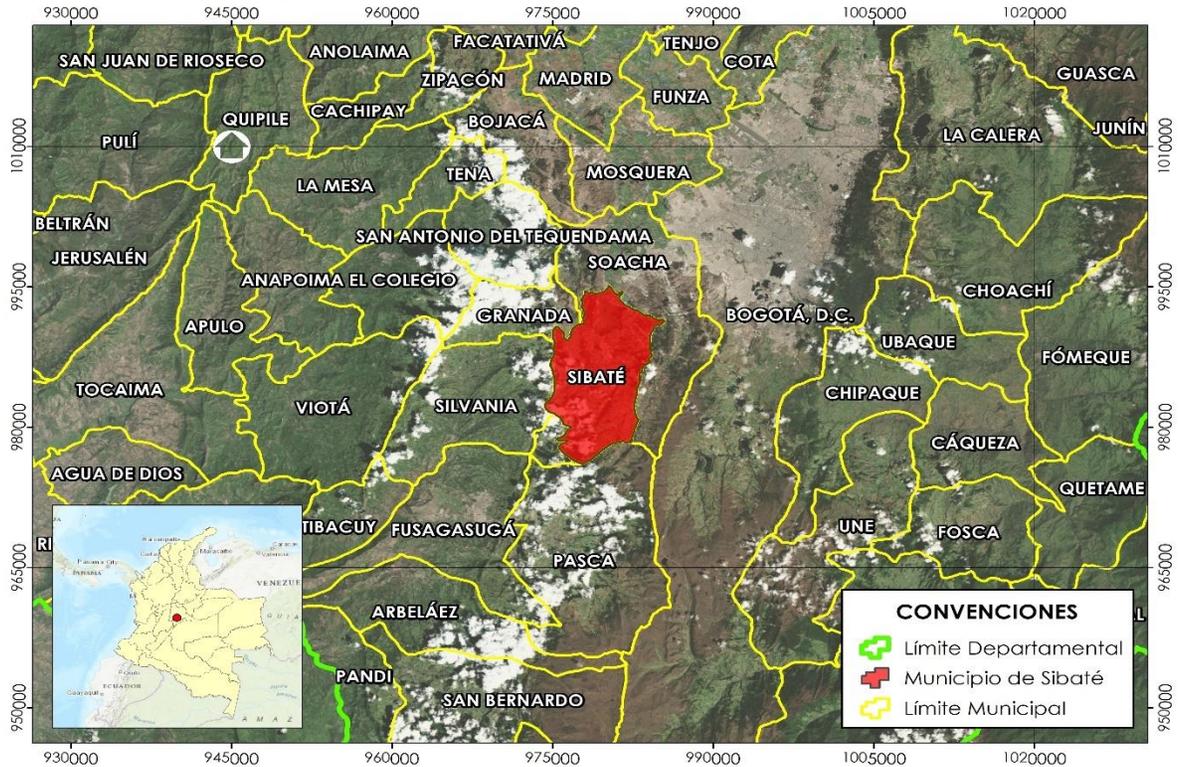
5.2 MARCO GEOGRÁFICO

A continuación, se describen las características geográficas que delimitan el proyecto.

Sibaté: Con base a lo especificado en la página oficial de la alcaldía de Sibaté³⁶, este es un municipio del departamento de Cundinamarca, el cual cuenta con un área de 125.6km², de los cuales 16.9km² pertenecen al área urbana y 108.7km² al área rural, una población de 38,412 habitantes. Localizado con coordenadas 4°29'27" Norte y 74°15'34" Oeste, con una altura media sobre el nivel del mar correspondiente a 2600 m.s.n.m. La topografía corresponde a zonas de pendientes planas y onduladas, en donde la mayoría del territorio corresponde a zonas onduladas, aproximadamente un 74%. El municipio Limita al Norte y oriente con Soacha, al sur con Pasca y Fusagasugá, al occidente con Sylvania y granada.

³⁶ Disponible en internet: <<http://www.sibatecundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>>

Figura 6. Localización Municipio de Sibaté



Fuente: Autor, 2018

Barrio Pablo Neruda: El barrio Pablo Neruda se encuentra localizado en el municipio de Sibaté, departamento de Cundinamarca. El barrio Pablo Neruda está ubicado en el kilómetro 3 vía a Sibaté-Soacha frente al embalse El Muña, con coordenadas elipsoidales Latitud: $4^{\circ}31'44.88''N$, Longitud: $74^{\circ}14'11.13''O$, obtenidas a partir de Google Earth. El barrio se localiza aguas abajo de la descarga en la desembocadura de la Cuenca La Chacua.

Quebrada La Chacua: La quebrada Chacua se encuentra localizada en el municipio de Sibaté, departamento de Cundinamarca. Atraviesa por los barrios Pablo Neruda, Chacua y García, desembocando en el Río Bogotá. El embalse del Muña se encuentra en cotas por encima de la entrega del canal la Chacua, impidiendo la descarga sobre este cuerpo de agua. En temporadas de invierno se han presentado diversas inundaciones debido al desbordamiento del cauce de la quebrada.

5.3 MARCO LEGAL

Para fines de este trabajo la norma que se tendrá presente es la RAS 2017: Con base en lo indicado por el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio³⁷ el RAS (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico) 2017, correspondiente en su versión inicial al RAS 2000, modificado en Junio de 2017 mediante la resolución 0330 derogando las resoluciones anteriores, es el reglamento vigente a la fecha, para la elaboración de estudios de acueductos y alcantarillados a nivel nacional, siempre y cuando no se posea una normatividad específica para la región de estudio este es el reglamento a aplicar para cumplir con los diseños y diagnósticos de sistemas de alcantarillados y acueductos.

Para este caso en particular se tendrá en cuenta el título D, sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias.

³⁷ MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Documentación Técnico Normativa del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Resolución 0330. Bogotá D.C., 2017. p. 1.

6.1 ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

Dado el alcance de la investigación se puede determinar que el enfoque es de carácter cuantitativo, como lo indica Reyes³⁸ al tener en cuenta que se recolectaron datos para analizar y dar solución a un problema que aqueja a una comunidad, con base en la medición numérica y análisis estadístico de distintas variables, como lo es el haber llevado a cabo un estudio hidrológico e hidráulico del canal para determinar la lámina de agua y caudales respecto a diferentes periodos de retorno, cuyo fin era determinar patrones de comportamiento referente a teorías científicas referente a condiciones actuales y la alternativa proyectada para el sistema.

Por otra parte, el alcance de la investigación se basa directamente en lo descriptivo, ya que a partir de este método se analizó el funcionamiento actual de la quebrada la Chacua con el que se estableció el periodo de retorno que generaba los desbordamientos de este cuerpo de agua. De igual forma, la investigación es de tipo proyectiva teniendo en cuenta que se llevó a cabo la modelación como solución a un problema o necesidad que genera el exceder la capacidad del canal natural de estudio.

6.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN BASE

Para la elaboración de la tesis se hizo necesario llevar a cabo la recolección de información base de la zona de estudio, para lo cual se obtuvo los valores de registros pluviométricos de estaciones hidrometeorológicas cercanas a la zona de estudio, teniendo en cuenta que el cuerpo de agua objeto del trabajo, no cuenta con

³⁸ REYES, Roberto, *et all*, Metodología de la investigación. 6 ed. México.:McGraw-Hill, 2014. ISBN 978-1-4562-2396-0. 4 p.

estaciones sobre su cauce que permitan determinar los valores hidrológicos directamente. A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo para la obtención de la información.

6.2.1 Información Datos Hidrometeorológicos

Para la obtención de datos hidrometeorológicos se realizó la consulta correspondiente en las bases de datos disponible en línea, de las entidades IDEAM y la CAR. Los datos solicitados al IDEAM son solicitados en la página correspondiente de esta entidad, mediante el módulo de solicitud de información, en donde se debe crear un usuario y una clave para realizar la respectiva solicitud de información. Los datos de estaciones solicitadas a esta entidad corresponden a estaciones meteorológicas y algunas hidrometeorológicas que permitieron obtener registros tanto de precipitaciones como de condiciones climatológicas.

Las estaciones de las cuales se solicitó toda la información disponible se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3 Estaciones IDEAM

CÓDIGO	NOMBRE	CLASE	CATEGORIA	ESTADO	CORRIENTE	ALTITUD
21205720	SAN JORGE GJA	MET	CO	ACT	SOACHA	2900
21206170	CLARETIANO	MET	CO	SUS	FRIO	2500
21206230	VEGAS LAS HDA	MET	CO	SUS	BOGOTA	2543
21206280	ACAPULCO	MET	CO	ACT	BOGOTA	2650
21206640	SAN JOSE	MET	CO	SUS	TUNJUELITO	2700
21206660	COL SANTIAGO PEREZ	MET	CO	ACT	TUNJUELITO	2565
21201240	STA MARIA DE USME	MET	PM	ACT	TUNJUELITO	2800
21201300	AUSTRALIA	MET	PM	ACT	BOGOTA	3050
21201320	UNION LA	MET	PM	ACT	EMB MU#A	2640
21201580	PASQUILLA AUTOMATICA	MET	PM	ACT	TUNJUELITO	3000
21201920	ALTO SAN MIGUEL	MET	PM	ACT	EMB MUNA	2750
21202160	HIDROPARAISO	MET	PM	ACT	BOGOTA	1600
21201310	PREVENTORIO INFANT	MET	PM	ACT	BOGOTA	2650
21206160	HIDROPARAISO	MET	CP	SUS	BOGOTA	1600
21206620	COL H DURAN DUSAN	MET	CO	ACT	BOGOTA	2562
21206650	COL SAN CAYETANO	MET	CO	ACT	TUNJUELITO	3100
21195160	SUBIA AUTOMATICA	MET	CP	ACT	SUBIA	2075
21206940	CIUDAD BOLIVAR AUTOMATICA	MET	CP	ACT	TUNJUELITO	2687

Fuente: IDEAM, 2018

Respecto a las estaciones de la CAR, para facilitar los procesos de transparencia del país puso a disposición del público, los datos abiertos en donde la población colombiana y quienes estén interesados pueden acceder a distintos datos informativos y técnicos de todos los procesos que se llevan en el país, entre estos se encuentra la base de datos de la CAR, correspondiente a las precipitaciones máximas en 24 horas a nivel mensual datos que permiten obtener los valores mensuales durante cada año de registro de las estaciones de la CAR Cundinamarca a lo largo de la cuenca del Río Bogotá.

Para el presente proyecto se utilizaron los datos de 6 estaciones de la CAR Cundinamarca, dichas estaciones se muestran en la siguiente tabla, en donde cómo se puede apreciar en la siguiente tabla, solo se cuenta con registros de estaciones meteorológicas y no hidrométricas, las cuales permitirían mejores resultados además de contar con mediciones directas que lograrán dar una mayor validación al modelo hidrodinámico.

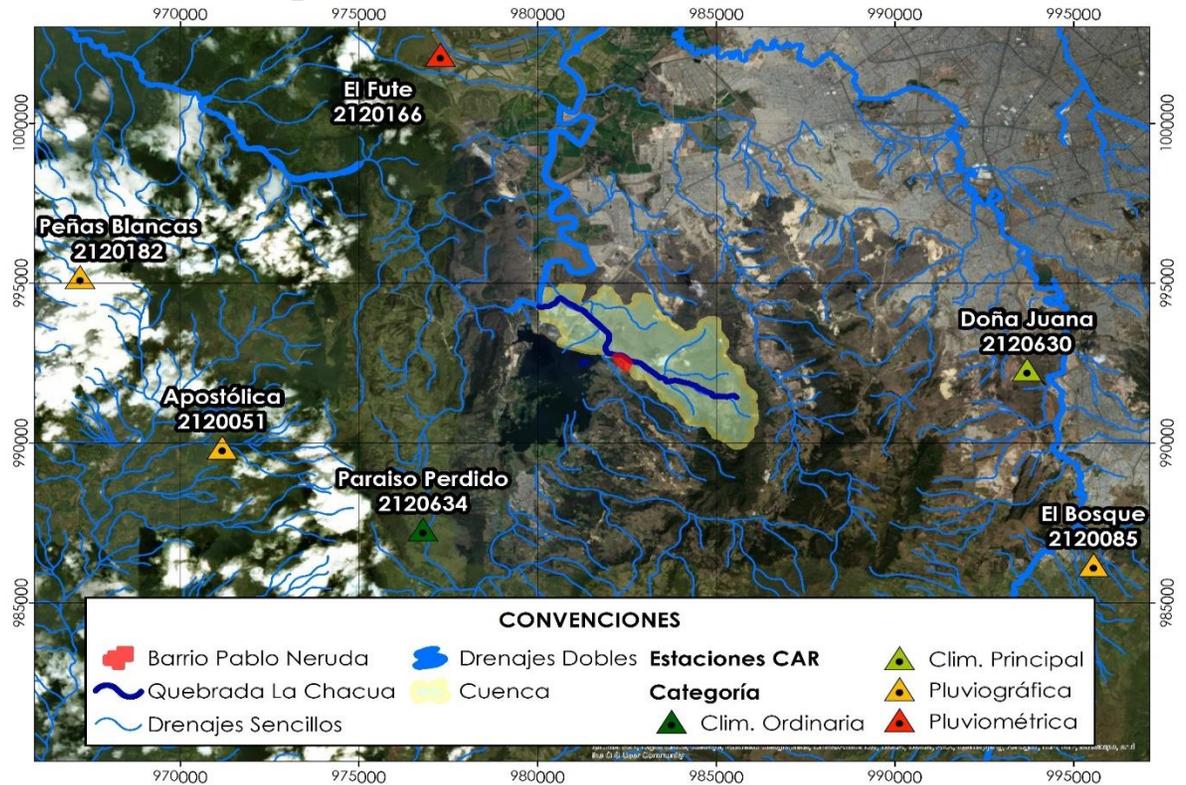
Tabla 4 Estaciones La CAR Cundinamarca

CÓDIGO	NOMBRE	CLASE	CATEGORIA	ESTADO	CORRIENTE	ALTITUD
2120051	Apostólica	MET	PG	Activa	EMB. MUÑA	2618
2120085	El Bosque	MET	PG	ACTIVA	R. TUNJUELO	2880
2120166	El Fute	MET	PM	ACTIVA	R. BOGOTÁ	2607
2120182	Peñas Blancas	MET	PG	ACTIVA	R. BOGOTÁ	2450
2120630	Doña Juana	MET	CP	ACTIVA	R. TUNJUELO	2700
2120634	Paraíso Perdido	MET	CO	ACTIVA	R. MUÑA	2700

Fuente: Datos Abiertos, 2018

En la siguiente imagen se muestran las estaciones de la CAR, que se emplean en el estudio hidrológico del proyecto.

Figura 8. Estaciones CAR Cundinamarca



Fuente: Autor, 2018

A continuación, se muestran las series de datos crudos organizados. Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la estación Apostólica.

Tabla 5 Datos Crudo Estación Apostólica

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1971	15.7	16.4	28.8	24.2	21.6	22.2	8	10	18.2	39.5	31.6	22.3
1972	21.2	13.6	18.2	21.6	25.8	15.2	11.4	5	1.4	14	12	0
1973	0	2.9	13.4	12.2	25	7.3	10	29.3	29.4	21.4	25.9	46.5
1974	16.8	15.5	13.7	16.2	28.2	12.5	3.5	15	13.5	12	29.5	19.8
1975	16.2	17	15.3	16	35	14	17.7	8.2	41.5	22	16.6	24.5
1976	22.5	17.3	19.5	31	23.9	16.9	3	3	23.7	23.5	17.7	23.7
1977	17.4	2.2	39.3	15.5	9.2	12.7	6.8	21	33.3	15	15	11.2
1978	1.3	9	20.8	40	17.4	10	9.4	5	10.5	12.7	17.8	19.6
1979	12.8	14	12.1	29.8	19.4	24.2	23.1	19.3	19.4	29.2	50.8	10
1980	2.5	5.8	3	15.7	14.5	23.7	3.8	0	0	0	0	0
1982	23.2	17.2	16.4	29.6	16.3	6.5	10.3	5.1	3.5	19.9	19.7	11.1
1987	18.9	10.5	26.2	30.4	18.5	1.6	10.9	3	14.2	23.7	18.2	3.6
1988	8.3	15	3.7	21.1	12.6	29.2	13.9	17.7	18.7	24.6	31.3	15.6
1991	3.7	20.1	26.8	26.4	16.1	3.5	10.5	10.4	3.9	13.2	15.9	26.2

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1992	5.3	4.2	27.5	7.8	9.3	2.5	3.6	6.6	11	12.8	18.1	6.8
1993	37.3	10.6	12.9	21.6	18	4	7.4	6.1	25	8.6	29.7	13.6
1994	16.5	18.8	27	9.2	17.8	9.7	10.4	3.7	19	18.9	43.6	1.4
1995	1.2	1.3	24.5	39.4	34.3	8.4	7.8	13	5.1	8.9	19.6	33
1996	16.3	19.9	21.7	18	36.6	21.7	12.2	6.2	13.2	12.6	15.9	12
1997	9.8	6.7	12.6	14.2	11.8	24.2	4.8	1.1	7	23	18.5	0
1998	0.2	8.5	4.5	6.6	26.5	2.5	9.4	8.3	0	19.3	11	15.3
1999	7.3	7.3	13.6	23.7	20.2	15.3	4.2	15.5	16.9	16.3	14	26.1
2000	5.5	26.5	7.6	4.5	14.4	30.2	14	16	25	9.8	16	54
2001	3.8	26	23	4.2	12	31	4.4	2.4	19	21	12.6	5
2002	7.3	17.7	14.3	22.1	14.8	20	8.1	3.1	0	15	13.4	19.4
2003	5.7	7.3	29	27.1	4	9.5	10	5	40.4	28	11.6	6.1
2004	6.5	20.6	14.2	25	32	6	5	4.5	16	17.6	19.6	14
2005	8.9	16.4	7.5	16	28.5	12	6.7	14.4	8.9	16	12.6	10.8
2006	18	0.9	16.4	17	30	12	0	0	8.2	26.6	16.4	0
2007	3.4	5.1	11.4	11	15	19.6	9.3	21	2.2	22.9	7	14
2008	7	12	28.4	22	2.1	25.6	18	17	7	32	16.4	20.4
2009	20.8	25	20.3	22	1.9	23.5	4.5	5.4	18.6	14.5	29.5	3.6
2010	4	15.5	5.5	43.8	23.8	13.1	24.6	7.2	12.5	18.8	26.7	21.2
2011	27.1	7.8	33.1	32	22.7	12.5	15.7	12.5	21	21.3	18.6	33.5
2012	3.9	16.6	18	22.9	8.1	21.8	9.6	7.2	6	25	6.3	22.5
2013	11.2	12.7	23	41.2	11.5	12.5	8.8	20.5	7	9.8	20.1	16.2
2014	13.5	11.7	38.1	11	7.5	5.2	9	7.5	6	26.5	7.5	13
2015	18	14.2	10.1	10	10.6	10	8.6	2.7	19.6	17.5	17.4	1
2016	13	18	2.5	41	26.2	6.4	18.3	14.6	18.1	20	13.5	28.1

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la estación El Bosque.

Tabla 6 Datos Crudo Estación El Bosque

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1963	10.5	32.5	11	25.5	25.5	34	26	37.5	20	30	40	15
1964	0	14	7.5	20	43	24	45	17	19.5	15.5	22	41
1965	10	26.5	26.5	40	45	40	31	26	31	45	28	40
1966	14	17.5	35	25	14	48	45	40	40	15	50	37
1967	15	12.6	28	17.7	25.2	26	19.9	39.5	15.5	22.6	75	12.2
1968	3.2	19.1	7.7	32.1	15.2	25.1	39.2	13.6	18.8	30	26.2	11.1
1969	17.2	15	6.6	27.4	24.3	29.8	19.8	22	27	37.3	21.1	21.2
1970	10.6	27	11.8	24.3	24	23.5	29.6	14	16.9	40.1	12.7	10.9
1971	16	9.1	16.5	41.2	28.7	37.5	36.6	17.8	23.8	21.7	18.3	22.7
1972	17.1	10	14	28	33.6	24	31.3	19.9	12.2	30	30.9	8.5
1973	10.3	1.2	4.7	28.8	32.3	25.2	15.8	30.6	23.6	35.1	27.9	31.8
1974	15.2	18.2	20.2	31	29.6	15.5	27.6	19.9	20	13.3	41.2	3.8
1975	8.6	23.3	24.4	12.6	15.8	31	15.1	33.5	11.3	28.3	34.5	19.4
1976	7.3	8.9	22	22	32.2	30	32	46.5	41	37.5	46.5	27
1977	0	15	18	20	12	36	47	40.5	40	35	41	15
1978	10	22	14	27	36	48	20	18	19.1	20	37.5	10.4
1979	5.8	2.1	18.3	85	17.8	30.9	18.9	25.6	19.9	29.9	78.9	20.7
1980	24.1	21.1	13	29.2	18.5	40.8	12.2	19.3	27	34.3	24.9	10.1
1981	6	7.9	10.2	15.4	42.2	23.5	38	36.5	32.3	49.4	27.3	26

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1982	21.4	7.6	13.6	47.9	27.2	19.1	21.8	22.8	23.5	21.8	11.4	4.6
1983	16.5	24.4	22	25	18	36	22	18	17.5	10.5	8.5	29
1984	18	45	45	45	45	45	15	27	15	8	15	5
1985	10	5.5	1.8	40	30	22.8	20	14	12.4	14	24	18
1986	5	17	31	20	20	12	16	14	16	15	4.5	7
1991	6	10	28.9	25	26	14	30	23.9	18.3	11.9	18.6	14.9
1992	4.6	16.4	76.6	7.6	19.1	8.8	10.5	10.5	10.5	8.5	28.6	24.4
1993	6.8	2.1	10.5	10	10.2	20.4	16	20.1	22	12	44.5	9.4
1994	30	45	28	28	10.2	20	25.3	29.7	20	15.5	37.7	17.9
1995	10.6	20.7	5.2	10.5	10.5	19.9	17.9	30.7	13.6	10.3	7.9	39.6
1996	18.7	24	19.4	22.3	62.2	16.5	29.7	18.3	29.2	10.7	16.9	15.2
1997	43	10.5	25.6	18.7	26.8	10.7	33.6	10.2	19	12.4	18	1.5
1998	3.4	10.2	38.3	8.2	51.5	32.3	28.6	13.9	14.4	28.3	24.1	31
1999	17.9	1.6	11.5	29.5	16.1	17.1	13.4	15.1	19.8	34.4	40.3	15.5
2000	15.2	26.3	29.5	21.5	25	19.3	10.5	10.5	10.5	10.5	30.6	12.3
2001	12.3	12	15.2	8	6.3	6.1	5.2	5.6	4.9	15.3	31	27
2002	4.3	2.1	14.5	17.5	4.4	21.8	4.3	5	7.7	22.3	13.6	10.9
2003	1.8	3.1	10.4	8.3	9.8	0	0	189.5	112.2	113.3	52	74
2004	0	15.2	18.3	24.4	30.5	1.7	19.7	11.1	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	57.1	3.1	13.1	1.5	5.7	5.2	4.9	0.5
2006	10.6	1.5	10.9	10.8	10.7	10.6	13.2	10.5	10.5	10.7	11.3	5.6
2007	0	10.5	15.5	22.5	21.8	24.2	14.2	21.8	15.2	43	23.4	16.2
2008	20.4	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2009	0	10.5	15.3	10.5	10.5	15.7	25.3	15.6	10.5	27.3	12.7	12.1
2010	0	10.5	10.5	21	27.2	28.6	23.2	10.5	23.5	35.3	45.3	23.4
2011	15.8	10.6	23.4	43.7	35.9	24.9	13.2	13.9	15.4	31.2	25.6	16.7
2012	25	25.3	38.2	50.5	15.3	43.4	27	16	32.7	23	20.3	23.7
2013	7.4	44.3	8.5	29.8	29.8	26.1	25.4	16.8	16.7	11.9	22.3	10
2014	7.4	6	20	23	20.4	36	25.8	18.7	11.5	10.3	20.5	18.3
2015	5.2	43	24	15	15.3	20	24	28.1	27.2	6	23.8	10
2016	2.9	6.6	13	30.2	32	20.3	20.5	29.9	27.5	12.4	41.3	18.2

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la estación El Fute.

Tabla 7 Datos Crudo Estación El Fute

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	7	5	4	21	30	10	20	24	15	30	25	20
1982	3	10	0	0	12	5	9	5	3	31	21	17
1986	12	12	7	9	24	19	6	8	21	24	24	1
1991	5.7	3.9	45.3	22.2	27.9	6.2	11.5	8.8	6.7	21.9	32.3	56.5
1992	16.3	7.9	6.8	19.7	1.5	1.3	6.6	9.9	9.4	6	20.7	6.8
1993	22.2	5.8	0	0	0	0	0	0	35.8	9.8	27.1	4
1994	8.9	12.2	15.4	17.6	14.4	9.2	19.8	12.2	17.2	49.2	26.1	1.7
1995	1.2	8.7	22.5	12.4	17.5	7.4	6.2	11.8	23	7.8	10.4	33.2
1996	16.5	26.1	21.4	12.4	14.4	32.7	22.4	10.4	15.8	18.8	13.2	14.7
1997	19.5	1.6	14.5	11.5	10.8	9.2	4.2	0.8	20.5	13.8	4.6	28.5
1998	2.5	13.5	20.8	8.8	23.3	5.3	14.5	9.8	15.3	24.6	23.1	10.2
1999	21.5	4.3	21.2	13.6	6.4	18.2	7.2	13	13.2	19.3	9.2	23.7
2000	13.2	18.7	20.4	3.8	18.8	10.6	12.7	19.5	14.4	8.9	9.2	19.1

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2001	2.6	36.2	9	3.1	12.7	7.1	7	1.1	15.1	20.1	29.1	53
2002	45.1	28.1	17.1	27.1	9.1	18.1	6	4	24	16	8.1	15
2003	4.1	14	21	23.1	5	0	0	7.1	13.1	33.1	29.1	15.1
2004	3	18.1	35	16.1	25.1	6	4.1	3.1	12.1	27.1	21.1	0
2005	20	13.1	5	34.1	25.1	7	2.1	0	0	0	0	0
2006	8.2	1.2	13.5	46.1	17.5	9.5	0	0	5.1	21	16	7
2007	1	4.1	6.4	17.2	29.6	19.5	9.7	11.2	10.4	27.5	22	19.8
2008	13.8	39.8	12.7	27.7	34.2	9.6	12.8	18.2	5.5	44.2	15.8	27.4
2009	9	13.3		53.5	5.5	13.5	8.1	7.3	8.8	39.1	16.5	3.4
2010	1.2	14.2	5.5	30.7	28.2	36.7	23.2	15.3	15.6	24.2	19.8	14.7
2011	8.8	27.5	35.7	26.8	57.8	10.7	9.7	11.8	9.8	15.7	25	24.5
2012	5	8	22.6	22.8	8	7	4	9	6	24	12.8	8.5
2013	6	12.9	9	35	20.5	10.5	7	5.5	6	13.5	33	17.5
2014	8.5	7	15	8	35	10.5	4.3	8.5	12.5	20.5	20	21
2015	8	9	6.6	7	11	5	9	3.5	11	6	10	1
2016	6	27	7.5	15.5	17.5	7.8	13.2	10	18	13.5	24.5	16

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la estación Peñas Blancas.

Tabla 8 Datos Crudo Estación Peñas Blancas

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	34.3	37.8	62	55.4	28.3	22	18.2	25	29.5	33	34.5	38
1992	26	29	41.4	28.5	27	6.7	24.1	19	21	33.5	51.7	28.6
1993	17.2	30.9	15	26.5	16.2	17.8	1.5	7.4	18.1	48	22	55
1994	23.6	36	22	35.6	25.5	19	13.4	23.6	40.6	58.3	42	6.5
1995	15	32	46.7	24.5	43.7	24.5	10.5	22.6	9.4	26.3	56.5	60.6
1996	36	26	51.5	41.6	49.3	19.8	34.5	13.5	20.8	57.1	32	21.5
1997	37	20.7	29.8	22.6	13.6	3.7	7.2	6.9	23.5	43.9	25	9.8
1998	10.4	11.6	44.7	29.3	24.5	21.2	16.2	8.5	19.8	29.8	41.1	35.8
1999	50.3	10.3	9.1	50.5	40.5	13.2	14.2	16.3	21.2	53.6	30.2	24.8
2000	43.5	30.9	38.1	34.4	16.5	11.4	10	28	15.1	33.2	40.6	12.1
2001	14.8	37	32.3	25.9	30.9	15.8	7	9.9	29.8	41.4	41.2	77.3
2002	20.1	27	25.7	73.5	3.8	8.2	18.7	11.2	28	19.5	20.1	17.1
2003	16	20.7	31.9	62.5	21.4	0	70.4	20	28.7	32.2	39	36.7
2004	36	36.2	41.5	40	32	6.1	28	15.5	50	31.8	50.9	33.4
2005	48.7	29.2	32.7	25	50.5	26	17.5	21.7	16.4	24.3	30	65.6
2006	30.4	31.3	41.1	48.5	37.8	14.2	17.2	6.5	12.2	63.3	0	38.2
2007	28.5	5.2	24.9	22.2	17	15.3	8.8	16.6	22	50	23.7	47
2008	21	0	0	30.3	0	41.4	18.7	71.2	15.3	36.4	75.9	32.9
2009	31.5	38.6	52.9	30.9	27.5	18.4	0	11.5	13	34.5	45	21.3
2010	0	10	17.5	36	43.5	15.7	43.3	19.2	23.7	45.2	58.6	34.2
2011	30.7	25.2	37	49.3	36.6	31	24	43.7	28.4	37.5	45.3	44
2012	40.4	20.5	18.2	29.6	16	11.4	13.7	14	8.8	41.8	28.8	27.5
2013	30.8	49.1	47.5	60	52.5	19.2	13.5	13.9	63.3	30.4	66.5	28.4
2014	19	38	34	31.7	61.5	14.5	9.2	9.1	9.2	25	72.3	55.1
2015	13.5	34.1	40	35.9	14.2	11.4	9.2	10	15.1	22.6	31	7
2016	26.2	24.4	47	33.5	39.7	16.8	15.7	8.7	26.9	22.6	62.5	45.9

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la estación Doña Juana.

Tabla 9 Datos Crudo Estación Doña Juana

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	3	4.1	26.1	22	19	6.6	10	15.4	5.8	4.3	8	10.1
1992	9.6	7.9	6.3	19.2	6	6.5	9.6	9.6	19.4	7.2	22.3	9.5
1993	26	5.5	0	0	0	0	0	8.5	8	6.8	32.1	2.6
1994	29	21.5	31.9	17	19.9	11	16.7	15.2	7.4	11.1	44.1	7
1995	2.1	3.5	16	10.9	45.2	12.6	6.8	9.4	6.5	11.2	49	24.7
1996	18.4	18.3	33.3	13	42.4	5.7	14	7.7	21.8	31	14	20
1997	39.4	7.4	23.4	7.7	14.2	24	8.2	4.2	17	10.9	21.3	1.2
1998	3.9	7	32	9.9	39.4	19.4	15.8	14.4	7.8	21.6	23.8	27.6
1999	8	21	17.1	15.7	11.8	11.5	3.7	15.8	16.4	22.5	31.3	9
2000	14.7	23	28.4	27	18.9	17.4	14	15.4	14.4	22.5	10.7	13
2001	5.5	27.8	22.3	8.8	18	11.1	12.1	6.6	18	9.8	14.7	16.1
2002	2.5	1.9	10.3	23.1	19.3	22.5	10.5	8.6	5.8	26	10	11.6
2003	8.6	7.9	14.1	26.2	7.3	0	0	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2	30.1	28.7	15
2005	4.6	14	18	16	20.3	17.5	16	5.2	17.5	14.8	10	7.8
2006	12.4	1.6	13.5	30.8	21.5	26	17.3	9	6.3	43	32.7	5
2007	0	6.5	7.3	21.3	12.2	24	9.8	9	4.7	30	6.4	18.8
2008	2.3	5.4	11.5	17.3	23.7	24.2	17.1	17.2	10.2	19.2	18	16.1
2009	5.2	14.7	12.5	21.5	13.1	6.2	8.9	7	6.1	19.7	24.3	2.4
2010	0.3	9.6	8.8	27.9	24.7	16.8	21.4	14.4	12.4	22.4	29.8	18.6
2011	8.1	16.4	19.4	32.4	22.8	7.3	9.8	5.1	10.3	20.6	26.8	30.2
2012	14.3	18.6	17.4	25.3	9.6	8.5	10.2	8.5	4.4	17.1	19.7	15
2013	1.1	16	9.1	19.8	23.5	14.5	10.6	16.6	16.5	10.2	21.8	9.1
2014	4.6	18.2	13.6	8.8	21.8	17.6	24.5	7.9	8.1	14.6	12.6	6.5
2015	6	12.6	10.5	5.2	9.5	14.2	13.9	8.1	19.9	5	6.7	2
2016	3	8.2	15	13.9	13.7	7.2	17	15.5	17.8	17.6	27.2	11.2

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la estación Paraíso Perdido.

Tabla 10 Datos Crudo Estación Paraíso Perdido

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	8	5.5	32	25.1	8	8	4	9.2	10	36.6	23.1	7.8
1992	5.1	7.4	8.3	4	8.5	2.2	9.9	6.4	9.5	8	10.8	8.4
1993	4.1	8.9	6.6	17	26	2.2	8.7	4.2	20.6	5.1	21.5	3.5
1994	5.5	10.7	18.7	6.6	10	19.2	13.2	7	4.8	12.5	4.8	1.8
1995	5.2	2	10.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.1
1997	25	14	29	10.5	22.4	17.6	7.5	5	9.8	16.7	9.9	1.3
1998	0	9.2	12.2	11.6	23.8	14.7	14	12.2	9.6	13.7	19.9	14.4
1999	14.2	19	22	29.4	15	8	24	11.9	15	12.8	19.3	11.3
2000	10	27.5	19	12.9	14.7	34	13.2	16.3	19.4	16.5	8	12.7
2001	0.8	33.4	16.9	2.9	20	1.4	4.8	2.7	32	17.6	39.2	18.2
2002	4.5	8.8	14.8	26.7	22.2	21.7	12.2	5.5	18.9	13.8	19.3	20
2003	9	4.8	14.2	27.2	6.1	4.7	17.9	11	5.9	33.7	16.1	5.1

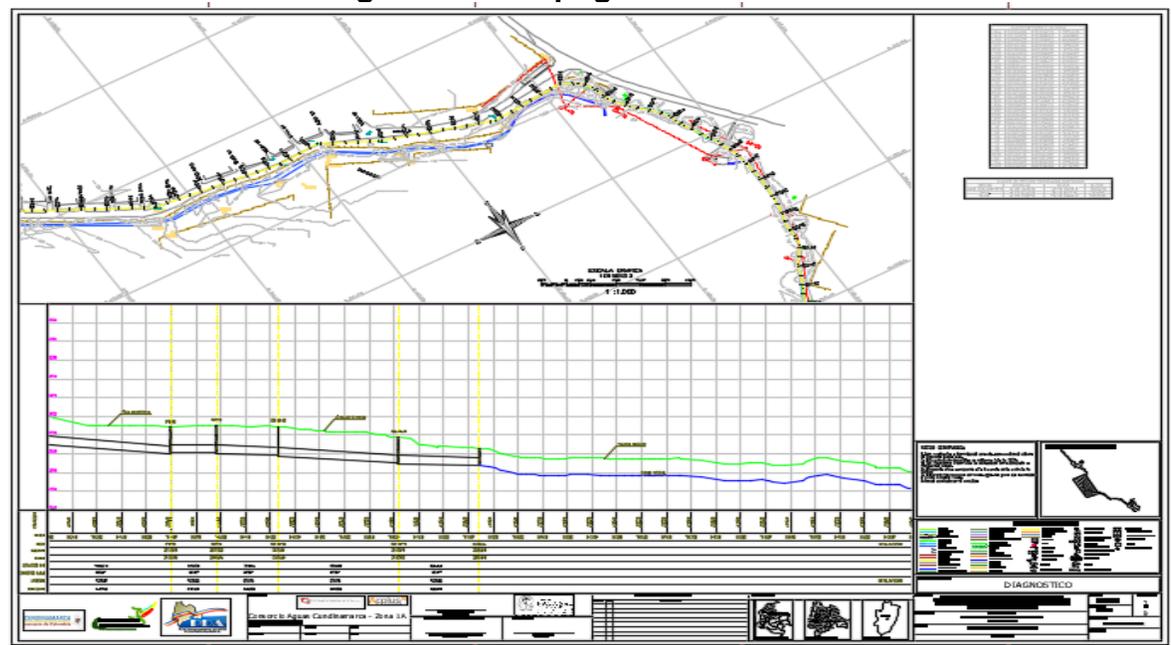
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2004	6.2	20.4	51.9	38.5	29.6	7.5	10.4	3.3	13.7	71	24.9	13
2005	20.1	24.7	8	9.7	26.7	17.1	6.4	6.9	12.5	15.2	11.6	5.5
2006	11.1	1.8	31.9	24.8	14.1	16	9.9	10.4	13	17.1	17.6	6.4
2007	21.2	0	0	17.5	8.1	31.6	14.4	19.9	6.6	19.2	10	10.8
2008	25.9	19.8	17.7	17.1	29.7	28.7	20.9	20.8	6.8	14.9	19.6	15.3
2009	8.4	11.1	11.9	17.2	13.3	24.6	6.9	17.4	13.4	20.3	30	11
2010	0	11.4	5.7	49.8	14	10.7	18.5	9.8	11.2	26	24.4	14
2011	9.7	13	20.9	29.2	19.6	15.5	12.9	19.9	12.3	49.1	16.7	82
2012	9.2	17.6	20.7	29.8	10.4	16.5	14.5	8.9	9	14.1	8.6	23.2
2013	16	17.5	15.2	48.5	27	17.8	8.8	7.4	6.3	9.7	14.1	38.2
2014	8.4	22.6	21.8	16.5	20.5	8.2	4.7	8.4	9	24.5	25.2	9.8
2015	23.2	27.2	25.8	20.1	9.2	6.8	7.1	2.9	13.7	19.7	24.9	3.9
2016	23.2	7.5	6.5	17.3	34.8	8.8	17	12	32.1	19.9	18.9	12.2

Fuente: Datos Abiertos, 2018.

6.2.2 TOPOGRAFÍA

La topografía de la zona de estudio se obtuvo del contrato realizado ante Empresas públicas de Cundinamarca (EPC) por la consultoría Consorcio Aguas de Cundinamarca, del contrato EPC-C-073 del año 2013, la interventoría fue realizada por la Universidad Nacional de Colombia.

Figura 9. Topografía EPC-C-073



Fuente: Consorcio Aguas de Cundinamarca, 2013

6.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez definidos los insumos se procedió a la elaboración de los modelos hidrológicos e hidráulicos, el montaje de los procedimientos realizados se muestra a continuación.

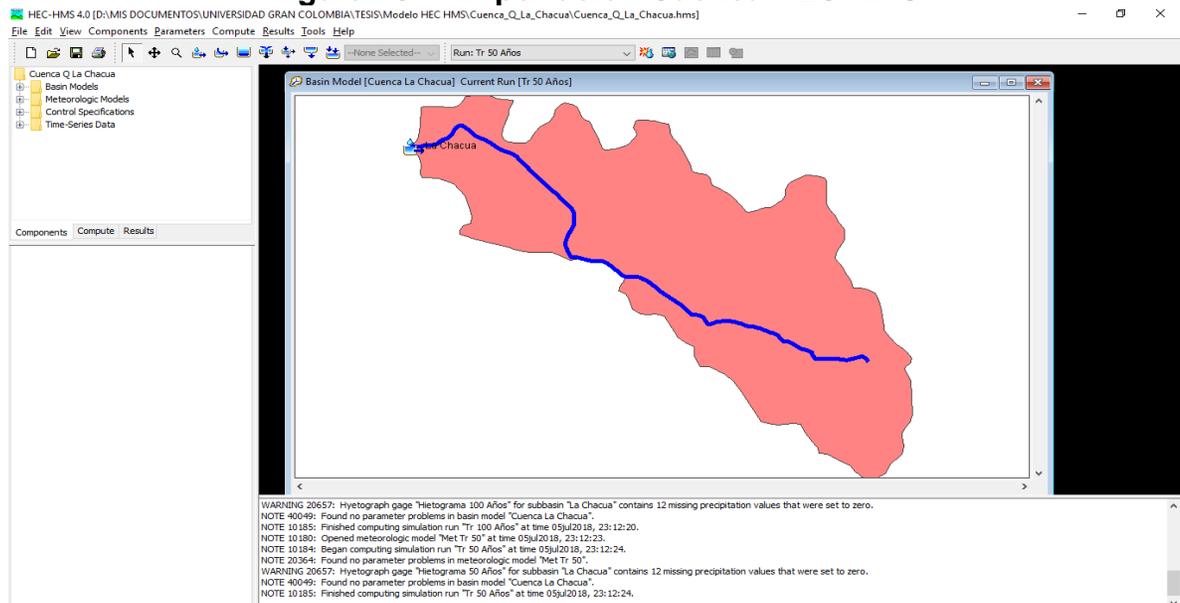
6.3.1 Montaje Modelo Hidrológico HEC-HMS

A partir de los resultados obtenidos de los hietogramas para cada periodo de retorno, mediante el software HEC-HMS, se determinaron los hidrogramas unitarios, con los que se realizaron las modelaciones hidráulicas, en este capítulo se detallan los procesos llevados a cabo para la determinación de estos.

6.3.1.1 Modelo de cuenca

En primera instancia se creó el respectivo proyecto dentro del software HEC-HMS, seguido de lo cual se agregó la cuenca dentro de la administración del modelo de cuenca, como se muestra en la figura 10.

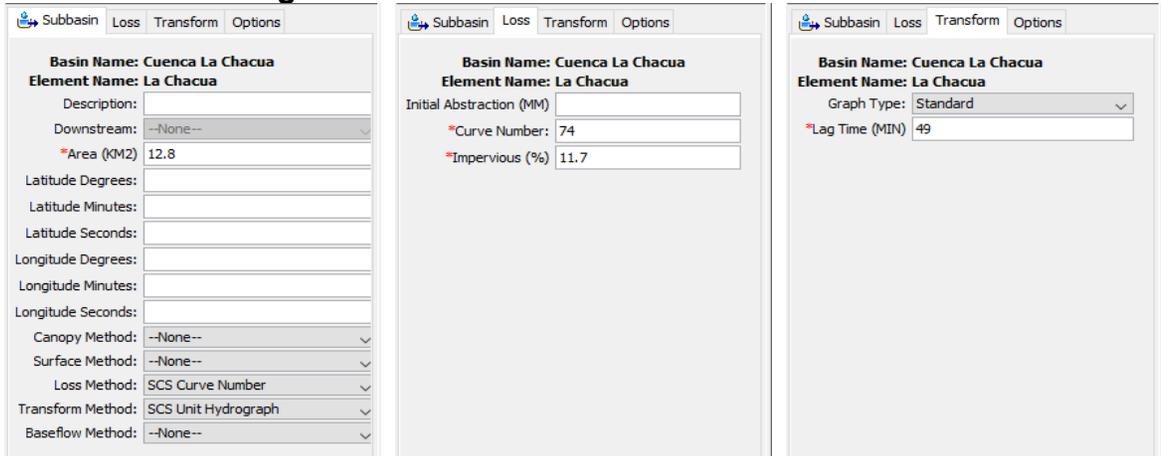
Figura 10. Importación Cuenca HEC-HMS



Fuente: Autor, 2018

Seguida a la importación de la geometría de la cuenca, además del drenaje de estudio, se ingresan los parámetros característicos de la cuenca, como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Parámetros Cuenca La Chacua



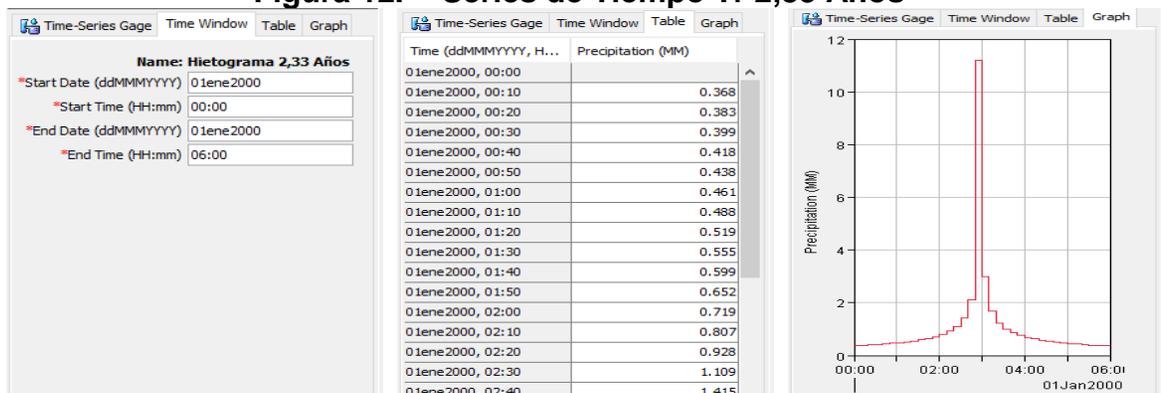
Fuente: Autor, 2018

6.3.1.2 Información de Series de tiempo

Se crearon 3 series de tiempo con base a los hietogramas generados, con intervalos de 10 minutos como se observa en los bloques alternos generados, con una duración de lluvia de 6 horas.

En la Figura 12, se muestran los parámetros de serie ingresados para el periodo de retorno de 2,33 Años.

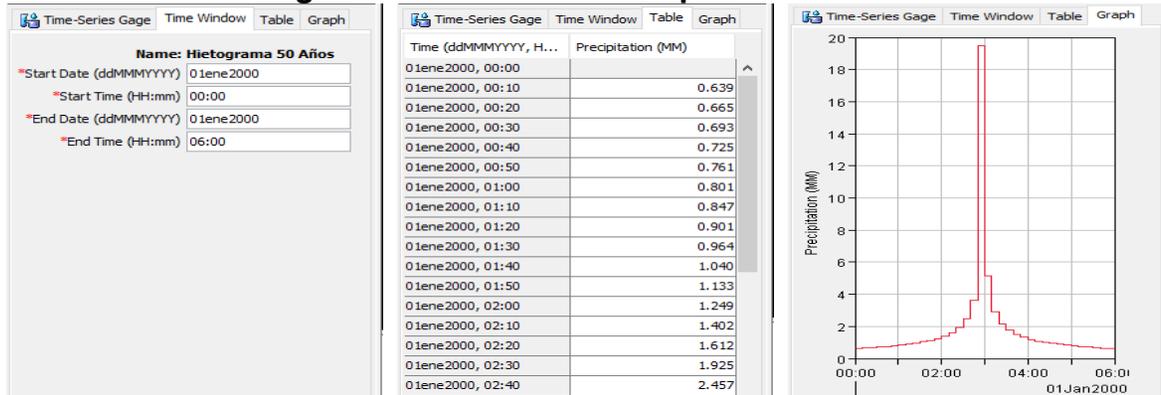
Figura 12. Series de Tiempo Tr 2,33 Años



Fuente: Autor, 2018

En la Figura 13, se muestran los parámetros de serie ingresados para el periodo de retorno de 50 Años.

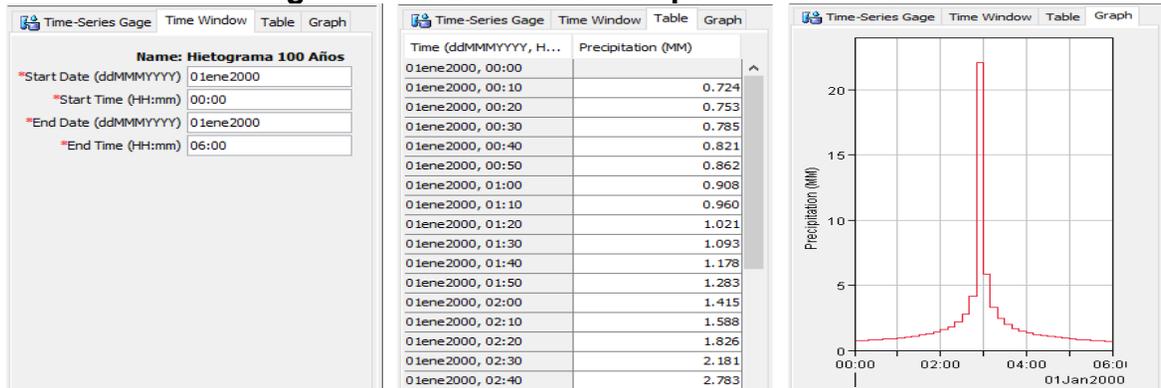
Figura 13. Series de Tiempo Tr 50 Años



Fuente: Autor, 2018

En la Figura 14, se muestran los parámetros de serie ingresados para el periodo de retorno de 100 Años.

Figura 14. Series de Tiempo Tr 100 Años



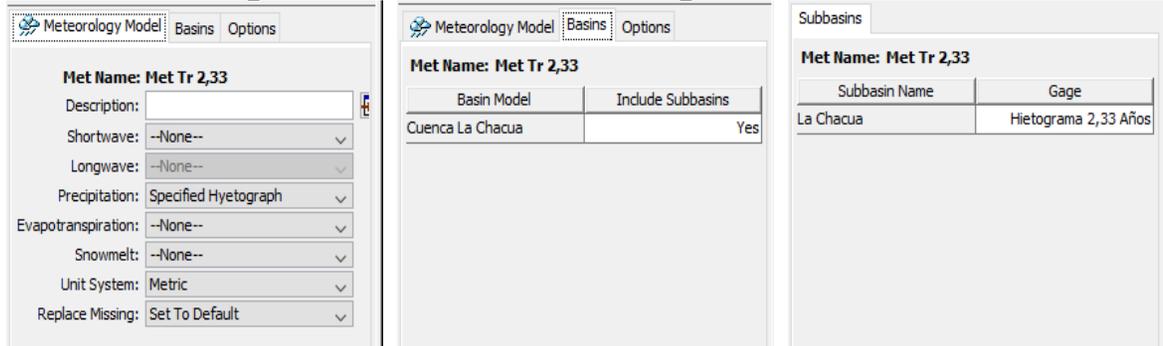
Fuente: Autor, 2018

6.3.1.3 Modelo Meteorológico

En este ítem se agregó el tipo de precipitación ingresada, la participación de la cuenca de estudio y el respectivo hietograma con base al periodo de retorno.

En la Figura 15, se muestran las configuraciones del módulo de modelo meteorológico, para el periodo de retorno de 2,33 años.

Figura 15. Modelo Meteorológico Tr 2,33 Años



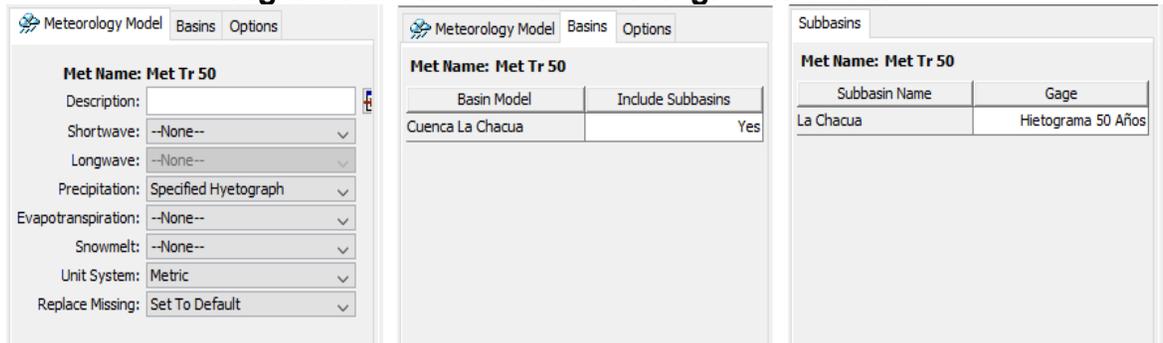
The screenshot displays the configuration for a meteorological model with a return period of 2.33 years. It is divided into three main sections:

- Basins:** Shows the 'Met Name' as 'Met Tr 2,33'. Below this are several dropdown menus for 'Description', 'Shortwave', 'Longwave', 'Precipitation' (set to 'Specified Hyetograph'), 'Evapotranspiration', 'Snowmelt', 'Unit System' (set to 'Metric'), and 'Replace Missing' (set to 'Set To Default').
- Options:** Contains a table with two columns: 'Basin Model' and 'Include Subbasins'. The row for 'Cuenca La Chacua' has 'Yes' in the 'Include Subbasins' column.
- Subbasins:** Contains a table with two columns: 'Subbasin Name' and 'Gage'. The row for 'La Chacua' has 'Hietograma 2,33 Años' in the 'Gage' column.

Fuente: Autor, 2018

En la Figura 16, se muestran las configuraciones del módulo de modelo meteorológico, para el periodo de retorno de 50 años.

Figura 16. Modelo Meteorológico Tr 50 Años



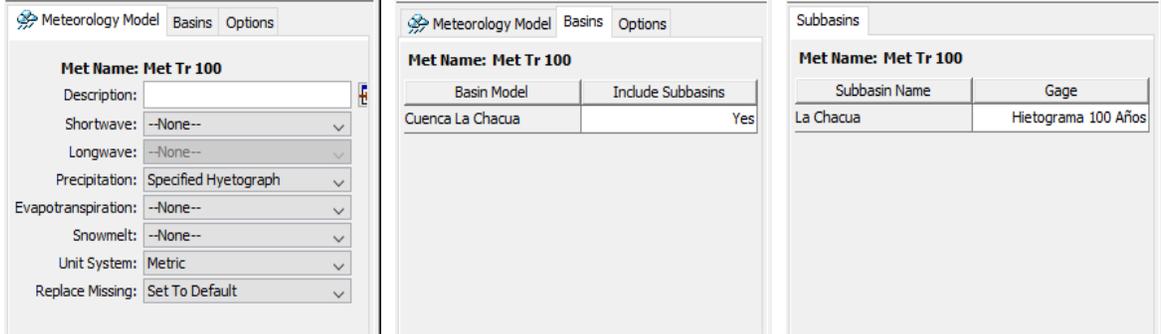
The screenshot displays the configuration for a meteorological model with a return period of 50 years. It is divided into three main sections:

- Basins:** Shows the 'Met Name' as 'Met Tr 50'. Below this are several dropdown menus for 'Description', 'Shortwave', 'Longwave', 'Precipitation' (set to 'Specified Hyetograph'), 'Evapotranspiration', 'Snowmelt', 'Unit System' (set to 'Metric'), and 'Replace Missing' (set to 'Set To Default').
- Options:** Contains a table with two columns: 'Basin Model' and 'Include Subbasins'. The row for 'Cuenca La Chacua' has 'Yes' in the 'Include Subbasins' column.
- Subbasins:** Contains a table with two columns: 'Subbasin Name' and 'Gage'. The row for 'La Chacua' has 'Hietograma 50 Años' in the 'Gage' column.

Fuente: Autor, 2018

En la Figura 17, se muestran las configuraciones del módulo de modelo meteorológico, para el periodo de retorno de 100 años.

Figura 17. Modelo Meteorológico Tr 100 Años



The screenshot shows three panels of the Meteorology Model software. The left panel is the 'Options' tab, the middle is the 'Basins' tab, and the right is the 'Subbasins' tab.

Options Tab:

- Met Name: Met Tr 100
- Description: [Empty text box]
- Shortwave: --None--
- Longwave: --None--
- Precipitation: Specified Hyetograph
- Evapotranspiration: --None--
- Snowmelt: --None--
- Unit System: Metric
- Replace Missing: Set To Default

Basins Tab:

Basin Model	Include Subbasins
Cuenca La Chacua	Yes

Subbasins Tab:

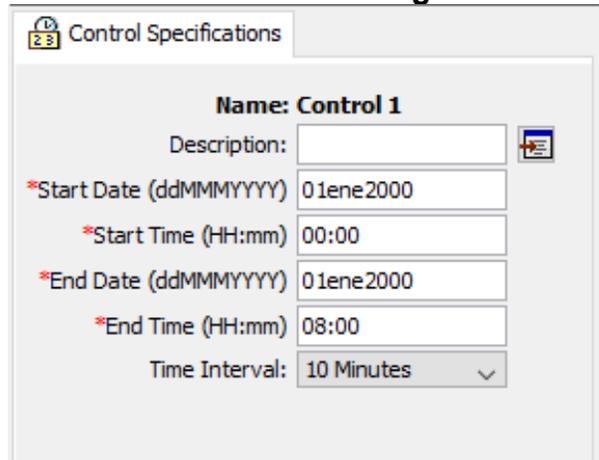
Subbasin Name	Gage
La Chacua	Hietograma 100 Años

Fuente: Autor, 2018

6.3.1.4 Control de Especificaciones

En este ítem se configuraron los tiempos de modelación, con la fecha de inicio y fin, determinando que los resultados sean mostrados con intervalos de 10 minutos.

Figura 18. Modelo Meteorológico Tr 100 Años



The screenshot shows the 'Control Specifications' dialog box for 'Control 1'.

Name: Control 1

Description: [Empty text box]

*Start Date (ddMMYYYY): 01ene2000

*Start Time (HH:mm): 00:00

*End Date (ddMMYYYY): 01ene2000

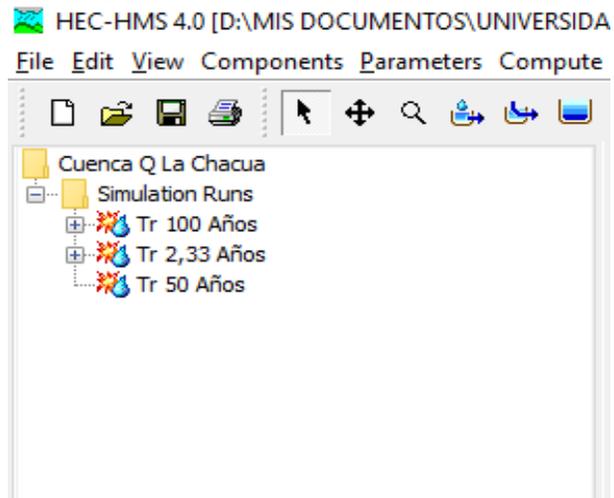
*End Time (HH:mm): 08:00

Time Interval: 10 Minutes

Fuente: Autor, 2018

Se corrieron los tres modelos realizados respecto a cada periodo de retorno, como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Modelo Ejecutados



Fuente: Autor, 2018

En el capítulo de resultados se muestran los hidrogramas obtenidos del modelo hidrológico, adicionalmente se adjunta en formato digital dentro del CD entregado el Anexo D Modelación Hidrológica, en el cual se encuentra el ejecutable del modelo hidrológico realizado.

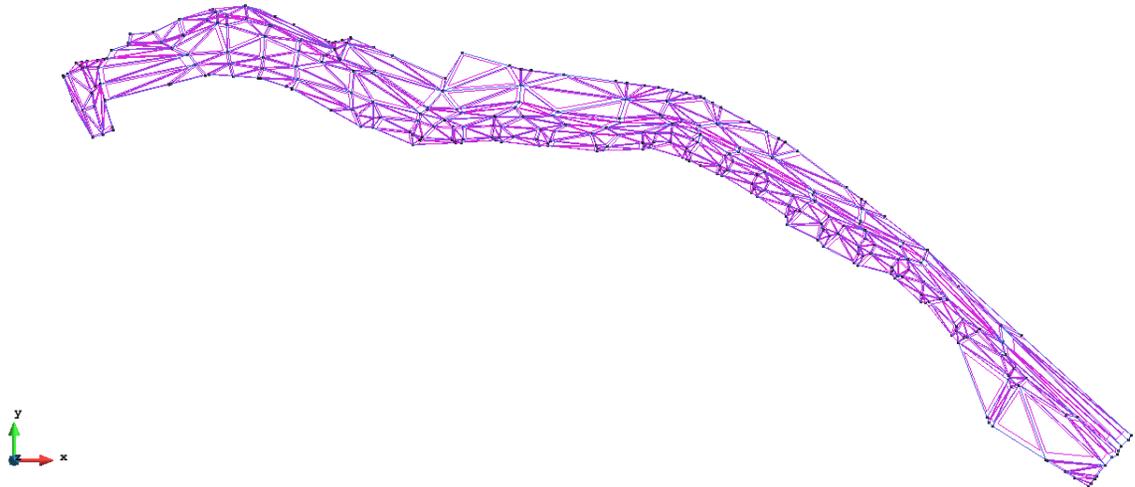
6.3.2 Montaje Modelo Hidráulico Iber

Para la modelación de los diferentes escenarios se decidió implementar el software Iber, el cual realiza un análisis 2D de la información, en este capítulo se describe el proceso de montaje de información dentro del software.

6.3.2.1 Definición de Geometría

Para la obtención del modelo hidrológico, se hizo necesario en primera instancia importar la geometría de la zona de estudio, para la modelación en Iber existen diversas formas de importar la geometría, para este caso en específico, se determinó implementar la triangulación de la topografía, en formato shape.

Figura 20. Importación Triangulación Topografía

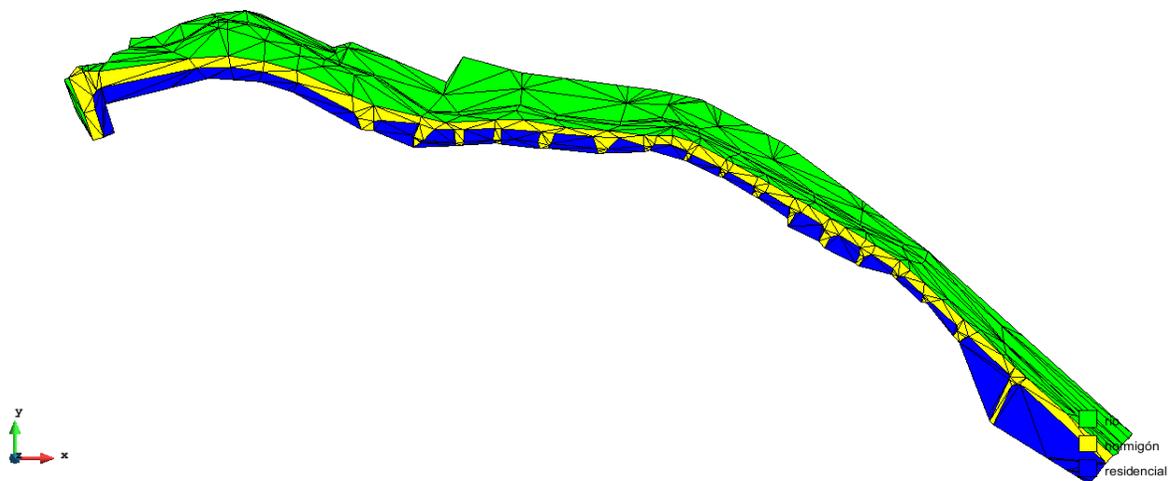


Fuente: Autor, 2018

6.3.2.2 Coeficientes de Rugosidad

Un aspecto importante de la modelación consiste en la definición de los coeficientes de rugosidad, los cuales permiten determinar el comportamiento del flujo sobre distintas superficies, en total se determinó el uso de tres superficies asignadas a la triangulación, como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Coeficientes de Rugosidad (Manning)



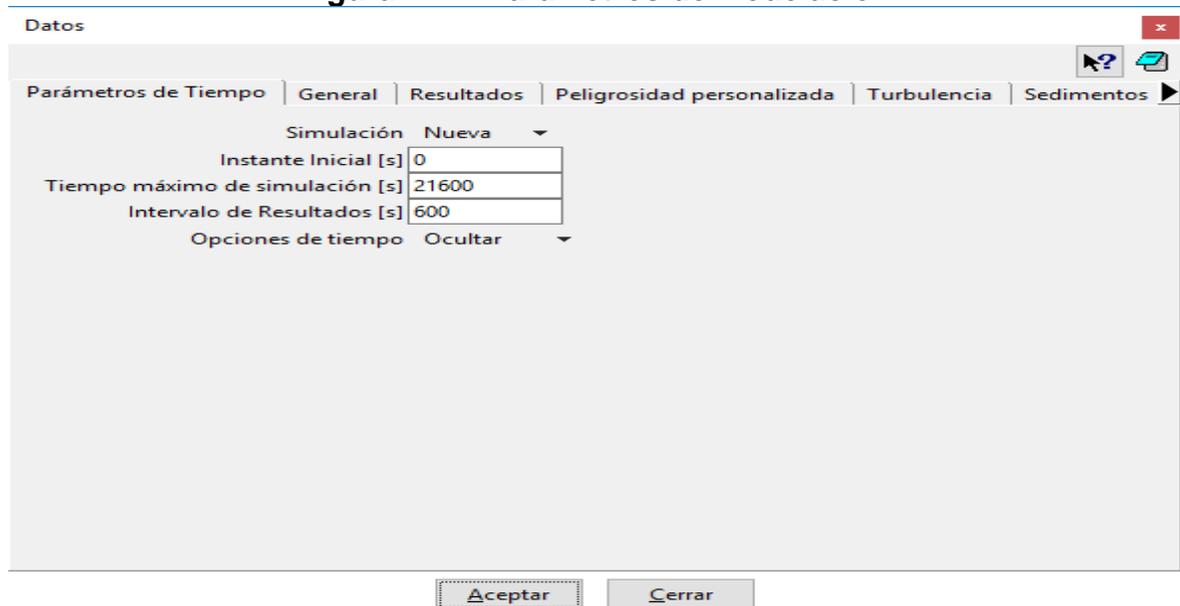
Fuente: Autor, 2018

En la imagen se aprecian de color verde la ronda hídrica del drenaje a las cuales se les asignó un coeficiente de rugosidad o número de Manning 0.025; de color amarillo se observan las zonas de vías a las cuales se les asignó un valor de rugosidad de 0.018 y por último las zonas de color azul, corresponden a las zonas residenciales del barrio pablo Neruda, a las cuales se les asignaron valores de rugosidad 0.15. Estos valores ya vienen definidos por defecto en el software, con base a la clasificación de cada zona se determina el uso de estos.

6.3.2.3 Parámetros de Modelación

En los parámetros de modelación, se ajustan las condiciones que rigen la modelación en cuanto a resultados y tiempo de simulación. Como se determinó en el modelo hidrológico la duración de las lluvias determinado para la modelación corresponde a 6 horas, equivalente a 21600 segundos, de igual forma se determinó que el intervalo de resultados fuera cada 10 minutos, equivalentes a 600 segundos.

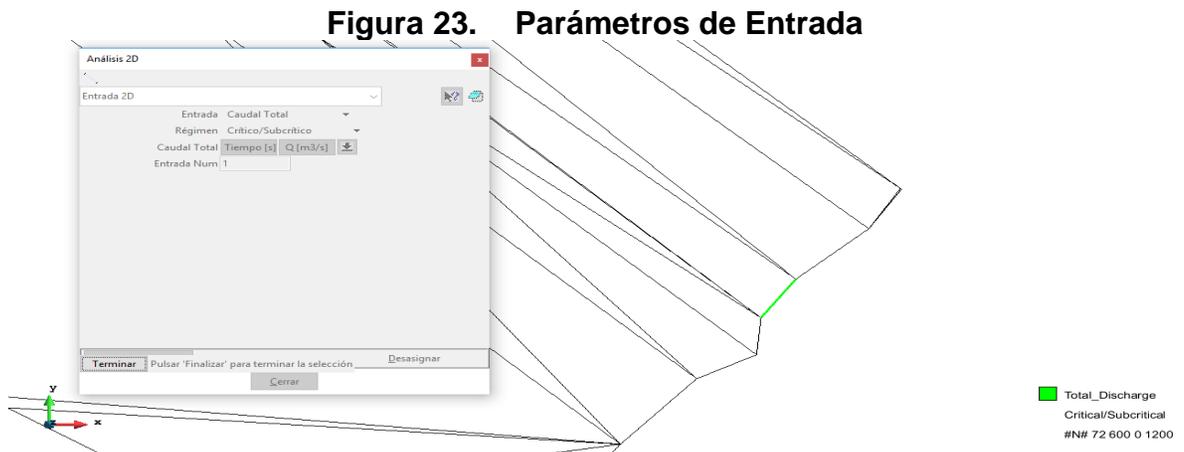
Figura 22. Parámetros de Modelación



Fuente: Autor, 2018

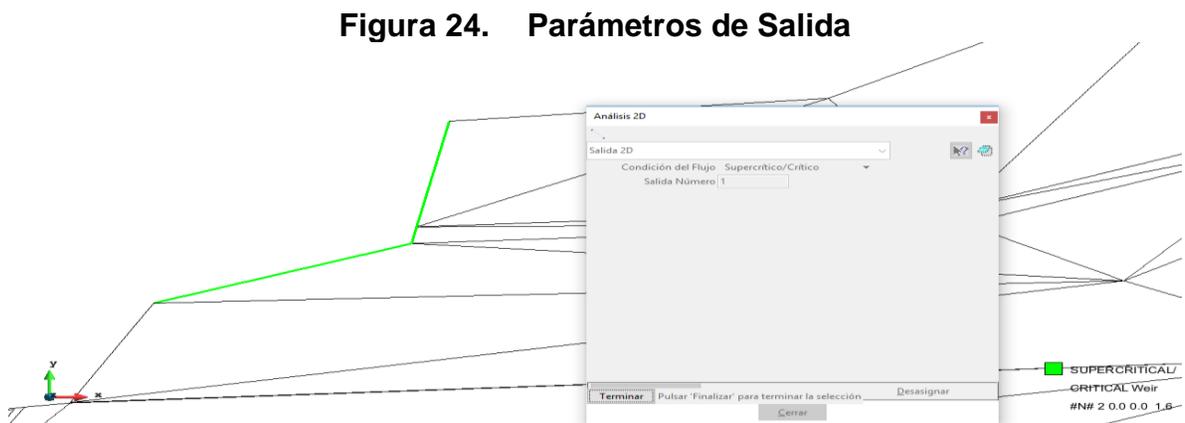
6.3.2.4 Condiciones de Frontera

Para la definición de las condiciones de frontera se hace necesario el definir la entrada y salida del flujo. Para la definición de la entrada se asignaron los hidrogramas obtenidos de la modelación hidrológica para cada escenario, definiendo en primera instancia la zona por la que ingresa el caudal, siendo este el lecho del cuerpo de agua, como se muestra en la figura 23.



Fuente: Autor, 2018

Luego de definir la entrada se procede a definir la salida del flujo, estableciendo la continuidad de este, permitiendo una adecuada representación. En la figura 24 se muestran las zonas de salida establecidas.

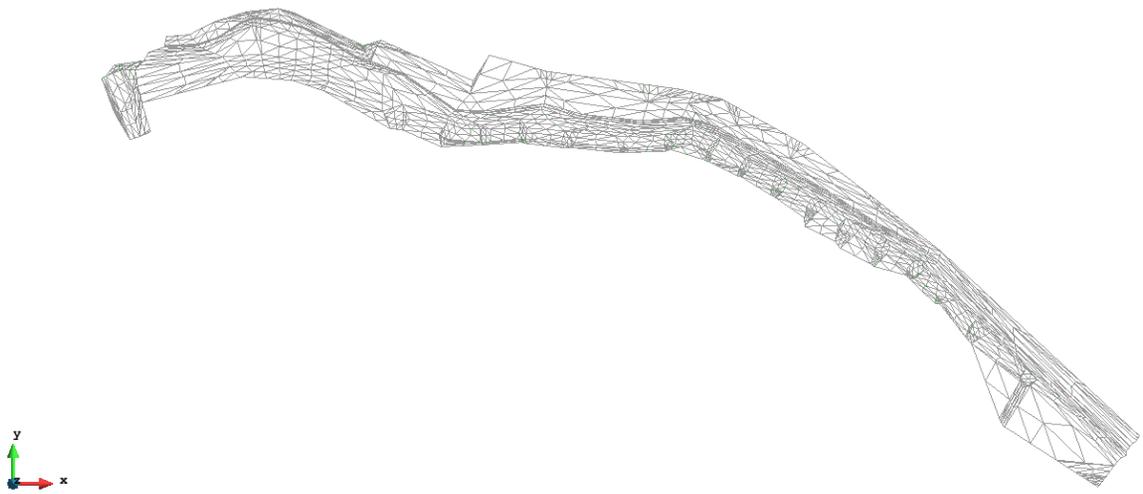


Fuente: Autor, 2018

6.3.2.5 Generación de Malla

El paso final antes de empezar el procesamiento de la información es la generación del mallado, el cual asigna los parámetros definidos respecto a cada elemento contenido de acuerdo con los pasos antes descritos, el tamaño de la malla es fundamental para obtener una adecuada representación de la zona de estudio, en la figura 25, se puede observar el mallado generado de la información.

Figura 25. Mallado



Fuente: Autor, 2018

6.3.2.6 Procesamiento

Una vez generado el mallado de la información, se corre el modelo, el software muestra el avance paso a paso, de los procesos realizados, si el usuario así lo desea puede ir visualizando los resultados gráficos. El software muestra cuando el procesamiento de la información ha culminado como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Procesamiento de Información

Información de salida para 'current'

10200.004	0.02340	22:47:29:97	1.900	1.178
10800.021	0.02203	22:47:38:09	2.500	1.522
11400.005	0.02741	22:47:45:47	3.800	2.358
12000.020	0.02398	22:47:53:36	5.800	4.002
12600.007	0.02108	22:48:02:73	8.000	5.929
13200.009	0.01889	22:48:13:62	9.600	7.746
13800.002	0.00510	22:48:48:07	10.500	8.723
14400.001	0.00510	22:49:32:72	10.500	8.957
15000.004	0.00510	22:50:17:34	10.000	8.676
15600.002	0.00510	22:51:01:86	9.100	8.068
16200.001	0.00510	22:51:47:58	8.200	7.254
16800.004	0.00510	22:52:31:82	7.400	6.500
17400.002	0.00510	22:53:15:00	6.800	5.900
18000.000	0.00510	22:53:57:74	6.200	5.353
18600.003	0.00510	22:54:43:30	5.700	4.858
19200.001	0.00510	22:55:26:45	5.300	4.445
19800.004	0.00510	22:56:08:25	4.900	4.069
20400.003	0.00510	22:56:49:75	4.600	3.774
21000.001	0.00510	22:57:31:05	4.400	3.540
21600.004	0.00510	22:58:12:16	4.100	3.313
COMPUTATION FINISHED SUCCESSFULLY!				
20:07:2018				
22:58:12				

Cerrar

Fuente: Autor, 2018

En el capítulo de resultados, se ilustra la información obtenida del post proceso para cada escenario.

7 RESULTADOS

A continuación, se describen los procedimientos llevados a cabo para la obtención de los resultados del proyecto, los cuales se basan en los objetivos específicos del trabajo.

En primera instancia se procesaron y analizaron los datos base obtenidos de fuentes oficiales, con el fin de establecer que estaciones hidrometeorológicas implementar dentro del proyecto. Los análisis de la información pluviométrica se llevaron a cabo en Microsoft Excel 2016.

7.1 SELECCIÓN REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS

Antes de llevar a cabo la complementación de datos se determinó un rango de 26 años de registro entre las 6 estaciones, respecto al periodo de 1991 al 2016, teniendo registros durante este periodo en las 6 estaciones inicialmente seleccionadas.

7.1.1 COMPLEMENTACIÓN DE SERIES HIDROLÓGICAS

Con base a los datos obtenidos de las estaciones de la CAR se procedió a determinar la idoneidad de los datos entregados a fin de implementar condiciones apropiadas dentro de la modelación llevada a cabo.

Al realizar la complementación de series hidrológicas faltantes de las estaciones suministradas, mediante el procedimiento establecido en Monsalve Sáenz³⁹, respecto a la complementación de datos faltantes descrita en el marco teórico del presente documento.

³⁹ MONSALVE SÁENZ. Ob. cit., p. 84.

A continuación, se presentan las series ajustadas para cada estación, los datos complementados se muestran de color rojo. Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la complementación de datos faltantes de la estación Apostólica.

Tabla 11 Datos Faltantes Estación Apostólica

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	3.7	20.1	26.8	26.4	16.1	3.5	10.5	10.4	3.9	13.2	15.9	26.2
1992	5.3	4.2	27.5	7.8	9.3	2.5	3.6	6.6	11	12.8	18.1	6.8
1993	37.3	10.6	12.9	21.6	18	4	7.4	6.1	25	8.6	29.7	13.6
1994	16.5	18.8	27	9.2	17.8	9.7	10.4	3.7	19	18.9	43.6	1.4
1995	1.2	1.3	24.5	39.4	34.3	8.4	7.8	13	5.1	8.9	19.6	33
1996	16.3	19.9	21.7	18	36.6	21.7	12.2	6.2	13.2	12.6	15.9	12
1997	9.8	6.7	12.6	14.2	11.8	24.2	4.8	1.1	7	23	18.5	7.52
1998	0.2	8.5	4.5	6.6	26.5	2.5	9.4	8.3	11.04	19.3	11	15.3
1999	7.3	7.3	13.6	23.7	20.2	15.3	4.2	15.5	16.9	16.3	14	26.1
2000	5.5	26.5	7.6	4.5	14.4	30.2	14	16	25	9.8	16	54
2001	3.8	26	23	4.2	12	31	4.4	2.4	19	21	12.6	5
2002	7.3	17.7	14.3	22.1	14.8	20	8.1	3.1	14.07	15	13.4	19.4
2003	5.7	7.3	29	27.1	4	9.5	10	5	40.4	28	11.6	6.1
2004	6.5	20.6	14.2	25	32	6	5	4.5	16	17.6	19.6	14
2005	8.9	16.4	7.5	16	28.5	12	6.7	14.4	8.9	16	12.6	10.8
2006	18	0.9	16.4	17	30	12	11.97	9.94	8.2	26.6	16.4	8.62
2007	3.4	5.1	11.4	11	15	19.6	9.3	21	2.2	22.9	7	14
2008	7	12	28.4	22	2.1	25.6	18	17	7	32	16.4	20.4
2009	20.8	25	20.3	22	1.9	23.5	4.5	5.4	18.6	14.5	29.5	3.6
2010	4	15.5	5.5	43.8	23.8	13.1	24.6	7.2	12.5	18.8	26.7	21.2
2011	27.1	7.8	33.1	32	22.7	12.5	15.7	12.5	21	21.3	18.6	33.5
2012	3.9	16.6	18	22.9	8.1	21.8	9.6	7.2	6	25	6.3	22.5
2013	11.2	12.7	23	41.2	11.5	12.5	8.8	20.5	7	9.8	20.1	16.2
2014	13.5	11.7	38.1	11	7.5	5.2	9	7.5	6	26.5	7.5	13
2015	18	14.2	10.1	10	10.6	10	8.6	2.7	19.6	17.5	17.4	1
2016	13	18	2.5	41	26.2	6.4	18.3	14.6	18.1	20	13.5	28.1
MED	9.30	13.91	18.30	17.37	16.67	32.79	9.30	13.91	18.30	17.37	16.67	32.79
MÁX	21.00	40.40	32.00	43.60	54.00	54.00	21.00	40.40	32.00	43.60	54.00	54.00

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la complementación de datos faltantes de la estación El Bosque.

Tabla 12 Datos Faltantes Estación El Bosque

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	6.00	10.00	28.90	25.00	26.00	14.00	30.00	23.90	18.30	11.90	18.60	14.90
1992	4.60	16.40	76.60	7.60	19.10	8.80	10.50	10.50	10.50	8.50	28.60	24.40
1993	6.80	2.10	10.50	10.00	10.20	20.40	16.00	20.10	22.00	12.00	44.50	9.40
1994	30.00	45.00	28.00	28.00	10.20	20.00	25.30	29.70	20.00	15.50	37.70	17.90
1995	10.60	20.70	5.20	10.50	10.50	19.90	17.90	30.70	13.60	10.30	7.90	39.60

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1996	18.70	24.00	19.40	22.30	62.20	16.50	29.70	18.30	29.20	10.70	16.90	15.20
1997	43.00	10.50	25.60	18.70	26.80	10.70	33.60	10.20	19.00	12.40	18.00	1.50
1998	3.40	10.20	38.30	8.20	51.50	32.30	28.60	13.90	14.40	28.30	24.10	31.00
1999	17.90	1.60	11.50	29.50	16.10	17.10	13.40	15.10	19.80	34.40	40.30	15.50
2000	15.20	26.30	29.50	21.50	25.00	19.30	10.50	10.50	10.50	10.50	30.60	12.30
2001	12.30	12.00	15.20	8.00	6.30	6.10	5.20	5.60	4.90	15.30	31.00	27.00
2002	4.30	2.10	14.50	17.50	4.40	21.80	4.30	5.00	7.70	22.30	13.60	10.90
2003	1.80	3.10	10.40	8.30	9.80	9.07	27.30	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2004	10.91	15.20	18.30	24.40	30.50	1.70	19.70	11.10	17.55	42.10	31.20	19.16
2005	20.18	21.50	14.37	22.84	57.10	3.10	13.10	1.50	5.70	5.20	4.90	0.50
2006	10.60	1.50	10.90	10.80	10.70	10.60	13.20	10.50	10.50	10.70	11.30	5.60
2007	12.94	10.50	15.50	22.50	21.80	24.20	14.20	21.80	15.20	43.00	23.40	16.20
2008	20.40	20.00	22.66	25.70	29.21	28.32	20.31	28.29	9.69	33.17	28.04	24.77
2009	15.26	10.50	15.30	10.50	10.50	15.70	25.30	15.60	10.50	27.30	12.70	12.10
2010	2.33	10.50	10.50	21.00	27.20	28.60	23.20	10.50	23.50	35.30	45.30	23.40
2011	15.80	10.60	23.40	43.70	35.90	24.90	13.20	13.90	15.40	31.20	25.60	16.70
2012	25.00	25.30	38.20	50.50	15.30	43.40	27.00	16.00	32.70	23.00	20.30	23.70
2013	7.40	44.30	8.50	29.80	29.80	26.10	25.40	16.80	16.70	11.90	22.30	10.00
2014	7.40	6.00	20.00	23.00	20.40	36.00	25.80	18.70	11.50	10.30	20.50	18.30
2015	5.20	43.00	24.00	15.00	15.30	20.00	24.00	28.10	27.20	6.00	23.80	10.00
2016	2.90	6.60	13.00	30.20	32.00	20.30	20.50	29.90	27.50	12.40	41.30	18.20
MED	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
MÁX	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la complementación de datos faltantes de la estación El Fute.

Tabla 13 Datos Faltantes Estación El Fute

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
1992	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
1993	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
1994	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
1995	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
1996	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
1997	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
1998	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
1999	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
2000	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2001	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
2002	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2003	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
2004	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2005	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
2006	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2007	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
2008	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2009	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2010	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2011	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
2012	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2013	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
2014	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
2015	12.73	15.75	21.09	20.96	23.61	19.19	19.89	23.30	20.22	22.96	25.94	18.93
2016	43.00	45.00	76.60	50.50	62.20	43.40	33.60	189.50	112.20	113.30	52.00	74.00
MED	10.68	14.47	16.76	20.42	18.92	11.29	10.23	9.05	13.65	20.70	18.83	18.04
MÁX	45.10	39.80	45.30	53.50	57.80	36.70	23.20	19.50	35.80	49.20	33.00	56.50

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la complementación de datos faltantes de la estación Peñas Blancas.

Tabla 14 Datos Faltantes Estación Peñas Blancas

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	34.30	37.80	62.00	55.40	28.30	22.00	18.20	25.00	29.50	33.00	34.50	38.00
1992	26.00	29.00	41.40	28.50	27.00	6.70	24.10	19.00	21.00	33.50	51.70	28.60
1993	17.20	30.90	15.00	26.50	16.20	17.80	1.50	7.40	18.10	48.00	22.00	55.00
1994	23.60	36.00	22.00	35.60	25.50	19.00	13.40	23.60	40.60	58.30	42.00	6.50
1995	15.00	32.00	46.70	24.50	43.70	24.50	10.50	22.60	9.40	26.30	56.50	60.60
1996	36.00	26.00	51.50	41.60	49.30	19.80	34.50	13.50	20.80	57.10	32.00	21.50
1997	37.00	20.70	29.80	22.60	13.60	3.70	7.20	6.90	23.50	43.90	25.00	9.80
1998	10.40	11.60	44.70	29.30	24.50	21.20	16.20	8.50	19.80	29.80	41.10	35.80
1999	50.30	10.30	9.10	50.50	40.50	13.20	14.20	16.30	21.20	53.60	30.20	24.80
2000	43.50	30.90	38.10	34.40	16.50	11.40	10.00	28.00	15.10	33.20	40.60	12.10
2001	14.80	37.00	32.30	25.90	30.90	15.80	7.00	9.90	29.80	41.40	41.20	77.30
2002	20.10	27.00	25.70	73.50	3.80	8.20	18.70	11.20	28.00	19.50	20.10	17.10
2003	16.00	20.70	31.90	62.50	21.40	13.89	70.40	20.00	28.70	32.20	39.00	36.70
2004	36.00	36.20	41.50	40.00	32.00	6.10	28.00	15.50	50.00	31.80	50.90	33.40
2005	48.70	29.20	32.70	25.00	50.50	26.00	17.50	21.70	16.40	24.30	30.00	65.60
2006	30.40	31.30	41.10	48.50	37.80	14.20	17.20	6.50	12.20	63.30	36.58	38.20
2007	28.50	5.20	24.90	22.20	17.00	15.30	8.80	16.60	22.00	50.00	23.70	47.00
2008	21.00	36.46	34.72	30.30	44.75	41.40	18.70	71.20	15.30	36.40	75.90	32.90
2009	31.50	38.60	52.90	30.90	27.50	18.40	19.08	11.50	13.00	34.50	45.00	21.30
2010	3.57	10.00	17.50	36.00	43.50	15.70	43.30	19.20	23.70	45.20	58.60	34.20
2011	30.70	25.20	37.00	49.30	36.60	31.00	24.00	43.70	28.40	37.50	45.30	44.00
2012	40.40	20.50	18.20	29.60	16.00	11.40	13.70	14.00	8.80	41.80	28.80	27.50
2013	30.80	49.10	47.50	60.00	52.50	19.20	13.50	13.90	63.30	30.40	66.50	28.40
2014	19.00	38.00	34.00	31.70	61.50	14.50	9.20	9.10	9.20	25.00	72.30	55.10
2015	13.50	34.10	40.00	35.90	14.20	11.40	9.20	10.00	15.10	22.60	31.00	7.00
2016	26.20	24.40	47.00	33.50	39.70	16.80	15.70	8.70	26.90	22.60	62.50	45.90
MED	27.10	28.01	35.35	37.83	31.34	16.87	18.61	18.21	23.45	37.51	42.42	34.78
MÁX	50.30	49.10	62.00	73.50	61.50	41.40	70.40	71.20	63.30	63.30	75.90	77.30

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la complementación de datos faltantes de la estación Doña Juana.

Tabla 15 Datos Faltantes Estación Doña Juana

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	3.00	4.10	26.10	22.00	19.00	6.60	10.00	15.40	5.80	4.30	8.00	10.10
1992	9.60	7.90	6.30	19.20	6.00	6.50	9.60	9.60	19.40	7.20	22.30	9.50
1993	26.00	5.50	8.40	14.26	14.38	7.42	7.00	8.50	8.00	6.80	32.10	2.60
1994	29.00	21.50	31.90	17.00	19.90	11.00	16.70	15.20	7.40	11.10	44.10	7.00
1995	2.10	3.50	16.00	10.90	45.20	12.60	6.80	9.40	6.50	11.20	49.00	24.70
1996	18.40	18.30	33.30	13.00	42.40	5.70	14.00	7.70	21.80	31.00	14.00	20.00
1997	39.40	7.40	23.40	7.70	14.20	24.00	8.20	4.20	17.00	10.90	21.30	1.20
1998	3.90	7.00	32.00	9.90	39.40	19.40	15.80	14.40	7.80	21.60	23.80	27.60
1999	8.00	21.00	17.10	15.70	11.80	11.50	3.70	15.80	16.40	22.50	31.30	9.00
2000	14.70	23.00	28.40	27.00	18.90	17.40	14.00	15.40	14.40	22.50	10.70	13.00
2001	5.50	27.80	22.30	8.80	18.00	11.10	12.10	6.60	18.00	9.80	14.70	16.10
2002	2.50	1.90	10.30	23.10	19.30	22.50	10.50	8.60	5.80	26.00	10.00	11.60
2003	8.60	7.90	14.10	26.20	7.30	6.74	20.29	34.52	30.68	38.02	22.32	19.55
2004	8.10	17.02	26.09	22.71	24.14	4.56	9.37	5.23	1.20	30.10	28.70	15.00
2005	4.60	14.00	18.00	16.00	20.30	17.50	16.00	5.20	17.50	14.80	10.00	7.80
2006	12.40	1.60	13.50	30.80	21.50	26.00	17.30	9.00	6.30	43.00	32.70	5.00
2007	9.62	6.50	7.30	21.30	12.20	24.00	9.80	9.00	4.70	30.00	6.40	18.80
2008	2.30	5.40	11.50	17.30	23.70	24.20	17.10	17.20	10.20	19.20	18.00	16.10
2009	5.20	14.70	12.50	21.50	13.10	6.20	8.90	7.00	6.10	19.70	24.30	2.40
2010	0.30	9.60	8.80	27.90	24.70	16.80	21.40	14.40	12.40	22.40	29.80	18.60
2011	8.10	16.40	19.40	32.40	22.80	7.30	9.80	5.10	10.30	20.60	26.80	30.20
2012	14.30	18.60	17.40	25.30	9.60	8.50	10.20	8.50	4.40	17.10	19.70	15.00
2013	1.10	16.00	9.10	19.80	23.50	14.50	10.60	16.60	16.50	10.20	21.80	9.10
2014	4.60	18.20	13.60	8.80	21.80	17.60	24.50	7.90	8.10	14.60	12.60	6.50
2015	6.00	12.60	10.50	5.20	9.50	14.20	13.90	8.10	19.90	5.00	6.70	2.00
2016	3.00	8.20	15.00	13.90	13.70	7.20	17.00	15.50	17.80	17.60	27.20	11.20
MED	9.63	12.14	17.40	18.37	19.86	13.50	12.87	11.31	12.09	18.74	21.86	12.68
MÁX	39.40	27.80	33.30	32.40	45.20	26.00	24.50	34.52	30.68	43.00	49.00	30.20

Fuente: Datos Abiertos, 2018

Los datos que en la siguiente tabla corresponden a la complementación de datos faltantes de la estación Paraíso Perdido.

Tabla 16 Datos Crudo Estación Paraíso Perdido

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	8.00	5.50	32.00	25.10	8.00	8.00	4.00	9.20	10.00	36.60	23.10	7.80
1992	5.10	7.40	8.30	4.00	8.50	2.20	9.90	6.40	9.50	8.00	10.80	8.40
1993	4.10	8.90	6.60	17.00	26.00	2.20	8.70	4.20	20.60	5.10	21.50	3.50
1994	5.50	10.70	18.70	6.60	10.00	19.20	13.20	7.00	4.80	12.50	4.80	1.80
1995	5.20	2.00	10.20	16.42	25.44	11.20	7.94	13.77	9.88	9.80	22.86	30.19
1996	16.69	19.06	23.45	16.22	33.21	16.33	17.68	9.00	16.74	19.92	14.38	7.10
1997	25.00	14.00	29.00	10.50	22.40	17.60	7.50	5.00	9.80	16.70	9.90	1.30
1998	2.90	9.20	12.20	11.60	23.80	14.70	14.00	12.20	9.60	13.70	19.90	14.40
1999	14.20	19.00	22.00	29.40	15.00	8.00	24.00	11.90	15.00	12.80	19.30	11.30
2000	10.00	27.50	19.00	12.90	14.70	34.00	13.20	16.30	19.40	16.50	8.00	12.70
2001	0.80	33.40	16.90	2.90	20.00	1.40	4.80	2.70	32.00	17.60	39.20	18.20

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2002	4.50	8.80	14.80	26.70	22.20	21.70	12.20	5.50	18.90	13.80	19.30	20.00
2003	9.00	4.80	14.20	27.20	6.10	4.70	17.90	11.00	5.90	33.70	16.10	5.10
2004	6.20	20.40	51.90	38.50	29.60	7.50	10.40	3.30	13.70	71.00	24.90	13.00
2005	20.10	24.70	8.00	9.70	26.70	17.10	6.40	6.90	12.50	15.20	11.60	5.50
2006	11.10	1.80	31.90	24.80	14.10	16.00	9.90	10.40	13.00	17.10	17.60	6.40
2007	21.20	5.27	9.86	17.50	8.10	31.60	14.40	19.90	6.60	19.20	10.00	10.80
2008	25.90	19.80	17.70	17.10	29.70	28.70	20.90	20.80	6.80	14.90	19.60	15.30
2009	8.40	11.10	11.90	17.20	13.30	24.60	6.90	17.40	13.40	20.30	30.00	11.00
2010	1.79	11.40	5.70	49.80	14.00	10.70	18.50	9.80	11.20	26.00	24.40	14.00
2011	9.70	13.00	20.90	29.20	19.60	15.50	12.90	19.90	12.30	49.10	16.70	82.00
2012	9.20	17.60	20.70	29.80	10.40	16.50	14.50	8.90	9.00	14.10	8.60	23.20
2013	16.00	17.50	15.20	48.50	27.00	17.80	8.80	7.40	6.30	9.70	14.10	38.20
2014	8.40	22.60	21.80	16.50	20.50	8.20	4.70	8.40	9.00	24.50	25.20	9.80
2015	23.20	27.20	25.80	20.10	9.20	6.80	7.10	2.90	13.70	19.70	24.90	3.90
2016	23.20	7.50	6.50	17.30	34.80	8.80	17.00	12.00	32.10	19.90	18.90	12.20
MED	11.36	14.24	18.28	20.87	18.94	14.27	11.82	10.08	13.14	20.67	18.29	14.89
MÁX	25.90	33.40	51.90	49.80	34.80	34.00	24.00	20.80	32.10	71.00	39.20	82.00

Fuente: Datos Abiertos, 2018

7.1.2 ANÁLISIS DE DOBLE MASA

Con base a la definición y procedimiento dada en el marco conceptual, se determinaron los valores máximos por año de cada estación con su respectivo promedio, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 17 Precipitación máxima a nivel multianual 24 Hrs

Año	Apostólica	El Bosque	El Fute	Peñas Blancas	Doña Juana	Paraíso Perdido
1991	26.80	30.00	56.50	62.00	26.10	36.60
1992	27.50	76.60	20.70	51.70	22.30	10.80
1993	37.30	44.50	35.80	55.00	32.10	26.00
1994	43.60	45.00	49.20	58.30	44.10	19.20
1995	39.40	39.60	33.20	60.60	49.00	30.19
1996	36.60	62.20	32.70	57.10	42.40	33.21
1997	24.20	43.00	28.50	43.90	39.40	29.00
1998	26.50	51.50	24.60	44.70	39.40	23.80
1999	26.10	40.30	23.70	53.60	31.30	29.40
2000	54.00	30.60	20.40	43.50	28.40	34.00
2001	31.00	31.00	53.00	77.30	27.80	39.20
2002	22.10	22.30	45.10	73.50	26.00	26.70
2003	40.40	189.50	33.10	70.40	38.02	33.70
2004	32.00	42.10	35.00	50.90	30.10	71.00
2005	28.50	57.10	34.10	65.60	20.30	26.70
2006	30.00	13.20	46.10	63.30	43.00	31.90
2007	22.90	43.00	29.60	50.00	30.00	31.60
2008	32.00	33.17	44.20	75.90	24.20	29.70
2009	29.50	27.30	53.50	52.90	24.30	30.00

Año	Apostólica	El Bosque	El Fute	Peñas Blancas	Doña Juana	Paraíso Perdido
2010	43.80	45.30	36.70	58.60	29.80	49.80
2011	33.50	43.70	57.80	49.30	32.40	82.00
2012	25.00	50.50	24.00	41.80	25.30	29.80
2013	41.20	44.30	35.00	66.50	23.50	48.50
2014	38.10	36.00	35.00	72.30	24.50	25.20
2015	19.60	43.00	11.00	40.00	19.90	27.20
2016	41.00	41.30	27.00	62.50	27.20	34.80
PROMEDIO	32.79	47.16	35.60	57.74	30.80	34.23

Fuente: Autor, 2018

Con los máximos determinados por año, se realiza la tabla acumulativa respectiva

Tabla 18 Precipitación Acumulada máxima a nivel multianual 24 Hrs

Año	Apostólica	El Bosque	El Fute	Peñas Blancas	Doña Juana	Paraíso Perdido
1991	26.80	30.00	56.50	62.00	26.10	36.60
1992	54.30	106.60	77.20	113.70	48.40	47.40
1993	91.60	151.10	113.00	168.70	80.50	73.40
1994	135.20	196.10	162.20	227.00	124.60	92.60
1995	174.60	235.70	195.40	287.60	173.60	122.79
1996	211.20	297.90	228.10	344.70	216.00	156.00
1997	235.40	340.90	256.60	388.60	255.40	185.00
1998	261.90	392.40	281.20	433.30	294.80	208.80
1999	288.00	432.70	304.90	486.90	326.10	238.20
2000	342.00	463.30	325.30	530.40	354.50	272.20
2001	373.00	494.30	378.30	607.70	382.30	311.40
2002	395.10	516.60	423.40	681.20	408.30	338.10
2003	435.50	706.10	456.50	751.60	446.32	371.80
2004	467.50	748.20	491.50	802.50	476.42	442.80
2005	496.00	805.30	525.60	868.10	496.72	469.50
2006	526.00	818.50	571.70	931.40	539.72	501.40
2007	548.90	861.50	601.30	981.40	569.72	533.00
2008	580.90	894.68	645.50	1057.30	593.92	562.70
2009	610.40	921.98	699.00	1110.20	618.22	592.70
2010	654.20	967.28	735.70	1168.80	648.02	642.50
2011	687.70	1010.98	793.50	1218.10	680.42	724.50
2012	712.70	1061.48	817.50	1259.90	705.72	754.30
2013	753.90	1105.78	852.50	1326.40	729.22	802.80
2014	792.00	1141.78	887.50	1398.70	753.72	828.00
2015	811.60	1184.78	898.50	1438.70	773.62	855.20
2016	852.60	1226.08	925.50	1501.20	800.82	890.00

Fuente: Autor, 2018

Con los promedios obtenidos se determina que las estaciones homogéneas representativas corresponden a 4 estaciones: Apostólica, El Fute, Doña Juana y Paraíso perdido.

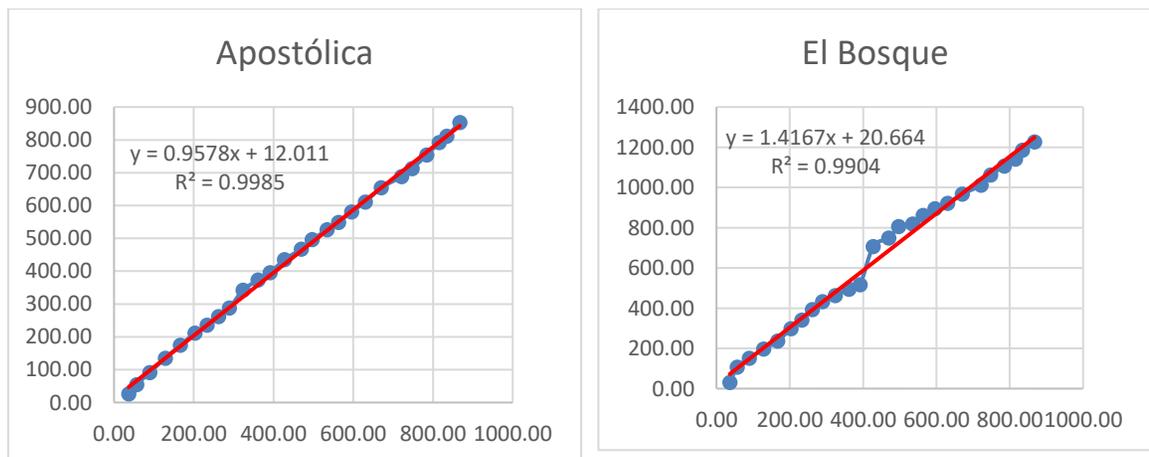
Tabla 19 Estaciones Homogéneas

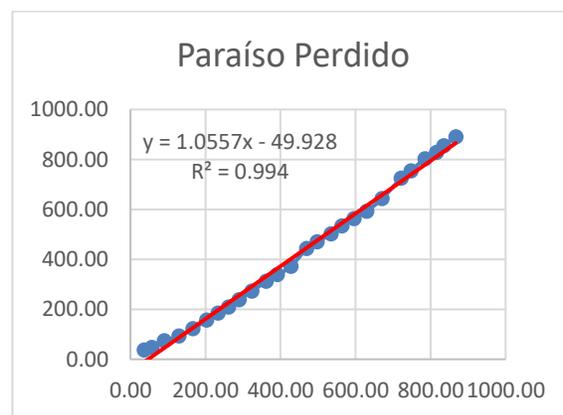
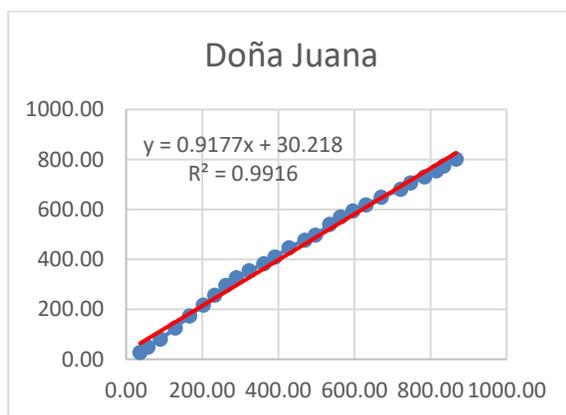
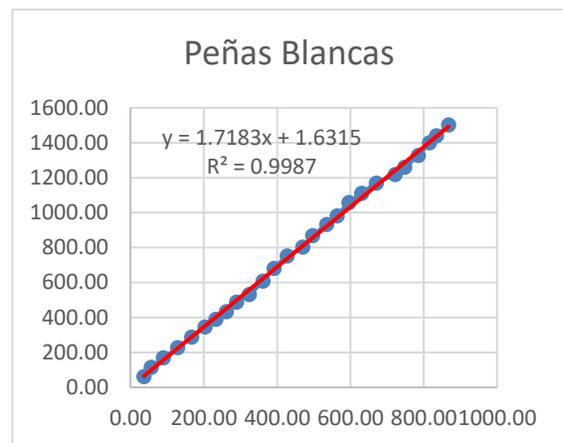
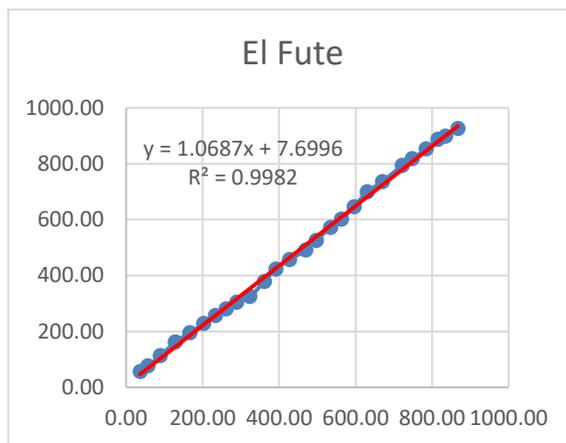
Año	Promedio Estaciones Homogéneas	Promedio Acumulado Estaciones Homogéneas
1991	36.50	36.50
1992	20.33	56.83
1993	32.80	89.62
1994	39.03	128.65
1995	37.95	166.60
1996	36.23	202.83
1997	30.28	233.10
1998	28.58	261.68
1999	27.63	289.30
2000	34.20	323.50
2001	37.75	361.25
2002	29.98	391.23
2003	36.31	427.53
2004	42.03	469.56
2005	27.40	496.96
2006	37.75	534.71
2007	28.53	563.23
2008	32.53	595.76
2009	34.33	630.08
2010	40.03	670.11
2011	51.43	721.53
2012	26.03	747.56
2013	37.05	784.61
2014	30.70	815.31
2015	19.43	834.73
2016	32.50	867.23

Fuente: Autor, 2018

A continuación, se muestran cada una de las gráficas obtenidas para cada estación:

Figura 27. Análisis de Doble Masa





Fuente: Autor, 2018

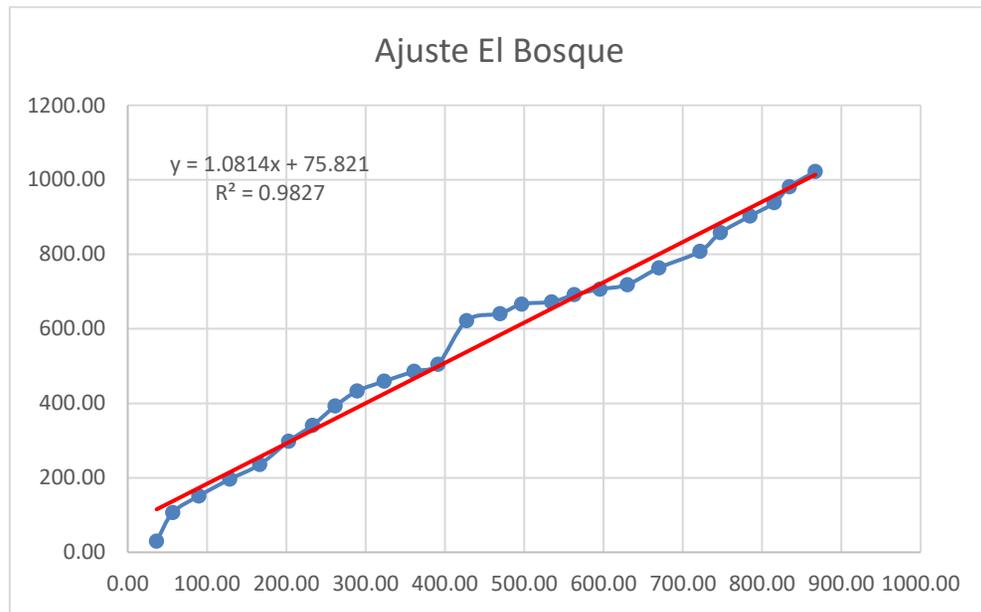
Con base a las gráficas obtenidas se observó que en la estación El Bosque se presenta un comportamiento inadecuado respecto a la serie de datos, por lo cual se procedió a realizar el respectivo ajuste mencionado por Monsalve Sáenz⁴⁰.

El resultado obtenido para el ajuste de la estación no corresponde a los resultados esperados aun teniendo un R^2 de 0,98 no se muestra una distribución adecuada de la idoneidad de la información, por lo cual se decide omitir la estación para seguir con los cálculos.

⁴⁰ Ibid., p. 86.

En la siguiente figura se muestra la gráfica que describe el ajuste de la estación el Bosque.

Figura 28. Ajuste Estación El Bosque



Fuente: Autor, 2018

7.2 CUENCA HIDROGRÁFICA

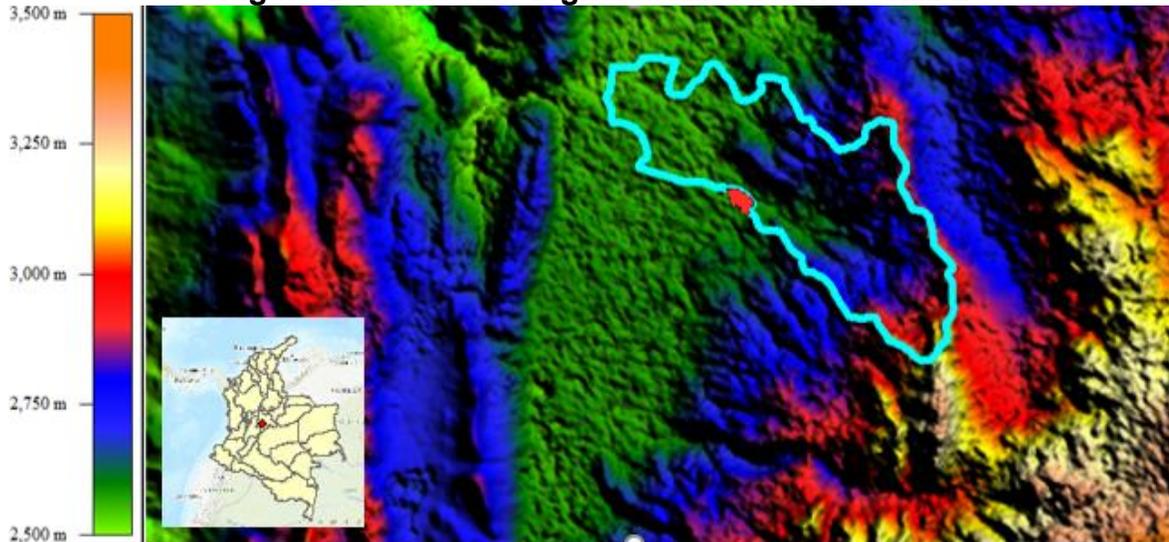
La cuenca Hidrográfica permite determinar el área que drena sobre el cuerpo de agua de estudio, a partir de la cual se determina el caudal que transcurre sobre la misma, con el fin de establecer diferentes parámetros que determinan el comportamiento hidrológico de la zona, a continuación, se describe el proceso llevado a cabo para la obtención de la cuenca aferente al proyecto.

7.2.1 DELIMITACIÓN

Para la delimitación de la cuenca hidrográfica aferente al proyecto se procedió a la obtención de curvas de nivel a partir de imágenes satelitales, mediante el programa

Global mapper, en donde primero se llevó a cabo la obtención del modelo de elevaciones de la zona de estudio, como se muestra en la siguiente figura 29.

Figura 29. Modelo Digital de Elevaciones – MDE



Fuente: Global Mapper, 2018

A partir de la obtención del MDE (Modelo digital de elevaciones), se procede con ayuda del mismo software a obtener las curvas de nivel, las cuales se generaron con un intervalo de 1 metro para obtener una mejor representación del terreno.

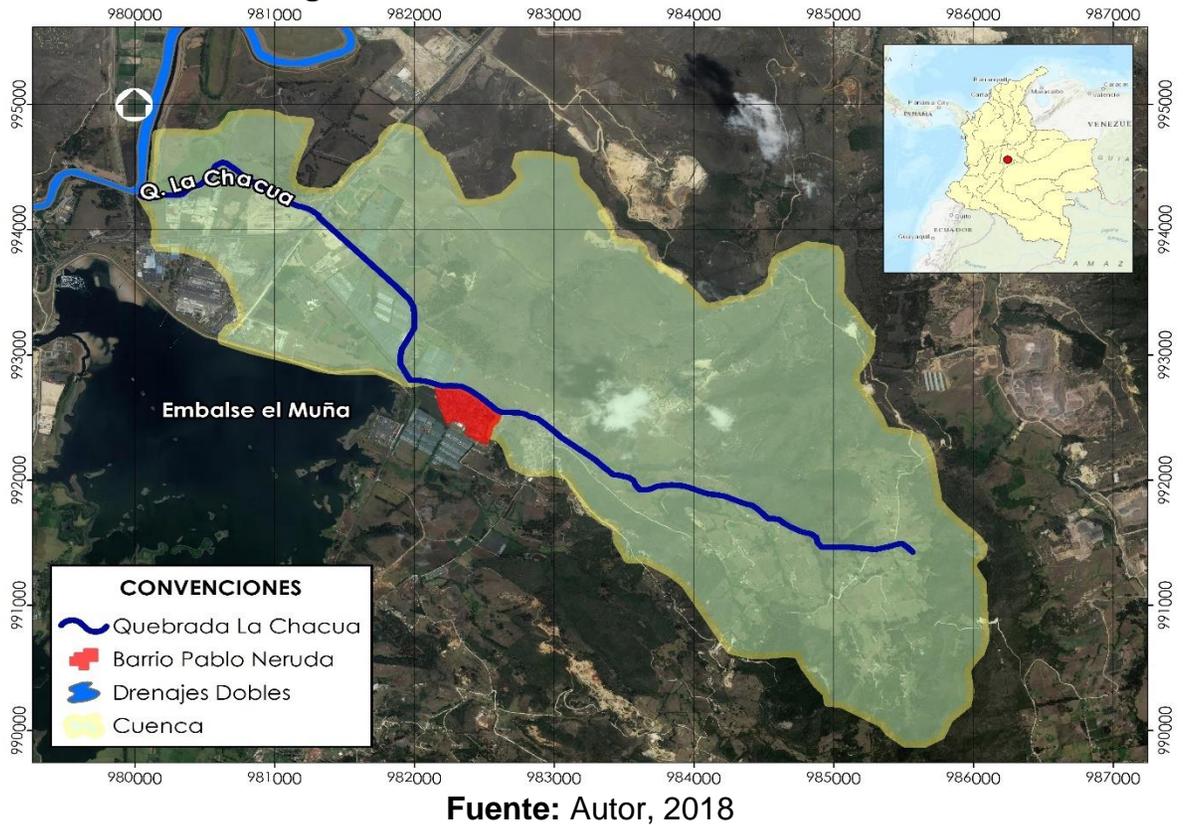
Con el mismo software se procede a determinar las cuencas, esta determinación se hace de forma automatizada, ya que este lo genera a partir de la imagen raster del MDE, se hace necesario el ajuste manual del borde perimetral de la cuenca definida.

Se generaron a diferentes escalas las cuencas de la zona de estudio, con el fin de determinar la mejor geometría para esta, por lo cual se generaron respecto a cantidad de celdas de la imagen raster.

Siguiente a la obtención automatizada de la cuenca del proyecto, se sigue con la edición manual para definir adecuadamente la cuenca de la quebrada Chacua, para lo cual se exporta la información en formato shape, no antes de definir el sistema de proyección, el cual según el RAS debe corresponder al sistema de referencia

MAGNA SIRGAS, para este caso coordenadas Gauss Krueger origen central o EPSG 3116.

Figura 30. Cuenca Quebrada La Chacua



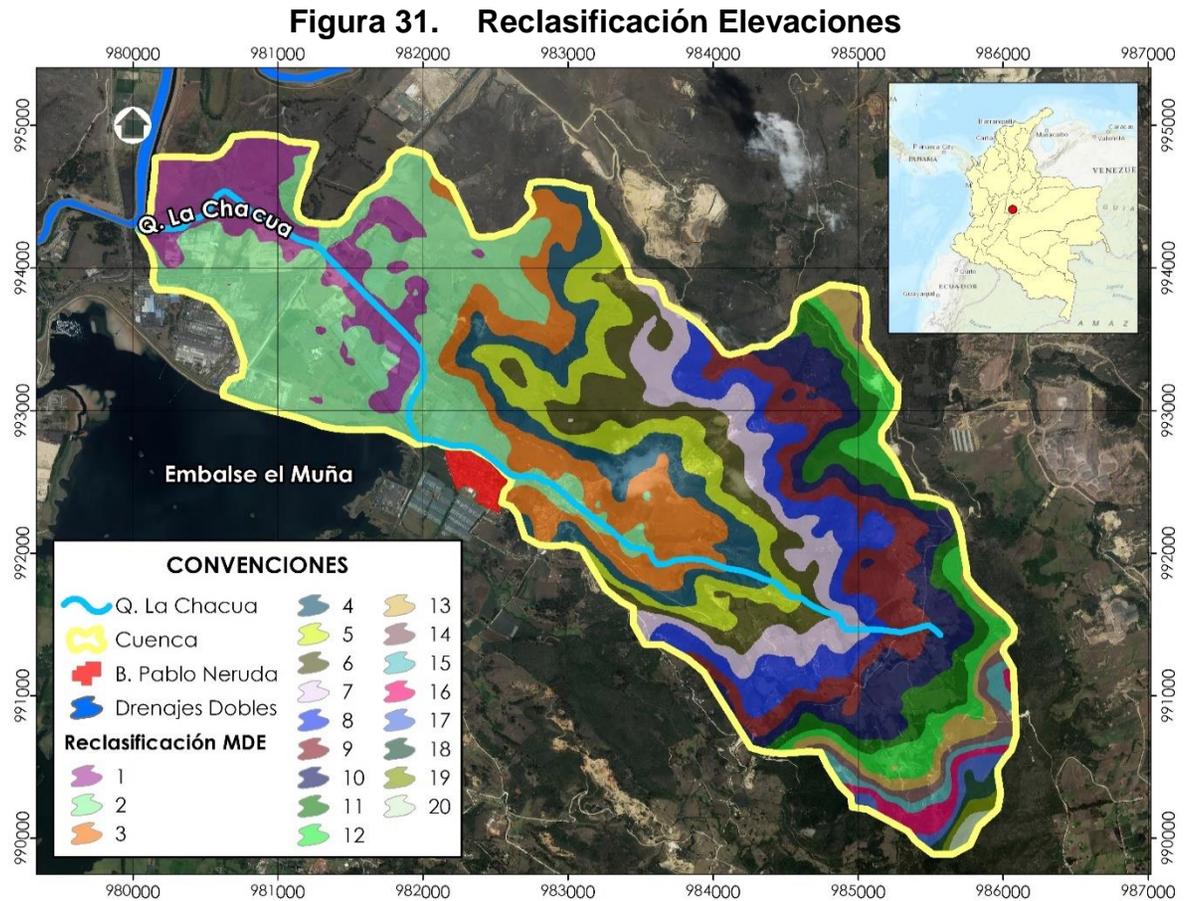
7.2.2 MORFOMETRÍA

Para la definición de la morfometría de la cuenca en primera instancia se procedió con la determinación de la curva hipsométrica la cual según Monsalve Sáenz⁴¹, es la forma gráfica de representar las elevaciones de una cuenca relacionando el valor de las cotas con el porcentaje de área acumulada.

⁴¹ Ibid., p. 44.

Siguiendo la metodología de áreas por curvas de nivel se obtuvieron los siguientes resultados.

Se realizó una reclasificación del raster de elevaciones con 20 clases, como se muestra en la figura 31.



Fuente: Autor, 2018

En la tabla 20 se muestra la clasificación de las cotas con base a lo mostrado en la figura 31.

Tabla 20 Reclasificación MDE

Intervalo de Cotas	Identificador
2526.489502 - 2558.633032	1
2558.633032 - 2590.776563	2
2590.776563 - 2622.920093	3
2622.920093 - 2655.063623	4
2655.063623 - 2687.207153	5
2687.207153 - 2719.350684	6
2719.350684 - 2751.494214	7
2751.494214 - 2783.637744	8
2783.637744 - 2815.781274	9
2815.781274 - 2847.924805	10
2847.924805 - 2880.068335	11
2880.068335 - 2912.211865	12
2912.211865 - 2944.355396	13
2944.355396 - 2976.498926	14
2976.498926 - 3008.642456	15
3008.642456 - 3040.785986	16
3040.785986 - 3072.929517	17
3072.929517 - 3105.073047	18
3105.073047 - 3137.216577	19
3137.216577 - 3169.360107	20

Fuente: Autor, 2018

Se realizó un análisis zonal con base a la clasificación de 20 categorías y el MDT, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 21 Reclasificación MDE

Categoría	Área (m ²)	Cota Máxima (msnm)	Cota Mínima (msnm)
1	1135100	2526.489502	2558.632813
2	2726425	2558.633545	2590.776367
3	1149650	2590.78125	2622.919922
4	863125	2622.921143	2655.061768
5	878925	2655.064209	2687.202881
6	848450	2687.20752	2719.348389
7	732325	2719.35376	2751.493652
8	788400	2751.494385	2783.637695
9	817975	2783.638428	2815.780518
10	877600	2815.782715	2847.923828
11	599025	2847.92627	2880.067871
12	454000	2880.073242	2912.206055
13	273650	2912.213623	2944.350098
14	163875	2944.357666	2976.494629
15	134425	2976.501953	3008.633789
16	140225	3008.648193	3040.757813
17	88650	3040.787109	3072.924316
18	53900	3072.932861	3105.066406

Categoría	Área (m ²)	Cota Máxima (msnm)	Cota Mínima (msnm)
19	36725	3105.093018	3137.216553
20	36675	3137.247803	3169.360107

Fuente: Autor, 2018

Siguiendo la metodología descrita por Monsalve Sáenz⁴² se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 22 Hipsometría de La Cuenca

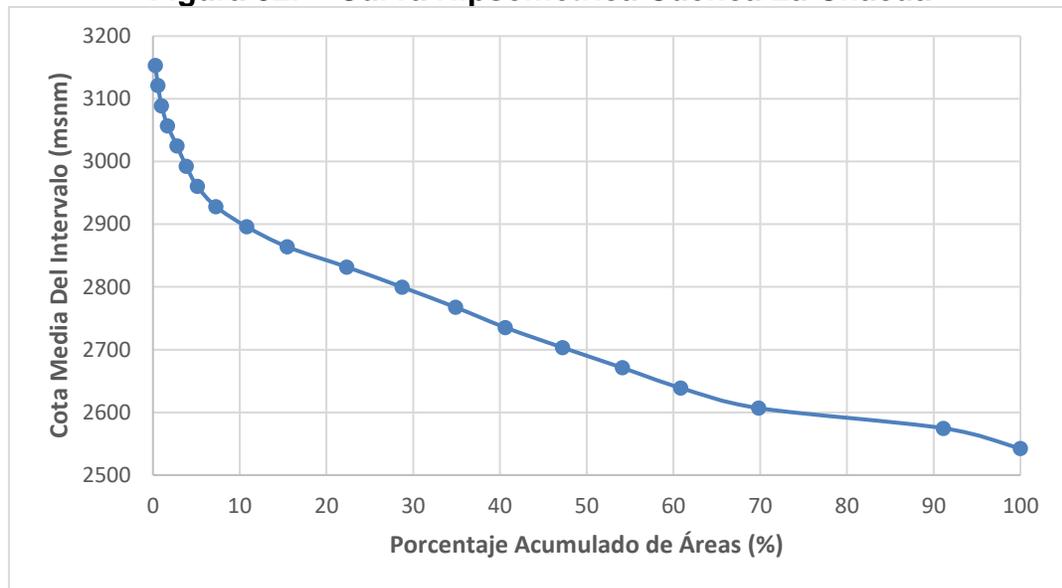
Categoría	Cota Mínima (msnm)	Cota Máxima (msnm)	Cota Media Del Intervalo (msnm)	Área (Km ²)	Área Acumulada (Km ²)	Porcentaje De Área (%)	Porcentaje Acumulado de Áreas (%)	Cota Media del Intervalo x Área	Porcentaje De Área (%) Hipsométrica
1	2526.49	2558.63	2542.56	1.14	1.14	8.87	8.87	2886.06	100.00
2	2558.63	2590.78	2574.70	2.73	3.86	21.30	30.17	7019.74	91.13
3	2590.78	2622.92	2606.85	1.15	5.01	8.98	39.15	2996.97	69.83
4	2622.92	2655.06	2638.99	0.86	5.87	6.74	45.90	2277.78	60.85
5	2655.06	2687.20	2671.13	0.88	6.75	6.87	52.76	2347.73	54.10
6	2687.21	2719.35	2703.28	0.85	7.60	6.63	59.39	2293.60	47.24
7	2719.35	2751.49	2735.42	0.73	8.33	5.72	65.11	2003.22	40.61
8	2751.49	2783.64	2767.57	0.79	9.12	6.16	71.27	2181.95	34.89
9	2783.64	2815.78	2799.71	0.82	9.94	6.39	77.66	2290.09	28.73
10	2815.78	2847.92	2831.85	0.88	10.82	6.86	84.52	2485.23	22.34
11	2847.93	2880.07	2864.00	0.60	11.42	4.68	89.20	1715.61	15.48
12	2880.07	2912.21	2896.14	0.45	11.87	3.55	92.75	1314.85	10.80
13	2912.21	2944.35	2928.28	0.27	12.14	2.14	94.89	801.32	7.25
14	2944.36	2976.49	2960.43	0.16	12.31	1.28	96.17	485.14	5.11
15	2976.50	3008.63	2992.57	0.13	12.44	1.05	97.22	402.28	3.83
16	3008.65	3040.76	3024.70	0.14	12.58	1.10	98.31	424.14	2.78
17	3040.79	3072.92	3056.86	0.09	12.67	0.69	99.01	270.99	1.69
18	3072.93	3105.07	3089.00	0.05	12.73	0.42	99.43	166.50	0.99
19	3105.09	3137.22	3121.15	0.04	12.76	0.29	99.71	114.62	0.57
20	3137.25	3169.36	3153.30	0.04	12.80	0.29	100.00	115.65	0.29
Totales				12.80		100			

Fuente: Autor, 2018

Graficando los resultados se obtiene la curva hipsométrica, la cual se muestra en la figura 32.

⁴² Ibid., p. 44.

Figura 32. Curva Hipsométrica Cuenca La Chacua



Fuente: Autor, 2018

La curva Hipsométrica permite determinar que la característica fisiográfica de la cuenca objeto de estudio corresponde a valles extensos y cumbres escarpadas.

Otra característica importante de la morfometría de una cuenca corresponde a la pendiente de la cuenca, en donde primero se determina el tipo de topografía de la zona de estudio, para ello se realizó un mapa de pendientes con base a la siguiente clasificación, determinada por el IGAC⁴³.

Tabla 23 Clase de Pendientes

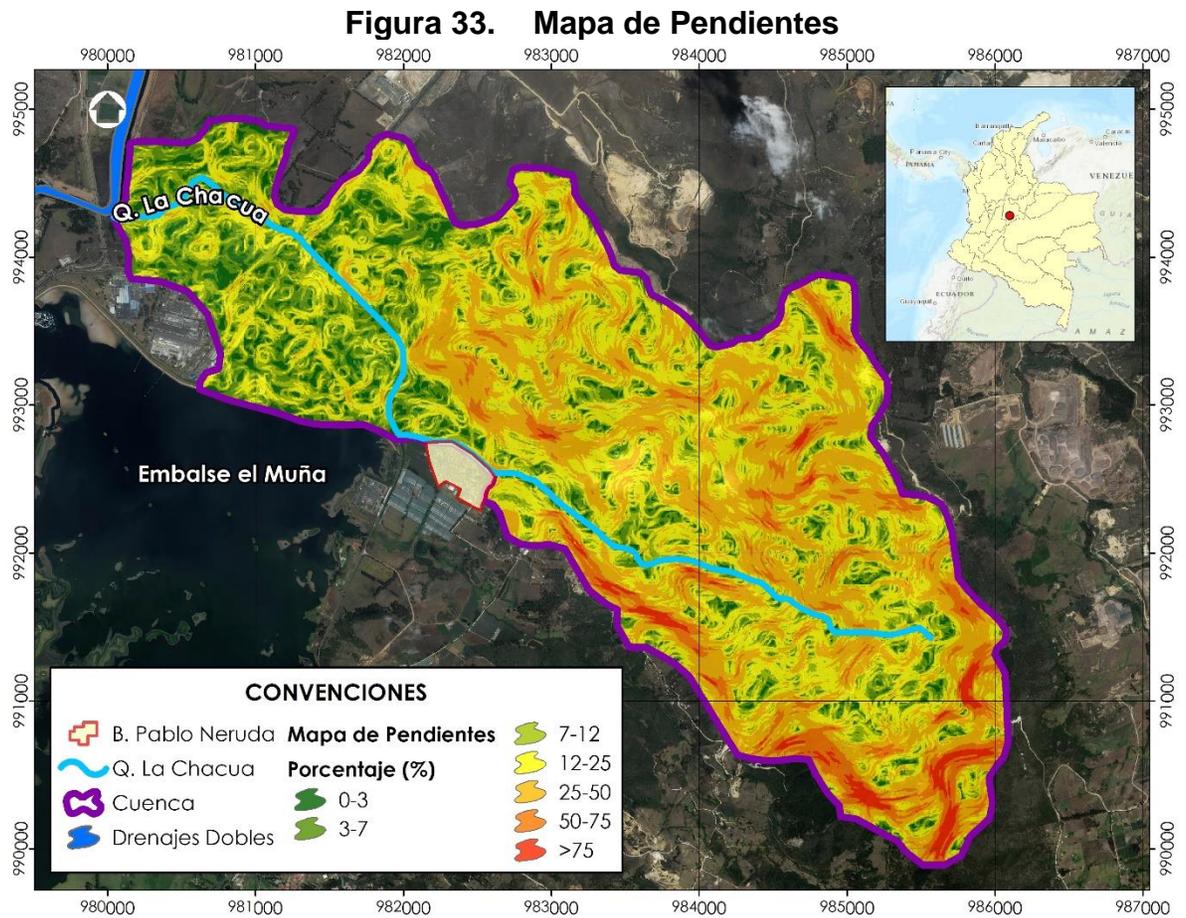
Clase	%
Plana	0-3
Ligeramente Inclinada	3-7
Moderadamente Inclinada	7-12
Fuertemente Inclinada	12-25
Ligeramente Escarpada	25-50
Moderadamente Escarpada	50-25

⁴³ INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso. M40100-02/14 Versión 2. Bogotá D.C.: IGAC, 2014. 17p.

Clase	%
Fuertemente Escarpada	>75

Fuente: IGAC, 2014

En la figura 33 se muestra la respectiva clasificación de pendientes de la zona.



Fuente: Autor, 2018

Al realizar un análisis zonal de las pendientes se obtiene el valor de la pendiente media, el cual corresponde a 22,84% siendo en promedio un terreno con una pendiente fuertemente inclinada.

Se determinaron otros valores importantes en la morfometría de la cuenca, los cuales se determinan directamente. Estos valores corresponden a Área, Perímetro,

centroides, Longitud del cauce, entre otros. A continuación, en la tabla 24 se presenta el resumen de las características importantes de la morfometría de la cuenca.

Tabla 24 Resumen Parámetros Morfometría

Concepto	Valor	Unidad
Área Cuenca	12.80	Km ²
Perímetro	20.99	Km
Cota Máxima de La Cuenca	3169.36	msnm
Cota Mínima de la Cuenca	2526.49	msnm
X Centroide Cuenca	983442.31	m
Y Centroide Cuenca	992700.10	m
Altura Promedio	2847.93	msnm
Altura Más Frecuente	2574.70	msnm
Longitud del Cauce	7.37	Km
Pendiente Media de La Cuenca	22.84	%

Fuente: Autor, 2018

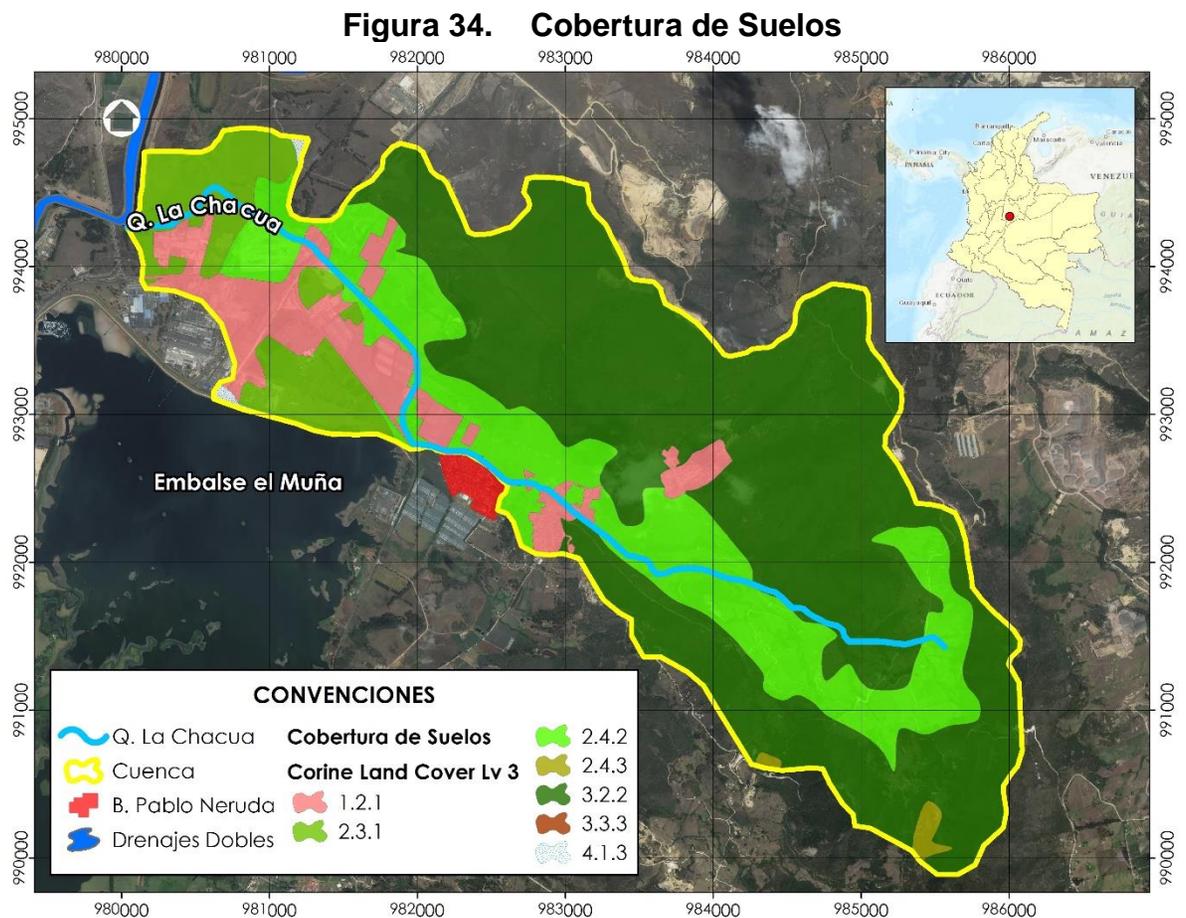
7.2.3 NÚMERO DE CURVA

Para la obtención del número de curva se determinaron en primera instancia las coberturas de suelo pertenecientes de la cuenca objeto de estudio. En Colombia y a nivel mundial se implementó la metodología Corine Land Cover, que consiste en la determinación de coberturas de suelo interpretadas de forma automatizada y supervisada a partir de imágenes satelitales, esta metodología fue adoptada por Colombia para la determinación de las coberturas de suelo a lo largo de la Cuenca del Río Magdalena⁴⁴.

⁴⁴ IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. 2008. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 200p. + 164 hojas cartográficas.

Con la base de coberturas existentes se procedió a realizar una intersección respecto de la cuenca delimitada para el proyecto obteniendo así las coberturas de suelo correspondientes. Debido a que la base que se tiene corresponde al año 2009, se realizó la complementación de la información con un análisis supervisado.

En la figura 34 se muestran las coberturas de suelo pertenecientes a la cuenca de estudio.



Fuente: Autor, 2018

En la tabla 25 se relacionan las clasificaciones de suelos por medio de la metodología Corine Land Cover, respecto al nivel 3, las cuales se muestran en la figura 34.

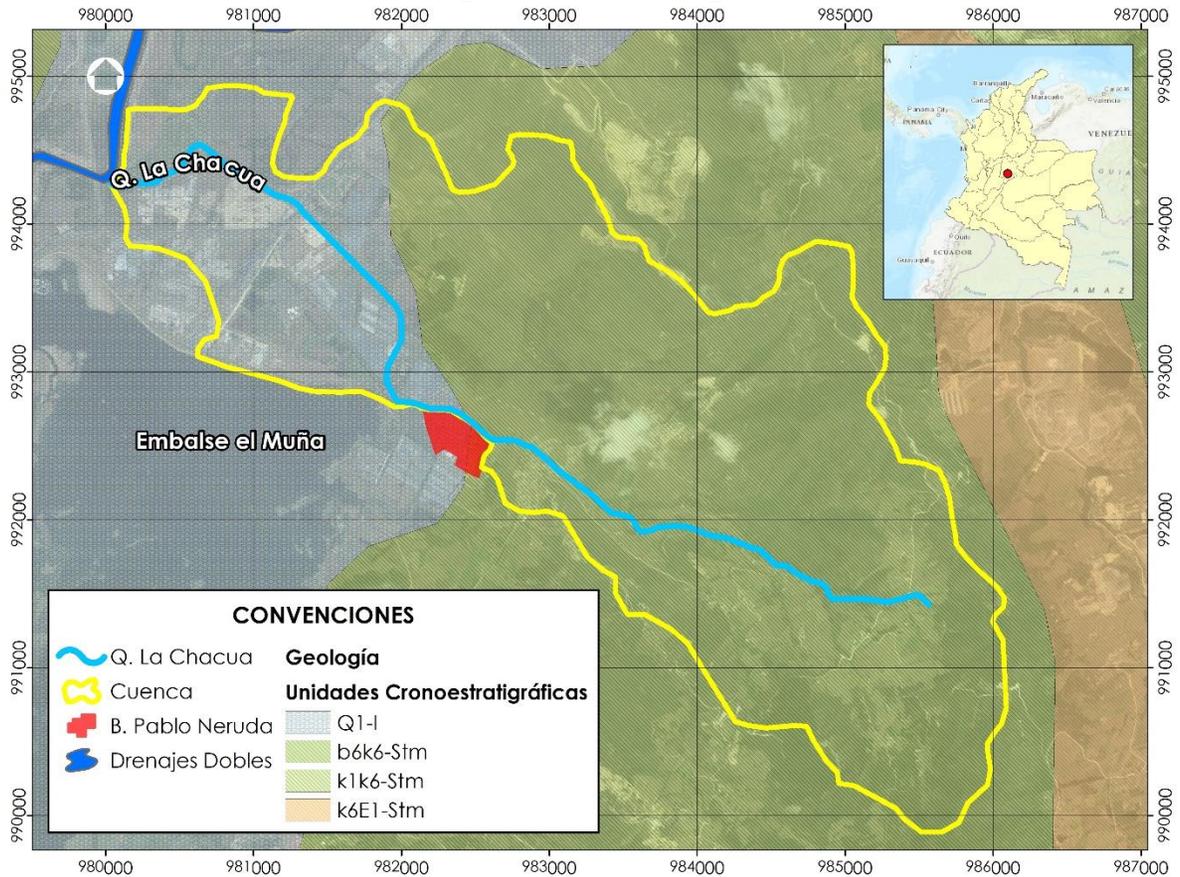
Tabla 25 Coberturas de Suelo

Código	Cobertura Nivel 3	Área (Ha)
1.2.1	Zonas Industriales o Comerciales	121.05
2.3.1	Pastos Limpios	110.32
2.4.2	Mosaico de Pastos y Cultivos	292.66
2.4.3	Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales	7.15
3.2.2	Arbustos y Matorrales	745.88
3.3.3	Tierras Desnudas o Degradadas	0.88
4.1.3	Vegetación Acuática Sobre Cuerpos de Agua	3.37

Fuente: Autor, 2018

Al tener definidas las coberturas de suelo se sigue con la determinación del grupo hidrológico del suelo, el cual permite determinar los valores del número de curva. Para esto se hizo necesario la determinación de la Geología, como se muestra en la figura 35.

Figura 35. Geología



Fuente: Autor, 2018

Dentro de la cuenca de estudio se encuentran principalmente dos unidades cronoestratigráficas: Q1-I y K1k6-Stm. Q1-I corresponde a Arcillas, turbas, y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas. Localmente, capas de depósitos de diatomeas. Mientras que la cronoestratigrafía y K1k6-Stm contiene Shales, calizas, fosforitas, cherts y cuarzoarenitas. Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur. Todas las anteriores unidades encontradas a lo largo de la cuenca refieren una velocidad de infiltración entre 1,27 mm/hr a 3,81 mm/hr, correspondiendo entonces al grupo hidrológico C.

Se realizó el análisis de las coberturas de suelo con base a los datos de número de curva para el grupo hidrológico C, según lo especificado en Ven te Chow, *et all*⁴⁵, se determinó el valor de número de curva que corresponde a cada cobertura del suelo, obteniendo como se muestra en la tabla 26, que el valor de número de curva para el proyecto corresponde a 74.

Tabla 26 Número de curva Cuenca

ID	Área (Ha)	Cobertura de Suelo	NIVEL 3	Grupo Hidrológico	Número Curva CN	CN x A	CN Ponderado
1	121.05	Zonas Industriales o Comerciales	1.2.1	C	92.5	11196.69	
2	110.32	Pastos Limpios	2.3.1	C	86	9487.77	
3	292.66	Mosaico de Pastos y Cultivos	2.4.2	C	74	21657.18	
4	7.15	Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales	2.4.3	C	78	558.03	74
5	745.88	Arbustos y Matorrales	3.2.2	C	70	52211.40	
6	0.88	Tierras Desnudas o Degradadas	3.3.3	C	87	76.99	
7	3.37	Vegetación Acuática Sobre Cuerpos de Agua	4.1.3	C	71	239.13	
Sumatoria	1281.32				558.5	95427.19	

Fuente: Autor, 2018

⁴⁵ VEN TE, Hidrología Aplicada, Op, cit., p. 154

7.2.4 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración se calculó a partir de 3 ecuaciones descritas en Ven te Chow, *et al*⁴⁶, las cuales hacen parte de estudios de cuencas rurales

Tabla 27 Tiempos de concentración

Kirpich (1940)			California Culverts Practice (1942)			Ecuación de Retardo SCS (1973)		
$T_c = 0,02 L^{0,77} S^{-0,385}$			$T_c = 60 (11,9L^3/H)^{0,385}$			$T_c = \frac{100 L^{0,8} [(1000/CN)-9]^{0,7}}{1900S^{0,5}}$		
Tc (min)	83.82		Tc (min)	59.49		Tc (min)	101.62	
Ítem	Valor	Unidad	Ítem	Valor	Unidad	Ítem	Valor	Unidad
L	24190.43	ft	L	5.58	mi	L	24190.43	ft
S	0.23	ft/ft	H	2109.15	ft	CN	74	Adimensional
						S	22.84	%

Fuente: Autor, 2018

Se encuentran distintas diferencias entre las tres ecuaciones con base a lo indicado por el autor, por lo cual se decide determinar el valor promedio de los tres resultados, obteniendo que el tiempo de concentración para la cuenca corresponde a 81,64 minutos.

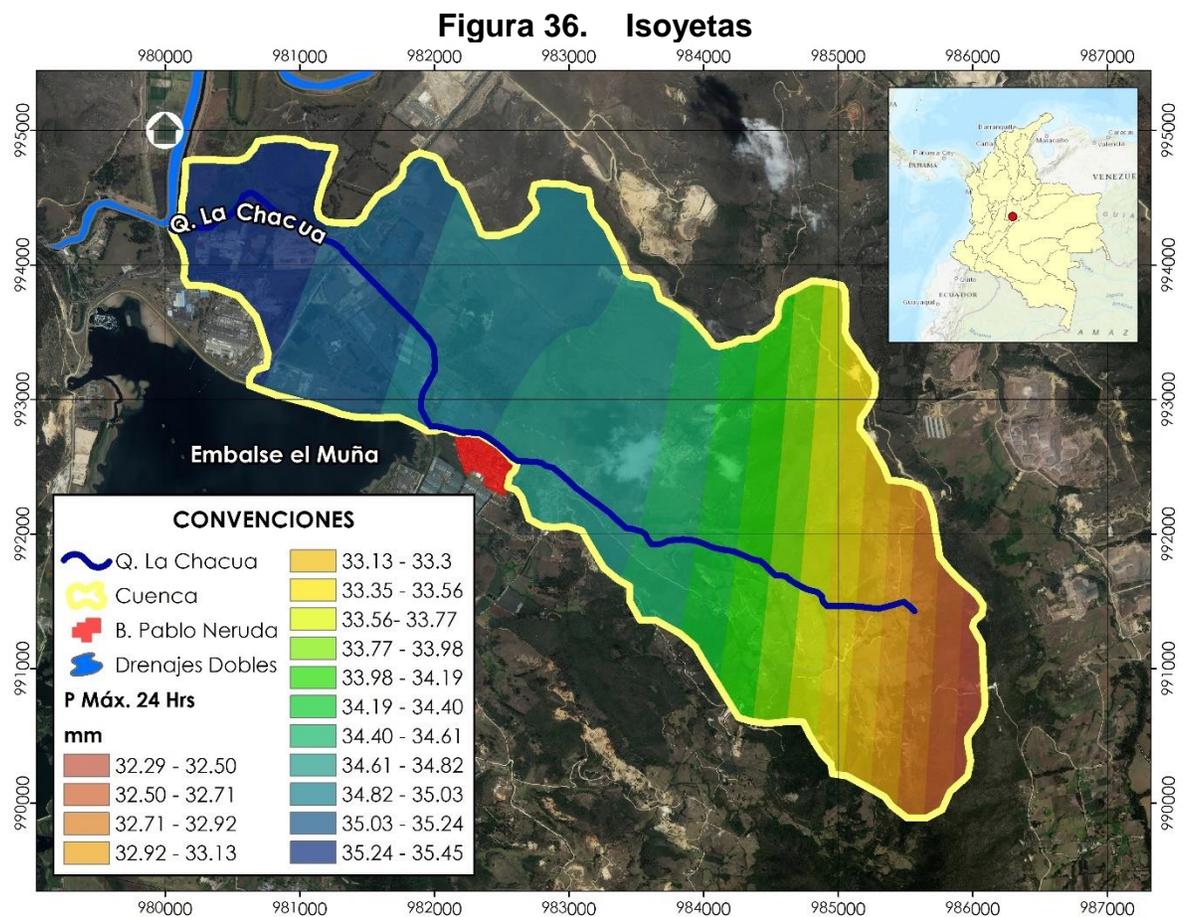
7.3 ESTUDIO HIDROLÓGICO

En este capítulo se describen los resultados obtenidos respecto los hidrogramas unitarios para los tiempos de retorno de 2.33 años, 50 años y 100 años.

⁴⁶ Ibid., p. 513-514

7.3.1 ISOYETAS Y PRECIPITACIÓN MEDIA MÁX. 24 HRS

Para la determinación de las isoyetas se procedió a aplicar el modelo de interpolación “Spline” del software ArcGIS 10.3, el cual permite obtener la distribución de la lluvia a lo largo de la cuenca de estudio. En la Figura 36, se muestran las isoyetas obtenidas a partir de las precipitaciones promedio máximas 24 horas a nivel multianual de las 5 estaciones escogidas con base a los resultados estadísticos antes mostrados.



Fuente: Autor, 2018

A partir de la obtención de las curvas de precipitación se procedió a determinar la precipitación máxima promedio en 24 horas a nivel multianual, valor el cual se implementó en la determinación de las curvas IDF. Para la obtención de este valor

se aplicó el procedimiento descrito por Ven te Chow, et all⁴⁷, en donde se describe que la mejor metodología para determinar valores de precipitación media es el de isoyetas incluso sobre el de polígonos de Thiessen.

Para la obtención del valor de la precipitación promedia a nivel multianual se procedió a realizar un análisis ponderado por medio del software ArcGIS 10.3 el cual corresponde a la simplificación del método de isoyetas, realizando un análisis zonal, obteniendo la precipitación media ponderada para toda la cuenca.

El valor obtenido por el análisis zonal corresponde a una precipitación promedio Máxima en 24 Horas a nivel multianual de 34.336 mm, con una desviación estándar de 0,81mm.

7.3.2 CURVAS IDF SINTÉTICAS

Empleando la ecuación establecida por Vargas y Granados⁴⁸, se obtienen las siguientes intensidades para cada periodo de retorno respecto una llovía de 6 horas de duración.

Tabla 28 Intensidades

Tr	DURACION EN MINUTOS												
	5	10	15	20	30	45	60	90	100	120	150	180	360
2.33	106.214	67.221	51.438	42.543	32.554	24.911	20.603	15.765	14.706	13.039	11.253	9.978	6.315
5	121.864	77.125	59.017	48.811	37.35	28.581	23.638	18.088	16.873	14.96	12.911	11.448	7.245
10	138.057	87.374	66.859	55.297	42.314	32.379	26.779	20.492	19.115	16.948	14.627	12.969	8.208
25	162.813	103.041	78.848	65.212	49.901	38.185	31.581	24.166	22.543	19.987	17.25	15.294	9.679
50	184.448	116.733	89.325	73.878	56.532	43.259	35.778	27.378	25.538	22.643	19.542	17.327	10.966
100	208.958	132.245	101.195	83.695	64.044	49.007	40.532	31.016	28.932	25.652	22.139	19.629	12.423

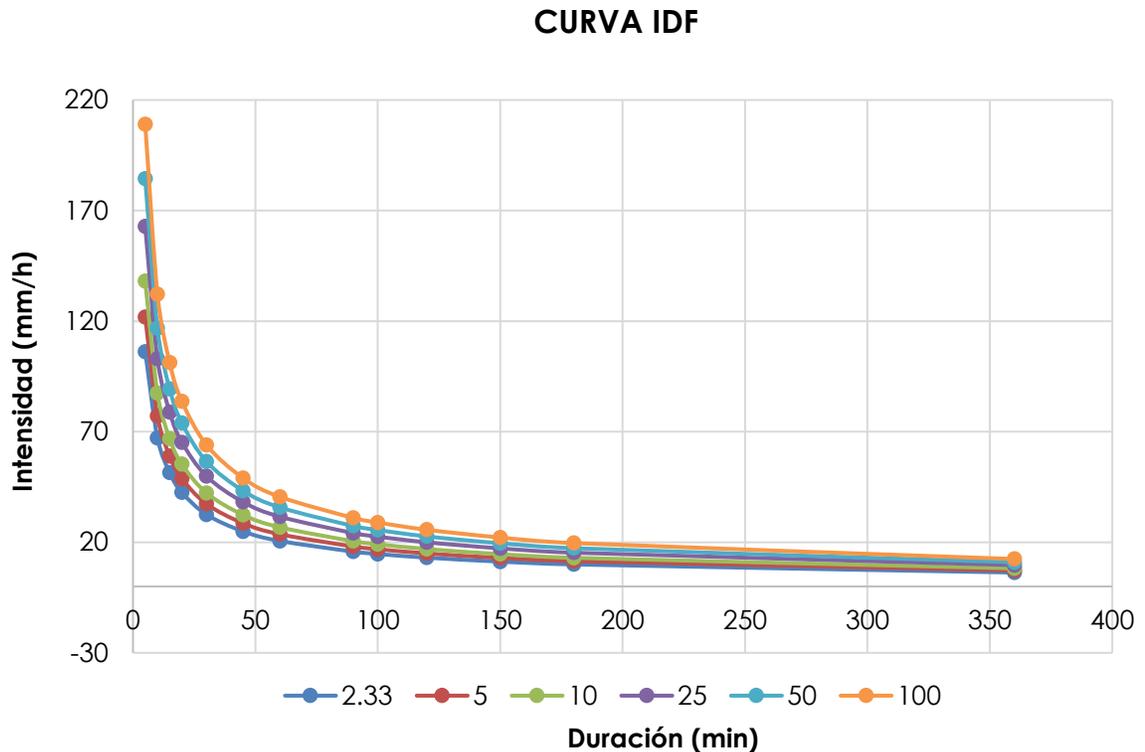
Fuente: Autor, 2018

⁴⁷ Ibid., p. 150

⁴⁸ VARGAS R. y GRANADOS M.D. Op cit., p. 187-200

Al graficar los resultados se obtienen las curvas IDF sintéticas, las cuales se muestran en la siguiente figura.

Figura 37. Regionalización Curvas IDF Sintéticas



Fuente: Autor, 2018

7.3.3 HIETOGRAMAS

Siguiendo la metodología descrita por Ven te Chow, *et all* ⁴⁹, respecto a los hietogramas por el método de bloques alterno, se obtuvieron los hietogramas correspondientes a la distribución de la lluvia para los distintos periodos de retorno determinados para el análisis de la información. La duración de la lluvia estimada para la generación de los hietogramas corresponde a 6 horas.

⁴⁹ VEN TE, Hidrología Aplicada, op. cit., p. 477-479

7.3.3.1 Hietograma Periodo de Retorno 2,33 Años

La tabla 29 muestra los procedimientos llevados a cabo para la determinación del hietograma para el periodo de retorno de 2,33 Años, el cual corresponde a la escorrentía con más probabilidad de ocurrencia. Se muestra el orden alterno de los valores de precipitación con una discretización de colores los cuales muestran los valores mínimos en color rojo en degradé hasta llegar al valor máximo correspondiente a la precipitación máxima, localizada en la mitad del hietograma.

Tabla 29 Tabulación Hietograma Tr 2,33 Años

Orden	Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad acumulada (mm)	Prof. Incremental (mm)		Distribución HBA (mm)
35	10	67.22	11.20	1.00	11.203	0.368
33	20	42.54	14.18	2.00	2.977	0.383
31	30	32.55	16.28	3.00	2.096	0.399
29	40	26.92	17.95	4.00	1.673	0.418
27	50	23.24	19.36	5.00	1.415	0.438
25	60	20.60	20.60	6.00	1.238	0.461
23	70	18.61	21.71	7.00	1.109	0.488
21	80	17.04	22.72	8.00	1.008	0.519
19	90	15.77	23.65	9.00	0.928	0.555
17	100	14.71	24.51	10.00	0.862	0.599
15	110	13.81	25.32	11.00	0.807	0.652
13	120	13.04	26.08	12.00	0.760	0.719
11	130	12.37	26.80	13.00	0.719	0.807
9	140	11.78	27.48	14.00	0.684	0.928
7	150	11.25	28.13	15.00	0.652	1.109
5	160	10.78	28.76	16.00	0.624	1.415
3	170	10.36	29.36	17.00	0.599	2.096
1	180	9.98	29.93	18.00	0.576	11.203
2	190	9.63	30.49	19.00	0.555	2.977
4	200	9.31	31.02	20.00	0.536	1.673
6	210	9.01	31.54	21.00	0.519	1.238
8	220	8.74	32.05	22.00	0.503	1.008
10	230	8.49	32.53	23.00	0.488	0.862
12	240	8.25	33.01	24.00	0.474	0.760
14	250	8.03	33.47	25.00	0.461	0.684
16	260	7.83	33.92	26.00	0.449	0.624
18	270	7.63	34.36	27.00	0.438	0.576
20	280	7.45	34.78	28.00	0.427	0.536
22	290	7.28	35.20	29.00	0.418	0.503
24	300	7.12	35.61	30.00	0.408	0.474
26	310	6.97	36.01	31.00	0.399	0.449
28	320	6.83	36.40	32.00	0.391	0.427
30	330	6.69	36.78	33.00	0.383	0.408
32	340	6.56	37.16	34.00	0.375	0.391
34	350	6.43	37.53	35.00	0.368	0.375

Orden	Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad acumulada (mm)	Prof. Incremental (mm)	Distribución HBA (mm)
36	360	6.31	37.89	36.00	0.361

Fuente: Autor, 2018

En la figura 38, se muestra la gráfica de hietograma obtenida para el periodo de retorno de 2,33 Años.

Figura 38. Hietograma Tr 2,33 Años



Fuente: Autor, 2018

7.3.3.2 Hietograma Periodo de Retorno 50 Años

La tabla 30 muestra los procedimientos llevados a cabo para la determinación del hietograma para el periodo de retorno de 50 Años. En la tabla se muestra el orden alterno de los valores de precipitación con una discretización de colores los cuales muestran los valores mínimos en color rojo en degradé hasta llegar al valor máximo correspondiente a la precipitación máxima, localizada en la mitad del hietograma.

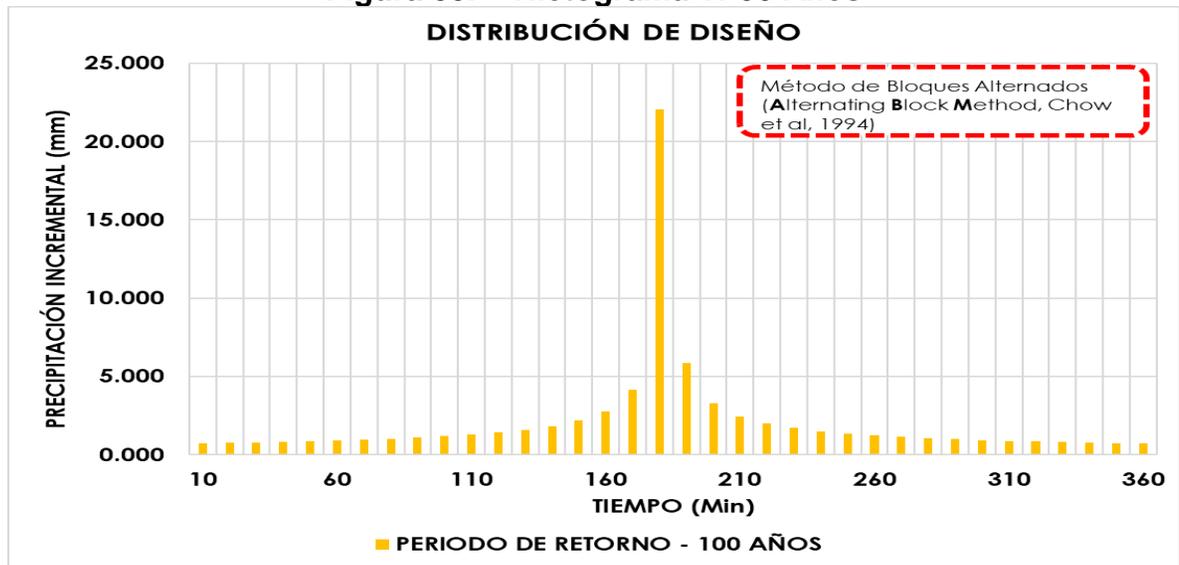
Tabla 30 Tabulación Hietograma Tr 50 Años

Orden	Duracion (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad acumulada (mm)	Prof. Incremental (mm)	Distribución HBA (mm)
35	10	116.73	19.46	1.00	19.456
33	20	73.88	24.63	2.00	5.170
31	30	56.53	28.27	3.00	3.640
29	40	46.76	31.17	4.00	2.904
27	50	40.35	33.63	5.00	2.457
25	60	35.78	35.78	6.00	2.151
23	70	32.32	37.70	7.00	1.925
21	80	29.59	39.45	8.00	1.751
19	90	27.38	41.07	9.00	1.612
17	100	25.54	42.56	10.00	1.498
15	110	23.98	43.97	11.00	1.402
13	120	22.64	45.29	12.00	1.320
11	130	21.48	46.54	13.00	1.249
9	140	20.45	47.72	14.00	1.187
7	150	19.54	48.86	15.00	1.133
5	160	18.73	49.94	16.00	1.084
3	170	17.99	50.98	17.00	1.040
1	180	17.33	51.98	18.00	1.000
2	190	16.72	52.94	19.00	0.964
4	200	16.16	53.88	20.00	0.931
6	210	15.65	54.78	21.00	0.901
8	220	15.18	55.65	22.00	0.873
10	230	14.74	56.50	23.00	0.847
12	240	14.33	57.32	24.00	0.823
14	250	13.95	58.12	25.00	0.801
16	260	13.59	58.90	26.00	0.780
18	270	13.26	59.66	27.00	0.761
20	280	12.94	60.41	28.00	0.742
22	290	12.65	61.13	29.00	0.725
24	300	12.37	61.84	30.00	0.709
26	310	12.10	62.53	31.00	0.693
28	320	11.85	63.21	32.00	0.679
30	330	11.61	63.88	33.00	0.665
32	340	11.39	64.53	34.00	0.652
34	350	11.17	65.17	35.00	0.639
36	360	10.97	65.79	36.00	0.627

Fuente: Autor, 2018

En la figura 39, se muestra la gráfica de hietograma obtenida para el periodo de retorno de 50 Años.

Figura 39. Hietograma Tr 50 Años



Fuente: Autor, 2018

7.3.3.3 Hietograma Periodo de Retorno 100 Años

La tabla 31 muestra los procedimientos llevados a cabo para la determinación del hietograma para el periodo de retorno de 100 Años. En la tabla se muestra el orden alterno de los valores de precipitación con una discretización de colores, los cuales muestran los valores mínimos en color rojo en degradé hasta llegar al valor máximo correspondiente a la precipitación máxima, localizada en la mitad del hietograma.

Tabla 31 Tabulación Hietograma Tr 100 Años

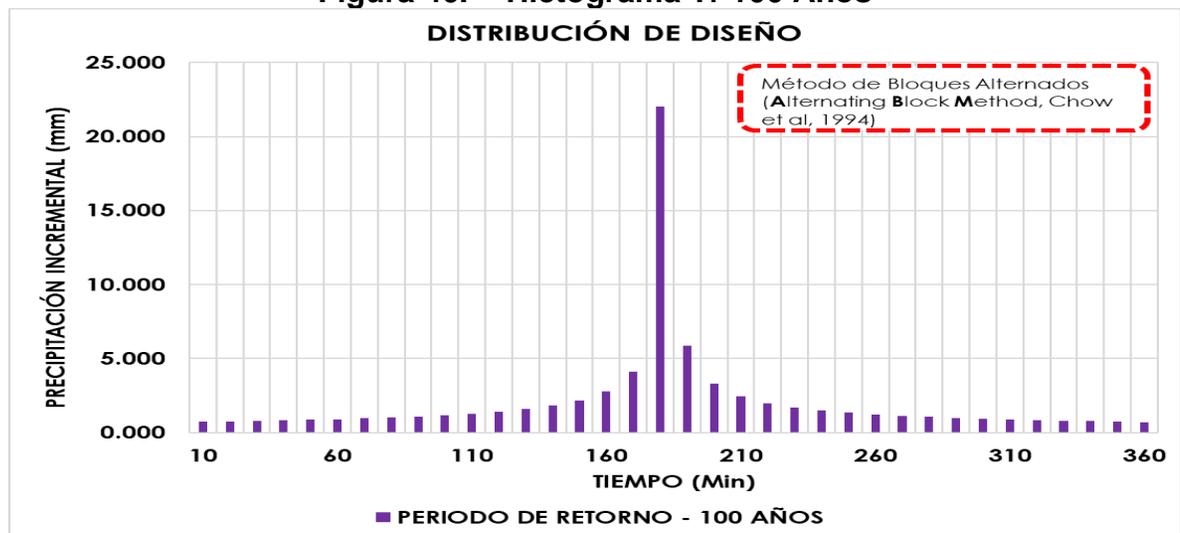
Orden	Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad acumulada (mm)	Prof. Incremental (mm)	Distribución Hba (mm)
35	10	132.25	22.04	1.00	22.041
33	20	83.70	27.90	2.00	5.858
31	30	64.04	32.02	3.00	4.124
29	40	52.97	35.31	4.00	3.290
27	50	45.72	38.10	5.00	2.783
25	60	40.53	40.53	6.00	2.436
23	70	36.61	42.71	7.00	2.181
21	80	33.52	44.70	8.00	1.984
19	90	31.02	46.52	9.00	1.826
17	100	28.93	48.22	10.00	1.697
15	110	27.17	49.81	11.00	1.588

Orden	Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad acumulada (mm)	Prof. Incremental (mm)	Distribución Hba (mm)
13	120	25.65	51.30	12.00	1.415
11	130	24.33	52.72	13.00	1.588
9	140	23.17	54.06	14.00	1.826
7	150	22.14	55.35	15.00	2.181
5	160	21.22	56.58	16.00	2.783
3	170	20.38	57.75	17.00	4.124
1	180	19.63	58.89	18.00	22.041
2	190	18.94	59.98	19.00	5.858
4	200	18.31	61.03	20.00	3.290
6	210	17.73	62.06	21.00	2.436
8	220	17.19	63.05	22.00	1.984
10	230	16.70	64.01	23.00	1.697
12	240	16.23	64.94	24.00	1.496
14	250	15.80	65.85	25.00	1.345
16	260	15.40	66.73	26.00	1.228
18	270	15.02	67.59	27.00	1.133
20	280	14.66	68.43	28.00	1.055
22	290	14.33	69.25	29.00	0.989
24	300	14.01	70.06	30.00	0.933
26	310	13.71	70.84	31.00	0.884
28	320	13.43	71.61	32.00	0.841
30	330	13.16	72.36	33.00	0.803
32	340	12.90	73.10	34.00	0.769
34	350	12.66	73.83	35.00	0.738
36	360	12.42	74.54	36.00	0.711

Fuente: Autor, 2018

En la figura 40, se muestra la gráfica de hietograma obtenida para el periodo de retorno de 100 Años.

Figura 40. Hietograma Tr 100 Años



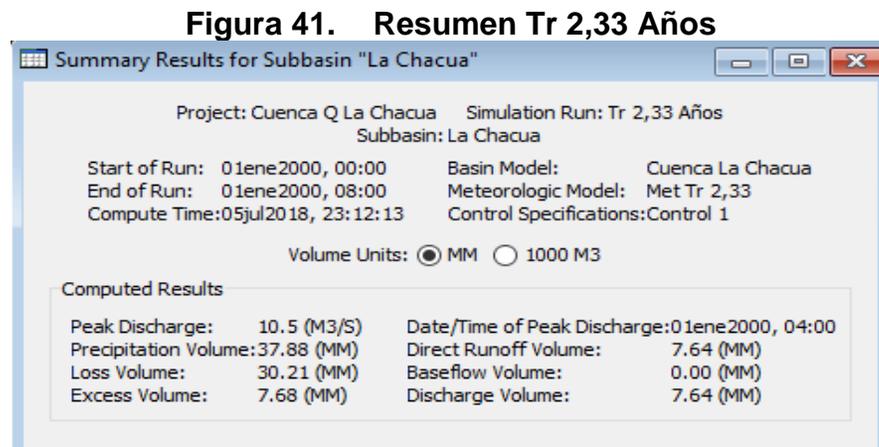
Fuente: Autor, 2018

7.3.4 MODELO HEC-HMS

A continuación, se presentan los resultados de los Hidrogramas obtenidos en el HEC-HMS, respecto a cada periodo de Retorno.

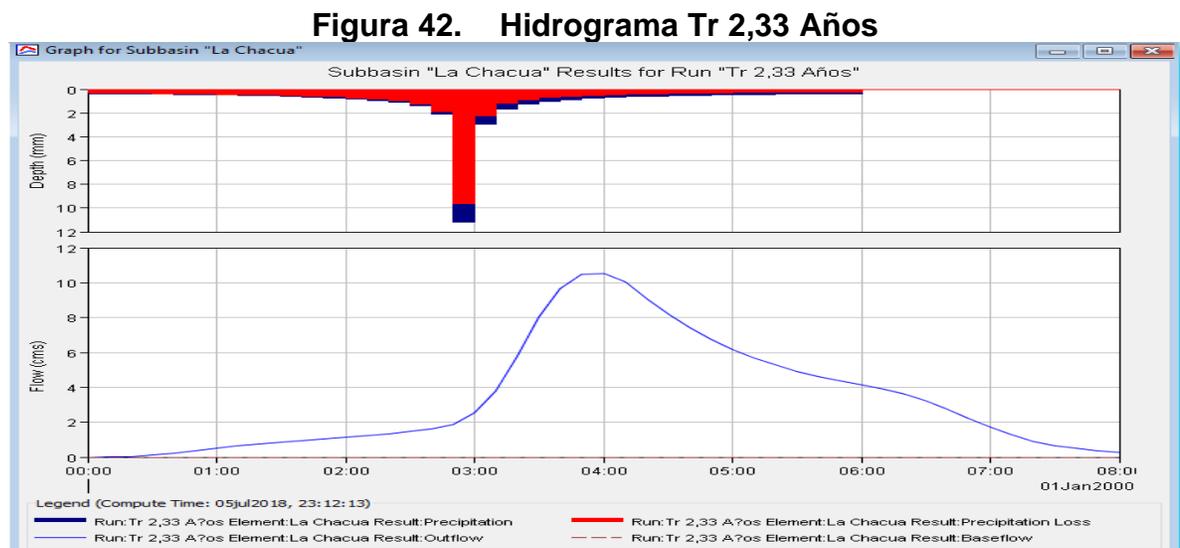
7.3.5 HIDROGRAMA TR 2,33 AÑOS

La Figura 41, muestran el resumen de los resultados obtenidos de la modelación para el periodo de retorno de 2,33 años.



Fuente: Autor, 2018

El hidrograma unitario obtenido para la modelación se muestra en la Figura 42

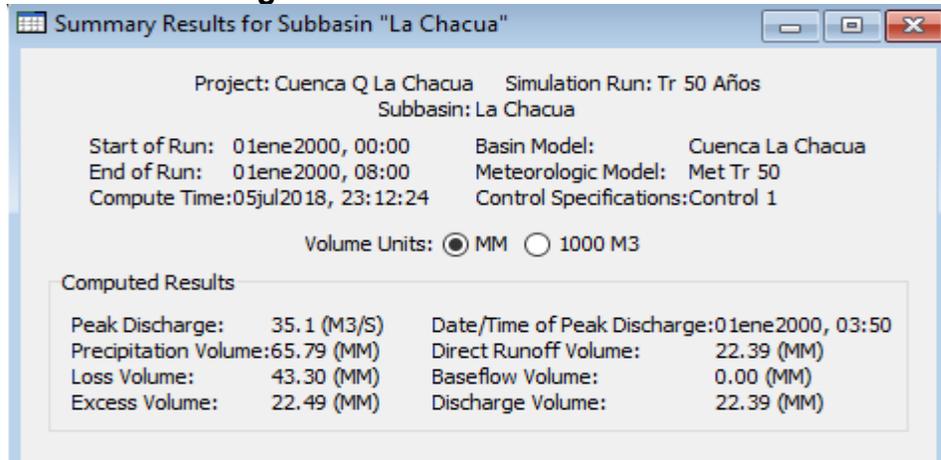


Fuente: Autor, 2018

7.3.6 HIDROGRAMA TR 50 AÑOS

La Figura 43, muestran el resumen de los resultados obtenidos de la modelación para el periodo de retorno de 50 años.

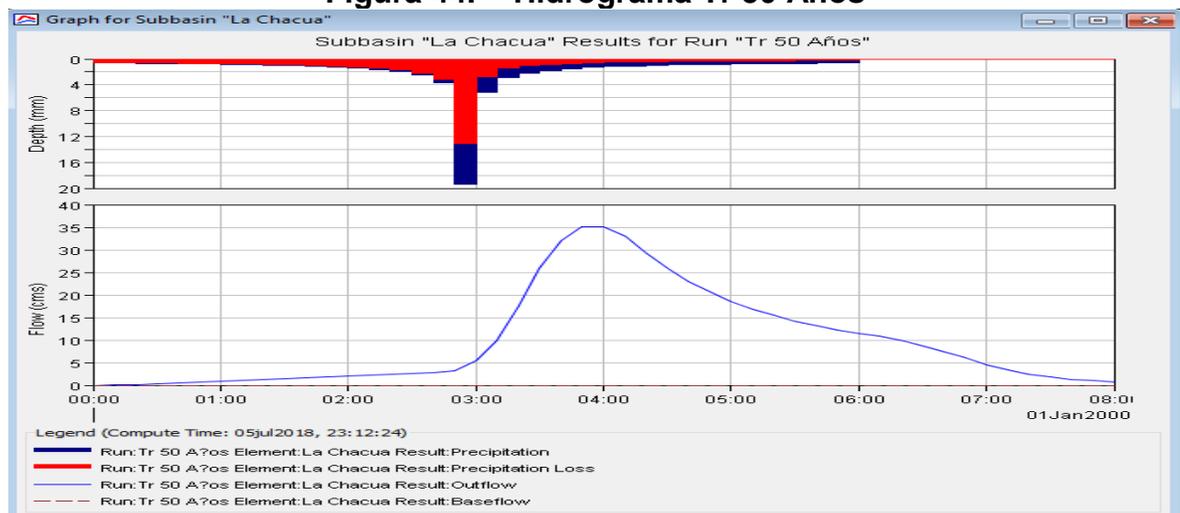
Figura 43. Resumen Tr 50 Años



Fuente: Autor, 2018

El hidrograma unitario obtenido para la modelación se muestra en la Figura 44

Figura 44. Hidrograma Tr 50 Años

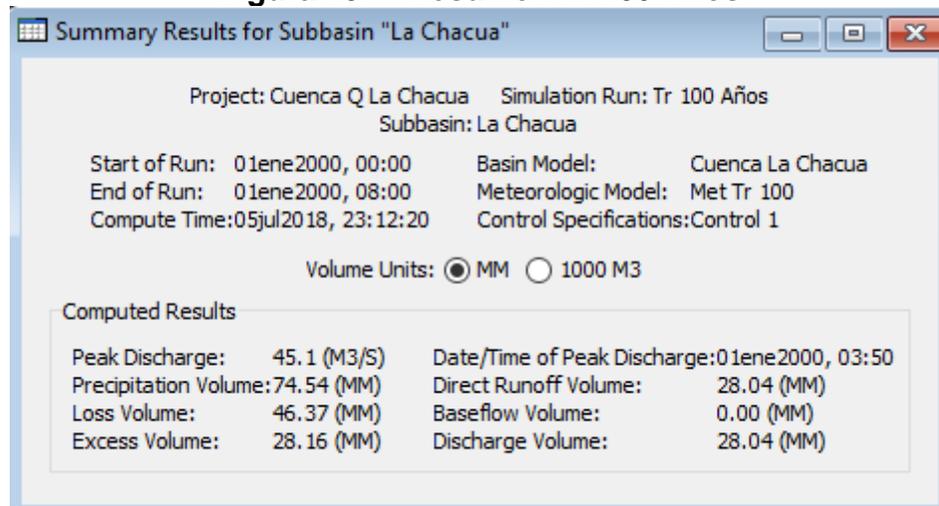


Fuente: Autor, 2018

7.3.7 HIDROGRAMA TR 100 AÑOS

La Figura 45, muestran el resumen de los resultados obtenidos de la modelación para el periodo de retorno de 100 años.

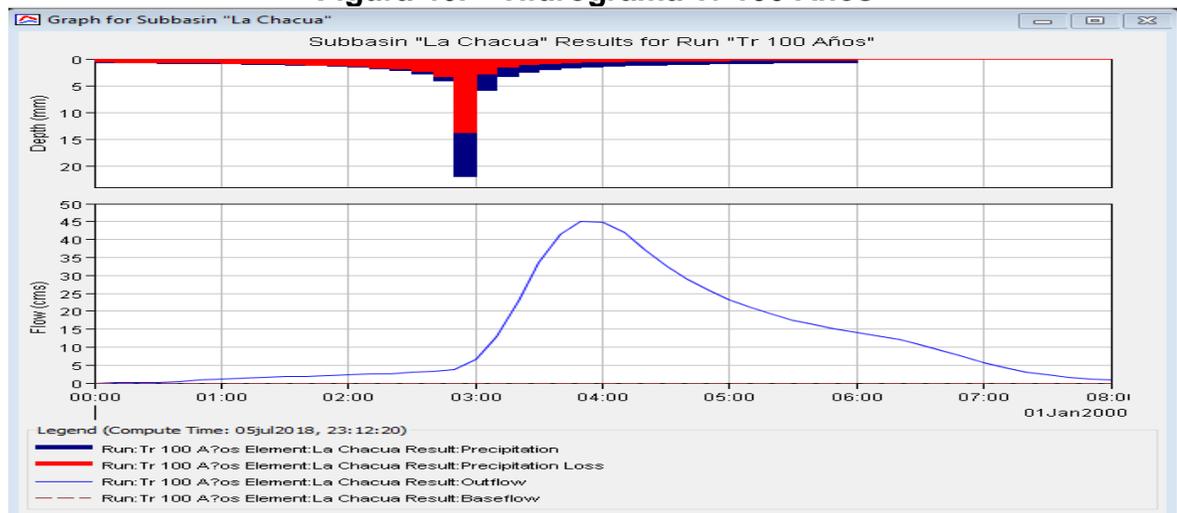
Figura 45. Resumen Tr 100 Años



Fuente: Autor, 2018

El hidrograma unitario obtenido para la modelación se muestra en la Figura 46

Figura 46. Hidrograma Tr 100 Años



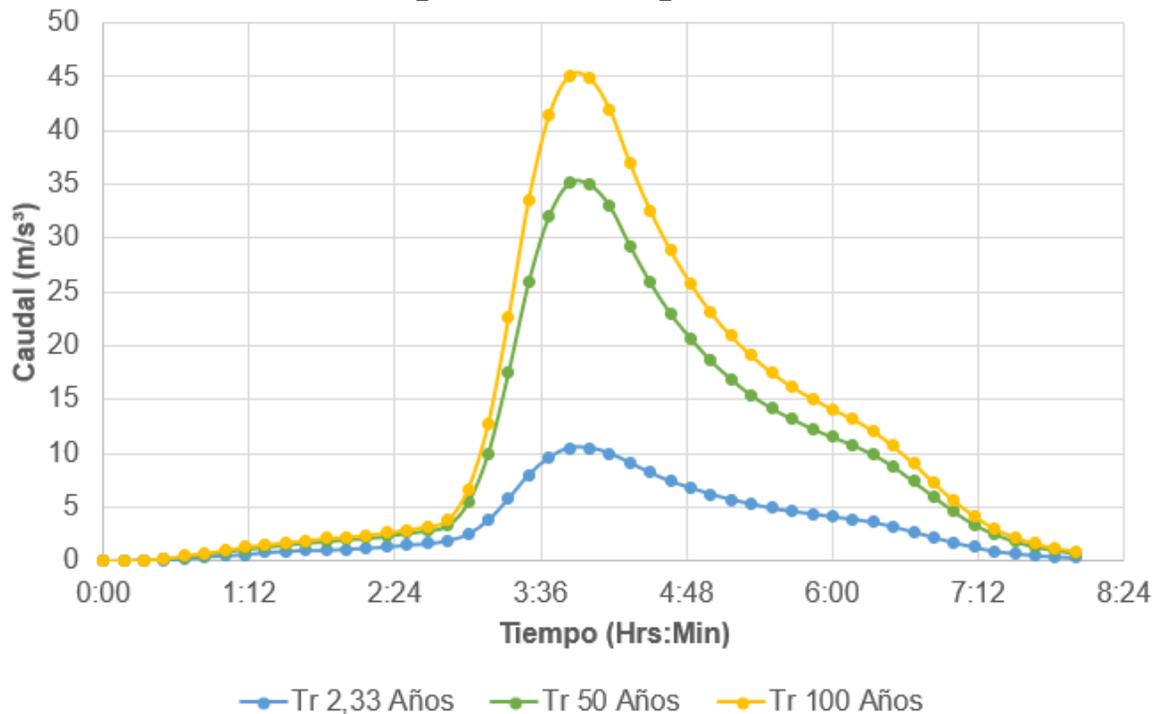
Fuente: Autor, 2018

7.4 MODELACIÓN HIDRÁULICA

Para la modelación en Iber se determinó realizar 4 modelos, de los cuales 3 corresponden al diagnóstico respecto los periodos de retorno de 2.33, 50 y 100 años, y el último modelo respecto a la alternativa de solución propuesta con un periodo de retorno de 100 años como lo indica el RAS. Las modelaciones se encuentran en formato digital adjuntas en CD como Anexo B Modelación Hidráulica de diagnóstico y el Anexo C Modelación Hidráulica de Diseño, adicionalmente se encuentra el Anexo A KMZ, en el cual se encuentran los modelos exportados a Google Earth.

En la siguiente figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno, mostrando los distintos comportamientos obtenidos mediante la modelación hidrometeorológica.

Figura 47. Hidrogramas



Fuente: Autor, 2018

7.4.1 ESCENARIO 1: TR 2,33 AÑOS – DIAGNÓSTICO

Se ingresaron los valores del hidrograma obtenido respecto el periodo de retorno de 2.33 años, el cual representa una mayor posibilidad de ocurrencia, obteniendo como resultado que en ningún instante de la modelación el agua excede la capacidad del canal, por lo cual no se genera desbordamiento del cauce.

Figura 48. Resultado Tr 2,33 Años



Fuente: Autor, 2018

7.4.2 ESCENARIO 2: TR 50 AÑOS – DIAGNÓSTICO

Se ingresaron los valores del hidrograma obtenido respecto el periodo de retorno de 50 años, en donde como se observa en la figura 49, se presenta el desbordamiento del cauce.

Figura 49. Resultado Tr 50 Años



Fuente: Autor, 2018

7.4.3 ESCENARIO 3: TR 100 AÑOS – DIAGNÓSTICO

Se ingresaron los valores del hidrograma obtenido respecto el periodo de retorno de 100 años, en donde como se observa en la figura 50, se presenta el desbordamiento del cauce desde el instante de modelación 12000 (3.33 horas), situación que ya se había presentado desde el periodo de retorno de 50 años, pero como lo establece el RAS, dadas las condiciones morfométricas de drenaje, se debe diseñar para este periodo de retorno.

La figura 50 muestra el instante 15000 de la modelación (4.16 horas), en donde se presenta la máxima inundación de la zona.

Figura 50. Resultado Tr 100 Años

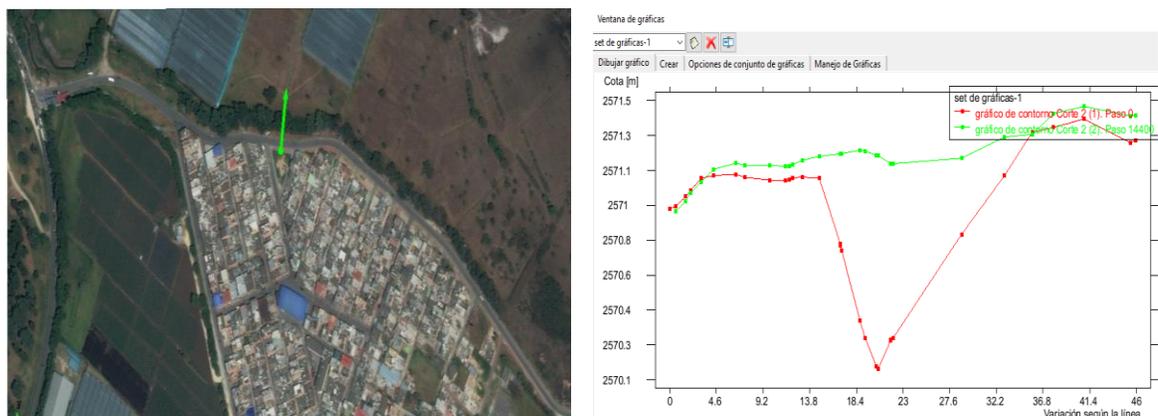


Fuente: Autor, 2018

En los resultados mostrados se observa que se alcanzan alturas de hasta 2,31 metros (color rojo) dentro del cauce de la quebrada. El desbordamiento se genera a lo largo de todo el barrio Pablo Neruda.

La sección de valores máximos obtenida para la modelación entre la carrera 13 Este y la transversal 12 Este.

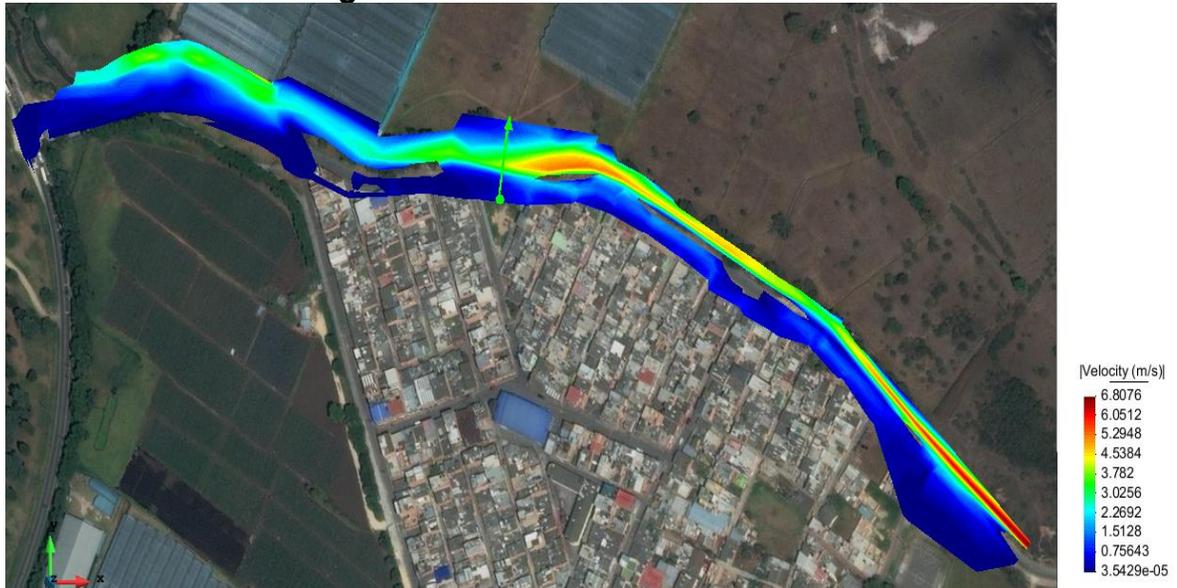
Figura 51. Sección Transversal Tr 100 Años



Fuente: Autor, 2018

Otros de los resultados que se pueden observar corresponde a las velocidades, en donde en el instante 13800, en donde se alcanzan velocidades de 6.8 m/s, como se muestra en la figura 52.

Figura 52. Velocidades Tr 100 Años



Fuente: Autor, 2018

Debido a que no se cuentan con mediciones directas sobre la quebrada se hace imposible realizar una calibración y validación del modelo con datos tomados directamente sobre la quebrada, por lo cual se procede a validar la información con el registro fotográfico con el que se cuenta, encontrando que las zonas de las que se tiene registro y abarcan el dominio de la topografía, se inundan dentro del modelo.

Figura 53. Validación Zonas Inundadas



Fuente: Autor, 2018

7.4.4 ESCENARIO 4: TR 100 AÑOS – ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

Dadas las condiciones antes descritas, se plantea el diseño base de un canal con el fin de controlar los desbordamientos sobre la quebrada La Chacua, cabe resaltar que otra alternativa de solución podría contemplar la elaboración de un embalse, pero este presentaría problemas para establecer las zonas a inundar dados los problemas prediales que se podrían presentar y la proximidad de construcciones al cauce del drenaje, dentro del alcance del trabajo se propone evaluar únicamente una posible alternativa de solución, la cual se toma como alternativa base, en este caso la proyección del canal se considera pertinente dados los eventos antes descritos.

Dentro del CD adjunto se anexa en formato digital el Anexo E Videos de Modelación, en el cual se ilustra el resultado en 3d de la modelación realizada.

Para la elaboración del escenario de la alternativa de solución, en principio se revisa lo indicado por el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio⁵⁰ en donde se especifica principalmente que:

1. Los canales deben diseñarse para que funcionen como un sistema a gravedad, utilizando las fórmulas de flujo gradualmente variado y/o modelos de flujo no permanente, evitando flujo crítico.
2. Si la sección transversal del canal es cerrada, debe cumplirse la condición de flujo a superficie libre, de tal manera que la profundidad de flujo no exceda el 90% de la altura del conducto.
3. El caudal de diseño debe tener en cuenta los aportes por canales y/o colectores tributarios; estos deben descargar al canal por encima de la cota de aguas máximas generada por el caudal de diseño del receptor. En localidades de altas pendientes se deben proyectar canales interceptores en las zonas altas del sistema.
4. Para canales revestidos en concreto, la velocidad máxima permitida es de 5.0 m/s, para otro tipo de revestimiento y en canales no revestidos, la velocidad máxima debe fijarse con base en el riesgo de erosión que pueda sufrir el canal, la cual depende del material en que este construido. Si la pendiente es elevada, debe diseñarse el canal de forma escalonada, para cumplir con los requisitos de velocidades máximas.
5. La pendiente mínima de diseño en canales revestidos debe ser aquella que no presente una velocidad inferior a 0,75 m/s
6. Deben efectuarse las prevenciones apropiadas de borde libre, incluyendo la sobreelevación del flujo causada por las curvas horizontales.

⁵⁰ MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, Ob. Cit., p. 94.

7. En la entrega a cuerpos receptores, deberán tenerse en cuenta las condiciones de remanso que se generen con la cota de aguas máximas de éste, para el periodo de retorno definido en la tabla 16, con base en el área de drenaje del cuerpo receptor en el punto de descarga.
8. Para canales abiertos se debe prever zonas de amortiguación, bermas y zonas de entrada para mantenimiento.

7.4.4.1 Periodo de Retorno

En la tabla 32 se muestra lo especificado en la tabla 16 del RAS 2017, respecto a los periodos de retorno para el diseño de canales.

Tabla 32 Periodos de Retorno (tabla 16)

Características del área de Drenaje	Periodo de Retorno (Años)
Tramos iniciales en zonas residenciales con áreas tributarias menores de 2 hectáreas	3
Tramos iniciales en zonas comerciales o industriales, con áreas tributarias menores de 2 hectáreas	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias entre 2 y 10 hectáreas	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores a 10 hectáreas	10
Canales abiertos que drenan áreas menores a 1000 hectáreas	50
Canales abiertos en zonas planas y que drenan áreas mayores a 1000 hectáreas	100
Canales abiertos en zonas montañosas (alta velocidad) o a media ladera, que drenan áreas mayores a 1000 hectáreas	100

Fuente: RAS, 2017

Se determina en primera instancia que el periodo de retorno a implementar para el diseño corresponde a 100 años.

7.4.4.2 Pre-dimensionamiento Sección Típica del Canal

Definido el periodo de retorno se procede a determinar la sección típica de canal con su respectiva geometría, la cual permita que el cauce del drenaje no exceda su capacidad impidiendo el desbordamiento del cuerpo de agua. Teniendo en cuenta que el caudal máximo alcanzado en el hidrograma obtenido corresponde a $45 \text{ m}^3/\text{s}$, se procede a determinar la geometría de la sección, teniendo varios aspectos en cuenta, como la presencia de edificaciones y/o estructuras las cuales están muy próximas al cauce del canal, por lo cual, se complica la selección de la geometría adecuada, dadas estas condiciones se determina implementar una sección trapezoidal, con revestimiento en concreto (Manning = 0,015). Se planteó un ancho de solera de 3 metros, un talud 1V:1H para las paredes del canal.

Para el pre-dimensionamiento del canal, se implementa el uso del software libre Hcanales, con el fin de validar si los parámetros indicados cumplen con las características hidráulicas necesarias. Como resultado se obtuvo que la sección determinada cumple bajo régimen supercrítico, obteniendo una velocidad de $4,14 \text{ m/s}$, con lo cual se cumple lo establecido por el RAS de no superar una velocidad de $5,0 \text{ m/s}$ para canales revestidos en concreto, además de obtener un tirante normal de $2,12 \text{ m}$ el cual se aproxima a $2,2 \text{ m}$.

Cabe resaltar que para obtener las condiciones hidráulicas antes mencionadas se estableció una pendiente longitudinal de $0,3\%$. En la Figura 54 se muestran los resultados obtenidos, respecto el pre-dimensionamiento del canal.

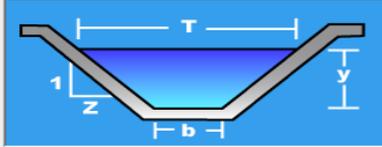
Figura 54. Pre-dimensionamiento sección canal de diseño

Cálculo de tirante normal secciones: trapezoidal, rectangular, triangular

Lugar: **Sibaté** Proyecto: **La Chacua**
Tramo: **Barrio Pablo Neruda** Revestimiento: **Concreto**

Datos:

Caudal (Q): **45.1** m³/s
Ancho de solera (b): **3** m
Talud (Z): **1**
Rugosidad (n): **.015**
Pendiente (S): **.003** m/m



Resultados:

Tirante normal (y): **2.1244** m Perímetro (p): **9.0088** m
Area hidráulica (A): **10.8866** m² Radio hidráulico (R): **1.2084** m
Espejo de agua (T): **7.2489** m Velocidad (v): **4.1427** m/s
Número de Froude (F): **1.0793** Energía específica (E): **2.9992** m-Kg/Kg
Tipo de flujo: **Supercrítico**

Calculador Limpia Pantalla Imprimir Menú Principal Calculadora

Ejecuta las operaciones 8:29 p. m. 29/08/2018

Fuente: Propio, 2018

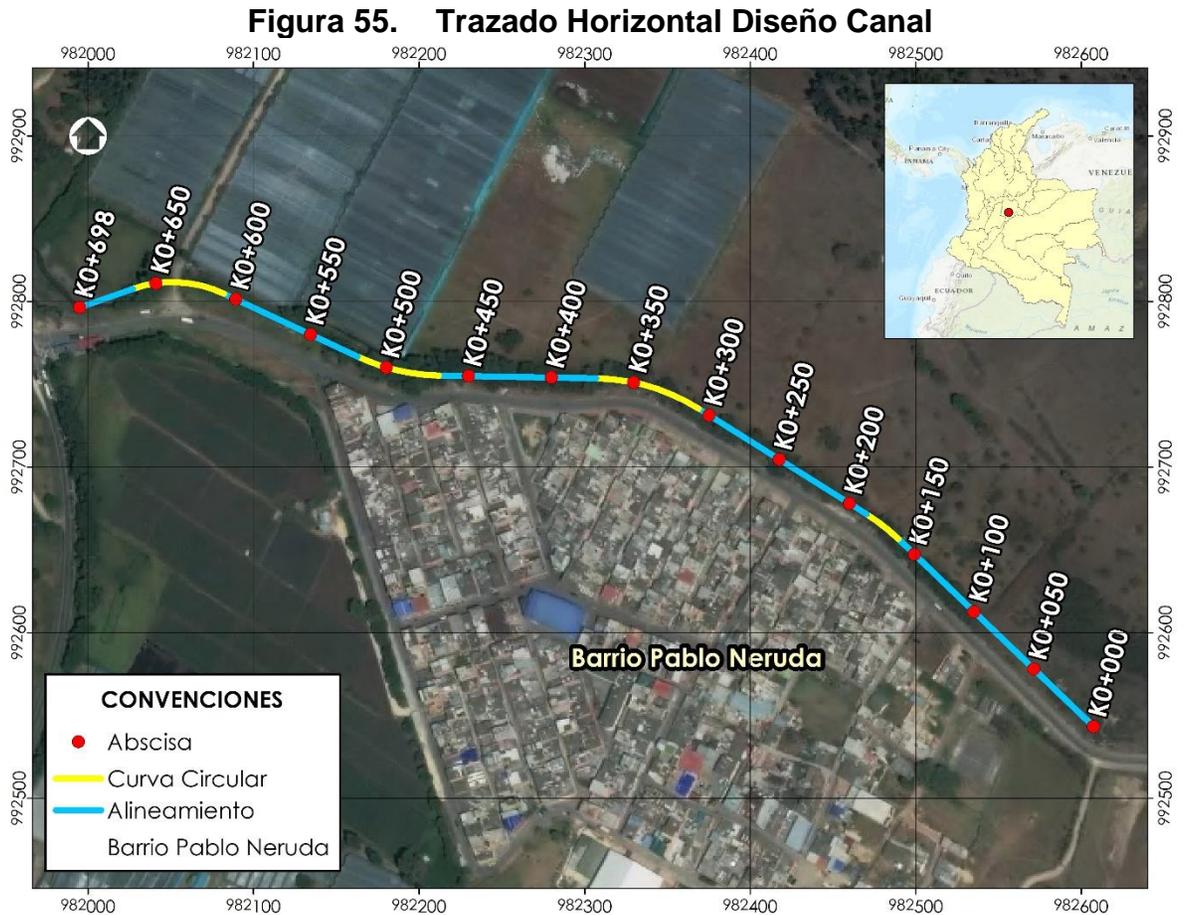
7.4.4.3 Trazado Horizontal

Para la elaboración del trazado del canal se tuvieron en cuenta dos parámetros importantes, el primero la proximidad de edificaciones y la segunda, el concepto de líneas de ceros para obtener menores cantidades en los movimientos de tierra proyectados, se aclara que para este caso dado que la proximidad a estructuras es tan alta, prima este parámetro sobre el trazado de menor corte y/o relleno, claro está sin dejar totalmente de lado este ítem.

Para la elaboración del trazado se implementó el software Auto CAD Civil 3D. El trazado en planta contempla 4 curvas simples horizontales, realizadas con el fin de obtener las deflexiones necesarias para que el trazado se adaptara a las zonas donde existen construcciones.

De las 4 curvas, 3 cuentan con un radio de 120 m y la última con un radio de 72,8m con el fin de dar una geometría adecuada al trazado del canal.

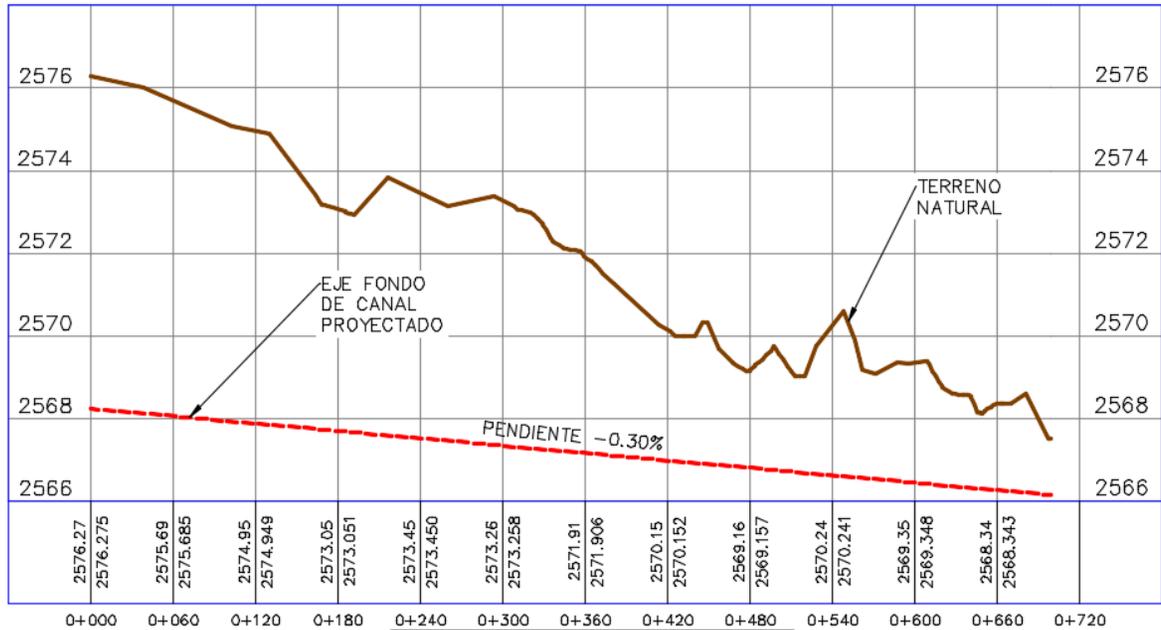
En la Figura 55 se pueden validar la localización de las 4 curvas realizadas en planta para el proyecto.



7.4.4.4 Trazado Vertical

Para la definición del trazado vertical, se establece una pendiente longitudinal del 0,3%, en la figura 56, se muestra el perfil longitudinal del terreno natural y el trazado de diseño del fondo del canal, con la respectiva pendiente antes mencionada, aumentado en escala vertical 30 veces para poder apreciar mejor el detalle.

Figura 56. Perfil de Diseño



Fuente: Propio, 2018

7.4.4.5 Dimensionamiento Final Sección Típica del Canal

Para el dimensionamiento final del canal se deben contemplar dos parámetros importantes que no se tienen en cuenta en el pre-dimensionamiento. El primer aspecto que tratar corresponde a la definición del tratamiento de las sobreelevaciones de la lámina de agua generadas en las curvas horizontales del canal debido a la acción de la fuerza centrífuga, generando un aumento de la banca exterior y una disminución de la banca interior de la curva, situación que en época de crecientes generaría el desbordamiento del cauce en estas zonas. Para controlar las sobreelevaciones generadas existen varios métodos, para este diseño se opta por la utilización de peraltes en estas zonas.

Según lo indicado por Ven te Chow et all⁵¹, una forma de calcular el peralte puede determinarse igualando la componente gravitacional a lo largo de la pendiente transversal con la fuerza centrífuga determinada mediante el radio de curvatura y la velocidad.

$$S_t = \frac{V^2}{g r}$$

Reemplazando estos valores se obtiene una pendiente del 2,5%, la cual al correr el modelo no es suficiente para controlar el desbordamiento del cauce, por lo cual se decide implementar una pendiente máxima del 6%.

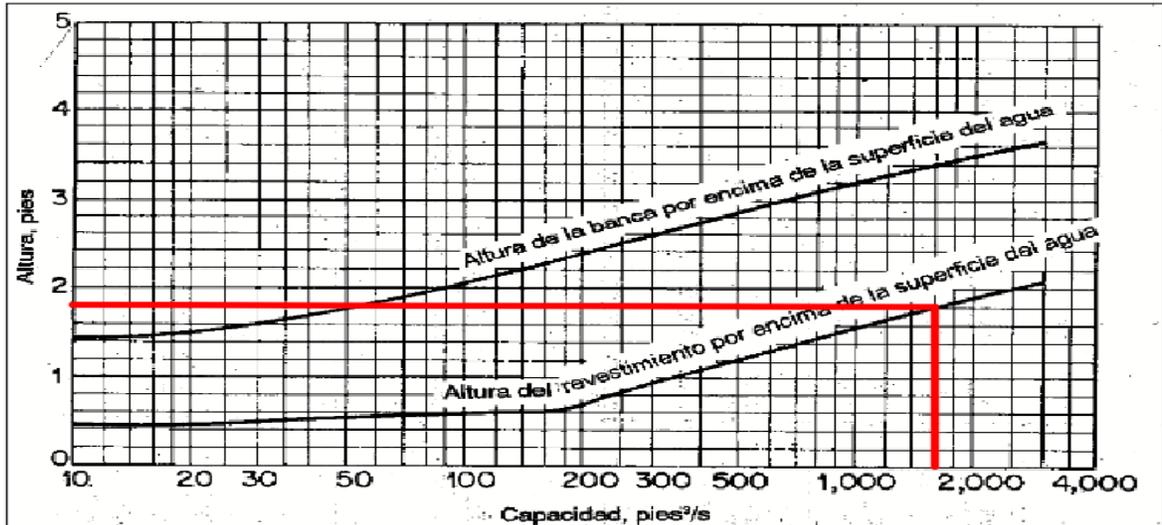
Al igual que en el diseño geométrico de una vía es necesario determinar una longitud de desarrollo para alcanzar el peralte máximo, en el cual este se va desarrollando de forma progresiva, para esto se decide implementar una longitud de desarrollo del 66,67%.

El segundo aspecto importante para tener en cuenta para la definición final de la sección típica corresponde a la determinación del borde libre del canal. Según Ven te Chow et all⁵², el borde libre debe ser lo suficientemente grande para prevenir que ondas o fluctuaciones que generen reboses, para ello la U.S. Bureau of reclamation elaboró unas curvas para la determinación de este parámetro.

⁵¹ VEN TE, Chow. Hidráulica de Canales Abiertos., Colombia. McGraw-Hill, 2004. 446 p.

⁵² Ibid., p. 156.

Figura 57. Borde Libre

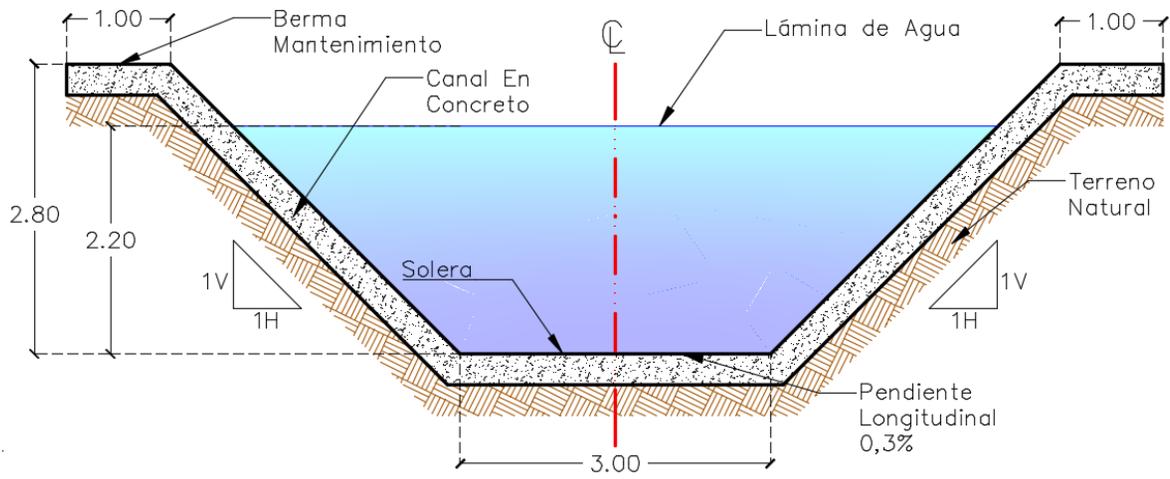


Fuente: Ven Te Chow, 2004

Como se muestra en la Figura 57, según las curvas recomendadas por la U.S. Bureau of reclamation, para el diseño corresponde un borde libre de 1,8 ft, correspondiendo a 0,55 m, valor el cual se aproxima para el diseño a 0,60 metros. Por lo anterior la altura total del canal proyectado corresponde a 2,8 metros.

Otros aspectos importantes determinados para la sección típica del canal corresponden a la definición de una zona de amortiguación o berma para el mantenimiento de este, por lo cual se determinó una banca de 1 metro de ancho a cada lado. El talud proyectado de corte es de 1H:1V y de relleno 2H:1V sobre el terreno natural. En la Figura 58, se ilustra la sección típica del canal proyectado.

Figura 58. Sección Típica de Diseño



Fuente: Propio, 2018

7.4.4.6 Modelo Hidráulico

Definida la sección a implementar se procede con la generación del canal proyectado sobre el terreno natural, en la figura 59 se muestra el terreno proyectado generado en el software Civil 3D.

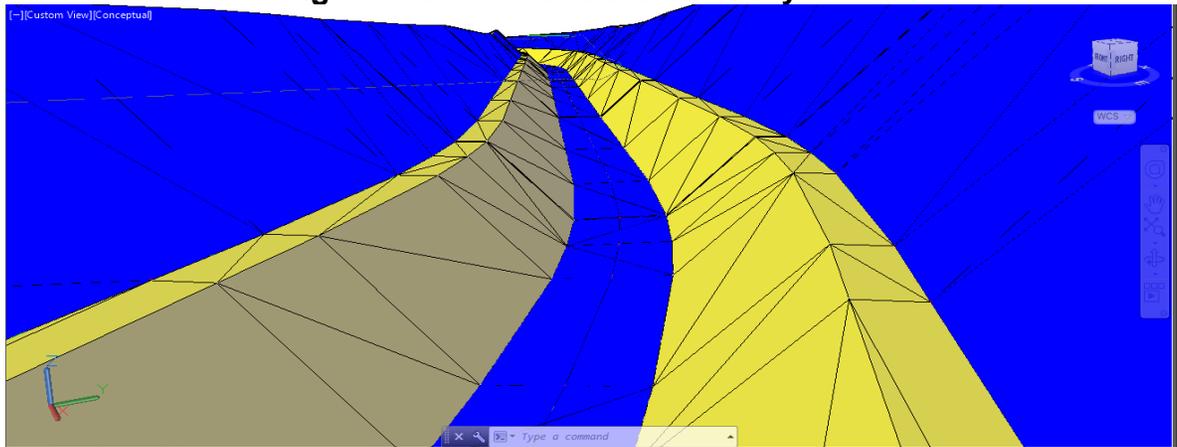
Figura 59. Terreno Proyectado



Fuente: Propio, 2018

La sección del corredor proyectado se ilustra en la figura 60, en donde se muestra con más detalle la geometría definida.

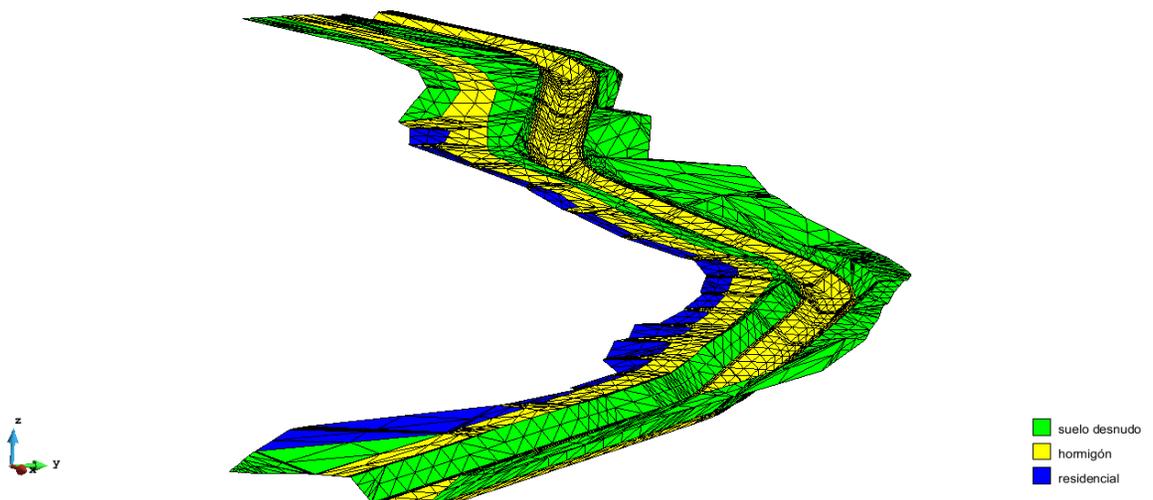
Figura 60. Sección Terreno Proyectado



Fuente: Propio, 2018

Al extraer la triangulación generada y asignar el mismo hidrograma con un periodo de retorno de 100 años y se asignan los nuevos valores de los coeficientes de Manning.

Figura 61. Coeficientes de Manning Modelo



Fuente: Propio, 2018

El resultado del modelo obtenido muestra que en ningún instante se presenta el desbordamiento del cauce, con lo cual se cumple el propósito del diseño proyectado.

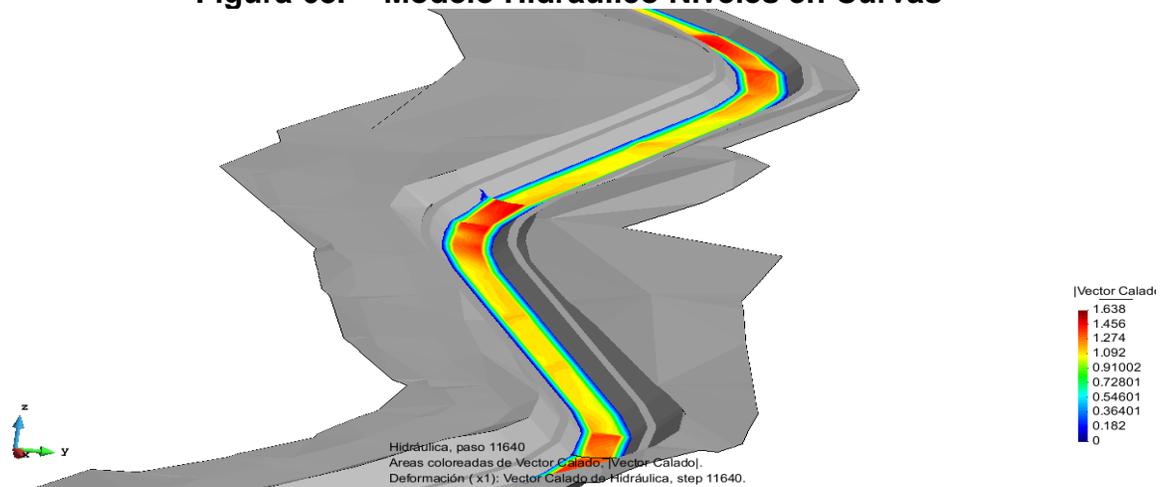
Figura 62. Modelo Hidráulico Diseño



Fuente: Propio, 2018

En la figura 63, se muestra el modelo total, respecto a las láminas de agua obtenidas, en donde se observa que en las curvas es donde se presentan mayores tirantes.

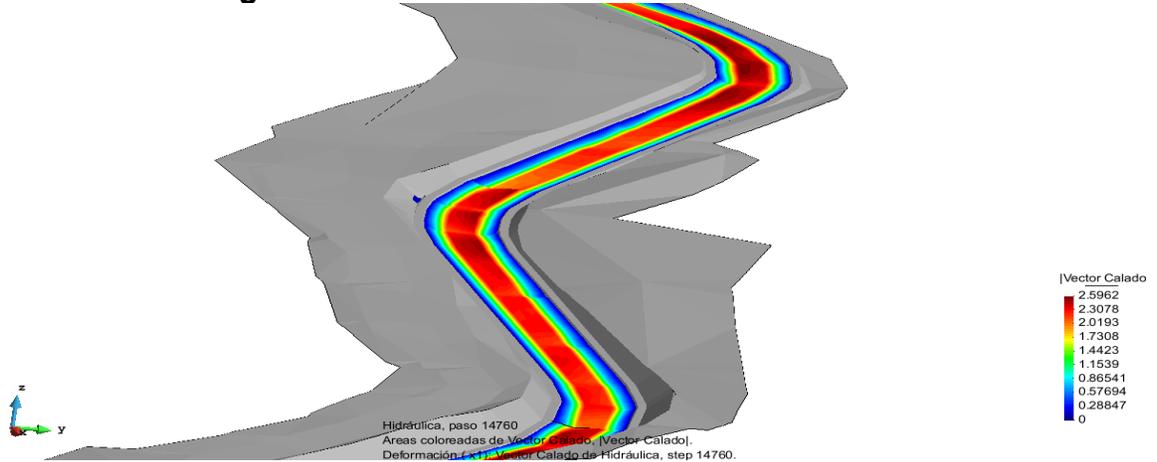
Figura 63. Modelo Hidráulico Niveles en Curvas



Fuente: Propio, 2018

En la figura 64, se muestra la lámina máxima de agua obtenida, se aprecia que no son sobrepasadas las bermas proyectadas para mantenimiento, cuando se presenta el máximo caudal en el sistema.

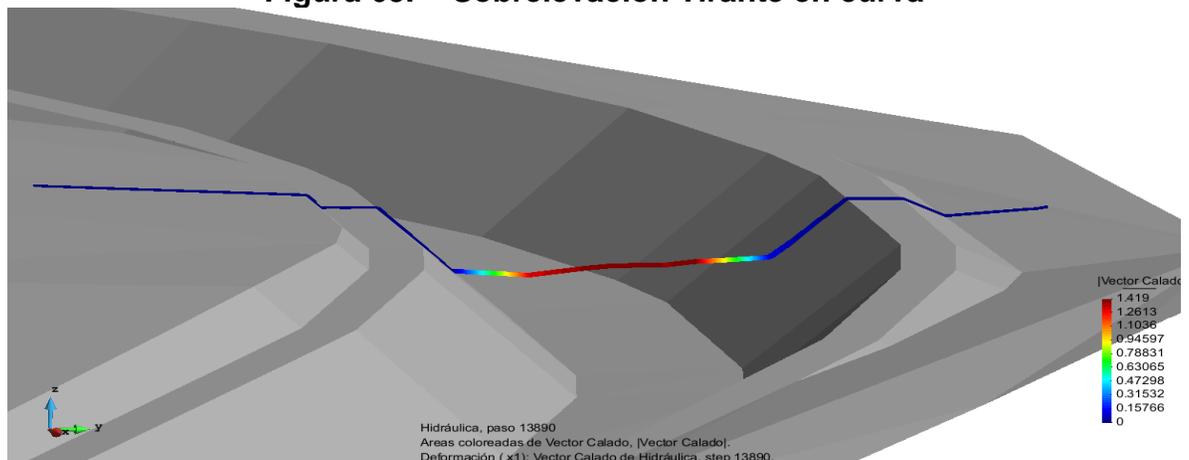
Figura 64. Modelo Hidráulico Máximo tirante



Fuente: Propio, 2018

En la figura 65, se muestra una sección en 2D, donde se ilustra la lámina de agua sobre el canal en una de las curvas, se aprecia la sobrelevación sobre la banca exterior de la curva mientras en la banca interior se presenta una disminución, situación esperada por la acción de la fuerza centrífuga en la curva.

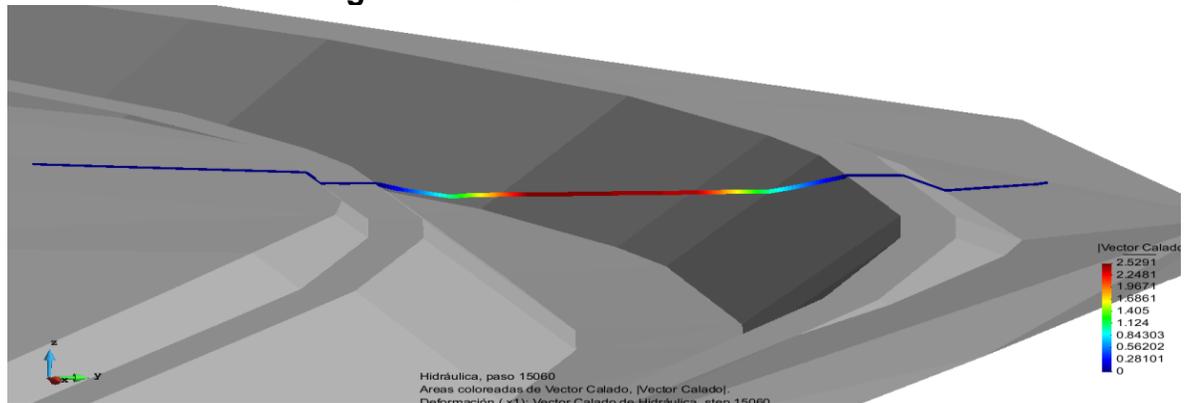
Figura 65. Sobrelevación Tirante en curva



Fuente: Propio, 2018

Por otra parte, en la figura 66, se muestra una sección en 2D de la última curva en donde se muestra el tirante máximo alcanzado, evidenciando que en ningún instante se presenta el desbordamiento del drenaje.

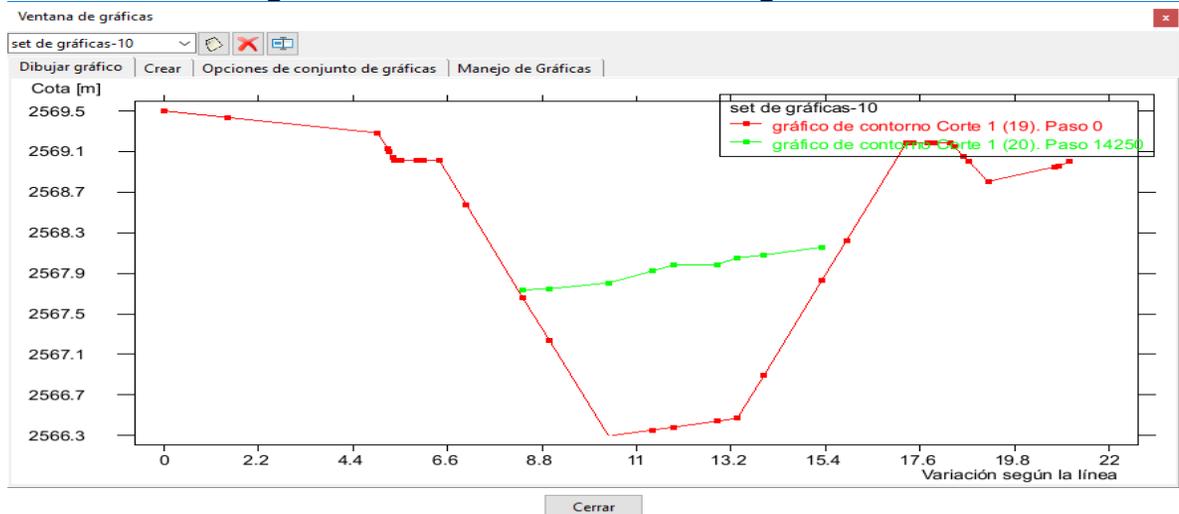
Figura 66. Sección Tirante Máximo



Fuente: Propio, 2018

Se obtienen algunas secciones del modelo hidráulico, con el fin de evidenciar la implementación de los peraltes y poder apreciar el comportamiento de la lámina de agua sobre una de las curvas. En la figura 67, se muestra la altura de la lámina de agua en el segundo 14250 de la modelación.

Figura 67. Sección Hidráulica Segundo 14250



Fuente: Propio, 2018

8 CONCLUSIONES

La evaluación de la alternativa de solución en el modelo hidráulico Iber 2D, arrojó como resultado poder controlar el desbordamiento de la quebrada La Chacua para periodos de retorno de hasta 100 años, mediante la proyección de un canal revestido en concreto de sección trapezoidal

La hidrología de la zona de estudio presenta una precipitación promedio a nivel multianual de la cuenca La Chacua corresponde a 34.336 mm, con una desviación estándar de 0,81mm.

La topografía evidencia una pendiente media ponderada corresponde al 22,84% siendo en promedio un terreno con una pendiente fuertemente inclinada, dadas las elevaciones de la cuenca de estudio se tiene que la fisiografía de la cuenca corresponde a valles extensos y cumbres escarpadas.

El valor del número de curva obtenida para la cuenca La Chacua corresponde a 74, lo cual indica en su mayoría la presencia de Mosaicos de Pastos y Cultivos, señalando una alta tasa de pérdidas por infiltración.

Con base al modelo lluvia-escorrentía establecido, el máximo caudal con menos probabilidad de ocurrencia obtenida para la modelación corresponde a 45.1m³/s para el periodo de retorno de 100 años, con una duración de lluvia de 6 horas, obtenida a partir de un análisis de curvas sintéticas regionalizadas para Colombia.

El máximo caudal con más probabilidad de ocurrencia corresponde a 10.5m³/s, para el cual corresponde el periodo de retorno de 2,33 años.

Dadas las condiciones actuales de la quebrada la Chacua, la modelación en el software Iber evidencia que la capacidad del drenaje no es suficiente para contener

una precipitación con periodo de retorno superior a los 50 años, ya que a partir de esta se genera el desbordamiento del drenaje afectando al barrio Pablo Neruda.

Los resultados de las modelaciones realizadas respecto a condiciones actuales del sistema evidencian la necesidad de la definición de un canal que genere un adecuado drenaje de las aguas lluvias.

Con base a los resultados obtenidos del modelo de diseño respecto la alternativa de solución, el barrio Pablo Neruda se beneficiará con la construcción de un canal de sección trapezoidal revestido en concreto, con una sección típica de ancho de solera de 3 metros, un talud de 1H:1V y una profundidad de 2.8 metros, permitiendo drenar adecuadamente la escorrentía generada para precipitaciones con periodos de retorno de hasta 100 años, impidiendo que se genere el desbordamiento del cuerpo de agua y que se afecte a la población aferente al drenaje con una velocidad inferior a los 5m/s.

Iber es una gran herramienta computacional para la ingeniería civil, respecto a la hidráulica de canales, ya que permite simular distintos escenarios que den una solución adecuada a una problemática entorno a un cuerpo de agua que aqueje a un asentamiento poblacional, aplicando formulas teóricas sobre cada nodo de la malla generada del modelo digital de terreno, permitiendo generar una gran cantidad de cálculos simultáneamente, arrojando resultados precisos, siendo un gran aporte para la comunidad tanto estudiantil como profesional.

9 SUGERENCIAS

- La quebrada la Chacua no cuenta con una red meteorológica de medición propia y más cercanas son de categoría meteorológica, por ende, se hace necesario la implementación de estaciones hidrométricas aledañas para controlar con mayor precisión las condiciones meteorológicas de la zona de estudio.
- Se recomienda tener especial cuidado con la pendiente del canal proyectado, debido que al ser tan baja (0.3%), una inadecuada aplicación de esta puede incidir en los cambios de velocidad del drenaje, llegando a superar los 5 m/s permitidos por la norma para el revestimiento de hormigón, generando posibles problemas de erosión.
- Por otra parte, se recomienda dejar un corredor de 1 metro a ambos lados de la sección señalada, como se proyecta en el modelo, para el mantenimiento del canal, ya que este no influye en los aspectos hidráulicos de este.
- Se recomienda tener en cuenta los planes de ordenamiento territorial, en donde se especifican las rondas hídricas de los drenajes, para evitar el asentamiento de poblaciones muy próximas a cuerpos de agua, previniendo de esta forma catástrofes naturales.
- Se recomienda brindar orientación a la comunidad del Barrio Pablo Neruda para el manejo y cuidado de los cuerpos de agua, ya que de esto depende el adecuado funcionamiento del canal proyectado. Como se mostró uno de los principales causantes de las inundaciones se debe a la disposición de basuras sobre el drenaje, lo cual impide el adecuado flujo.

- Se sugiere impulsar el uso de software en instituciones de educación superior, principalmente de software libre que no tienen ningún costo, para ampliar la aplicación de conocimientos de los estudiantes que futuramente serán profesionales, con la respectiva supervisión del cuerpo docente capacitado, para el adecuado manejo de la herramienta computacional.

- Los taludes referenciados respecto a corte y relleno en el terreno natural deberán ser protegidos con biomallas o geobolsas que permitan taludes verdes amigables con el medio ambiente, además de la contemplación de obras que impidan la desestabilización del terreno aledaño a estructuras existentes.

11. BIBLIOGRAFÍA

GOBIERNO DE ESPAÑA, *et al.* Modelación bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de Referencia Hidráulico. España, 2010, 59 p.

IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. 2008. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 200p. + 164 hojas cartográficas.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso. M40100-02/14 Versión 2. Bogotá D.C.: IGAC, 2014. 43p.

MEJÍA, Luis Fernando. Departamento Nacional de Planeación (DNP). Índice Municipal de riesgo de desastres de Colombia, Colombia, 2018.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Documentación Técnico Normativa del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Resolución 0330. Bogotá D.C., 2017. 182 p.

MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la Ingeniería., 2 ed. Colombia. Alfaomega grupo editor, S.A., 1999. 364 p. ISBN 970-15-0404-6.

MONTAÑA FORERO, Luis Esteban. Calibración de los modelos hidrológico e hidráulico para el sistema de alerta temprana para inundación por desbordamiento para la quebrada Chiguaza. Tesis de Maestría en ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil, 2015. 110 p.

OCHOA GARCÍA, Sergio Aurelio, *et al.* Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, provincia de Córdoba. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Serie A. Córdoba, Argentina. Septiembre, 2016, vol. 3, no. 2. ISSN 2362 - 2539 (Versión electrónica).

REYES, Roberto, *et all*, Metodología de la investigación. 6 ed. México.:McGraw-Hill, 2014. 600 p. ISBN 978-1-4562-2396-0.

RODRIGUEZ RINCON, Juan Pablo. Estimación probabilística de mapas de inundación: una metodología basada en ensambles. Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil, énfasis en hidráulica. México D.F.: UNAM,2016. 163 p.

UNESCO, *et al.* International Glossary Of Hydrology, Suiza, 2012. 461 p. ISBN 978-92-63-03385-8.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, HEC-RAS river analysis System, Hydraulic Reference Manual, Estados Unidos, 2016, 538 p.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC MODELING SYSTEM, HEC-HMS, User`s Manual, Estados Unidos, 2010, 306 p.

VARGAS R. y GRANADOS M.D. Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. Universidad de Los Andes, 1998. p. 187-200

VEN TE, Chow. Hidráulica de Canales Abiertos., Colombia. McGraw-Hill, 2004. 667 p. ISBN 958-600-228-4.

VEN TE, Chow. Hidrología Aplicada., Colombia. McGraw-Hill, 2000. 584 p. ISBN 958-600-171-7.

VERA RUIZ, Daniel Armando. Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca alta del río Bogotá, en el municipio de villapinzón, utilizando modelación hidrológica hec-hms e hidráulica 1d y 2d hec-ras e íber. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Facultad Ingeniería Civil, 2015. 626 p.