

**APLICACIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA É HIDRÁULICA
HEC-HMS Y HEC-RAS PARA LA ESTIMACIÓN DE MANCHAS DE
INUNDACIÓN A UNA ESCALA DE 1:25.000 EN LA CUENCA DEL RÍO CHICÚ.**

PRESENTADO POR:

**JUAN CAMILO PÉREZ MARTÍNEZ
CRISTIAN DAVID BARBOSA CADENA**

ENTREGA FINAL

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D. C.**



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**APLICACIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICO É HIDRÁULICO
HEC-HMS Y HEC-RAS PARA LA ESTIMACIÓN DE MANCHAS DE
INUNDACIÓN A UNA ESCALA DE 1:25.000 EN LA CUENCA DEL RÍO CHICÚ.**

**PRESENTADO POR:
JUAN CAMILO PÉREZ MARTÍNEZ
CRISTIAN DAVID BARBOSA CADENA**

**Ing. Dayam Calderón Rivera
Director del proyecto**

**Ing. José Luis Díaz Arévalo
Codirectora del proyecto**

Trabajo de grado

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D. C.
2018**

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
3.	DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROYECTO	13
4.	JUSTIFICACIÓN.....	14
5.	OBJETIVOS.....	15
5.1	Objetivo General.....	15
5.2	Objetivos Específicos	15
6.	RESUMEN.....	16
7.	MARCO TEÓRICO	17
7.1	Términos.....	17
7.2	Modelo Hidrológico	19
7.2.1	Definición del modelo	19
7.3	Aplicación de Software de Sistemas Información Geográfica en el modelo 20	
7.3.1	ArcGIS.....	21
7.3.2	HecGeoRas.....	21
7.4	Métodos y Parámetros para Modelo Hidrológico en Hec-Hms	21
7.4.1	Método de pérdidas Soil Moisture Accounting	21
7.4.2	Método de transformación SCS <i>Unit Hydrograph</i>	22
7.4.3	Método Muskingum - Cunge	24
7.4.4	Series de tiempo	24
7.4.5	Secciones transversales	24
7.4.6	Modelo Meteorológico – <i>Meteorologic Models</i>	24
7.4.7	Control de especificaciones – <i>Control Specifications</i>	25
7.4.8	Crear una simulación – <i>Create Simulations Runs</i>	26
7.4.9	Metodología de completado de datos	26
7.4.10	Metodología para la transposición de caudales	27
7.4.11	Método Soil Conservations Service (SCS).....	29
7.4.12	Soil Water Characteristics.....	31
7.4.13	Métricas de Calibración.....	32
7.5	Métodos y Parámetros para Modelo Hidráulico en Hec-Ras	34
7.5.1	Parámetros de Geometría del cauce.....	35
7.5.2	Coeficiente de Manning.....	35
7.5.3	Tipos de flujos en canales abiertos	37
7.5.4	Simulación de flujo permanente en Hec – Ras	37
7.5.5	Numero de Froude	38
8.	MARCO CONTEXTUAL	39



8.1	Localización Geográfica	39
8.2	Morfometría de la cuenca	40
8.2.1	Parámetros físicos.....	40
8.2.2	Datos topográficos de la cuenca	40
8.2.3	Parámetros de forma.....	41
8.2.4	Parámetros de relieve	45
8.2.5	Parámetros del Cauce.....	48
8.3	Climatología.....	52
8.3.1	Precipitación.....	52
8.3.2	Temperatura.....	61
8.3.3	Caudales	66
8.4	Suelo	69
8.5	Cobertura y uso del suelo	73
8.6	Hidrogeología	75
8.7	Metodologías de los modelos hidrológico E hidraulicos	78
9.	Modelo Hidrológico	81
9.1	Caracterización y definición de las subcuencas	81
9.2	Trazado del modelo base	82
9.3	Asignación de información a <i>SubCuencas, uniones y ríos</i>	83
9.4	Modelo meteorológico	86
9.5	calibración Y VALIDACIÓN	86
9.5.1	Método Soil Conservations Service (SCS).....	86
9.5.2	Aplicación del método de transposición de caudales	87
9.5.3	Calibración y Validación del Modelo Hidrológico.....	89
9.6	Resultados Modelo Hidrologico	95
9.6.1	Resultados Modelo Hidrológico Subcuenca Santillana	95
9.6.2	Resultados Modelo Hidrológico cuenca Chicú	96
10.	Modelo Hidráulico	100
10.1	Levantamiento y preproceso de datos para modelo hidráulico.....	100
10.1.1	Topografía.....	100
10.1.2	Calculo de caudales pico	106
10.2	Geometría del Río Chicú	108
10.2.1	Secciones de análisis	108
10.2.2	Estructuras hidráulicas.....	111
10.3	Asignación coeficiente de Manning	114
10.4	Simulación de flujo permanente en Hec-Ras.....	115
10.4.1	Condiciones de contorno	115

10.5	Calibración del modelo	116
10.6	Análisis de resultados obtenidos	118
10.6.1	Zonas críticas.....	132
11.	Medidas de mitigación.....	135
11.1	Propuestas de medidas de mitigación para la cuenca del río chicú	141
12.	CONCLUSIONES	143
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
14.	BIBLIOGRAFÍA	150

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 7-1	Calculo de pesos estaciones – Subcuenca Santillana.....	25
Tabla 7-2	Condición de Humedad antecedente - Precipitación total en los 5 días anteriores.....	29
Tabla 7-3	Grupos hidrológicos del suelo.....	30
Tabla 7-4	Números de curva de escorrentía.....	31
Tabla 7-5	Valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe	34
Tabla 8-1	Clasificación de cuencas de acuerdo a su área.....	40
Tabla 8-2	Factores de forma de la cuenca	41
Tabla 8-3	Rangos de índices de forma	41
Tabla 8-4	Rangos de Índice de Gravelius o Coeficiente de compacidad	42
Tabla 8-5	Rangos de Índice de Alargamiento.....	43
Tabla 8-6	Rangos de Coeficiente Orográfico	48
Tabla 8-7	Rangos de densidad de drenajes	48
Tabla 8-8	Rango de Rugosidad de Drenaje.....	51
Tabla 8-9	Estaciones Utilizadas para el análisis de precipitación	52
Tabla 8-10	Porcentajes de datos faltantes.....	52
Tabla 8-11	Porcentajes de datos faltantes.....	53
Tabla 8-12	Valores mínimos, medios y máximos precipitaciones anuales	55
Tabla 8-13	Calculo de la precipitación media de la cuenca del río Chicú	58
Tabla 8-14	Precipitación mensual por estación – Periodo de estudio 2010.....	59
Tabla 8-15	Precipitación mensual por estación – Periodo normal 2013	59
Tabla 8-16	Estaciones meteorológicas para el análisis de temperatura	61
Tabla 8-17	Temperatura Mínima Abr – Nov 2010.....	65
Tabla 8-18	Leyenda fisiográfica pedológica Subcuenca río Chicú.....	70
Tabla 8-19	Leyenda de clasificación por capacidad de uso de la subcuenca del río Chicú.....	71
Tabla 8-20	Tipos de suelo	72
Tabla 8-21	Descripción nomenclatura CLC para la cobertura de la cuenca del río Chicú.....	74
Tabla 8-22	Acuíferos presentes en la cuenca del río Chicú.....	76
Tabla 8-23	Áreas de acuíferos en la cuenca del río Chicú	77

Tabla 9-1 Subcuencas – Cuenca río Chicú	81
Tabla 9-2 Calculo de porcentaje de impermeabilidad	84
Tabla 9-3 Valores ingresados para las ocho subcuencas.....	85
Tabla 9-4 Pesos de las estaciones para cada subcuenca	86
Tabla 9-5 CN para las ocho subcuencas - Cuenca del río Chicú.....	86
Tabla 9-6 Parámetros de mejor ajuste – Método de pérdida SMA.	90
Tabla 9-7 Coeficiente de correlación – Cuenca río Chicú	93
Tabla 9-8 Criterio de Schultz.....	95
Tabla 9-9 Índice de Nash - Sutcliffe	95
Tabla 9-10 Caudales estación piloto y calculados cuenca río Chicú	97
Tabla 9-11 Valores medios de Caudal obtenidos con el modelo Hec – Hms	97
Tabla 9-12 Resultados obtenidos para cada subcuenca	98
Tabla 10-1. Información Cartográfica IGAC de la cuenca del río Chicú.....	100
Tabla 10-2 Caudal para un periodo de retorno de 5 Años	108
Tabla 10-3 Caudal para un periodo de retorno de 25 años	108
Tabla 10-4 Caudal para un periodo de retorno de 50 años	108
Tabla 10-5 Caudal para un periodo de retorno de 100 años	108
Tabla 10-6. Coeficiente de Manning fondo del río Chicú.	114
Tabla 10-7. Coeficiente de Manning de áreas aledañas al río Chicú.....	115
Tabla 10-8 Caudales ingresados al programa HEC RAS.	115
Tabla 10-9. Niveles de lámina de agua y de aforo sección de control parte alta de la cuenca (Sección 19696.22).....	116
Tabla 10-10. Niveles de lámina de agua y de aforos sección de control parte baja de la cuenca (sección 2628.22).	116
Tabla 10-11 Áreas con vulnerabilidad alta por manchas de inundación de 5 años.	118
Tabla 10-12 Áreas con vulnerabilidad alta por manchas de inundación de 25 años.	118
Tabla 10-13 Áreas con vulnerabilidad alta por manchas de inundación de 50 años.	118
Tabla 10-14 Áreas con vulnerabilidad alta por manchas de inundación de 100 años.....	118
Tabla 10-15. Características de mancha de inundación zona critica 1 para los diferentes periodos de retorno.	133
Tabla 10-16. Características de mancha de inundación zona critica 2 para los diferentes periodos de retorno.	133
Tabla 10-17. Características de mancha de inundación zona critica 3 para los diferentes periodos de retorno.	134
Tabla 11-1 Características del material granular para llenado de gaviones	138
Tabla 11-2. Requisitos de los materiales para terraplenes	140

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 7-1 Ciclo de escorrentía.....	19
Ilustración 7-2 SCS Unit Hydrograph	23
Ilustración 7-3 Ilustración interfaz Soil Water Characteristics	32
Ilustración 8-1 Localización Cuenca del río Chicú	39
Ilustración 8-2 Áreas de las Vertientes – Índice Asimétrico.	43
Ilustración 8-3 Cuenca del río Chicú y rectángulo para Índice de Homogeneidad.	45
Ilustración 8-4 Curvas de Nivel Cuenca río Chicú.....	46
Ilustración 8-5 Interpretación Curva Hipsométrica.	47
Ilustración 8-6 Red de drenajes de la Cuenca del río Chicú	49
Ilustración 8-7 Clasificación de Horton.....	50
Ilustración 8-8 Distribución espacial de la precipitación – abril 2010 a noviembre 2010.....	60
Ilustración 8-9 Distribución Espacial de la temperatura Mínima Media Abr – Nov. 2010.....	63
Ilustración 8-10 Mapa de delimitación y ubicación de la Cuenca Piloto – Cuenca Río Chicú	66
Ilustración 8-11 Mapa fisiográfico pedológico Subcuenca río Chicú	72
Ilustración 8-12 Mapa de Cobertura Vegetal Cuenca río Chicú	74
Ilustración 8-13 Mapa hidrogeológico Cuenca Río Chicú	78
Ilustración 8-14. Metodología modelo hidrológico río Chicú.	79
Ilustración 8-15. Metodología modelo hidráulico río Chicú.	80
Ilustración 9-1 Subcuencas – Cuenca del río Chicú	82
Ilustración 9-2 Modelo básico trazado - Cuenca río Chicú.....	83
Ilustración 10-1. DEM cuenca del río Chicú con información secundaria.	101
Ilustración 10-2. Levantamiento de sección del río Chicú parte baja de la cuenca.	102
Ilustración 10-3. Integración geometría de cauce e información secundaria.	104
Ilustración 10-4. Modelo de elevación digital del terreno – Cuenca del Río Chicú.	105
Ilustración 10-5. Geometría del cauce del Río Chicú y secciones de trabajo.	110
Ilustración 10-6. Geometría Box Culvert 1 implantado sobre el modelo.	111
Ilustración 10-7. Geometría Box Culvert 2 implementado sobre el modelo.	112
Ilustración 10-8. Geometría Puente 1 implementado sobre el modelo.	112
Ilustración 10-9. Puente 2 implementado sobre el modelo.	113
Ilustración 10-10. Modelo Hidráulico HEC – RAS del Río Chicú.....	114
Ilustración 10-11. Resultado calibración sección de aforo 19696.22.	117
Ilustración 10-12. Resultado calibración sección de aforo 19696.22.	117
Ilustración 10-13. Resultado grafico de la simulación hidráulica de sección 15946.48 parte alta de la cuenca del Río Chicú.	119
Ilustración 10-14. Resultado grafico de la simulación hidráulica de sección 8886.558 parte media de la cuenca del Río Chicú.	119
Ilustración 10-15. Resultado grafico de la simulación hidráulica de sección 138.90	

parte baja de la cuenca del Río Chicú.	120
Ilustración 10-16. Perfil longitudinal de la lámina de agua de la creciente con período de retorno de 5 años en el río Chicú.....	125
Ilustración 10-17. Mancha de inundación para un periodo de retorno de 5 años del Río Chicú.	126
Ilustración 10-18. Perfil longitudinal de la lámina de agua de la creciente con período de retorno de 25 años en el río Chicú.....	127
Ilustración 10-19. Mancha de inundación para un periodo de retorno de 25 años del Río Chicú.	128
Ilustración 10-20. Perfil longitudinal de la lámina de agua de la creciente con período de retorno de 50 años en el río Chicú.....	129
Ilustración 10-21. Mancha de inundación para un periodo de retorno de 50 años del Río Chicú.	130
Ilustración 10-22. Mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años del Río Chicú.	131
Ilustración 10-23. Localización Zonas Críticas del Río Chicú.	132
Ilustración 11-1 Principales partes de un dique artificial	135
Ilustración 11-2 Partes de un Dique en talud	136
Ilustración 11-3 Gavión.....	137
Ilustración 11-4 Terraplén	139
Ilustración 11-5 Zonas Críticas del Río Chicú.	141

CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1	23
Ecuación 2	23
Ecuación 3	26
Ecuación 4	27
Ecuación 5	27
Ecuación 6	27
Ecuación 7	27
Ecuación 8	28
Ecuación 9	28
Ecuación 10	28
Ecuación 11	28
Ecuación 12	32
Ecuación 13	33
Ecuación 14	33
Ecuación 15	33
Ecuación 16	33
Ecuación 17	34
Ecuación 18	34
Ecuación 19	35

Ecuación 20	35
Ecuación 21	36
Ecuación 22	36
Ecuación 23	36
Ecuación 24	36
Ecuación 25	37
Ecuación 26	37
Ecuación 27	37
Ecuación 28	38
Ecuación 29	41
Ecuación 30	42
Ecuación 31	42
Ecuación 32	44
Ecuación 33	44
Ecuación 34	46
Ecuación 35	48
Ecuación 36	49
Ecuación 37	51
Ecuación 38	51

ANEXOS

Anexo 1. Resultados modelación Hidrológica.

Anexo 2. Resultados modelación Hidráulica.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo al Reporte Final de Áreas de Afectadas por Inundaciones 2010 – 2011 publicado por el IDEAM, IGAC y el DANE, el departamento de Cundinamarca posee un área de inundación periódica aproximada de 7.802 ha. Esta área se vio drásticamente superada cuando el fenómeno de variabilidad climática denominado “La Niña”, hizo presencia en el territorio colombiano.

Durante el transcurso del año 2010 se inició el proceso de formación del fenómeno de La Niña, el cual se caracteriza por el enfriamiento de las temperaturas de las aguas del océano Pacífico por debajo de lo normal, el cual provoca un cambio en el patrón del comportamiento de los vientos y por ende el de las lluvias con un incremento de estas sobre la región Caribe y Andina (Reporte final inundaciones, 2011).

Este fenómeno dejó alrededor de 181 personas fallecidas y más de 30.000 personas damnificadas solo en el departamento de Cundinamarca, según el Informe Final de Damnificados por la Emergencia Invernal 2010 – 2011.

Esto se produjo por el aumento de lluvia en la zona, lo cual superó la capacidad de almacenamiento del suelo, lo que produjo el incremento del caudal que colmató la capacidad de los cauces para conducir esta agua, generando el desbordamiento del agua de tal manera que se llenó la zona de inundación natural a los costados del río, en donde se localizaban asentamientos humanos, las cuales quedaron sumamente afectadas por estas crecientes.

A pesar de la existencia de normativas que establecen una distancia mínima entre un cuerpo de agua y una estructura civil para uso público, las personas hacen caso omiso a estas reglas de tal manera que ponen en riesgo la vida de todo su núcleo familiar. En algunos casos, la falta de socialización por parte de las entidades competentes con la comunidad acerca de estas normas da vía libre para que las personas construyan en zonas de riesgo de inundación. El Decreto 469 de 2003 establece: *“Ronda Hidráulica se define como: zona de protección ambiental e hidráulica no edificable de uso público, constituida por una franja paralela o alrededor de los cuerpos de agua, medida a partir de la línea de marea máxima (máxima inundación), de hasta 30 metros de ancho destinada principalmente al manejo hidráulico y restauración ecológica”*.

Por lo tanto, se hace necesario un estudio hidrológico e hidráulico en la Cuenca del río Chicú, con el fin de determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca y así mismo obtener las áreas de inundación mediante software de modelación, de tal manera que se puedan plantear estrategias de mitigación en estas zonas, reduciendo el número de pérdidas de vidas humanas y pérdidas económicas para los habitantes y municipios.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Según el IDEAM *“Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce, superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas”* (IDEAM, s.f.).

Las inundaciones han sido uno de los fenómenos naturales más destructivos en el país que han cobrado vidas humanas y pérdidas materiales, como por ejemplo en junio del 2002 en la ciudad de Bogotá se presentaron fuertes lluvias que provocaron grandes eventos de inundación en los barrios Tunjuelito, San Benito, Abraham Lincon y Nuevo Muzú a causa del desbordamiento del Río Tunjuelo, damnificando a tres mil personas donde hubo siete hospitalizados y 420 predios inundados pero sin pérdidas mortales. De acuerdo con el informe entregado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la estimación de la Empresa de Acueductos y Alcantarillado de Bogotá el 9 de junio se presentó un caudal máximo de 186 m³/s a la altura de la avenida Boyacá (Barrio San Benito), equivalente a una creciente con periodo de retorno de 100 años (Hermelín, 2007). Por otra parte, datos depurados por la Unidad Nacional para la Gestión del Riego de Desastres (UNGRD) “entre los años 2006 – 2014 en el país se reportaron 21.594 emergencias generadas por eventos de origen natural, de los cuales 14.853 causados por inundaciones y deslizamientos” (DNP, 2015).

Siendo las inundaciones la primera causa de muerte por fenómenos hidrometeorológicos en el país, por lo tanto, es de vital importancia el estudio de estos fenómenos, aprovechando y desarrollando nuevas tecnologías y herramientas que aporten al adecuado ordenamiento territorial y gestión integral del riesgo identificando las áreas necesarias para el desenvolvimiento del Río y así evitar el uso de estas zonas en actividades humanas, que puedan generar algún riesgo a la comunidad.

En el caso más puntual la cuenca del río Chicú se han presentado inundaciones en periodos de fuerte lluvias como en los años 2002 y 2010-2011, donde la mayor parte de la sabana de Bogotá quedo sumergida por el desbordamiento del río Bogotá y sus afluentes. Debido a la falta de control por parte de las alcaldías los habitantes de esta zona sufrieron pérdidas materiales, ya que ocuparon las zonas que por naturaleza sirven a los ríos para amortiguar el exceso de agua.

En la misma cuenca también se han presentado inundaciones, en el año 2012 en

la temporada de lluvia meses de marzo – abril, se presentó un desbordamiento ocasionado por las altas precipitaciones diarias, dando como resultado el rompimiento de un Jarillón en la vereda Parcelas, municipio de cota, antes de su desembocadura en el río Bogotá, lo que ocasionó la inundación de por lo menos 200 hectáreas (Rojas & Montaña, 2015), afectando a 35 familias dando pérdidas al sector agrícola y agropecuario (Gonzales, 2017), esto debido a que año tras año se venían aumentando las lluvias ocasionando que la altura de la lámina de agua alcanzara 1.70 m de altura en las zonas inundadas (Rojas & Montaña, 2015).

Por tanto, las inundaciones es uno de los principales fenómenos que afecta potencialmente a los municipios de Tabio, Tenjo y Cota que a través de los años ha ocasionado pérdidas materiales a la población por el desbordamiento del río Chicú. La mala gestión de las instituciones a cargo ha ocasionado una alta vulnerabilidad de la población que invade la ronda hídrica del cauce, provocando que en las dos épocas de invierno especialmente en los meses de marzo a abril y de octubre a noviembre, el río naturalmente incremente sus niveles inundando zonas ocupadas por la población, generando pérdidas económicas tanto para la población como a las alcaldías de los municipios.

3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROYECTO

Se realizó una caracterización morfológica y climatológica, que permitió conocer las condiciones de la cuenca, en cuanto a su posible de inundación, ya que al ser una cuenca de pendiente baja y con un periodo de retorno alto las probabilidades de inundación son altas. Seguido a esto se realizó la modelación hidrológica, en la cual se determinó el comportamiento hidrológico de la cuenca, donde se evidenció la máxima capacidad de almacenamiento del suelo, además de una distinción del suelo y cobertura del mismo, con base en la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, que sirvió para clasificar las diferentes coberturas que se tienen en la cuenca, y así poder realizar la calibración del modelo hidrológico. La información climática de la región, los datos hidrogeológicos y el tipo de suelo, fueron fundamentales para el modelado hidrológico en el software HEC-HMS.

Luego, partiendo de los caudales obtenidos mediante el modelo hidrológico se realizó el modelado hidráulico en el software HEC-RAS para los diferentes periodos de retorno, el cual se determinó el polígono de inundación de la cuenca a una escala 1:25.000. Con ayuda de estos mapas de manchas de inundación se podrán llevar a cabo propuestas para la mitigación de desastres por consecuencia de inundaciones en los que se pierden vidas humanas y/o materiales en los municipios que hacen parte de esta cuenca.

4. JUSTIFICACIÓN

Los municipios de Tabio y Tenjo, así como muchos municipios del país, no aplican rigurosamente la normatividad existente; según el Decreto 469 de 2003 en el Capítulo 3 Título VI Artículo 77 donde se define ronda hídrica como “*Zona de protección ambiental e hidráulica no edificable de uso público, constituida por una franja paralela o alrededor de los cuerpos de agua, medida a partir de la línea de mareas máximas (máxima inundación), de hasta 30 metros de ancho destinada principalmente al manejo hidráulico y la restauración ecológica*”. Gracias a la poca atención de las autoridades, la mala estipulación de la ronda hidráulica y el crecimiento demográfico de la zona centro del país, han hecho que en las comunidades asentadas en la ronda hídrica aumente el riesgo de las pérdidas materiales, económicas y humanas

La presente investigación se enfoca en realizar un estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Chicú ubicada en los municipios de Tabio, Tenjo, Cota y una parte de Madrid en el departamento de Cundinamarca, la cual representa una de las cuencas que aporta agua al río Bogotá. Se aplica una metodología, que permita la identificación de zonas susceptibles a inundaciones a causa del paso del Río Chicú, haciendo uso de las herramientas de modelación hidrológica e hidráulica HEC–HMS y HEC–RAS del cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, con el fin de dar una solución I en la cual se benefician tanto los entes reguladores para la adecuada gestión de mitigación y control de los riesgos asociados a las avenidas extremas, como las comunidades para el mejoramiento de la calidad de vida.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicación de modelo de simulación hidrológica e hidráulica HEC-HMS y HEC-RAS para la estimación de manchas de inundación a una escala de 1:25.000 en la cuenca del río Chicú.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización morfométrica e hidroclimática de la cuenca del Río Chicú.
- Modelar en el software HEC-HMS las condiciones hidrológicas de la cuenca con el fin de obtener los caudales asociados a diferentes periodos de retorno.
- Definir las manchas de inundación para la cuenca del río Chicú por medio de HEC RAS, para diferentes periodos de retorno.

6. RESUMEN

En este informe se encuentra el proceso realizado en la cuenca del Río Chicú para determinar las áreas de inundación en eventos de climáticos extremos. Comenzando con una caracterización morfológica y climatológica que permitieron realizar el modelo hidrológico, que sirvió para conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca y determinar la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo.

Así mismo, se presenta la modelación hidráulica, que permitió determinar las áreas de inundación para diferentes caudales según los periodos de retorno, los cuales se determinaron de 5, 25 50 y 100 años, esto con el fin de plantear obras de mitigación.

Palabras clave: Modelación hidrológica, Modelación hidráulica, climatología, morfología.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 TÉRMINOS

En el desarrollo de este informe se utilizarán conceptos especiales de hidrología e hidráulica los cuales deben ser aclarados para una adecuada interpretación de las frases e ideas que se exponen en el documento. A continuación, se presenta una lista de conceptos que ayudarán la comprensión del presente documento:

- **Hidrología:** Es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos (Villón, 2002).
- **HEC – HMS:** Es un software creado para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos por el Centro de Ingeniería Hidrológica. El software permite la representación física de una cuenca hidrográfica y posee elementos que permiten simular el comportamiento de esta. Los elementos que se pueden encontrar son: *subbasin* (subcuenca), *junction* (unión), *reach* (río), *sink* (sumidero), *reservoir* (depósito), *diversion* (desviación) y *source* (fuente). El programa tiene diferentes métodos para simular las pérdidas por infiltración, así mismo, posee métodos para realizar la transformación del exceso de precipitación en escorrentía. (Manual HEC-HMS, 2016). Este software posee gran variedad de usos, entre los que se destacan: determinar el comportamiento hidrológico de una cuenca, estudiar la disponibilidad de agua, diseño de vertederos, entre otros.
- **Modelo hidrológico:** Es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo la forma física o matemática. De forma matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente se representa es la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera, un modelo matemático nos ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología por lo que es necesario tener conocimientos de entradas (inputs) al sistema y salidas (outputs) a partir del sistema, con el objetivo de verificar si el modelo es representativo del prototipo o realidad (IDEAM, sf).
- **Cuenca:** La hoya hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo caudal efluente es descargado a través de una salida simple (Monsalve, 1999).

- **Precipitación:** Agregado de partículas acuosas, líquidas o sólidas, cristalizadas o amorgas, que caen de una nube o grupo de nubes y alcanzan el suelo (Monsalve, 1999).
- **Infiltración:** Formación de un paso de agua en forma de conductor a través de materiales naturales o artificiales, cuando las resultantes de todas las fuerzas que actúan sobre las partículas del suelo tienen una componente vertical en el sentido de la gravedad (Monsalve, 1999).
- **Escorrentía:** Parte de la precipitación que fluye por la superficie del terreno (escorrentía superficial) o por debajo de aquel (escorrentía subterránea) (Monsalve, 1999).
- **Acuífero:** Es una formación geológica, o grupo de formaciones o parte de una formación, capaz de acumular una significativa cantidad de agua subterránea, la cual puede brotar o extraerse para consumo (Sánchez, s.f.).
- **Acuitardo:** Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, pero que en el agua circula a través de ella con dificultad (Sánchez, s.f.).
- **Acuifugo:** Formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella (Sánchez, s.f.).
- **Método de polígonos de Thiessen:** Este método se puede utilizar para una distribución no uniforme de aparatos. Provee resultados más correctos con un área de la hoya aproximadamente plana. El método consiste en atribuir un factor de peso a los totales de precipitación en cada aparato, proporcionales al área de influencia de cada uno. Las áreas de influencia se determinan en mapas de la hoya que contengan la localización de las estaciones, uniendo dichos puntos de localización por medio de líneas rectas, y en seguida trazando las mediatrices de estas rectas, formando polígonos. Los lados de los polígonos son el límite de las áreas de influencia de cada estación (Monsalve, 1999).
- **Suelo:** Se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas. Además, como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas por materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de influencia del tiempo y combinado con el clima, topográfica, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2018).
- **DEM:** Un DEM es una representación ráster de una superficie continua, que hace referencia a la superficie de un terreno. La precisión de estos datos se determina principalmente por la resolución (la distancia entre los puntos de muestra) (ArcGIS, s.f.).

7.2 MODELO HIDROLÓGICO

7.2.1 Definición del modelo

El modelo lluvia – escorrentía, escogido para la caracterización hidrológica de la cuenca del río Chicú, consiste en una serie de procesos que suceden en la cuenca a lo largo de un periodo de precipitación.

El ciclo de escorrentía se ve caracterizado por siete (7) fases las cuales se presentan en la siguiente ilustración:

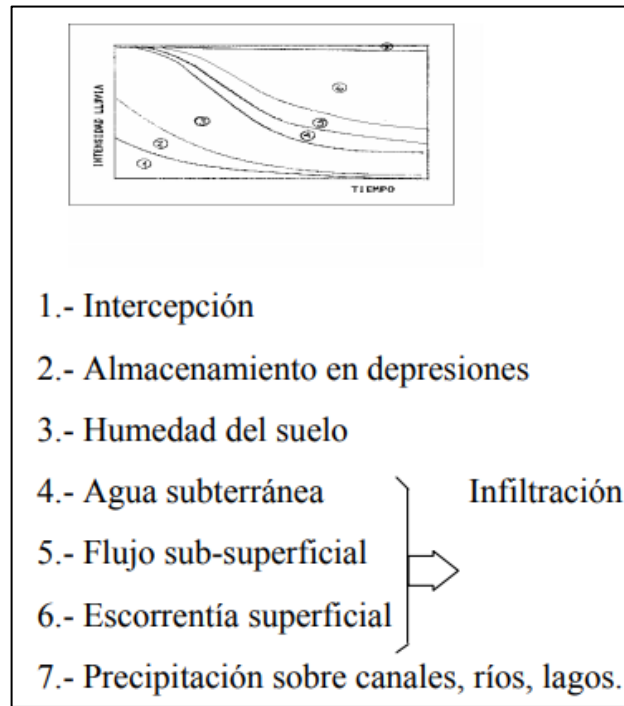


Ilustración 7-1 Ciclo de escorrentía
Fuente: Modelos Lluvia Escorrentía, UC.

- **Intercepción**

Se produce en el primer lapso de la tormenta, el agua es interceptada por los diferentes tipos de vegetación que se encuentra en la cuenca. Esto impide el fluir del agua por el terreno.

Debe tenerse en cuenta que en la cuenca se realizan procesos de cultivos, existen bosques, praderas, pastizales y urbanizaciones las cuales interceptan de diferente manera el agua que se precipita durante la tormenta.

- **Almacenamiento en depresiones**

La cuenca, por su relieve, posee depresiones en el suelo, los cuales en eventos de precipitación se convierten en pequeñas áreas de almacenamiento de agua por lo que captan el agua que escurre por el suelo y le interrumpen su recorrido evitando así su fluir hacia un caño, quebrada o río.

- **Humedad del suelo**

La humedad del suelo es un parámetro importante para el modelo lluvia – escorrentía, debido a la relación directamente proporcional entre la cantidad de agua que se encuentre en el suelo y capacidad de escorrentía de este; es decir, entre más saturado se encuentre el suelo, la capacidad de escorrentía será mayor.

- **Infiltración: Agua subterránea, Flujo sub-superficial y Escorrentía superficial**

La infiltración depende de la humedad del suelo y sus características hidráulicas, entre menos saturado se encuentre el suelo más volumen de agua absorberá. Además, si el nivel freático se encuentra cercano a la superficie este aumentará su nivel debido a la recarga que sufre por el suelo.

La cuenca del río Chicú contiene formaciones acuíferas de alta productividad, como la formación Guadalupe, Acuífero Labor y Tierna, entre otros. Estos almacenamientos subterráneos producen una disminución de la capacidad de escorrentía del suelo, es decir, el suelo permite la que el agua fluya a través y recargue de forma continua los depósitos de agua subterránea, por lo que el caudal en el río disminuye.

- **Precipitación sobre canales, ríos y lagos**

Durante una tormenta el agua se precipita por toda el área de la cuenca, por lo que recarga los cuerpos de agua existentes en la zona, de esta manera aumenta el volumen de agua contenido en los lagos, aumenta el caudal en los ríos y canales, además, al saturarse el suelo completamente se produce escorrentía y debido a la pendiente de la cuenca se encamina hacia las quebradas, caños, ríos y lagos que se encuentren en la cuenca.

7.3 APLICACIÓN DE SOFTWARE DE SISTEMAS INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL MODELO

Un Sistema de Información Geográfico (SIG) permite relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica. Esto quiere decir que en un solo mapa el sistema muestra la distribución de recursos, edificios, poblaciones, entre otros

datos de los municipios, departamentos, regiones o todo un país. Este es un conjunto que mezcla hardware, software y datos geográficos, y los muestra en una representación gráfica. Los SIG están diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar la información de todas las formas posibles de manera lógica y coordinada (Ministerio de Educación, s.f).

Para este caso se utilizó el Software ArcGis el cual posee bastas herramientas para el procesamiento de datos, imágenes, e información y sirve para crear, visualizar y analizar datos espaciales del terreno, por lo que permitió desarrollar los insumos básicos para la modelación hidrológica de la cuenca del río Chicú.

ArcGis es un software creado por *Environmental Systems Research Institute (ESRI)* de Redlands, California; es un completo programa de información geográfica que cuenta básicamente con tres componentes principales;

7.3.1 ArcGIS

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (ArcGIS, s.f.)

Este software posee herramientas muy completas que permiten al usuario realizar bastantes procesos, desde generar modelos de elevación digital, hasta dibujar curvas de nivel. Adicional a esto, posee extensiones de software externos, las cuales hacen que su uso en la ingeniería sea amplio.

7.3.2 HecGeoRas

Es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para procesar datos geoespaciales en ArcGIS utilizando una interfaz gráfica de usuario (GUI). La interfaz permite la preparación de datos geométricos para su importación a HEC-RAS y procesa los resultados de la simulación exportados desde HEC-RAS. (US Army Corps of Engineers, 2016).

7.4 MÉTODOS Y PARÁMETROS PARA MODELO HIDROLÓGICO EN HEC-HMS

Para realizar el modelo hidrológico en el software es necesario tener información base, como parámetros físicos de la cuenca, precipitación, entre otros, la cual servirá como insumo para desarrollar el modelo hidrológico.

7.4.1 Método de pérdidas Soil Moisture Accounting

El método *Soil Moisture Accounting (SMA)* o método contabilización de humedad en el suelo, es un algoritmo creado por el Centro de Ingeniería Hidrológica con el cual se analiza el comportamiento de la humedad en el suelo de una forma más detallada. Esta metodología se diseñó para tener la posibilidad de realizar análisis continuos de lluvias, ya que las versiones anteriores del software solo podían realizar análisis de eventos en 24 horas específicas, mientras que el método SMA

el análisis se expande a la modelación de meses.

El método SMA para su análisis utiliza tres capas para representar la dinámica del movimiento del agua en el suelo. Estas capas son:

- *Soil (%)*, *Groundwater 1 (%)* y *Groundwater 2 (%)*: El primer parámetro a introducir, se refiere a las condiciones iniciales para cada una de las tres capas. Esto se refiere al porcentaje del almacenamiento total de la capa que se encuentra llena de agua al inicio de la simulación (Manual HEC-HMS, 2016).
- *Max Infiltration* (mm/hr): Indica el límite de infiltración del almacenamiento superficial hacia la capa de suelo (Manual HEC-HMS, 2016).
- *Impermeable (%)*: Representa el porcentaje de zonas impermeables dentro de la subcuenca (Manual HEC-HMS, 2016).
- *Soil Storage* (mm): Representa el almacenamiento disponible en la capa de suelo (Manual HEC-HMS, 2016).
- *Tension Storage* (mm): Especifica la cantidad de agua almacenada en el suelo que no drena bajo los efectos de la gravedad (Manual HEC-HMS, 2016).
- *Soil Percolation* (mm/hr): Indica el límite de percolación desde el almacenamiento de suelo hacia el agua subterránea superficial (Manual HEC-HMS, 2016).
- *GW 1 Storage* (mm) y *GW 2 Storage* (mm): El almacenamiento GW1 y GW2 representan el almacenamiento total en la capa superior e inferior de agua subterránea, respectivamente (Manual HEC-HMS, 2016).
- *GW 1 Percolation* (mm/hr) y *GW 2 Percolation* (mm/hr): La percolación GW1 indica la tasa de percolación desde la capa superior de agua subterránea hacia la inferior, mientras que la percolación GW2 es la tasa de percolación profunda hacia fuera del sistema (Manual HEC-HMS, 2016).
- *GW 1 Coefficient* (hr) y *GW 2 Coefficient* (hr): Son usados como condiciones de tiempo para transformar el agua en almacenamiento en salidas laterales. Este caudal se puede convertir en flujo base (Manual HEC-HMS, 2016).

7.4.2 Método de transformación SCS Unit Hydrograph

El procedimiento de hidrograma unitario adimensional del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) es uno de los métodos más conocidos para derivar hidrogramas unitarios sintéticos actualmente en uso (NOAA, s.f.).

Con este método adimensional se puede transformar en una descarga contra tiempo para diferentes cuencas, si se tiene el área de drenaje, el tiempo de concentración y el factor de velocidad máxima.

En la Ilustración 7-2 se presenta el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS).

Dónde: T_c = tiempo de concentración; A = área de drenaje (km^2), T_p = tiempo pico (h) y q_p = caudal pico ($\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$)

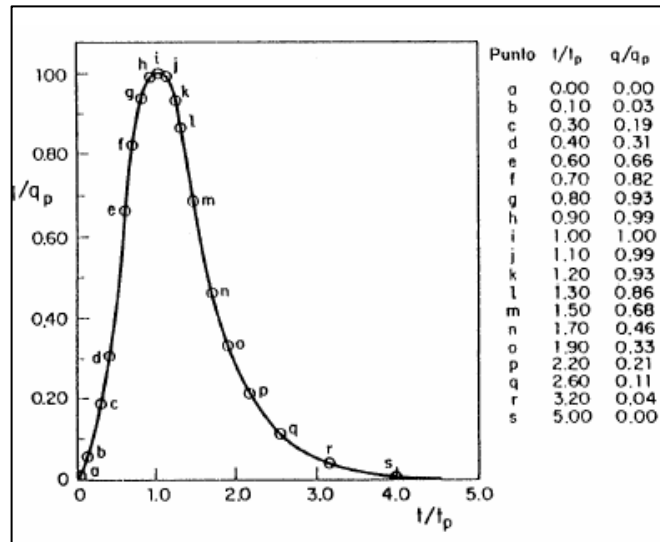


Ilustración 7-2 SCS Unit Hydrograph

Fuente: Fundamentos de la Hidrología Superficial, 2 006

Para definir el hidrograma unitario adimensional se calcula las ecuaciones 1 y 2 con ayuda del hidrograma presentado en la ilustración anterior se establece la forma del hidrograma. Las siguientes ecuaciones se obtuvieron del libro Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial.

$$q_p = 0.208 * \left(\frac{A}{t_p} \right)$$

Ecuación 1

$$t_p = \sqrt{(t_c)} + 0.6 * t_c$$

Ecuación 2

El hidrograma unitario estándar se define con un 37.5 % de la escurrentía de la cuenca que ocurre antes del flujo máximo. El software en su interfaz ofrece al usuario un tipo de gráfico que por defecto siempre se encuentra en *Standard* (PRF 484). Esta definición corresponde a un factor de tasa máxima de 484 que incorpora el porcentaje de escurrentía unitaria antes del pico, la base de tiempo total calculada y las conversiones de unidades cuando se aplican las ecuaciones dentro del sistema de unidad habitual de los EE. UU (Manual HEC-HMS, 2016).

El *Lag Time* (min) hace referencia al tiempo que demora una partícula de agua precipitada en el centroide de la subcuenca en llegar al punto más bajo de salida

de esta. Se ha determinado analizando las ecuaciones del método y se puede concluir que el *Lag time* se puede tomar como el 60 % del tiempo de concentración.

7.4.3 Método Muskingum - Cunge

El método *Muskingum – Cunge* está basado en la combinación de la conservación de masas y la representación de la difusión de conservación del momento (Manual HEC-HMS, 2016).

Para emplear este método se requieren varios datos de entrada, como la pendiente, la longitud del cauce principal, el número de rugosidad de Manning y la sección transversal del cauce en el punto en específico. Cabe destacar que este se aplica para el componente de trazado del modelo *Reach*, que se asemeja a los ríos.

La selección del intervalo de tiempo puede ser de dos tipos, el programa puede automáticamente seleccionar un intervalo de tiempo fijo que mantenga estable durante el punto máximo del hidrograma unitario. La otra alternativa, el programa puede automáticamente variar el tiempo del intervalo para tomar lo suficientemente largo para mantener la estabilidad numérica.

7.4.4 Series de tiempo

Las series de tiempo de las variables climatológicas pueden ser ingresadas de forma automática, mediante el software del Centro de Ingeniería Hidrológica de EE. UU, denominado HEC-DSS, es un sistema de base de datos diseñado para almacenar y recuperar de manera eficiente datos científicos que generalmente son secuenciales (HEC Usace, s.f.). También existe la posibilidad de introducir la información climatológica manualmente con la opción del programa HEC-HMS “*Time Series Data Manager*”, esta herramienta permita el ingreso de datos de las variables climatológicas, además de información de descarga para realizar la calibración del modelo.

7.4.5 Secciones transversales

Las secciones transversales son importantes para emplear el método de enrutamiento *Muskingum – Cunge*, en este apartado se permite ingresar la información topográfica tomada en campo de las secciones perpendiculares del cauce en estudio. Lo que permite al programa una mayor similitud con el entorno real.

7.4.6 Modelo Meteorológico – *Meteorologic Models*

Este componente del software está diseñado para preparar las condiciones meteorológicas de las subcuencas. Es decir, en este apartado se asignan las variables climáticas de precipitación, evapotranspiración, nieve, entre otras; además, se establece el sistema de unidades.

La interfaz de esta unidad permite al usuario escoger diferentes métodos para asignar las variables climáticas.

Para introducir los datos de precipitación y teniendo en cuenta que se agregaron las series de tiempo respectivas del año en estudio (2010), se utilizó la metodología de pesos de estaciones “*Gage Weights*”. Con este método se asignan pesos a las subcuencas dependiendo su localización y las áreas de las zonas de influencia de las estaciones. Por ejemplo, la subcuenca Hato Alto se encuentra en el centro, además la estación Hato Alto es la única que posee información de lluvia de esta zona, por consiguiente, se le asigna a esta subcuenca un valor de 1, que significa, esta región solo se verá influenciada por los registros de la estación Hato Alto.

Existen varias subcuencas que por la red de drenaje se componen diferentes regiones lo cual cambia la distribución de pesos al ingresar estos datos al modelo.

Por ejemplo, para la subcuenca 1 (Santillana), posee partes zonas de influencia de las estaciones Hato El y Hato Alto. Para este caso se calculó el peso de cada estación en función del área de la zona de influencia que pertenece a la subcuenca, en la siguiente tabla se muestra el cálculo realizado para la subcuenca 1.

Tabla 7-1 Calculo de pesos estaciones – Subcuenca Santillana

SUBCUENCA SANTILLANA		
ZONA DE INFLUENCIA	ÁREA (km ²)	% ÁREA
SANTILLANA	41.406497	0.940073
HATO EL	2.036263	0.04623
HATO ALTO	0.603271	0.013696
TOTAL	44.05	1

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes anteriormente calculados se ingresaron al modelo. Para la realización de este modelo fueron tenidas en cuenta solo las series de tiempo de precipitación, ya que la carencia de información diaria no permitió utilizar más variables climatológicas.

En cuanto al sistema de unidades, se escogió el métrico debido a que en Colombia es el sistema de unidades establecido.

7.4.7 Control de especificaciones – *Control Specifications*

El control de especificaciones es un componente fundamental del proyecto, sin embargo, no requiere de mucha información. Su principal función es controlar cuando empieza y cuando termina la simulación, además de tener en cuenta el intervalo de tiempo de la simulación.

7.4.8 Crear una simulación – *Create Simulations Runs*

La simulación es el primer método del programa para obtener resultados, en este apartado está compuesto por el modelo meteorológico, el control de especificaciones y el modelo base.

Los resultados obtenidos se pueden visualizar en tablas y gráficas, además se puede obtener las series de tiempo resultantes de toda la cuenca, como de cada una de las subcuencas. También se puede obtener la información de los elementos de unión entre subcuencas del programa.

7.4.9 Metodología de completado de datos

Razón de valores normales

Consiste en la complementación de datos teniendo en cuenta estaciones meteorológicas vecinas las cuales, dadas las características fisiográficas y climáticas, se consideran representativas de la estación incompleta, siempre y cuando se conozcan los valores promedio de la estación, estas pueden estimarse dichas cantidades en función de los valores medios mensuales o anuales mediante la ecuación:

$$P_x = \frac{N_x}{n} * \left(\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \dots + \frac{P_n}{N_n} \right)$$

Ecuación 3

P_x = Datos faltantes.

N_x = Promedio de la P total anual de todas las estaciones.

n = Total de estaciones de referencia.

N = Precipitación media anual de cada estación.

El valor de la precipitación faltante es estimado como la media aritmética de los valores en las diferentes estaciones, corregidos por el factor N_x/N_n .

Para el relleno de datos faltantes se hace siempre y cuando los valores de las estaciones vecinas no difieran de la estación a completar, máximo 10 %. En el caso de algunos años, las estaciones difieren del 10 %, por ello en estos casos se utilizó el método del cociente normal.

Método del cociente normal

La ecuación reside en tomar las precipitaciones anuales de cada una de las tres estaciones de referencia próxima, de forma que se emplea cuando la media de

una de las estaciones piloto difiere en más del 10 % de la media de la estación con datos faltantes (Guevara, 2003). Por ello en los casos específicos se utilizó esta metodología para el completado de los resultados faltantes, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$D_j = \frac{a_j PA + b_j PB + c_j Pc}{3}$$

Ecuación 4

$$Pa = \frac{\text{Precipitación anual estación dato faltante}}{\text{Precipitación anual estación referencia A}}$$

Ecuación 5

$$Pb = \frac{\text{Precipitación anual estación dato faltante}}{\text{Precipitación anual estación referencia B}}$$

Ecuación 6

$$Pc = \frac{\text{Precipitación anual estación dato faltante}}{\text{Precipitación anual estación referencia C}}$$

Ecuación 7

Dj: Precipitación estimada para el día j

Aj, bj, cj: Precipitaciones registrada en las tres estaciones de referencia el día

A partir de la obtención de los datos faltantes se determinó la homogeneidad de los datos por medio de la prueba rachas o *Run Test*, que consiste en establecer la homogeneidad en las series de cada una de las estaciones, esta prueba se hizo utilizando los valores anuales de cada una de ellas.

7.4.10 Metodología para la transposición de caudales

El método de transposición de caudales es una metodología que permite determinar indirectamente los caudales de una zona sin información a partir de una cuenca piloto o maestra con condiciones similares de temperatura, precipitación y relieve. Existen varias formas de realizar la transposición de caudales a una cuenca de mayor extensión, a continuación, se presentan algunas fórmulas para su utilización:

Para que la metodología no presente grandes niveles de error, se debe asegurar que: las cuencas presenten condiciones hidrometeorológicas similares (precipitación, humedad relativa, temperatura, etc.) y características morfológicas similares (López, 2016). Las siguientes ecuaciones se obtuvieron del trabajo de investigación para Maestría, Evaluación de Metodologías indirectas para la estimación de caudales medios mensuales.

- La primera ecuación (ecuación 8) relaciona directamente el área con el caudal:

$$Q_x = Q_p * \left(\frac{A_x}{A_p} \right)$$

Ecuación 8

Q_p = Caudal de la cuenca pivote (m^3/s)
 Q_x = Caudal de la cuenca sin información
 A_x = Área de la cuenca sin información (km^2)
 A_p = Área de la cuenca pivote (km^2)

- La segunda ecuación es una modificación a la ecuación 1 (ecuación 9), en donde se altera el resultado por la relación entre las precipitaciones aferentes a las cuencas:

$$Q_x = Q_p * \left(\frac{A_x}{A_p} \right) * \left(\frac{P_x}{P_p} \right)$$

Ecuación 9

P_x = precipitación de la cuenca sin información (mm)
 P_p = precipitación de la cuenca pivote (mm)

- La tercera ecuación es una modificación de la ecuación 2 (ecuación 10), en donde se altera el resultado por la adición de la relación entre los números de curva (CN) de las cuencas. Esta metodología según se afirma en los informes de Evaluación de impacto ambiental (EIA), permite una mejor aproximación dado que la precipitación total es afectada por la capacidad de respuesta al escurrimiento.

$$Q_x = Q_p * \left(\frac{A_x}{A_p} \right) * \left(\frac{P_x}{P_p} \right) * \left(\frac{CN_x}{CN_p} \right)$$

Ecuación 10

CN_x = número de curva de la estación sin información
 CN_p = número de curva de la estación pivote

Para tener una mejor aproximación se escogió como ecuación a emplear la ecuación 3 (ecuación 11):

$$Q_x = Q_p * \left(\frac{A_x}{A_p} \right) * \left(\frac{P_x}{P_p} \right) * \left(\frac{CN_x}{CN_p} \right)$$

Ecuación 11

Con esta metodología se garantiza un mejor resultado, ya que se tiene en cuenta el tipo de suelo y cobertura que se encuentra en la cuenca.

7.4.11 Método Soil Conservations Service (SCS)

La metodología *Soil Conservation Service (SCS)* fue creada en los Estados Unidos de América. Básicamente, este método depende de la interrelación suelo – cobertura y las características físicas del suelo, además de la condición de humedad antecedente; con todas las anteriores consideraciones se fija un número de curva (CN) que representa la interacción de suelo – cobertura en la cuenca.

Esta metodología originalmente fue propuesta para la evaluación de la precipitación neta que podría generar una tormenta (Monsalve Sáenz, 1995). Se debe tener en cuenta el volumen de precipitación antecedente, se puede tomar de 5 a 30 días anteriores, esto permite determinar el tipo de condición antecedente para emplear el método SCS. En la tabla siguiente se presentan las diferentes condiciones

Tabla 7-2 Condición de Humedad antecedente - Precipitación total en los 5 días anteriores

Tabla 2.- Precipitación total en los 5 días anteriores		
Plantas en periodo latente	Plantas en periodo de crecimiento	Humedad previa
Menos de 13 mm	menos de 35 mm	Seco (I)
De 13 a 32 mm	De 35 a 52 mm	Normal (II)
Más de 32 mm	Más de 52 mm	Húmedo (III)

Fuente: Calculo de la Precipitación Neta mediante el método SCS, Universidad Salamanca

Para la cuenca del río Chicú se determinó la humedad antecedente como normal, ya que se encuentra en un clima de páramo por lo que el suelo mantiene su humedad natural, además las precipitaciones en el mes de marzo fueron en total de 26.4 mm, por lo que certifica la condición de humedad antecedente.

Para esta metodología el suelo se puede clasificar en cuatro (4) grupos hidrológicos, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7-3 Grupos hidrológicos del suelo

GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO	INFILTRACIÓN CUANDO ESTÁN MUY HÚMEDOS	CARACTERÍSTICAS	TEXTURAS
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h	Arenosa Arenosa - limosa Franca
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franco - arcillosa-arenosa Franco - limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36 - 13 mm/h	Franco - arcillosa Franco - arcillosa - limosa Arcillo - arenosa
D	Muy lenta	Capacidad de infiltración <13 mm/h	Arcillosa

Fuente: Método del Número de Curva del SCS, Agua y SIG

La cobertura en este caso se divide por los diferentes usos del suelo que posee la cuenca, cada tipo de cobertura con base en el grupo hidrológico del suelo posee un número de curva. A continuación, en la Tabla 7-4 se muestra para diferentes tipos de cobertura y según el suelo, el valor de CN para una condición de humedad AMC II, el estado de saturación inicial se determinó a partir del mes de marzo (31 días) anterior al evento modelado, y se encontró un volumen total de lluvia de 26.4 mm, así mismo, se determinó que la vegetación en la cuenca son plantas en periodo latente, por lo que según la tabla 9-8 corresponde a una humedad previa normal (II).



Tabla 7-4 Números de curva de escorrentía.

Tabla 3. Números de curva de escorrentía para usos selectos de suelo agrícola, urbana y suburbana (Condiciones antecedentes de humedad AMC (II), $I_a = 0,2 S$)							
Descripción del uso de la tierra	Detalles de la descripción	Tratamiento o uso	Condición hidrológico	Grupo hidrológico de suelo			
				A	B	C	D
Tierra cultivada	baldío	filas rectas	no aplicable	77	86	91	94
	general	sin tratamientos de conservación	no disponible	72	81	88	91
	cultivos en filas	filas rectas	pobre	72	81	88	91
			bueno	67	78	85	89
		en contorno	pobre	70	79	84	88
			bueno	65	75	82	86
		en contorno y terraza	pobre	66	74	80	82
			bueno	62	71	78	81
	general	con tratamientos de conservación	no disponible	62	71	78	81
	granos pequeños	filas rectas	pobre	65	76	84	88
			bueno	63	75	83	87
		en contorno	pobre	63	74	82	85
			bueno	61	73	81	84
		en contorno y terraza	pobre	61	72	79	82
			bueno	59	70	78	81
	grano cerrado: legumbres o pradera de rotación	filas rectas	pobre	66	77	85	89
			bueno	58	72	81	85
		en contorno	pobre	64	75	83	85
			bueno	55	69	78	83
		en contorno y terraza	pobre	63	73	80	83
			bueno	51	67	76	80
Pastizales o campo de animales			pobre	68	79	86	89
			aceptable	49	69	79	84
			bueno	39	61	74	80
			pobre	47	67	81	88
		en contorno	aceptable	25	59	75	83
			bueno	6	35	70	79
Vegas de ríos y praderas			bueno	30	58	71	78
Bosques		troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	pobre	45	66	77	83
			aceptable	36	60	73	79
			bueno	25	55	70	77
Haciendas				59	74	82	86
Calles y carreteras		pavimentados con cunetas y alcantarillados ¹	no disponible	95	95	95	95
		superficie dura		74	84	90	92
		grava		76	85	89	91
		tierra		72	82	87	89
Áreas abiertas		césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	bueno (cubierto de pasto 75%+)	39	61	74	80
			aceptable (cubierto de pasto 50% - 75%)	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios		85% impermeables	no disponible	89	92	94	95
Districtos industriales		72% impermeables		81	88	91	93
Residencial	1/8 acre o menos	65% impermeable		77	85	90	92
	1/4 acre	38% impermeable		61	75	83	87
	1/3 acre	30% impermeable		57	72	81	86
	1/2 acre	25% impermeable		54	70	80	85
	1 acre	20% impermeable		51	68	79	84
Parqueadores pavimentados, techos, accesos, etc.				95	95	95	95

Fuente: Método de Abstracciones, Universidad Piura

7.4.12 Soil Water Characteristics

Se utiliza para simular la tensión del agua del suelo, la conductividad y la capacidad de retención de agua en función de la textura del suelo, con ajustes para tener en cuenta el contenido de grava, la compactación, la salinidad y la materia orgánica (NRCS, s.f.).

Con ayuda de este programa se puede obtener un valor aproximado de las

condiciones de un tipo de suelo, ya sea arenoso, franco arenoso, arcilla, entre otros. Este software es bastante útil cuando no se tiene la información completa de un tipo de suelo.

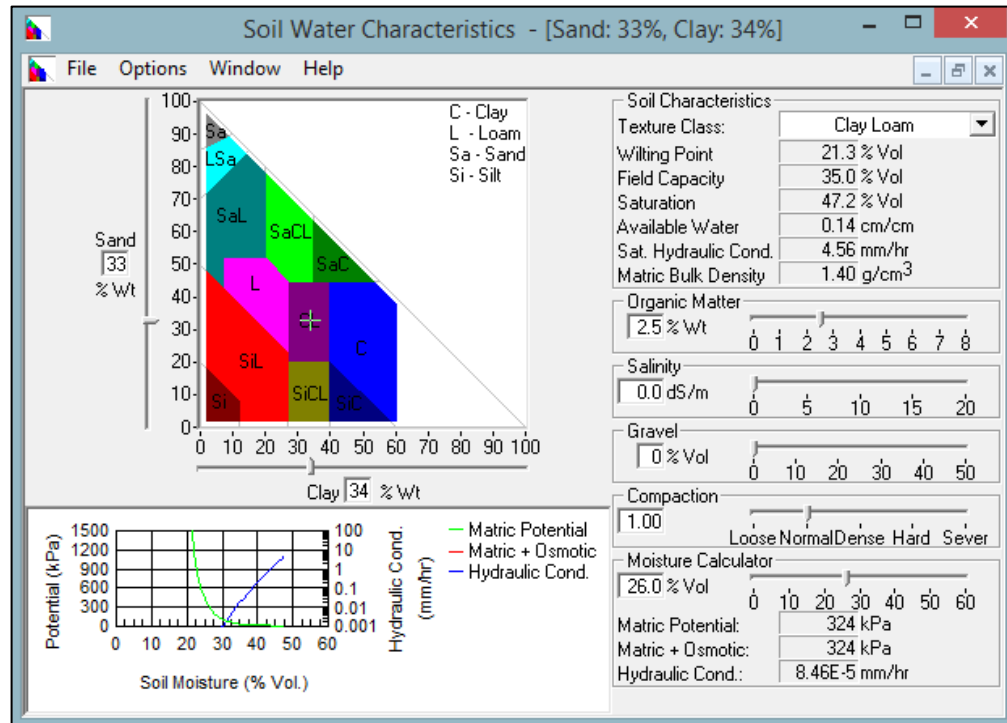


Ilustración 7-3 Ilustración interfaz Soil Water Characteristics

Fuente: Soil Water Characteristics

7.4.13 Métricas de Calibración

A continuación, se describen las tres métricas de calibración aplicadas, éstas se escogieron del documento Calibración de Modelos Hidrológicos escrito por Juan Cabrera (Ing. Civil):

- a. **Coefficiente de calibración:** expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en este caso, son los caudales observados y los caudales simulados. Se formula como:

$$r = \frac{(S_{obs, sim})}{(S_{obs} + S_{sim})^{1/2}}$$

Ecuación 12

Donde $S_{obs, sim}$ es la covarianza sin sesgo entre los caudales observados y simulados:

$$S_{obs, sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})$$

Ecuación 13

Y, Sobs y Ssim son las varianzas sin sesgo de los caudales observados y simulados, respectivamente:

$$S_{obs} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \quad y \quad S_{sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2$$

Ecuación 14

Donde los valores con barras representan valores medios y n es el número de datos simulados y observados.

El coeficiente de correlación puede tomar valores entre $0 < r < 1$, entre más cercano sea a 1, mejor es el ajuste.

b. Criterio de Schultz (D): El criterio de Schultz representa la desviación de los caudales simulados respecto a los observados. Su fórmula es:

$$D = 200 \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_i| Q_i}{n(Q_{max})^2}$$

Ecuación 15

Donde Qmax es la descarga máxima observada en el periodo de estudio.

c. Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E): es el criterio más utilizado en hidrología. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Ecuación 16

Mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $E=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$.

Tabla 7-5 Valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Calibración de Modelos Hidrológicos, Cabrera.

7.5 MÉTODOS Y PARÁMETROS PARA MODELO HIDRÁULICO EN HEC-RAS

El Modelo Matemático HEC-RAS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos denominado "*Water Surface Profiles*", calcula los perfiles superficiales del agua para las condiciones de un flujo permanente o no permanente y gradualmente variado en canales naturales o artificiales. Este procedimiento está basado en solucionar la ecuación unidimensional de energía con las pérdidas por fricción evaluadas por medio de la ecuación de Manning; en el presente estudio se consideraron condiciones de flujo permanente y uniforme.

Este modelo simula la hidráulica del flujo para canales sobre cualquier tipo de sección transversal bajo flujo gradualmente variado, trabajando de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, sacada del libro mecánica de fluidos aplicada de mott:

$$Z_1 + Y_1 + (V_1^2 / 2g) = Z_2 + Y_2 + (V_2^2 / 2g) + h$$

Ecuación 17

En donde: Zi: nivel del fondo del canal aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, este término se denomina cabeza de posición, en m; Yi: lámina de agua aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, este término se denomina cabeza de presión, en m; $V^2/2g$: cabeza de velocidad aguas arriba (1) y abajo del tramo (2), en m; h: pérdidas de energía en el tramo, dividiéndose en pérdidas por fricción (h_f) y localizadas (h_l), en m.

Las pérdidas por fricción (h_f), para flujo gradualmente variado en un tramo de longitud L del canal se pueden expresar por medio de la ecuación de Manning, las siguientes ecuaciones fueron sacadas del libro hidráulica de canales abiertos de chow:

$$h_f = ((S_{e1} + S_{e2})/2)L$$

Ecuación 18

En donde: S_{e1} y S_{e2} corresponden a los valores de la pendiente de la línea de energía aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo.

Estos valores se expresan por medio de la fórmula de Manning para flujo uniforme

en cada sección del tramo:

$$S_e = n^2 V^2 / R^{4/3}$$

Ecuación 19

En donde: n : coeficiente de rugosidad de Manning, valor adimensional; V : velocidad promedio del agua, en m/s; R , radio hidráulico, en m, igual al área hidráulica A , en m^2 , dividida entre el perímetro mojado P , en m.

El coeficiente de rugosidad de Manning se define de acuerdo con las caracterizaciones de campo, y teniendo en cuenta las recomendaciones de las diferentes referencias bibliográficas.

Por otro lado, las pérdidas localizadas en un punto del canal se expresan mediante la ecuación:

$$h_l = K \left| \left((V_1^2 / 2g) - (V_2^2 / 2g) \right) \right|$$

Ecuación 20

En donde: K : coeficiente de pérdidas localizadas, adimensional; V_i : velocidad promedio aguas arriba (1) y aguas abajo (2) del punto o tramo en donde se produce la pérdida localizada, en m/s.

Los parámetros necesarios para desarrollar de manera adecuada el modelo en este software son:

7.5.1 Parámetros de Geometría del cauce

Dentro de este incluye el conjunto de secciones transversales obtenidas mediante levantamientos en terreno, la separación entre las mismas se define en el sitio. Si los tramos de la corriente son rectos, se pueden tomar secciones cada 50 m o más, mientras que si se presentan curvas no sean muy cerradas, se deben tomar cada 10 o 20 m dependiendo de su longitud. También se tiene la posibilidad el ingreso de estructuras hidráulicas como puentes y box culvert (bridge/Culvert), drenajes, vertederos y aliviaderos entre otros.

7.5.2 Coeficiente de Manning

La n de Manning es una de las formas de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces, naturales o artificiales. Este coeficiente de resistencia al flujo es muy variable porque depende de una serie factores como la vegetación, irregularidad, obstrucciones, nivel, caudal, régimen de circulación, entre otros. (Córdova Webster et al., 2018)

De toda la teoría consultada existen diferentes métodos para el cálculo del coeficiente de Manning, dentro de este trabajo se nombran los siguientes tres métodos:

A. Método de Cowan:

Este autor desarrolló un procedimiento para estimar el valor de n en función de algunos parámetros característicos del cauce, aplicando la siguiente fórmula:

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

Ecuación 21

Los valores de n y m se obtienen de una tabla en función del material del perímetro, irregularidad, variación de la sección transversal, efecto de las obstrucciones, vegetación y curvaturas en planta.

B. Método del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (S.C.S.)

Este método propuesto por el ex Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (S.C.S.), hoy renombrado como Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (N.R.C.S.), es similar al método de Cowan, se basa en la misma tabla y se calcula con la fórmula:

$$n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5)$$

Ecuación 22

En esta fórmula se consideran las siguientes equivalencias de la tabla para Cowan: $n_1=n_0$, $n_2=n_4$, $n_3=n_1$, $n_4=n_3$ y n_5 : modificación por la alineación tomando en cuenta las longitudes de curvas (l_c) y de tramos rectos (l_r) en el cauce, si (l_c/l_r) está entre 1,0 y 1,2, $m_5=0,00$, si (l_c/l_r) está entre 1,2 y 1,5, $m_5=0,15$, si (l_c/l_r) es mayor que 1,5 entonces $m_5=0,30$.

$$n_5 = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Ecuación 23

C. Método Hec Ras

Esta fórmula depende de un parámetro muy utilizado en el diseño hidráulico de canales, como es la rugosidad absoluta k . La rugosidad está en directa relación con el tamaño de las partículas y utilizar la misma para el cálculo de la n tiene la ventaja de reflejar la variación del factor de fricción en cada instante.

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{18 * \log(12,2 R/k)}$$

Ecuación 24

Dónde: R es el radio hidráulico (m) y k es la rugosidad (m).

El software permite introducir de diferentes formas este parámetro, en el capítulo 9 del presente trabajo se explica la forma en la que fue introducido para la cuenca del río Chicú.

7.5.3 Tipos de flujos en canales abiertos

La clasificación del flujo en canales abiertos depende al cambio en la profundidad del flujo con respecto al tiempo y al espacio, de acuerdo con esto se considera que para el estudio de la hidráulica de un canal abierto el flujo es permanente quiere decir que la profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración.

Mediante el software HEC-HMS se obtuvo la serie de tiempo de los caudales que escurre sobre cada una de las subcuencas existentes hasta llegar a la cuenca del río Chicú.

7.5.4 Simulación de flujo permanente en Hec – Ras

- **Cálculo de caudales pico - distribución de Gumbel**

Para el cálculo de los caudales pico se utilizó la distribución de Gumbel que presenta la siguiente ecuación:

$$F(x) = e^{-e^{-(x-u)/\alpha}}$$

Ecuación 25

$$\alpha = s_x / \sigma_y$$

$$u = \bar{x} - \mu_y \cdot \alpha$$

Ecuación 26

Donde:

$F(x)$: Probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x ; $\bar{x}$: promedio de la muestra; e : base de los logaritmos neperianos; S_x : desviación estándar de la muestra; σ_y y μ_y : valores tabulados dependiendo del número de datos.

Las ecuaciones anteriores permiten el cálculo del periodo de retorno a partir del conocimiento del caudal. Para realizar el caso inverso, es decir, calcular el caudal para cierto periodo de retorno, es necesario despejar la variable x de la ecuación anterior, de tal manera que quedaría:

$$x = -\ln(-\ln(F(x))) \cdot \alpha + u$$

Ecuación 27

- **Condiciones de contorno**

La condición de contorno se define de acuerdo a la información que se tenga del proyecto, existen 4 tipos de condiciones de contorno que se puede ingresar dentro del software.

- ✓ Nivel del agua: Altura de la lámina de agua, este normalmente dado por una estación Limnigráfica u obtenida en campo, se debe tener en cuenta que es la altura sobre el nivel del mar no de la altura de la lámina de agua dentro de la sección ejemplo 1 m.

- ✓ Lámina de agua crítica: se define cuando en la sección existe un dispositivo de medición, que defina de acuerdo a la lámina de agua el caudal, para esta condición no se es necesario la entrada de los datos ya que el programa calcula la altura crítica de la lámina de agua en la sección.
- ✓ Curva de caudal: se usa cuando se tiene la gráfica la lámina de agua vs caudal.
- ✓ Lámina de agua normal: dentro de este se asigna el dato de la pendiente entre la sección aguas abajo y su inmediata superior.

De acuerdo con esto las condiciones de contorno se pueden definir aguas arriba y aguas abajo del tramo, para definir esto se debe tener en cuenta el régimen de flujo con el cual se comporta el río.

Si el régimen en todo el tramo se encuentra en régimen súper crítico se debería asignar aguas arriba, si el régimen va a ser de régimen subcrítico se deberá asignar aguas abajo y para cuando el régimen es mixto a lo largo del tramo se recomienda que se asigne tanto en aguas arriba como aguas abajo.

7.5.5 Numero de Froude

El número de Froude es un parámetro que caracteriza el flujo en canales abiertos, existe flujo en un canal por la fuerza de gravitación de acuerdo con esto el parámetro que representa este efecto gravitacional es el número de Froude siendo el cociente entre la velocidad media y celeridad relativa de la onda dinámica representada en la ecuación:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g L}}$$

Ecuación 28

Dónde: L = Parámetro de longitud [m]; V = Parámetro de velocidad [m/s]; g = Aceleración de la gravedad [m/s²]

El flujo se clasifica como:

Fr<1, Flujo subcrítico, tiene una velocidad relativa baja y la profundidad es relativamente grande, prevalece la energía potencial. Corresponde a un régimen de llanura.

Fr=1, Flujo crítico, es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.

Fr>1, Flujo supercrítico, tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad prevalece la energía cinética. Propios de cauces de gran pendiente o ríos de montaña.

La interfaz puede De acuerdo con esto se define las condiciones de contorno dentro del software teniendo en cuenta que la modelación se realiza en condiciones de régimen permanente.

8. MARCO CONTEXTUAL

8.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del río Chicú, hace parte de la región Andina, del altiplano Cundiboyacense y de la Cuenca alta del río Bogotá. Se encuentra localizada en el departamento de Cundinamarca, a una distancia de Bogotá de 45 kilómetros; limita por el norte con el municipio de Tabio, al oriente con los municipios de Cajicá, Chía y Cota; al occidente con los municipios de Subachoque, el Rosal y Madrid, y al sur con parte del municipio de Tenjo (CAR, 2011).

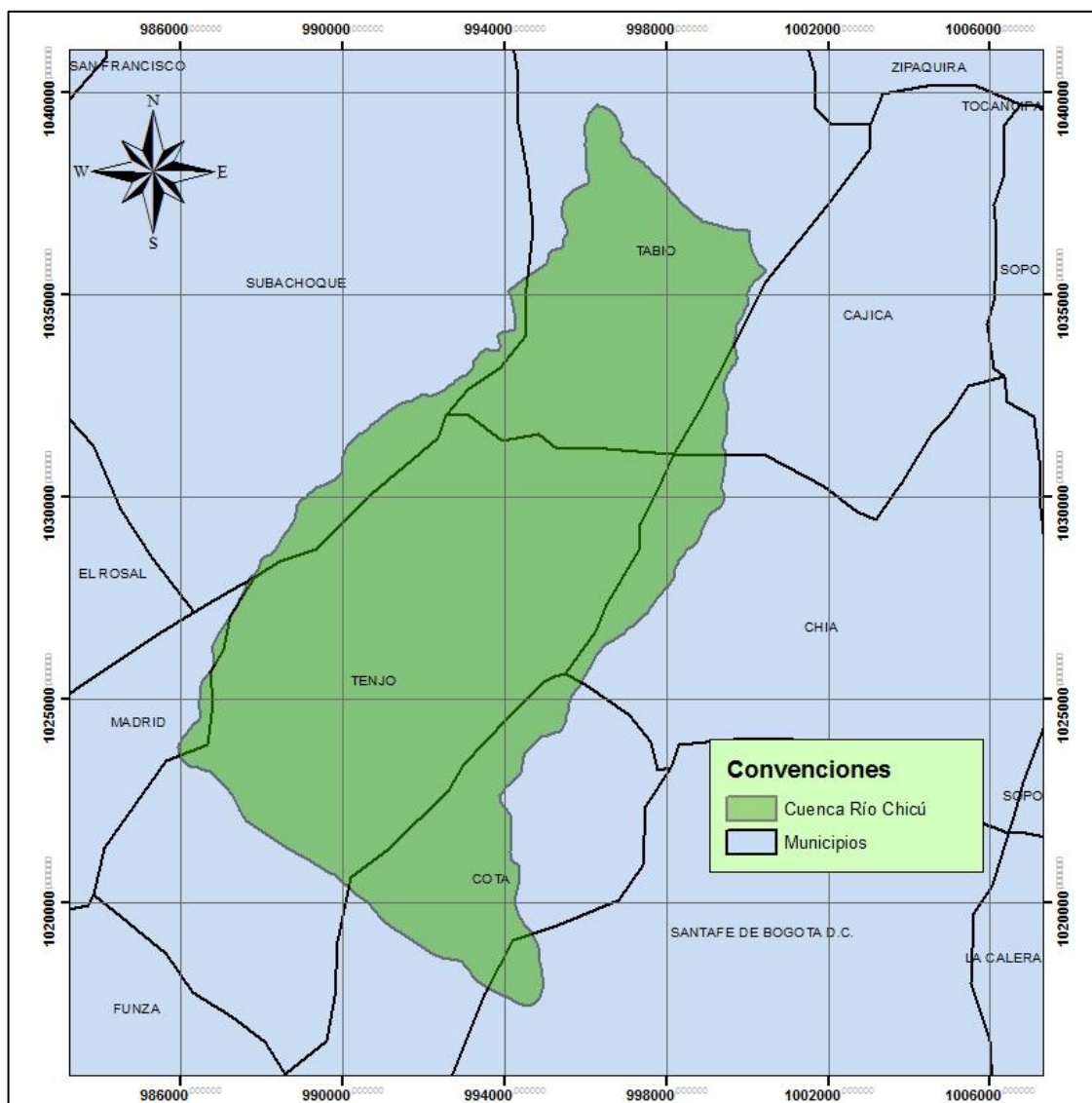


Ilustración 8-1 Localización Cuenca del río Chicú
Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

8.2 MORFOMETRÍA DE LA CUENCA

8.2.1 Parámetros físicos

- **Área de la cuenca**

El área de una cuenca puede ser considerada como una de las características físicas más importantes, ya que, de acuerdo con esta, puede recoger mayor o menor cantidad de precipitación generando crecidas en un tiempo determinado. La cuenca del río Chicú tiene un área de 142,237 km², considerándose como una cuenca pequeña de acuerdo con la Tabla 8-1 (Aguirre, 2007).

Tabla 8-1 Clasificación de cuencas de acuerdo a su área

Tamaño de la cuenca (km²)	Descripción
< 25	muy pequeña
25 a 250	pequeña
250 a 500	intermedia-pequeña
500 a 2500	intermedia-grande
2500 a 5000	grande
> 5000	muy grande

Fuente: Aguirre, 2007

- **Perímetro de la cuenca**

El perímetro de una cuenca es definido como la medición del límite que envuelve el área considerada que corresponde al parte-aguas de la cuenca; la cuenca del río Chicú cuenta con un perímetro de 60,17 km.

- **Longitud de la cuenca**

Se define como: la longitud medida desde la salida de la cuenca, hasta el límite de la divisoria, paralela al cauce principal, a lo largo de una línea recta. En la cuenca del río Chicú se tiene una longitud de 22,29 km.

8.2.2 Datos topográficos de la cuenca

A continuación, en la Tabla 8-2 se presentan los factores de forma y longitudes que describen topográficamente las características de la cuenca del río Chicú.

Tabla 8-2 Factores de forma de la cuenca

Parámetro	Valor
Cota máxima (m.s.n.m)	3250
Cota mínima (m.s.n.m)	2550
Ancho de la cuenca (Km)	10.52
Área de la vertiente mayor (Km ²)	89.8
Área de la vertiente menor (Km ²)	52.5
Longitud de curvas de nivel (Km)	513.21
Área del rectángulo (Km ²)	240.93

Fuente: Elaboración propia.

8.2.3 Parámetros de forma

- Índice de forma (IF)

Es la relación entre el área y la longitud axial en donde relaciona la velocidad de las corrientes, los histogramas de lluvias y el tiempo de concentración, dado por la siguiente ecuación (Esquivel Jiménez, 2015).

$$IF = \frac{\text{Área de la cuenca}}{\text{Longitud axial}^2} = \frac{142.237}{22.29^2} = 0.29$$

Ecuación 29

El índice de forma de la cuenca río Chicú se encuentra en el rango de 0 – 0.4 que corresponde a una cuenca alargada tal como se muestra en la

Tabla 8-3, un factor de forma bajo está menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño, pero con mayor factor de forma (Monsalve, 1999), ya que poseen una mayor amortiguación de crecientes por su forma alargada lo que le permite tener mayor tiempo de concentración.

Tabla 8-3 Rangos de índices de forma

Valores	Forma de la cuenca
Menores de 0.4	Alargada
Entre 0.4 y 0.7	Oblonga
Mayor a 0.7	Redonda

Fuente: Esquivel, 2015

- **Índice de Gravelius o Coeficiente de compacidad (Kc)**

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la de la cuenca (Monsalve, 1999).

$$Kc = \frac{\text{Perímetro}}{2x\sqrt{\pi \times \text{área}}} = \frac{60.17}{2x\sqrt{\pi \times 142.237}} = 1.41$$

Ecuación 30

Tabla 8-4 Rangos de Índice de Gravelius o Coeficiente de compacidad

Valores	Interpretación
1.0 a 1.25	Casi redonda a oval redonda
1.26 a 1.50	Oval redonda a oval oblonga
1.51 a mas de 2	Oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: Esquivel, 2015

La cuenca del río Chicú cuenta con un coeficiente de compacidad de 1.41, lo que indica que la cuenca es Oval redonda a oval oblonga de acuerdo con la Tabla 8-4, así mismo el valor del coeficiente de compacidad es muy cercano a la categoría oval oblonga a rectangular oblonga. La cuenca presenta un comportamiento con tendencia media a las inundaciones ya que posee una susceptibilidad media a la concentración de agua.

- **Índice de alargamiento (IA)**

El índice de alargamiento relaciona la longitud máxima de la cuenca con el ancho máximo, este fue propuesto por Horton.

$$IA = \frac{\text{Longitud máxima}}{\text{Ancho máximo}} = \frac{22.29}{9.6} = 2.12$$

Ecuación 31

Este valor confirma, la cuenca del río Chicú tiene la característica de ser alargada, ya que se obtuvo un valor superior a uno, caracterizándola según Tabla 8-5 como alargada, lo cual indica que posee mayores valores de tiempo de concentración, por lo que puede presentarse eventos de inundaciones.



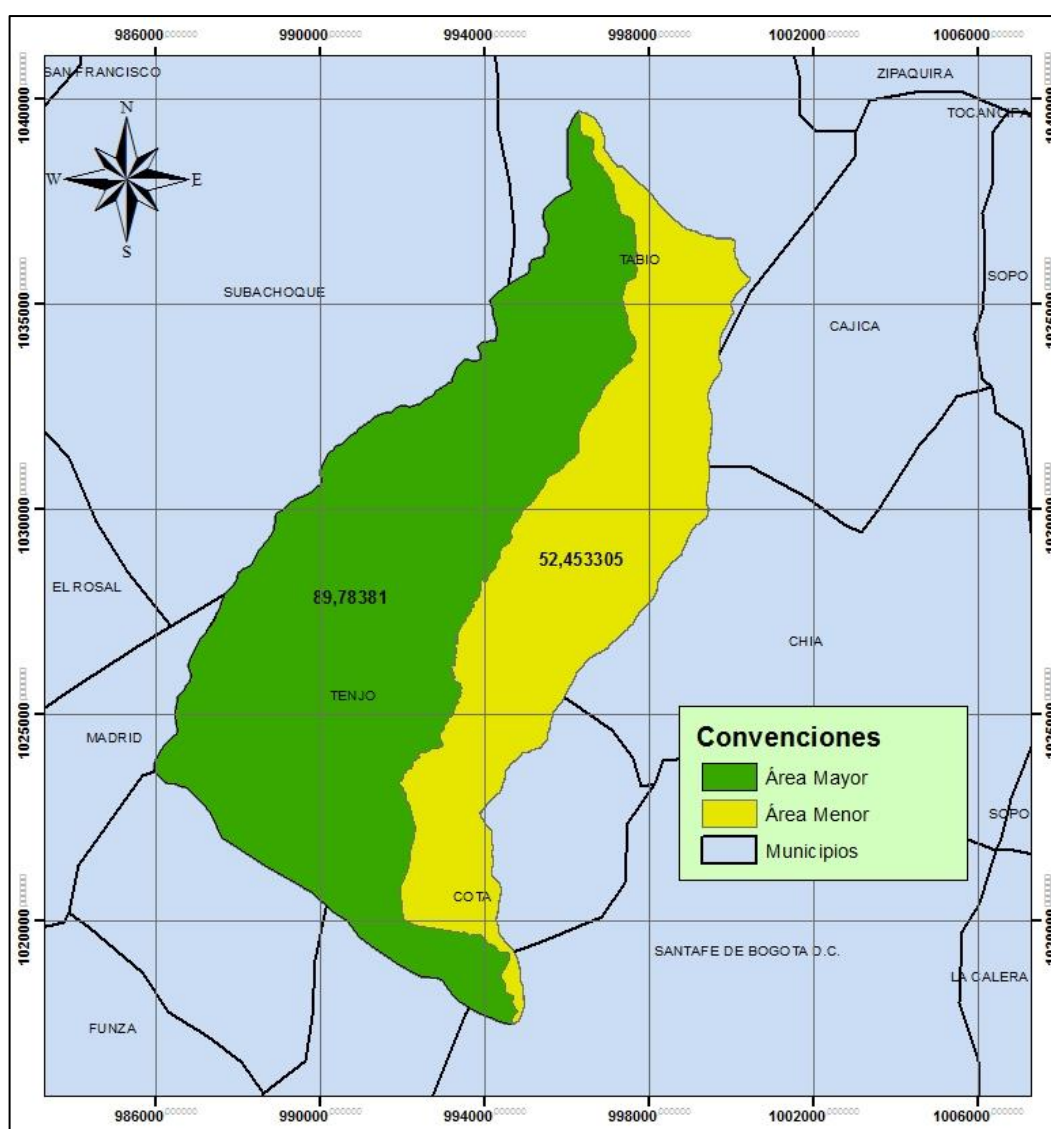
Tabla 8-5 Rangos de Índice de Alargamiento.

Valores	Interpretación
> 1	Alargada
Proximo a 1	Achatada

Fuente: Esquivel, 2015

- **Índice Asimétrico**

Es la relación entre el área mayor y área menor que conforman las vertientes, de acuerdo con la separación del cauce principal (Keller y Pinter, 1996). Esta relación puede apreciarse en la Ilustración 8-2.



$$IM = \frac{\text{Vertiente mayor}}{\text{Vertiente menor}} = \frac{89.8}{52.5} = 1.71$$

Ecuación 32

La cuenca del río Chicú tiene un índice asimétrico de 1.71, lo cual indica que la vertiente del lado izquierdo (Verde) recoge un mayor volumen de lluvia, por lo que es de esperarse que el caudal aportado por esta zona sea mayor que el del área derecha (Amarillo), como se puede observar en la ilustración anterior, esto permite plantear que la cuenca en esta zona sufre un proceso erosivo, arrastrando mayor sedimento que la de su lado opuesto debido a que su red de drenaje es más densa que la zona.

- **Índice de Homogeneidad (IH)**

Este parámetro se obtiene a partir de la división del área de la cuenca con el rectángulo realizado por medio de la longitud y ancho mayor de la cuenca. Este índice es un complemento del índice de alargamiento.

$$IH = \frac{\text{Área de la cuenca}}{\text{Área de rectángulo}} = \frac{142.237}{240.93} = 0.59$$

Ecuación 33

De acuerdo al índice de homogeneidad, con un valor de 0.59, para la cuenca del río Chicú, indica que la hoya hidrográfica no es heterogénea, por lo cual se interpreta que la cuenca posee una longitud más grande que su ancho máximo. En la siguiente ilustración se presenta el rectángulo y la cuenca del río Chicú.

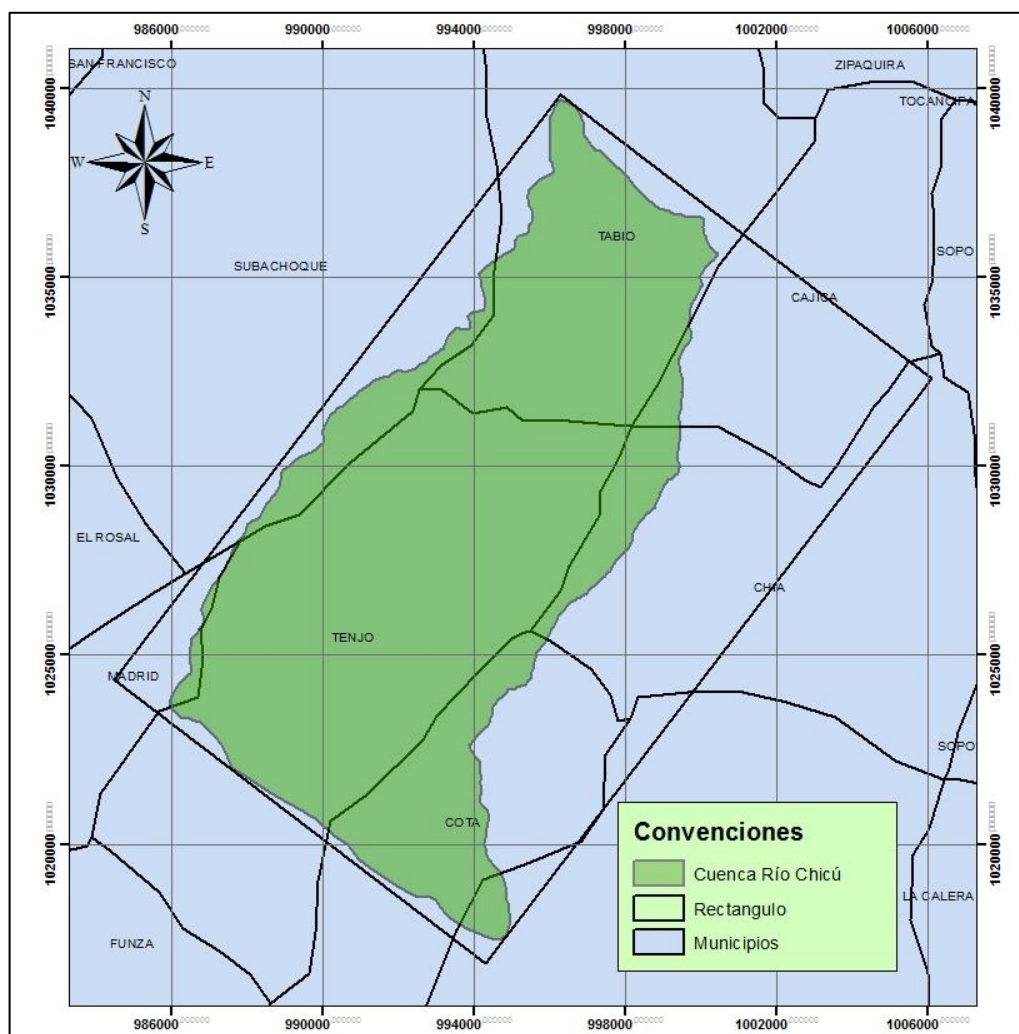


Ilustración 8-3 Cuenca del río Chicó y rectángulo para Índice de Homogeneidad
 Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

8.2.4 Parámetros de relieve

- **Pendiente media de la cuenca**

Esta característica controla en buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por lo tanto, el tiempo que lleva el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales (Monsalve, 1999), estas pendientes medias se calcularon con curvas de nivel cada 50 metros utilizando la Ecuación 34.

$$PM = \frac{\text{Equidistancia entre curvas} \times \sum \text{lon. curvas}}{\text{Área de la cuenca}} = 18 \%$$

Ecuación 34

La cuenca del río Chicú tiene la característica de poseer una pendiente media del 18% que corresponde a una pendiente baja, lo cual ocasiona tiempos de concentración altos, permitiendo que sea susceptible a inundaciones. Por otra parte, la baja pendiente ocasiona velocidades bajas, que ocasionan el depósito de sedimentos, provocando que el lecho del río aumente el nivel y este propenso a que el agua sobrepase la corona de ciertas partes del río, de tal manera que se presenten inundaciones.

En la siguiente ilustración se pueden observar las curvas de nivel en donde se aprecia la baja pendiente que posee la cuenca, y lo susceptible que puede ser a una inundación.

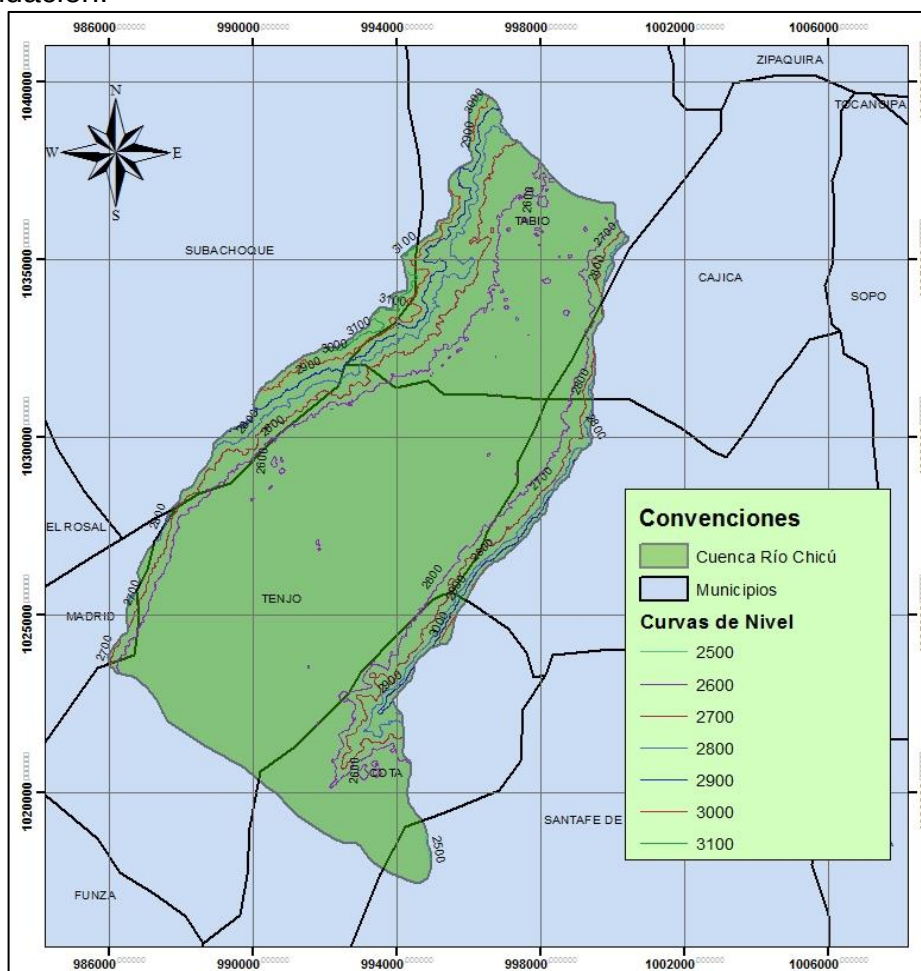


Ilustración 8-4 Curvas de Nivel Cuenca río Chicú

Fuente: Elaboración propia.

- **Curva Hipsométrica**

La curva hipsométrica representa el estudio de la variación de la elevación de los varios terrenos de la cuenca con referencia al nivel medio del mar, en donde relaciona el valor de la cota, en las ordenadas, con el porcentaje del área acumulada, en la abscisa (Monsalve, 1999).

Es frecuente definir el relieve de una cuenca por medio de esta curva, la cual representa gráficamente las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes (López y Blanco, 1976).

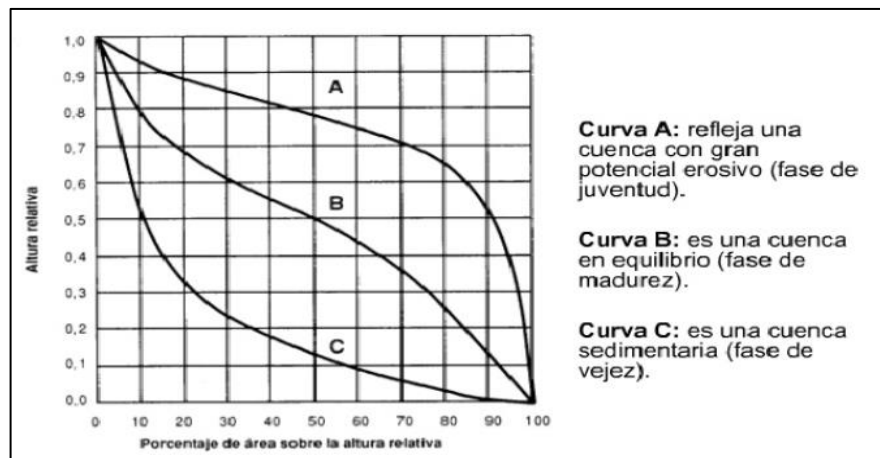
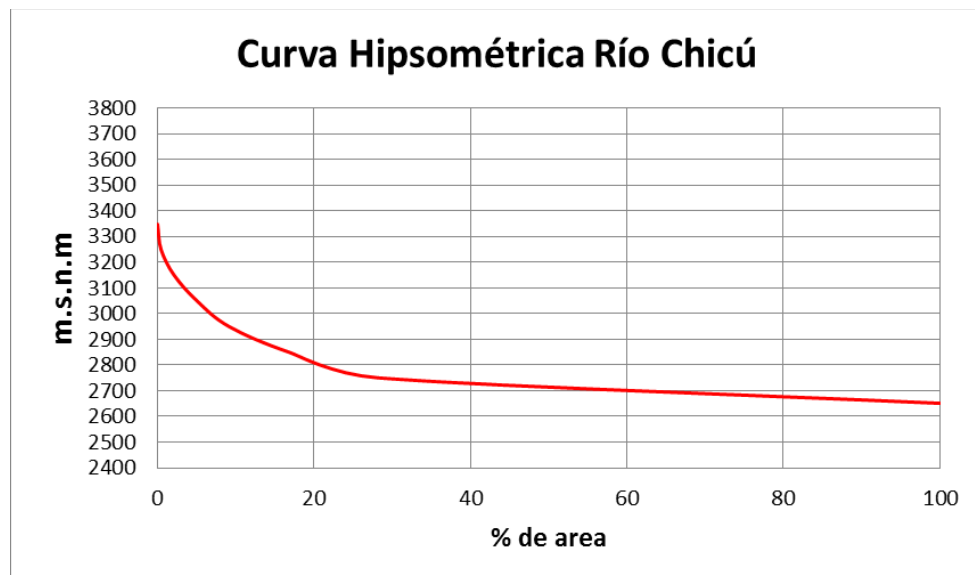


Ilustración 8-5 Interpretación Curva Hipsométrica.

Fuente: Rojas, 2015



Grafica 8-1 Curva Hipsométrica Cuenca río Chicú

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Gráfica 8-1. El río Chicú se encuentra entre las altitudes 3300 m y 2650 m considerándose una cuenca de alta montaña, por otra parte, el 72% del área de la cuenca se encuentra entre las cotas 2750 y 2650 distribuida sobre la parte media y baja de esta, considerando que es una cuenca sedimentaria en donde se encuentra en su etapa de vejez de acuerdo con la Ilustración 8-5.

- **Coeficiente Orográfico o de Masividad (CO)**

El coeficiente orográfico es la combinación de variables esenciales de relieve, corresponde a la relación entre la altitud media de la cuenca al cuadrado y el área de esta (Romero Díaz & López Bermúdez, 1987).

$$CO = \frac{\text{Altura media de cuenca}^2}{\text{Área total}} = \frac{2607}{142.237} = 0,05$$

Ecuación 35

La cuenca del río Chicú presenta un valor orográfico de 0.05, lo cual es bajo, según la clasificación presentada en la Tabla 8-6, lo que demuestra que la cuenca tiene la característica de tener un relieve que presenta poca degradación bajo efectos de una precipitación.

Tabla 8-6 Rangos de Coeficiente Orográfico

Valores	Interpretación
Mayor a 1	Alto
Menor a 1	Bajo

Fuente: Romero & López, 1987

8.2.5 Parámetros del Cauce

- **Índice de densidad de drenajes (Dd)**

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y el área total de la cuenca, en la Tabla 8-7 se puede observar los valores que usualmente toma las cuencas de baja, media y alto drenaje.

Tabla 8-7 Rangos de densidad de drenajes

Valores de densidad de drenajes principales (km/km ²)	Calificación
Mayores a 3.5	Densidad alta
Entre 3.5 y 0.5	Densidad media
menores a 0.5	densidad baja

Fuente: Monsalve, 1999

$$Dd = \frac{\text{Longitud total de drenajes}}{\text{Área total de la cuenca}} = \frac{301.068}{142.237} = 2.12$$

Ecuación 36

De acuerdo con el resultado obtenido, se puede concluir que es una cuenca medianamente drenada. La cual tiene la característica de tener una baja pendiente, existiendo varios cuerpos de agua lenticos sobre ella creados tanto de forma natural como artificial. En la Ilustración 8-6 se puede observar que la red de drenaje se encuentra mayormente distribuida sobre la parte alta de la cuenca, en donde se caracteriza por tener pendientes más altas, haciendo esta zona menos susceptible a las inundaciones. Por el contrario, en la parte media y baja en donde sus pendientes son menores, aumenta los tiempos de concentración.

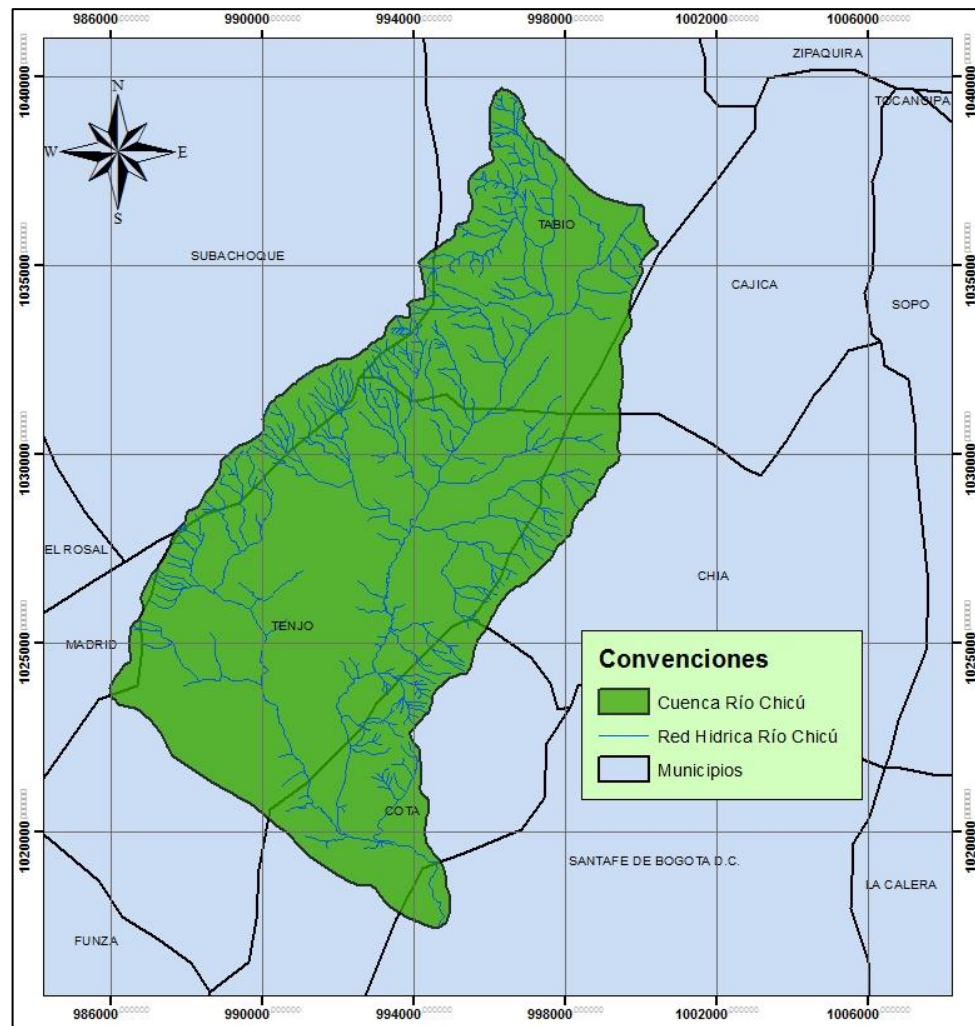


Ilustración 8-6 Red de drenajes de la Cuenca del río Chicú
Fuente: Elaboración propia.

- **Clasificación de Horton**

La clasificación de Horton refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca, clasificando cada corriente, desde los pequeños canales que no tienen tributarios llamados de orden (1), hasta cuando dos corrientes de orden (n) se unen (Monsalve, 1999).

Con base en esta metodología se determinó que el mayor orden en la cuenca es 6 como se puede observar en la Ilustración 8-7, lo cual indica que la cuenca cuenta con una red amplia en ramificaciones distribuidas en las partes altas, por donde drenan sus aguas haciendo que tenga diferentes aportes al cauce principal.

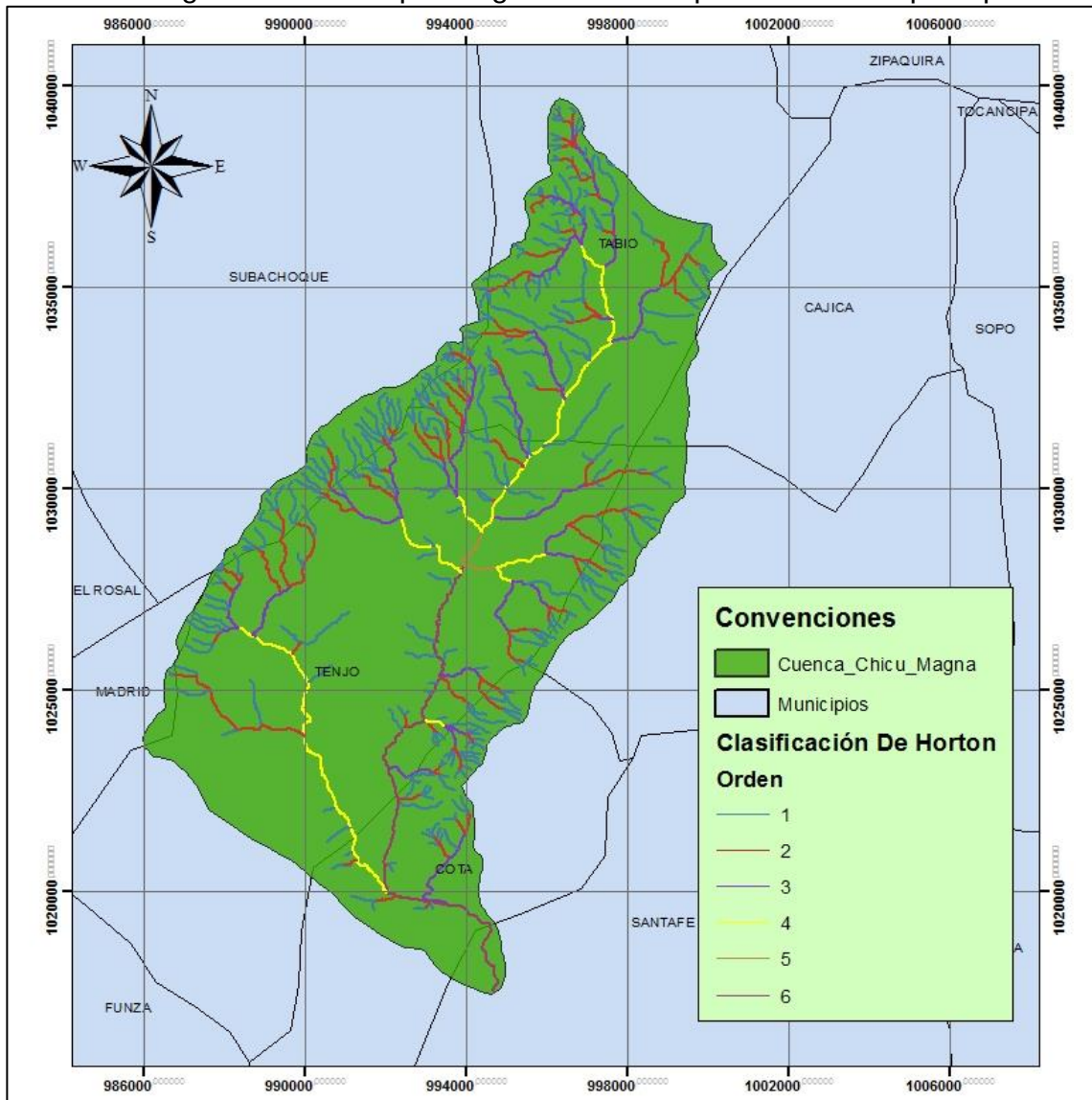


Ilustración 8-7 Clasificación de Horton

Fuente: Elaboración propia.

- **Rugosidad de drenajes (Rc)**

La rugosidad de la cuenca está mayormente vinculada a la densidad de los drenajes con el relieve de la cuenca (Romero & López, 1987).

$$Rc = \text{Densidad de drenaje} \times \text{desnivel de la cuenca} = 0.38$$

Ecuación 37

Tabla 8-8 Rango de Rugosidad de Drenaje

Valores	Interpretación
Mayor a 3.5	Alta
Entre 3.5 y 1.0	Moderada
Menor a 1.0	Baja

Fuente: Romero & López, 1987

La cuenca del río Chicú tiene la característica de tener una baja relación entre la cantidad de drenajes y la pendiente de la cuenca, por lo cual genera baja torrencialidad cuando se presentan lluvias, esto de acuerdo con el valor obtenido de 0.38 en este índice de acuerdo a la Tabla 8-8.

- **Tiempo de Concentración (Tc)**

Se denomina el tiempo que la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de agua dentro de la cuenca toma para llegar a una sección determinada de dicha corriente (Monsalve, 1999).

$$Tc = \frac{0.01947 \times Lc^{0.77}}{S^{0.385}} = 136.92$$

Ecuación 38

Dónde: Lc = Longitud del cauce principal de la cuenca (m); S = Pendiente media del cauce por el método de Taylor – Schuwarz (m/m)

El tiempo de concentración para la cuenca del río Chicú es de 136.92 min, es decir 2 horas y 28 minutos, que, para ser una cuenca pequeña, posee un tiempo de concentración alto debido a la baja pendiente que presenta el terreno en el cual escurren las aguas. La cuenca al tener tiempos elevados de concentración produce que mantenga una susceptibilidad media a inundaciones, ya que por las características del relieve que posee, hace que, en un evento máximo de precipitación, la escorrentía no sea conducida de una forma óptima evacuándola de la zona, sino que se represe en lugares del cauce y ocupe las llanuras de inundación natural, que en algunos casos se encuentran ocupadas por los lugareños que residen en la zona.

8.3 CLIMATOLÓGIA

Para la caracterización espacio-temporal de las variables climáticas, se tomó el periodo que se modeló en HEC-HMS el cual corresponde al evento más reciente de máxima precipitación que se tiene información. Este suceso se da entre los años 2010 – 2011, desde el mes de abril de 2010 hasta el mes de agosto de 2010. Debido a la falta de datos en las estaciones limnimétricas no se pudo realizar la modelación en un lapso mayor.

Para realizar la interpolación de los datos de precipitación y temperatura se utilizó la herramienta IDW, la cual interpola a una superficie de ráster el comportamiento espacial, a partir de distancias inversas, partiendo de las estaciones que se representan como puntos (ArcGis, s.f).

8.3.1 Precipitación

Tabla 8-9 Estaciones Utilizadas para el análisis de precipitación

CÓDIGO	ESTACIÓN	VARIABLE	VARIABLE ESTUDIADA	CORPORACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (m)	CORRIENTE	FECHA DE REGISTRO	
									INICIO	SUSPENSIÓN
21206020	SANTILLANA	ME	PRECIPITACIÓN	IDEAM	4.8985	-74.105	2575	BOGOTÁ	15/02/1997	-
21201210	HATO EL	PL	PRECIPITACIÓN	IDEAM	4.8664	-74.154	2575	SUBACHOQUE	15/06/1978	-
21206490	HATO ALTO	ME	PRECIPITACIÓN	IDEAM	4.8351	-74.140	2570	BOGOTÁ	18/08/1993	31/12/2012
2120136	STA INES	PM	PRECIPITACIÓN	CAR	4.8065	-74.142	2550	R-CHICÚ	03/01/1980	-

Fuente: Elaboración propia

- **Estimación de datos faltantes**

Para escoger el método de completado de datos se realizó un análisis del porcentaje de datos faltantes de precipitaciones mensuales. Para este análisis se tomaron las estaciones Santa Inés, Tabio, Ramada La y Santillana, que cuentan con el mayor rango de años con datos existentes de la zona de estudio, dando como resultado la Tabla 8-10 en la cual se escogió un rango de 30 años desde 1984 a 2014. La estación con mayor número de datos faltantes es la estación Santa Inés con 22 %, que representa 79 datos, es la estación Santillana y Ramada La, le sigue con 16 % y 8 % respectivamente; la estación que cuenta con menos datos faltantes es Tabio.

Tabla 8-10 Porcentajes de datos faltantes.

	30 AÑOS	ESTACIONES			
		STA INÉS	TABIO	RAMADA LA	SANTILLANA
1984	DATOS FALTANTES	79	13	29	57
2014	% DATOS FALTANTES	22 %	4 %	8 %	16 %

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Tabla 8-10 se decidió utilizar un menor rango de años de estudio, teniendo en cuenta los valores diarios de precipitación, se lograron utilizar tres estaciones más que son la estación Hato El, Hato Alto y Pantano Redondo, que contaban con porcentajes menores de datos faltantes (Tabla 8-11) permitiendo

interpretar mejor el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Chicú con una mejor especialización de las precipitaciones.

Tabla 8-11 Porcentajes de datos faltantes

	19 AÑOS	ESTACIONES						
		HATO EL	STA INES	TABIO	RAMADA LA	SANTILLANA	HATO ALTO	PANTANTO REDONDO
1994	DATOS FALTANTES	124	478	597	707	983	1684	474
2013	% DATOS FALTANTES	2%	7%	8%	10%	13%	23%	6%

Fuente: Elaboración propia.

Identificado el rango de años en estudio y el porcentaje de datos faltantes el paso siguiente es escoger el método para el completado de datos, a continuación, se presentan los métodos utilizados para esto. Debido a la localización de las estaciones mostradas en la

Tabla 8-11, se escogieron cuatro estaciones representativas de la cuenca, las cuales fueron: Santillana, Hato El, Hato Alto y Santa Inés.

Distribución temporal durante 1994 - 2013

La región se caracteriza por tener precipitaciones considerables que varían entre 300 mm y 1400 mm al año, como se puede observar en la Ilustración 8-11, en el periodo de tiempo del año 2000 y el 2012 se presentaron dos fenómenos extremos, donde en el año 2003 se acumuló una precipitación mínima de 82 mm registrada en la estación Hato Alto, y una máxima del mismo año de 755 mm en la estación Hato El, exponiendo las más bajas precipitaciones en los últimos 24 años, por el contrario las máximas precipitaciones se presentaron en los años 2010 y 2011, en estos años se acumularon precipitaciones de 1386 mm y 1395 mm al año, registradas en la estación Santillana, siendo los años donde se tuvo el registro más alto de precipitación en la línea de tiempo estudiada.

Por otra parte, en la zona de estudio se evidencia una variabilidad alta del año 2009 al 2010 de 618 mm registrada en la estación el hato, como se puede observar en la Ilustración 8-11, cabe resaltar que este fenómeno se repitió en el registró de las demás estaciones con variabilidades, en la estación Santillana se registró una variabilidad de 747 mm (53%) entre el año 2009 al 2010, representando el doble de su precipitación acumulada en un año.

De acuerdo a la Tabla 8-12 muestra los valores medios, mínimos y máximos anuales de precipitación registradas dentro de la serie de tiempo estudiada (19 Años) para cada estación, los valores de precipitación tienen la característica de tener un umbral (pequeño, medio o alto) entre las estaciones. Los valores mínimos anuales de la cuenca se encuentran en las estaciones Hato Alto (82.3 mm) y Tabio (275.8 mm) registrados en los años 2003 y 2005 respectivamente, y los máximos en las estaciones Santillana (1395.9 mm) y Ramada La (1369.9 mm), cabe aclarar que la estación Ramada se encuentra por fuera de la zona de estudio, pero permite caracterizar la zona de estudio.

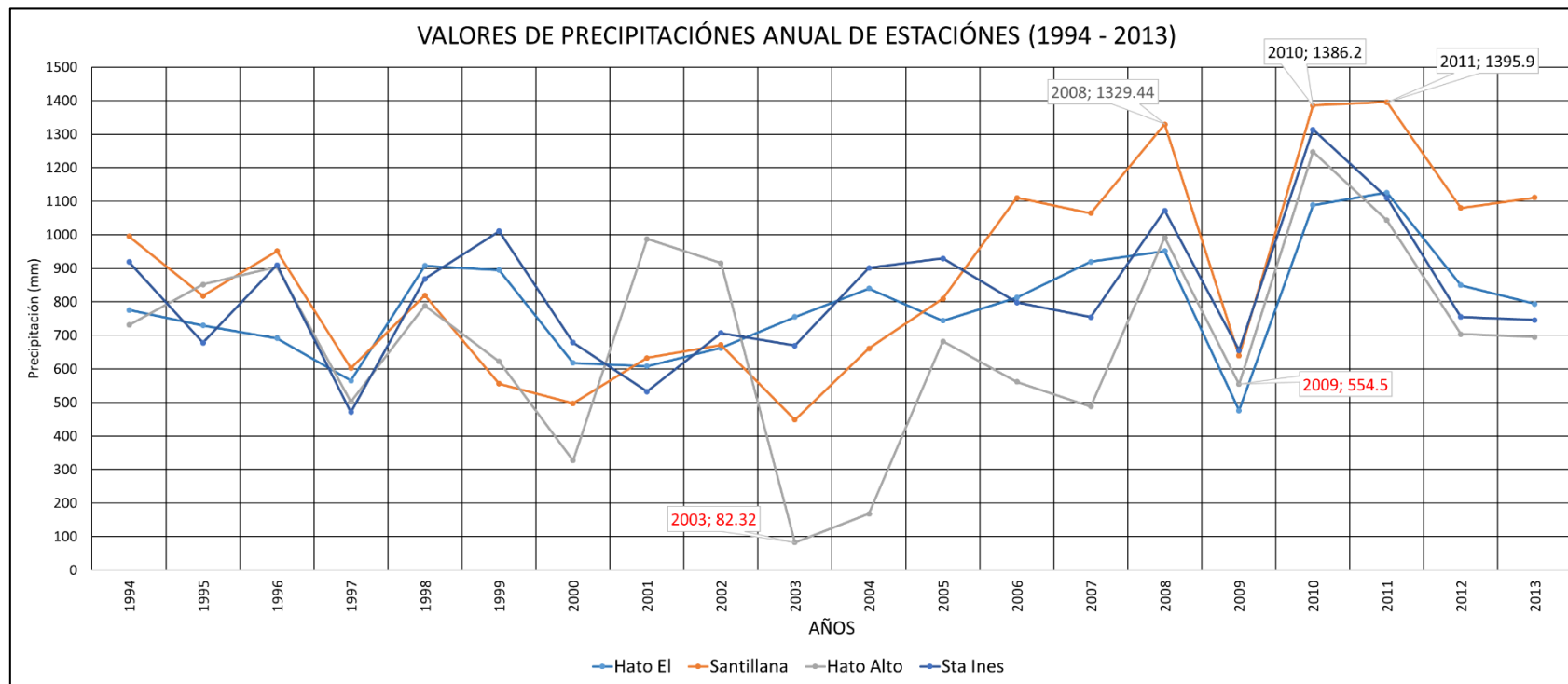


Gráfico 8-1 Serie de tiempo de precipitaciones anuales
Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica

Tabla 8-12 Valores mínimos, medios y máximos precipitaciones anuales

Estación	Mínima (mm)	Media (mm)	Máxima (mm)	Desviación estándar (mm)
Hato El	476.1	790.5	1125.8	165.7
Santillana	448.2	879.0	1395.9	295.7
Hato Alto	82.3	692.4	1247.3	293.7
Sta Inés	470.9	824.1	1314.0	203.7

Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica

Se puede observar en la Tabla 8-12 el comportamiento de la precipitación media mensual de las diferentes estaciones. La grafica se caracteriza por tener dos picos que representan las precipitaciones medias máximas que se generan durante el año, dividiendo las épocas de lluvia en dos periodos, el primer periodo de lluvia ocurre entre los meses de Abril y Mayo con precipitaciones que oscilan entre 116.1 – 97.0 mm para el mes de abril, y para el mes de mayo entre 105.5 – 70.1 mm, y el segundo periodo de lluvia se da en los meses de octubre y noviembre con precipitaciones que oscilan entre 114.0 - 75 mm en el mes de octubre y para el mes de noviembre entre 94.8 – 70.1 mm.

El análisis anterior corresponde a la distribución temporal de la media mensual multianual desde 1994 hasta el año 2013, la cual resumen de forma general el comportamiento de la precipitación en la cuenca. A continuación, se presenta un análisis temporal del periodo en que se enfoca el presente informe, el cual comienza en el mes de abril de 2010 hasta el mes de noviembre de 2010.

Para el análisis del periodo general se tuvo en cuenta estaciones fuera de la cuenca, con el fin de abarcar las periferias de la hoya hidrográfica y conocer mejor el comportamiento de la zona, mientras que, para el análisis puntual, es decir, de abril a noviembre de 2010, se tomó solo las estaciones dentro de la cuenca y las que se encontraban alrededor máximo a 500 metros. Por tal motivo se presentan solo cuatro estaciones en el siguiente análisis.

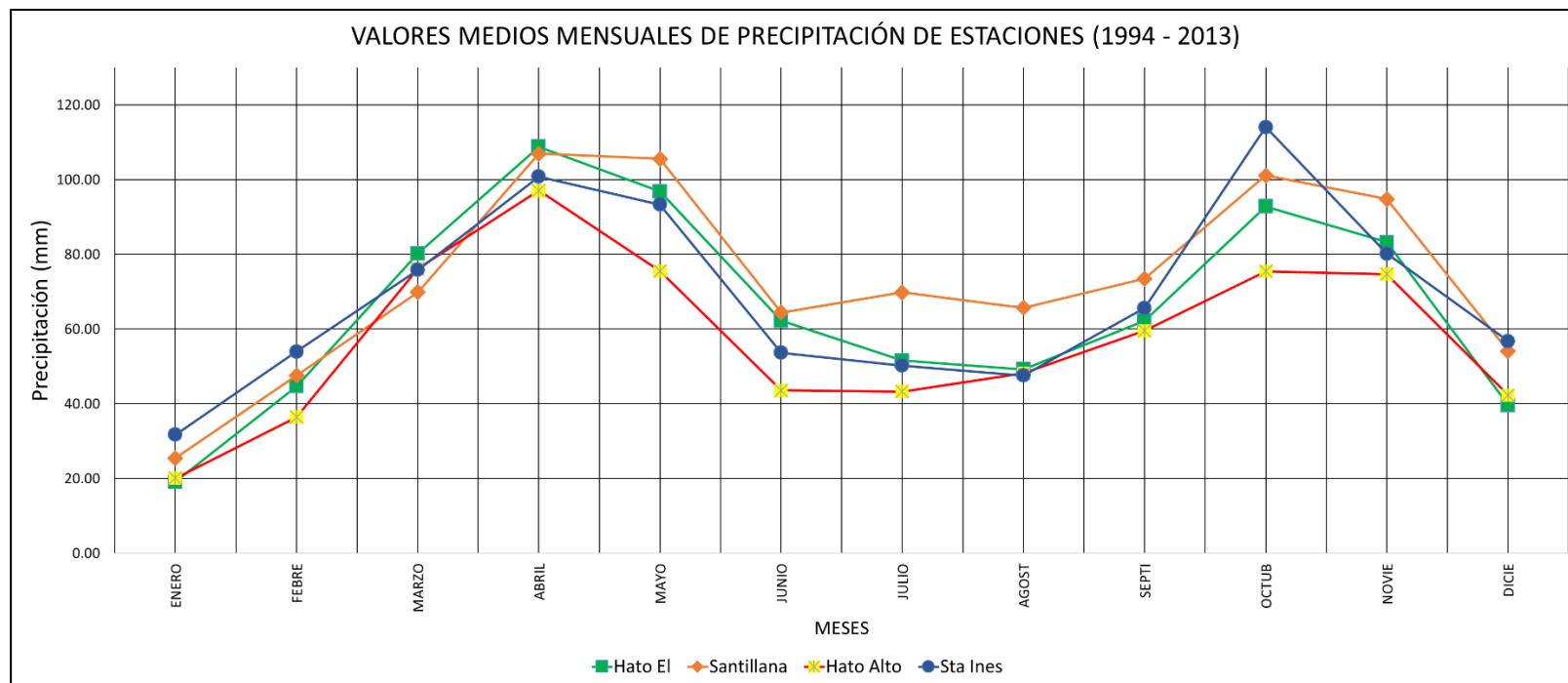


Gráfico 8-2 Valores medios mensuales de precipitación de estaciones
Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica.

PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA

Para la determinación de la precipitación media de la cuenca se utilizó la metodología de Polígonos de Thiessen con el software ArcGIS, tomando como base la localización de las cuatro estaciones climatológicas de las que se tenía información. El resultado de este proceso se observa en la siguiente ilustración.

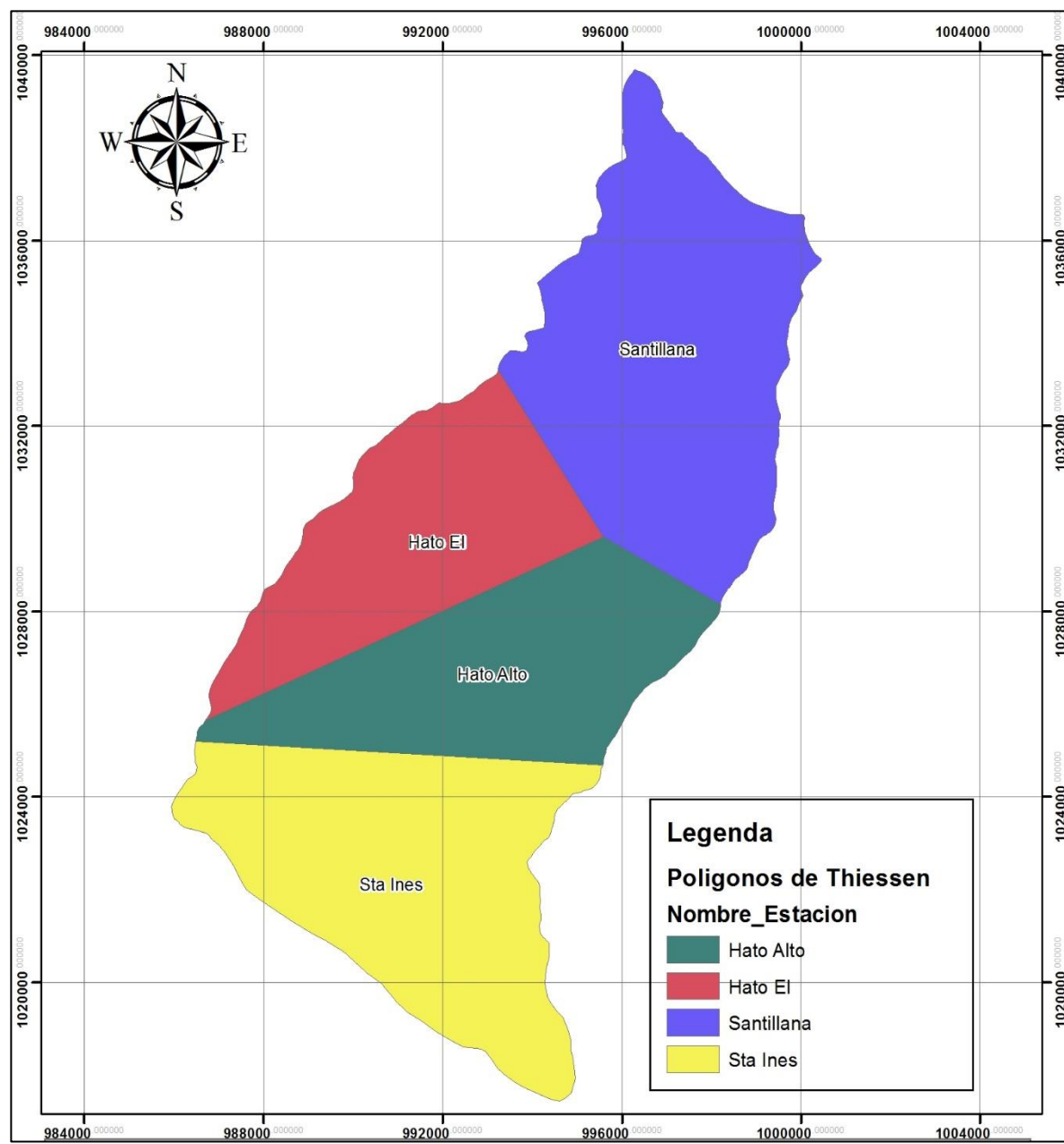


Gráfico 8-3 Polígonos de Thiessen – Cuenca Río Chicú
Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

Este procedimiento permitió determinar la precipitación media de la cuenca, que es igual a 1086.2 mm, la cual se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 8-13 Cálculo de la precipitación media de la cuenca del río Chicú

POLIGONO	ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN ACUM. (mm)	AREA		PRECI*%AREA
			km ²	%	
1	SANTILLANA	1227.90	45.06	32%	389.03
2	HATO EL	897.10	39.83	28%	251.22
3	HATO ALTO	1091.80	30.00	21%	230.25
4	STA INES	1122.00	27.34	19%	215.7
		TOTAL	142.24	100%	1086.2

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

Distribución temporal – Periodo Modelado

La Tabla 8-12 presenta los valores mensuales de precipitación, donde se destaca el mes de abril, el cual presenta los valores más altos en las cuatro estaciones, el segundo con mayor volumen de agua registrado es el mes de noviembre, le sigue julio, mayo, octubre, junio, agosto y por último septiembre.

En las tierras altas de las cordilleras, en el Valle del Cauca y en los valles altos del Magdalena, enero, febrero, junio, julio, agosto y en algunas partes diciembre, son meses de verano (temporada seca); los demás meses corresponden a la temporada de lluvias y a épocas de lloviznas o garuas (Calendario Climatológico Aeronáutico Colombiano, 1967).

Con base en lo anterior se puede establecer que el periodo en estudio corresponde a un evento extremo, en el cual los meses característicos de época seca presentan información de lluvia elevada.

Se observa en la Tabla 8-14 la precipitación promedio mensual para un periodo normal, el cual corresponde al año 2013. Al realizar una comparación entre los datos registrados durante el año 2010 y el año 2013 en las cuatro estaciones para los 8 meses de estudio, se tiene que en los meses correspondientes a la época seca en el año 2013, es decir junio, julio y agosto, presentaron un volumen bajo de precipitación mientras que en 2010, estos mismos presentaron aproximadamente el doble de lo registrado en el año normal, por lo que se observa la influencia de un evento climático extremo en la zona de estudio, concluyéndose que la cuenca durante este periodo de tiempo se vio obligada a transportar un volumen importante de agua, por lo que las zonas naturales de inundación fueron abastecidas debido al exceso del líquido.

Tabla 8-14 Precipitación mensual por estación – Periodo de estudio 2010

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN_mm							
	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE
SANTILLANA	218.3	189.7	81.0	200.2	76.0	75.9	143.5	243.3
HATO EL	212.5	99.0	69.1	158.5	65.0	88.0	69.0	136.0
HATO ALTO	251.8	117.2	108.3	179.3	93.2	60.3	105.3	176.4
STA INES	215.9	194.4	73.9	214.7	94.2	55.6	110.7	162.6

Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica.

Tabla 8-15 Precipitación mensual por estación – Periodo normal 2013

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN_mm							
	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE
SANTILLANA	144.30	121.60	28.40	70.10	131.10	99.80	86.80	154.40
HATO EL	127.50	139.40	14.50	28.40	58.50	37.70	44.40	114.00
HATO ALTO	98.31	94.60	15.46	35.41	68.18	49.40	47.25	96.95
STA INES	98.00	62.50	44.50	24.00	89.60	15.60	52.40	116.00

Fuente: Elaboración propia con base en información CAR

En cuanto a la Gráfico 8-4 se puede concluir el mes de mayor precipitación en la cuenca: abril. Además, la estación que registró mayor precipitación en este mes fue Hato Alto, ubicada en la parte central de la cuenca. En cuanto al mes con menos volumen de agua registrado, es septiembre, y la estación que registró el menor valor fue Sta Inés, ubicada en el sector sur de la cuenca.

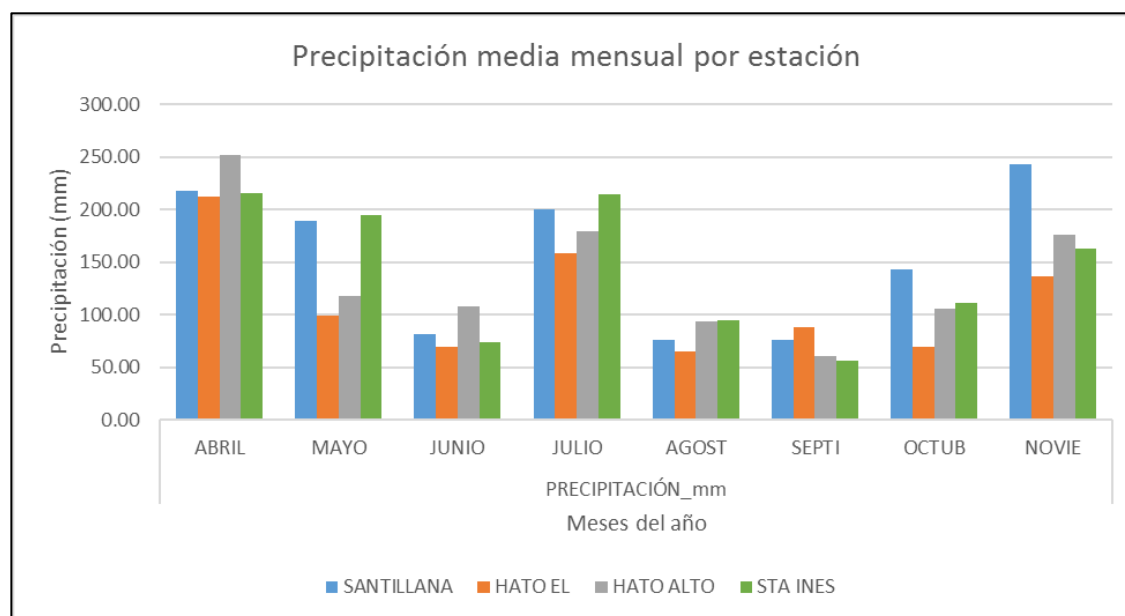


Gráfico 8-4 Precipitación mensual abril 2010 – Noviembre 2010

Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica

Distribución espacial

Se puede observar en la siguiente ilustración el volumen de precipitación media mensual multianual registrado por las estaciones en cada zona de la cuenca en el

periodo de estudio, donde se destaca la estación Santillana, la cual obtuvo el más alto dato de precipitación en los 8 meses con un valor de 1227 mm; seguido se tiene la estación Santa Inés con un volumen de 1122 mm.

En ilustración 8-12, se presenta la distribución espacial de la precipitación media de los 8 meses estudiados. Se puede observar que las zonas donde más llueve corresponden al norte y sur de la cuenca, donde se encuentran ubicadas las estaciones Santillana y Santa Inés.

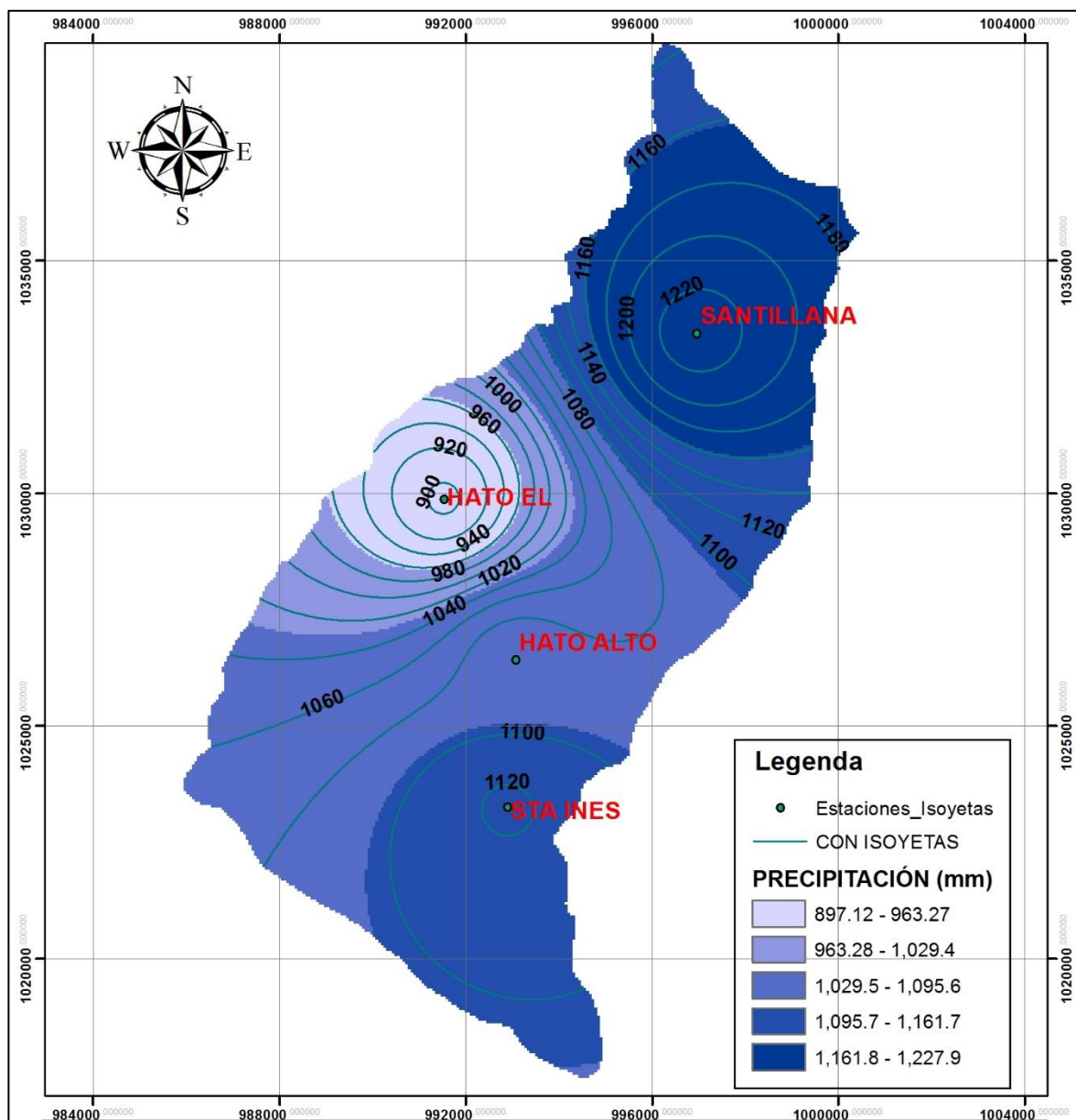


Ilustración 8-8 Distribución espacial de la precipitación – abril 2010 a noviembre 2010

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

Además, se observa que la zona occidental de la cuenca es la que presenta menos volumen de agua registrado en la estación, ya que se encuentra alrededor de aproximadamente 897 mm.

8.3.2 Temperatura

La marcha anual de la temperatura mínima promedio guarda estrecha relación con el comportamiento de la precipitación. En la mayor parte de las regiones Caribe y Andina, las temperaturas mínimas más bajas ocurren durante las temporadas secas y las mayores temperaturas mínimas se registran en los meses más lluviosos (IDEAM, 2011).

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que el presente informe se enfoca en el estudio del evento extremo de precipitación ocurrido en el periodo 2010 – 2011, se tomó la temperatura mínima para realizar el análisis de la distribución espacial y temporal.

Para la caracterización espacio-temporal de la variable climática de temperatura, se tomaron cinco estaciones, de las cuales tres hacen parte o se encuentran en el área de la cuenca del río Chicú, mientras que dos se encuentran alrededor de la cuenca a una distancia aproximada de 3 km; pero con una diferencia de alturas no mayor a 50 metros, además, teniendo en cuenta que en la parte baja de la cuenca no se tiene información de estaciones que obtengan datos de temperatura, se procedió a tomar estas dos estaciones para realizar el análisis.

Tabla 8-16 Estaciones meteorológicas para el análisis de temperatura

	ESTACIÓN	LATITUD	LONGTUD	ALTURA (m.s.n.m)
1	SANTILLANA	4.898528	-74.104833	2575
2	HATO EL	4.866389	-74.153861	2575
3	HATO ALTO	4.835083	-74.139917	2570
4	FLORES COLOMBIANAS	4.73625	-74.15733	2560
5	NVA GENERACIÓN	4.782222	-74.094333	2590

Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica

A continuación, se presenta el análisis de la distribución espacial y temporal de la variable de temperatura en la cuenca del río Chicú, para el año de 2010, durante los meses de abril a noviembre.

Distribución espacial

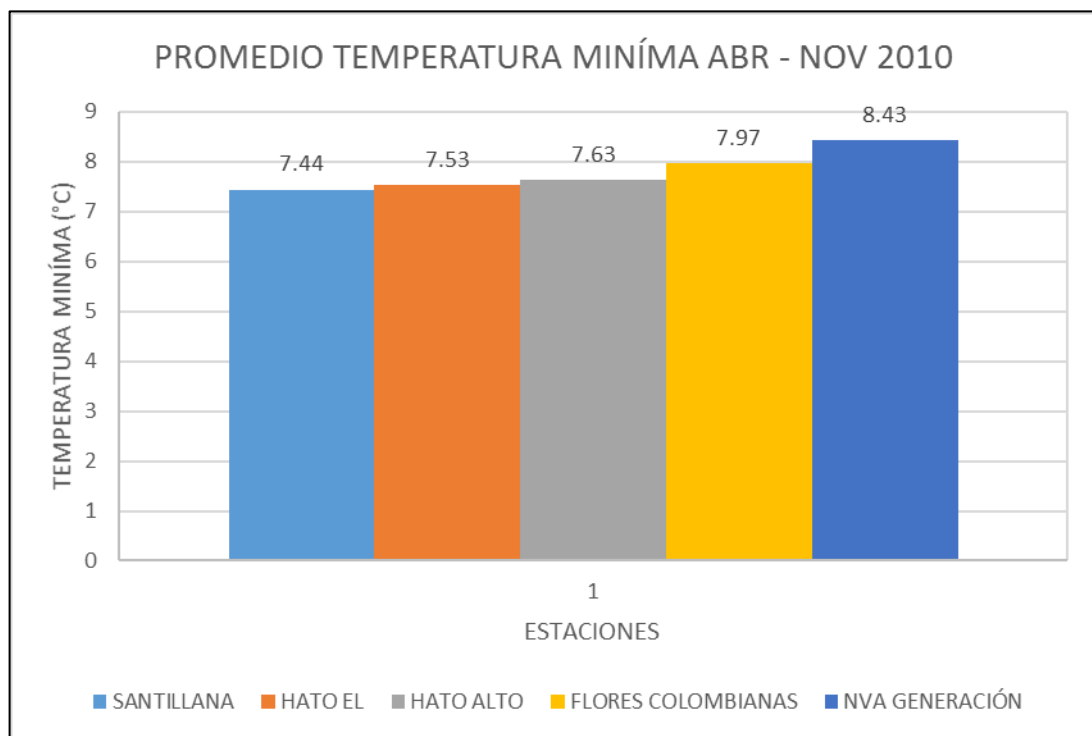


Gráfico 8-5 Promedio Temperatura mínima Abr – Nov 2010

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior se presenta la temperatura mínima media de la cuenca del río Chicú, la temperatura mínima media registrada más alta fue 8.43°C, y la más baja fue de 7.44°C.

La estación Nva Generación junto con la estación Flores Colombianas, registraron las temperaturas mínimas medias más alta. Se puede concluir que la cuenca presenta temperaturas más elevadas en la parte sur debido a las bajas pendientes y el poco relieve de la zona; mientras que la estación Hato El registró la temperatura mínima media más baja debido a que se encuentra localizada sobre un brazo de la Cordillera Oriental.

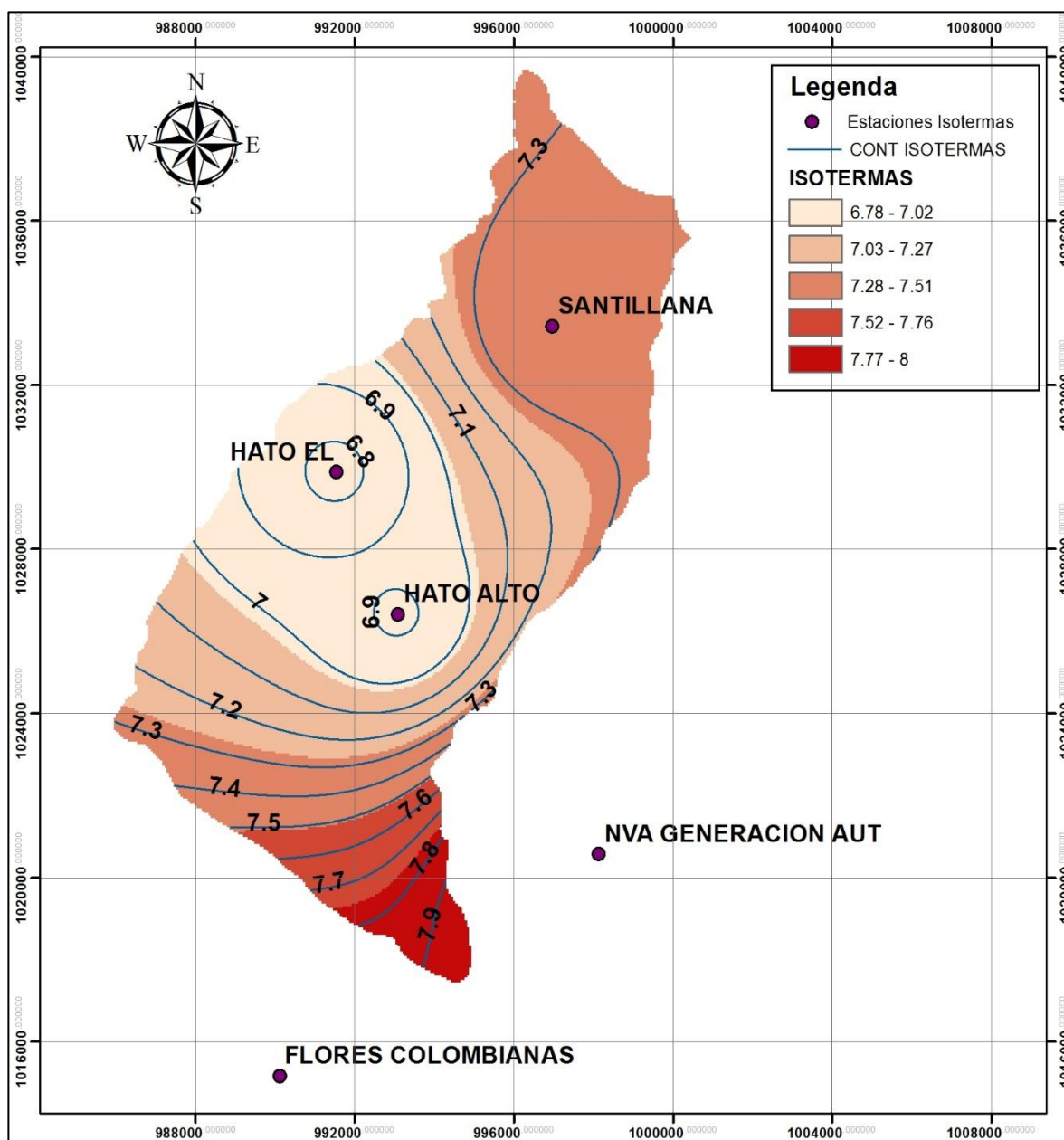


Ilustración 8-9 Distribución Espacial de la temperatura Mínima Media Abr – Nov. 2010

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración anterior se observa la distribución espacial de la temperatura mínima media en la cuenca del río Chicú. Se puede apreciar que la zona con temperatura más alta es la parte baja con intervalo de 7.28°C a 8°C , donde se presentan pendientes menores al 1 % y el relieve es bajo, así mismo, la gran parte de este territorio está deforestado por lo que la temperatura presenta una magnitud mayor.

En cuanto a la parte noroccidental y central, se presentan las temperaturas mínimas medias más bajas de toda la cuenca, con un intervalo de 6.78°C a 7.02°C . Cabe destacar la localización de la estación Hato El, ya que se encuentra sobre una ramificación de la Cordillera Oriental, de tal manera que está a una altura considerable por lo que las temperaturas son un poco más bajas que en la parte sur de la cuenca.

La zona norte de la cuenca presenta temperaturas entre 7.28°C y 7.51°C . En conclusión, la cuenca presenta temperaturas mínimas representativas a las zonas de páramo.

Teniendo en cuenta que en general la cuenca presenta alturas por encima de los 2500 msnm, las temperaturas mínimas no superan los 13°C , por lo que la variación en los registros de las estaciones es mínima.

Distribución temporal

La distribución temporal se realizó con base en la información registrada en las cinco (5) estaciones climatológicas seleccionadas.

En el Gráfico 8-6 se puede observar la distribución de la temperatura mínima en los ocho meses de estudio, donde se destaca la línea amarilla que corresponde a la estación Flores Colombianas, se observa que esta serie comienza con una temperatura alta en abril, pero los siguientes meses cae, lo cual concuerda con el periodo de exceso registrado en la estación pluviométrica de Sta Inés, la cual se encuentra localizada en la zona de influencia de la estación Flores Colombianas. Esto evidencia que la disminución de la temperatura está estrechamente relacionada con el aumento en las precipitaciones. Siguiendo la línea de tiempo se observa una pendiente positiva desde el mes de junio y cierra con la temperatura más elevada registrada con un promedio mensual de 10.26°C .

La estación Nva Generación comienza en una temperatura 9.14°C , que sigue aumentando, alcanzando en el mes de mayo los 9.75°C , luego comienza a decrecer hasta alcanzar la temperatura más baja registrada de 7.66°C , en el mes de agosto. Meses adelante presenta una tendencia creciente, por lo que finaliza el mes de noviembre con una temperatura mínima promedio de 8.41°C .

La serie de la estación Hato El presenta pendientes negativas en los meses de mayo y junio, siendo el registro de mayo uno de los más bajos registrados por las estaciones, además, a partir de ese mes presenta una pendiente positiva que registra un valor de 9.09°C en el mes de septiembre, para posteriormente cerrar en el mes de noviembre con una temperatura mínima promedio de 8.56°C .

A pesar de que la estación Hato El presenta un promedio menor de temperatura mínima, si se observa el comportamiento de la variable de precipitación para esta misma estación, ocurre una discrepancia, ya que en la zona donde se ubica esta

estación, es la posee menor volumen de precipitación registrado, por lo que en este caso la relación entre temperatura mínima y altas precipitación no es evidente. Excepto en el mes de abril donde en esta zona fue la que presentó una mayor precipitación en toda la cuenca.

En cuanto a las dos estaciones más; Santillana presenta pendientes positivas de mayo a junio y agosto a septiembre, mientras que de abril a mayo y de septiembre a octubre decrece bruscamente, la temperatura mínima en la zona de esta estación varía entre 5.3°C y 8.9°C durante los 8 meses. Para Hato Alto se expone una serie con pendientes positivas de abril a mayo y desde el mes de junio hasta septiembre, mientras que la temperatura decrece de mayo a junio y de septiembre a octubre, en noviembre cierra con una temperatura mínima promedio de 8.95°C. Para esta zona de la cuenca la temperatura mínima se encuentra alrededor de los 5.89°C y 9.27°C durante los 8 meses.

Tabla 8-17 Temperatura Mínima Abr – Nov 2010

ESTACIÓN	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE
SANTILLANA	6.7	5.3	7.8	7.8	7.5	8.9	7.3	8.2
HATO EL	6.31	6.17	6.9	7.32	8.07	9.09	7.81	8.56
HATO ALTO	5.89	7.07	6.01	6.81	8.68	9.27	8.37	8.95
FLORES COLOMBIANAS	8.24	5.47	5.16	7.12	7.96	9.52	10.06	10.26
NVA GENERACIÓN	9.14	9.75	8.37	8.33	7.66	8.01	7.79	8.41

Fuente: Elaboración propia.

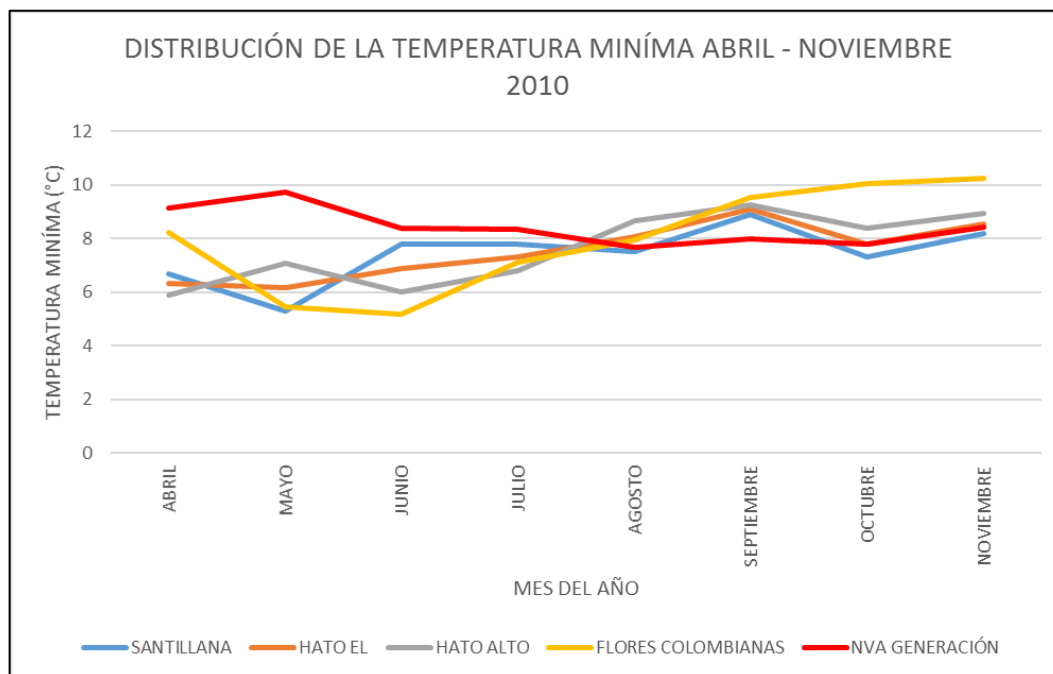


Gráfico 8-6 Distribución de la Temperatura Mínima Abr – Nov 2010

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente los registros de temperatura más bajos están asociados a los eventos máximos de precipitación, por lo que se puede observar que durante el periodo en estudio se presentaron lluvias extremas acompañadas de temperaturas mínimas máximas, de tal manera que el comportamiento hidrológico de la cuenca tuvo un cambio drástico de un año a otro, evidenciando la influencia de fenómenos climáticos como el ENSO.

8.3.3 Caudales

Debido a que no se cuenta con una estación de caudal a la salida de la cuenca, se tuvo que realizar la caracterización de los caudales con la estación de Las Mercedes la cual se encuentra ubicada en la parte alta de la cuenca, como se observa en la siguiente ilustración.

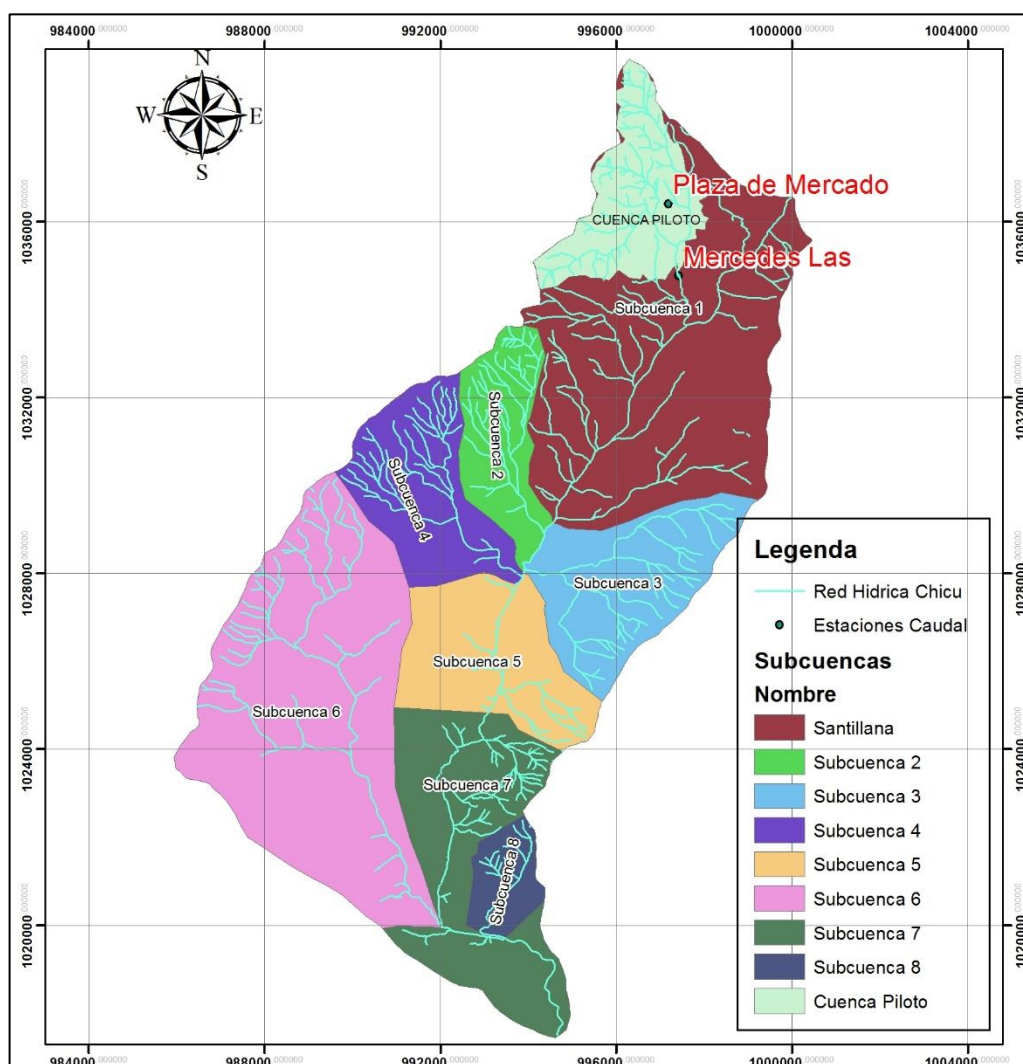


Ilustración 8-10 Mapa de delimitación y ubicación de la Cuenca Piloto – Cuenca Río Chicú

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

La estación de Las Mercedes sirvió para realizar el proceso de transposición de caudales con el objetivo de obtener una serie de datos de caudal para la subcuenca 1 (Santillana) y con base en esta información realizar la calibración del modelo hidrológico.

La estación de Las Mercedes monitorea una microcuenca de aproximadamente 9.52 km² de área.

El siguiente gráfico se presenta el comportamiento del caudal registrado en la estación de Las Mercedes, desde el mes de abril hasta el mes de noviembre. Analizando la gráfica, se observa que noviembre es el mes más caudaloso en la microcuenca, debido al ciclo trimestral de lluvias que existe en el país. Así mismo, se observa en la gráfica el mes con menor caudal registrado, el cual corresponde a junio, lo que se relaciona con la época de pocas lluvias en el área andina.

Además, se puede observar en la gráfica que, en algunos meses como abril, los primeros días del mes se registran los valores más altos de caudal, mientras que en otros meses estos picos se obtuvieron a mediados del mes.

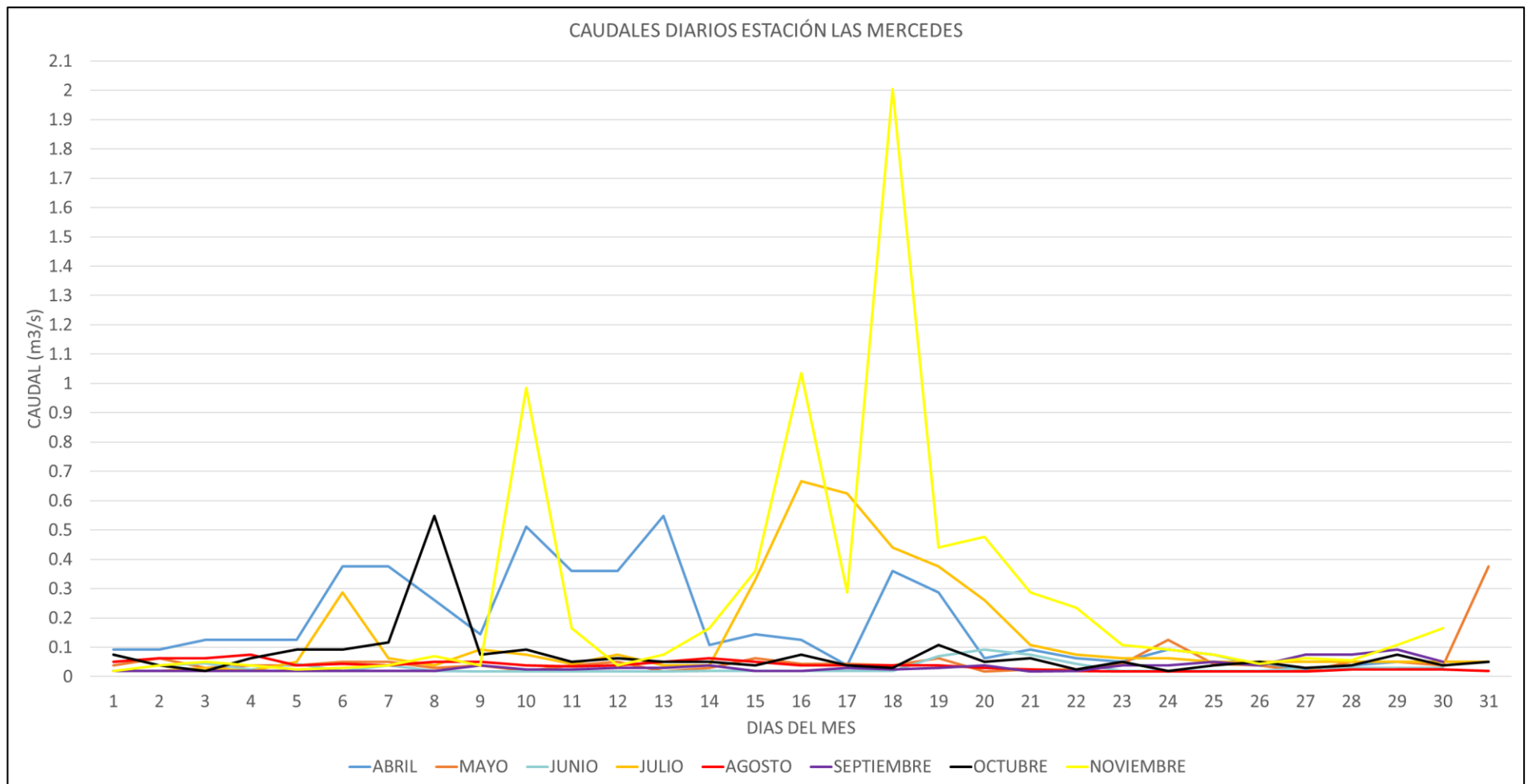


Gráfico 8-7 Comportamiento del caudal registrado por la estación Las Mercedes
Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica

8.4 SUELO

Para el desarrollo de esta investigación es fundamental conocer las características del suelo que se encuentran en la cuenca, ya que esta información es de vital importancia para determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca.

La zona donde está localizada la cuenca del río Chicú, es una zona de clima frío. Desde el punto de vista fisiográfico, la cuenca está enmarcada en la provincia fisiográfica de la Cordillera Oriental o de plegamiento, conformada a su vez por los grandes paisajes de montaña estructural erosional y valle aluvial (CAR, 2011)

Teniendo en cuenta las características del suelo, se establece que los cuerpos de agua subterráneos poseen una buena recarga de agua en la mayor parte de la cuenca, debido a su composición textural que estos presentan, las cuales se encuentran entre media finas a gruesas.

En cuanto al uso del suelo, en la Tabla 8-19 se presentan los diferentes usos que pueden tener los suelos de la cuenca, notándose que aproximadamente 10.733 ha son aptas para el uso en cultivos, mientras que solo 3323 ha no son aptas para estas labores.



Tabla 8-18 Leyenda fisiográfica pedológica Subcuenca río Chicú

Tabla 6.1.8.1-1. Leyenda fisiográfica pedológica subcuenca río Chicú

PROVINCIA FISIOGRÁFICA	UNIDAD CLIMÁTICA	GRAN PAISAJE	PAISAJE Y MATERIAL LITOLÓGICO	SUBPAISAJE	CARACTERÍSTICAS DE LAS GEOFORMAS	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS	UNIDADES CARTOGRÁFICAS Y CONTENIDO PEDOLÓGICO				
							Nombre de la Unidad	Subgrupo	Perfil No.	%	Símbolo
Cordillera Oriental o de plegamiento	Muy frío muy húmedo	Montaña estructural erosional	Glacis de acumulación y lomas en depósitos de ceniza volcánica sobre rocas clásticas arenosas- limoarcillosas y conglomeráticas.	Laderas erosionales	Laderas erosionales de pendientes moderadamente inclinadas	Bien drenados- de texturas moderadamente finas a gruesas- profundos a superficiales- limitados por contacto lítico y nivel freático alto.	Consociación	Typic Hapludands- familia medial- isotrigida	CC-284	85	MGTd
	Frio húmedo	Montaña estructural erosional	Crestas homoclinales en rocas clásticas limoarcillosas y depósitos de ceniza volcánica	Laderas estructurales y erosionales	Laderas fuertemente escarpadas- caracterizadas por frecuente presencia de deslizamientos y erosión hídrica laminar ligera en sectores	Bien drenados- de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y profundos a superficiales limitados por mantos de roca dura y coherente	Consociación	Typic Eutrudepts- familia franca fina- mezclada- isomésica	CC-94	70	MLSg
			Crestones homoclinales rocas clásticas limoarcillosas y depósitos de espesor variable de ceniza volcánica	Laderas estructurales y erosionales	Laderas ligera a moderadamente escarpadas- caracterizadas por frecuentes deslizamientos sectorizados	Profundos a superficiales limitados por contacto con el manto rocoso- bien a moderadamente bien drenados y de texturas finas a moderadamente gruesas	Consociación	Humic Lithic Eutrudepts- familia franca fina- mezclada- isomésica	CC-307	70	MLVf
			Glacis coluvial en ceniza volcánica sobre depósitos clásticos gravigénicos y rocas clásticas limoarcillosas	Laderas erosionales	Laderas ligeramente inclinadas afectadas esporádicamente por presencia de pedregosidad superficial	Profundos a moderadamente profundos- bien drenados- de texturas medias a moderadamente gruesas	Consociación	Pachic Melanudands- familia medial- isomésica	MU-9	75	MLKd
			Lomas en rocas clásticas arenosas- limo- arcillosas y mantos de espesor variable de ceniza volcánica	Laderas erosionales	Laderas ligeramente empinadas- caracterizadas por frecuentes deslizamientos sectorizados	Bien drenados- de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas- profundos a superficiales (limitados por horizonte argílico) y de evolución baja a moderada.	Consociación	Humic Dystrudepts- familia fina- mezclada- isomésica	CC-226	70	MLCd
		Planicie aluvial	Plano de inundación en sedimentos clásticos hidrogénicos	Sobrevega	Áreas planas del valle aluvial- afectadas por periódicas inundaciones y encharcamientos	Profundos a superficiales- bien a pobremente drenados- de texturas finas a medias	Consociación	Aeric Endoaquepts- familia franca fina- mezclada- isomésica	CT-2b	80	RLQ2a
			Terrazas aluviales en depósitos de ceniza volcánica	Plano de terraza	Áreas planas- afectadas en sectores muy aislados por encharcamiento poco frecuentes	Baja a moderadamente evolucionados- de texturas moderadamente finas a través de todo el perfil- muy profundos y bien drenados	Consociación	Typic Endoaquepts- familia franca- mezclada- isomésica	AC-19	80	RLQa
							Consociación	Pachic Melanudands- familia medial- isomésica	AC-8	90	RLQa

ZONA URBANA

EMBALSE/CUERPO DE AGUA

Fuente: CAR, 2011

Tabla 8-19 Leyenda de clasificación por capacidad de uso de la subcuenca del río Chicú.

Tabla 6.1.8.2-1. Leyenda de clasificación por capacidad de uso de la subcuenca del río Chicú

Clase	Subclase	Principales limitantes	Uso potencial	Recomendaciones de uso y manejo	Unidades de suelo	Área (ha)	Porcentaje
II	IIC	Eventual presencia de heladas durante algunos meses del año	Agricultura intensiva con fines comerciales y ganadería semiintensiva con utilización de pastos mejorados	Control fitosanitario- utilización de semillas certificadas- rotación de cultivos- prácticas de mecanización controladas y asistencia técnica	RLOa	9688	68,3
IV	IVhs	Frecuentes encharcamientos y el drenaje natural imperfecto de los suelos	Agricultura semiintensiva con fines comerciales y de subsistencia y ganadería semiintensiva con utilización de pastos mejorados	Control fitosanitario- rotación de cultivos- prácticas de mecanización controladas y asistencia técnica	RLOa	69	0,5
					RLO2a	33	0,2
	IVp	Pendientes fuertemente inclinadas- fertilidad moderada de los suelos y susceptibilidad a la erosión	Agricultura de subsistencia y ganadería semiintensiva y extensiva para doble propósito	Rotación entre cultivos y con pastos- prácticas de mecanización agrícola controladas y guiadas y asistencia técnica permanente.	MLKd	798	5,6
					MLCd	3	0,0
VI	VIc	Climas muy fríos (páramo bajo) y pendientes moderadamente inclinadas sectorizadas	Reforestación y regeneración espontánea de la vegetación	Tratar de disminuir el área en cultivos- especialmente limpios. Evitar talas y quemas del bosque natural	MGTd	145	1,0
VII	VIIp	Pendientes moderadamente escarpadas- baja fertilidad natural de los suelos y su poca profundidad efectiva.	Reforestación y regeneración espontánea de la vegetación natural. Forestería de protección y producción.	Prohibir los cultivos. Evitar talas y quemas del bosque natural. Evitar el pastoreo de ganado	MLVi	2237	15,8
VIII	VIIIps	Pendientes fuertemente escarpadas- poca profundidad efectiva de los suelos y escasa lluvias durante los dos semestres	Conservación y protección de los suelos y los recursos asociados (fauna y flora)	Prohibir los cultivos. Evitar talas y quemas del bosque natural. Evitar el pastoreo de ganado. Promover programas de reforestación con especies nativas	MLSg	1086	7,7
Zona urbana					ZU	106	0,7
Embalse					Embalse/ cuerpo de agua	24	0,2

Fuente: CAR, 2011

UCSuelo	SUBGRUPO	ÁREA (Km)
MGTd	Typic Hapludands, Pachic Melanudands, Humic Lithic Dystrudepts	1.46
MLCd	Andic Humudepts, Humic Dystrudepts, Typic Hapludands, Typic Argiudolls	0.08
MLKd	Pachic Melanudands, Typic Hapludands, Andic Dystrudepts	7.99
MLSg	Typic Eutrudepts, Typic Hapludands	11.09
RLOa	Typic Endoaquepts, Aeris Endoaquepts, Thaptic Hapludands	8.36
RLQa	Pachic Melanudands, Andic Dystrudepts, Aeris Endoaquepts, Aquic Hapludands	88.52
MLVf	Humic Lithic Eutrudepts, Typic Placudands, Dystric Eutrudepts	22.34
CA	Cuerpo de agua	0.67
ZU	Zona urbana	1.73

Tabla 8-20 Tipos de suelo

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR.

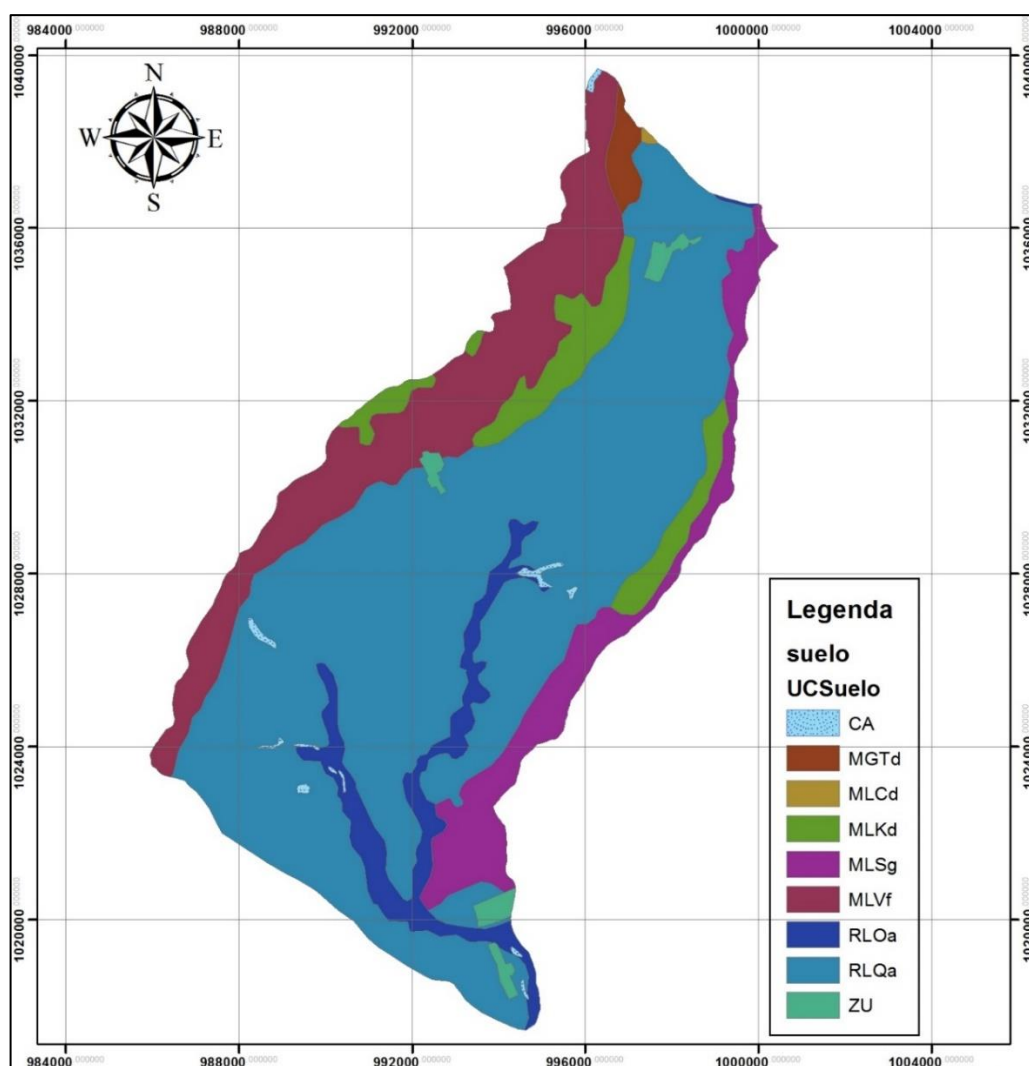


Ilustración 8-11 Mapa fisiográfico pedológico Subcuenca río Chicú

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR.

8.5 COBERTURA Y USO DEL SUELO

Este parámetro es la cobertura (bio) física que se observa sobre la superficie de la tierra, en un término amplio no solamente describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino que también describen otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua (IDEAM, s.f.).

La cuenca del río Chicú posee una extensión de aproximadamente 14.223,7 Ha, de las cuales 13.264 km² se tiene uso forestal el cual sirve como protección del suelo en zonas con pendientes fuertes, como madera para insumos en obras de construcción. En la Tabla 8-17 se muestran los diferentes tipos de cobertura, con la terminología empleada por la Unión Geográfica Internacional.

El uso pecuario es una actividad económica representativa de la zona, con un 23.03%. El uso pecuario hace referencia a las zonas destinadas para pastoreo y ganadería lechera.

Para la realización de esta investigación se utilizó la capa de cobertura vegetal proporcionada por profesionales pertenecientes a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). A continuación, en la siguiente ilustración se presenta el mapa de cobertura de la cuenca.

El proceso de adopción estandarización de la metodología y la leyenda de coberturas terrestres de Colombia, inició desde el año 2004 con la adaptación a nivel nacional de la metodología europea *CORINE Land Cover – CLC*; este proceso surge como respuesta a la necesidad que tenía el país de unificar y armonizar las diferentes metodologías y leyendas de coberturas terrestres empleadas hasta el momento (IDEAM, s.f.).

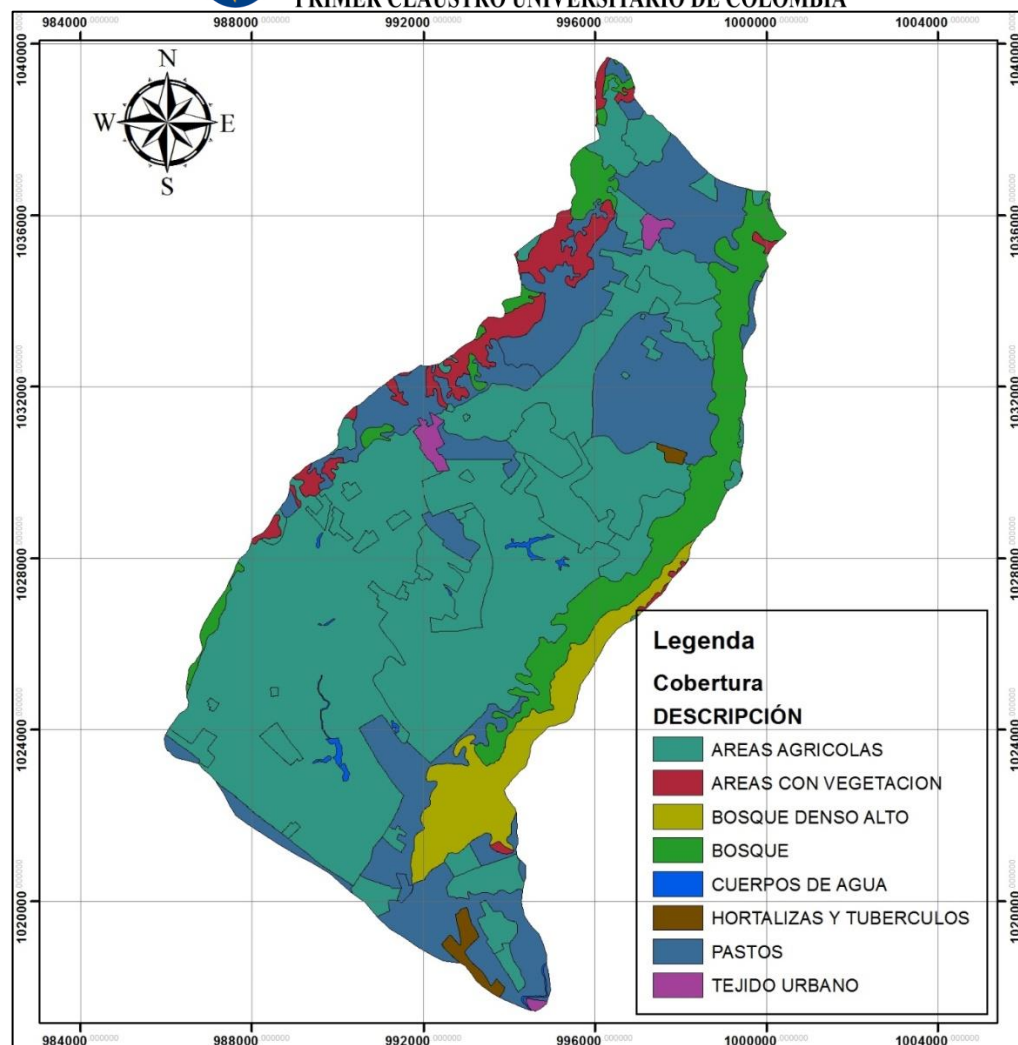


Ilustración 8-12 Mapa de Cobertura Vegetal Cuenca río Chicú

Fuente: Propia con base en información CAR, 2018.

La nomenclatura mostrada en la ilustración anteriormente mostrada corresponde a la clasificación CLC. Para la cuenca del río Chicú se tienen aproximadamente 9 tipos de coberturas generales las cuales se describen a continuación en la Tabla 8-21.

Tabla 8-21 Descripción nomenclatura CLC para la cobertura de la cuenca del río Chicú

COBERTURA IDEAM CLC		AREA (km ²)
1.1	Tejido urbano	0.983
2.1	Hortalizas y tubérculos	0.939
2.3	Pastos	32.752
2.5	Áreas agrícolas	81.113
3.1	Bosque	13.264
3.2	Áreas con vegetación	5.057

COBERTURA IDEAM CLC		AREA (km ²)
3.1	Bosque denso alto	7.610
5.1	Cuerpos de agua	0.520
TOTAL (km ²)		142.237

Fuente: Elaboración propia con base en información CAR y la Leyenda Nacional del IDEAM

La tabla anterior se construyó utilizando la información suministrada por la CAR y utilizando la información de la Leyenda Nacional del IDEAM; esta es una cartilla donde se encuentran los diferentes tipos de cobertura vegetal CLC adaptada a Colombia, junto con su respectiva nomenclatura, con base en esto se pudo dar un significado a cada tipología que se presenta en el mapa de la Ilustración 8-12.

La ocupación por cada tipo de cobertura la mayor extensión que ocupan las áreas agrícolas que aproximadamente son el 53% del total del área de la cuenca, es decir, 81.113 km², esta área se relaciona con cultivos de papa, invernaderos entre otros.

La necesidad de los habitantes de la cuenca los ha llevado a deforestar más de la mitad de la cuenca con el objetivo de sembrar sus productos para su subsistencia. Además, los pastos componen aproximadamente el 23% del área de la cuenca, haciendo referencia a la segunda actividad económica más importante de los residentes en la hoya hidrográfica es la ganadería y el pastoreo. Reduciendo el área con bosque a solamente 13.26 km².

8.6 HIDROGEOLOGÍA

Según el estudio de 1998 llamado Inventario y Diagnóstico de los Recursos Naturales Renovables del área Jurisdiccional de la CAR, allí se presenta la información hidrogeológica de la zona, donde aparece la cuenca del río Chicú (Subcuenca del río Bogotá).

El sistema hidrogeológico de la sabana de Bogotá se divide en los siguientes grupos:

- a) Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular
- b) Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas
- c) Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea

Las anteriores subdivisiones tienen su presencia en la cuenca del río Chicú, y se describen en la tabla siguiente, donde C: Capacidad específica, Qext: Caudal extraído que se tiene información, T: Transmisividad, k: conductividad hidráulica, S: coeficiente de almacenamiento.

Tabla 8-22 Acuíferos presentes en la cuenca del río Chicú

SUBDIVISIÓN	NOMBRE	CE (L/s*m)	Q _{ext} (L/s)	T (m ² /d)	k (m/d)	S	CALIDAD DE AGUA	RECARGA (m ³ /año)	
Sedimentos y rocas con flujo esencialmente Intergranular	Acuífero terraza alta (Qta)	0.03 a 0.2	Año 1990 0.3 a 3	5 a 20	0.4 a 0.5	5.5x10 ⁻³ y 4.5x10 ⁻⁵	No apto para el consumo humano	466.494	Precipitación y corrientes superficiales
	Acuífero Aluvial (Qal)	0.01 a 0.1	-	-	-	-	No apto para el consumo humano	201.291	Precipitación y corrientes superficiales
Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas	Acuífero Labor y Tierna (Ksglt)	0.3 a 0.5	Año 1989 3 a 15	50 a 278	1 a 3.5	4x10 ⁻⁴ y 5.1x10 ⁻³	No apto para el consumo humano	48.828	Flujo entre acuíferos
	Acuífero Arenisca Dura (Ksgd)	0.08 a 5	1 a 20	15 a 60 max 100	0.3 a 1	5.1x10 ⁻⁴	No apto para el consumo humano	353.071	Precipitación
Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea	Acuitardo Coluvial (Qc)	<0.01	-	-	-	-	No apto para el consumo humano	6.35	Flujo entre rocas
	Acuitardo Guaduas (KPgu)	<0.01	-	-	-	-	No apto para el consumo humano	1.859	Precipitación
	Acuitardo Plaeners (Ksgpl)	<0.01	-	-	-	-	No apto para el consumo humano	198.098	Precipitación y flujo por rocas fragmentadas
	Acuifugo Chipaque (Ksch)	<0.01	-	-	-	-	No apto para el consumo humano	68.957	Precipitación

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR – POMCA RÍO CHICÚ

Se puede apreciar en la tabla anterior las características físicas de los acuíferos, acuitardos y acuifugos que se encuentra en el territorio de la cuenca. Debido a la falta de información se presentan casillas vacías.

Tabla 8-23 Áreas de acuíferos en la cuenca del río Chicú

NOMBRE	SIMBOLO	ÁREA (km ²)
Acuífero Depósitos de Terraza	Qta	85.8
Acuífero Arenisca Dura	Ksgd	22.5
Acuitardo Guaduas	KPgu	1.3
Acuitardo Coluvial	Qc	0.8
Acuitardo Plaeners	Ksgpl	8.6
Acuifugo Chipaque	Ksch	3.4
Acuífero Labor y Tierna	Ksglt	0.1
Acuífero Aluvial	Qal	19.7
Total		142.2

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

Con base en la información presentada en la Tabla 8-22 y Tabla 8-23, además de la siguiente ilustración, se puede determinar que la zona central de la cuenca posee un acuífero (Qta), el cual es el más presente en la hoya hidrográfica con un área de 85.8 km², se extiende de norte a sur y de occidente a oriente, además presenta un alto potencial de producción, así mismo, la recarga de este acuífero es de 466.494 m³/año, alrededor 1278 m³/d. Esto significa que el suelo de la cuenca permite el paso de agua hasta los estratos permeables del acuífero, por lo que un porcentaje importante de la precipitación que cae sobre la cuenca se infiltra almacenándose en el suelo y en los cuerpos de agua subterráneos.

En los límites de la cuenca se tienen acuitardos (Ksglt, Qc) los cuales se recargan mediante la caída de hidrometeoros (precipitación) y el flujo subterráneo entre los estratos permeables, mientras que los acuíferos de arenisca dura (Ksgd) solo se recargan con la lluvia.

Se observa en la Ilustración 8-13, el cauce del río Chicú se encuentra sobre un acuífero aluvial cuyo caudal de recarga es de 201.291 m³/año, aproximadamente 551 m³/d, esto significa que el río Chicú recarga el cuerpo de agua de forma constante en algunas zonas.

En general, la cuenca posee 8 cuerpos de agua subterráneos, algunos interactúan entre sí para su abastecimiento, pero debido a las propiedades físicas de las capas no es buena está interrelación, mientras que otros utilizan las propiedades del suelo y la precipitación, así como los cuerpos de agua superficiales como suministro. Esto permite establecer que la cuenca presenta una pérdida de caudal

por infiltración alta debido a la demanda de recarga por parte de estas formaciones geológicas.

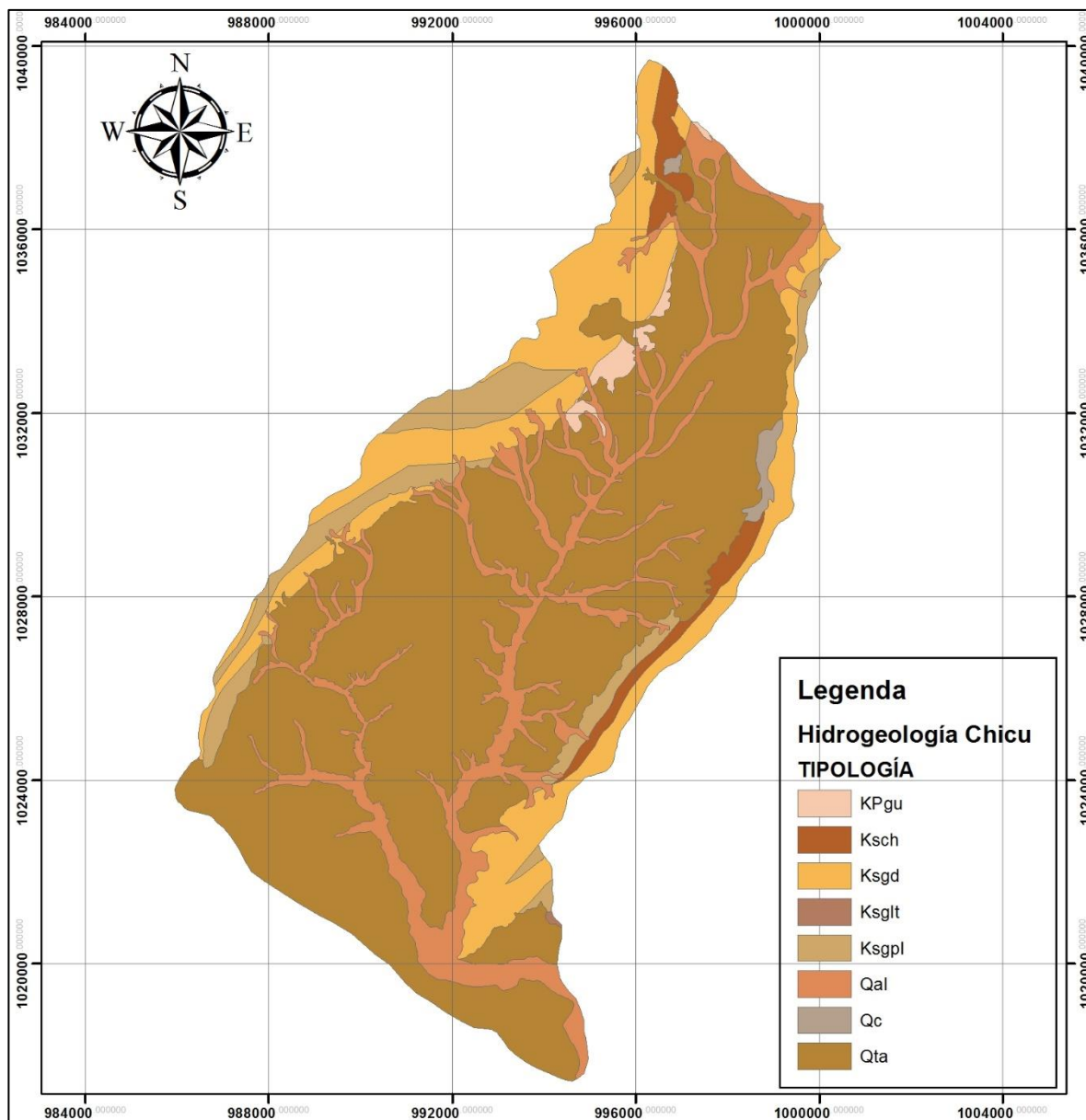


Ilustración 8-13 Mapa hidrogeológico Cuenca Río Chicú
 Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR.

8.7 METODOLOGÍAS DE LOS MODELOS HIDROLÓGICO E HIDRAULICOS

En las Ilustración 8-14 e Ilustración 8-15 se presentan las metodologías que fueron utilizadas para realizar el modelo hidrológico e hidráulica de la cuenca del río Chicú dentro de ella se nombran los insumos necesarios para modelar los programas HEC-HMS y HEC-RAS.

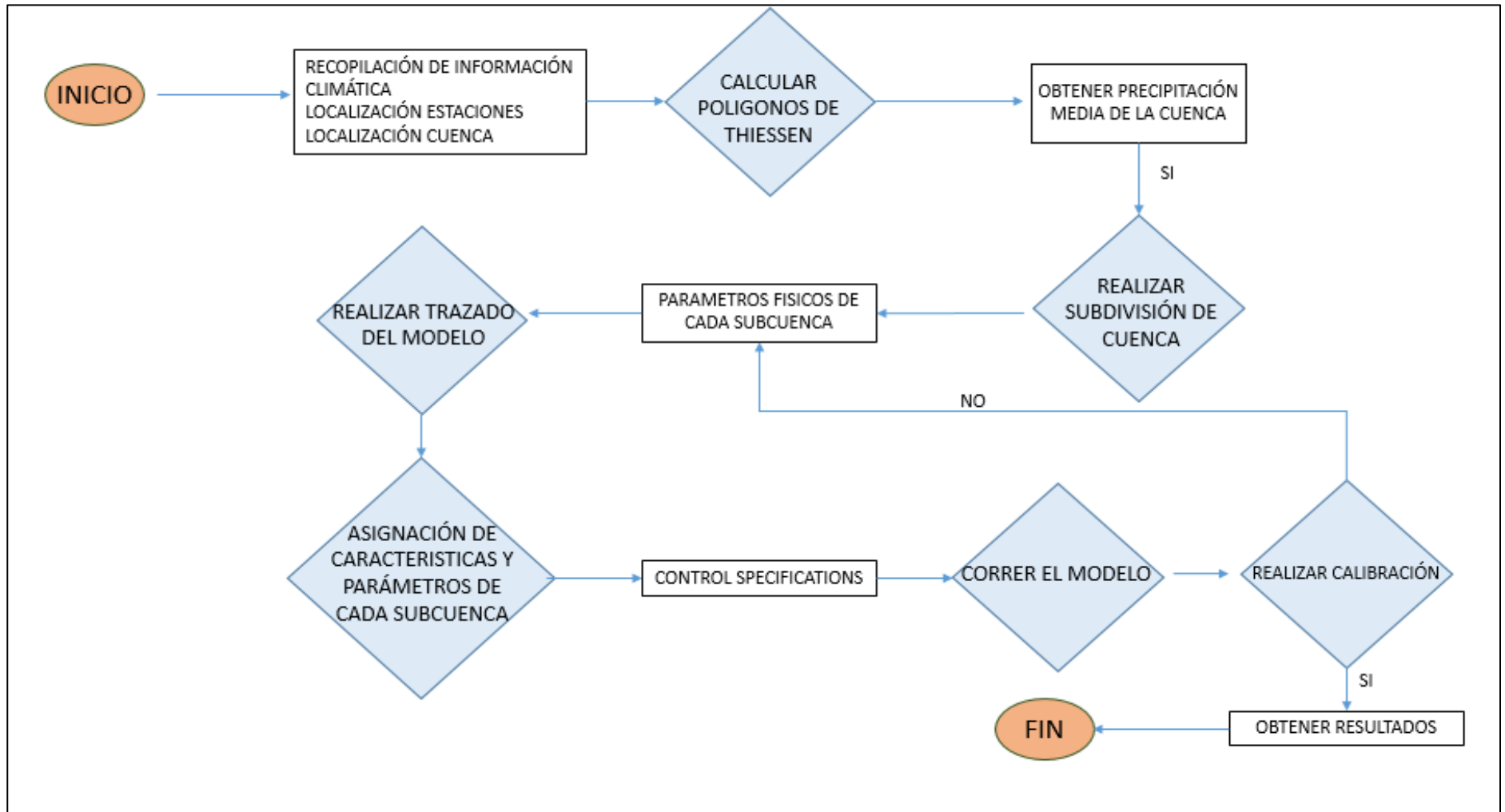


Ilustración 8-14. Metodología modelo hidrológico río Chicó.
 Fuente: Elaboración propia.

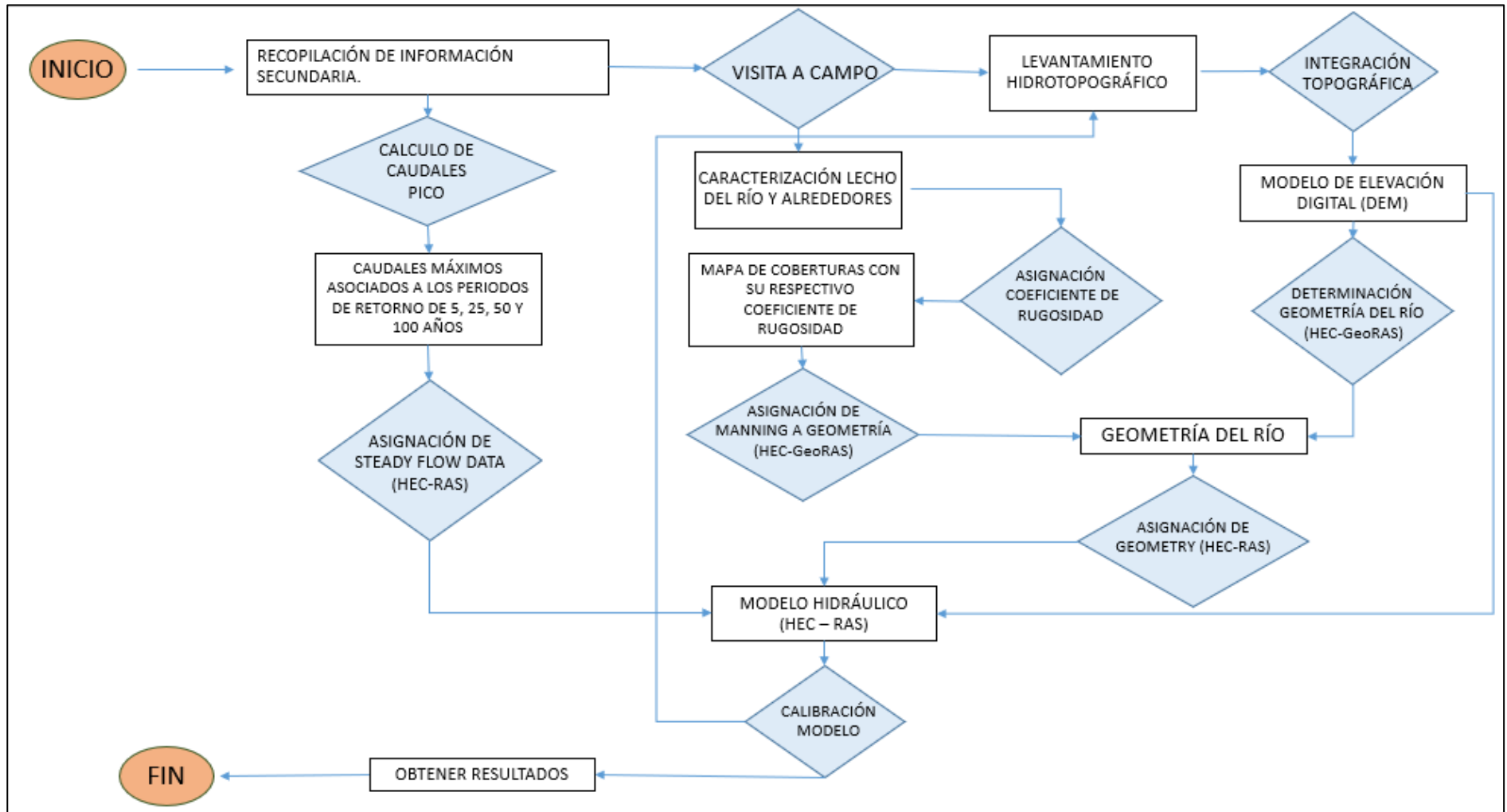


Ilustración 8-15. Metodología modelo hidráulico río Chicú.
Fuente: Elaboración propia.

9. MODELO HIDROLÓGICO

9.1 CARACTERIZACIÓN Y DEFINICIÓN DE LAS SUBCUENCAS

La cuenca del río Chicú posee un área total de aproximadamente 142,24 Km², y el río la atraviesa captando el agua de todos los afluentes, estos se distribuyen por toda la hoya hidrográfica. Con base en esto se segmentó la cuenca en pequeñas áreas o subcuencas con el fin de tener un mejor análisis del comportamiento hidrológico y así conocer el aporte de cada zona en cuanto a caudal, así mismo, conocer el volumen de agua de cada subcuenca.

Se trazaron las 8 subcuencas que se presentan en la siguiente tabla y la siguiente ilustración, con base en la red hidrográfica y en las estaciones climáticas. Los parámetros que se presentan en la siguiente tabla son los necesarios para realizar la modelación en el software HEC-HMS.

Tabla 9-1 Subcuencas – Cuenca río Chicú

SUBCUENCA		AREA (km ²)	PERIMETRO (km)	TIEMPO DE CONCETRACIÓN (min)
SANTILLANA	1	44.05	30.34	225.9
SUBCUENCA 2	2	7.48	13.70	108.73
SUBCUENCA 3	3	12.57	15.94	192.59
HATO EL	4	11.00	15.25	118.9
HATO ALTO	5	11.85	15.08	172.88
SUBCUENCA 6	6	35.03	26.76	333.79
STA INES	7	16.79	26.11	555.38
SUBCUENCA 8	8	3.47	7.52	90.60

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

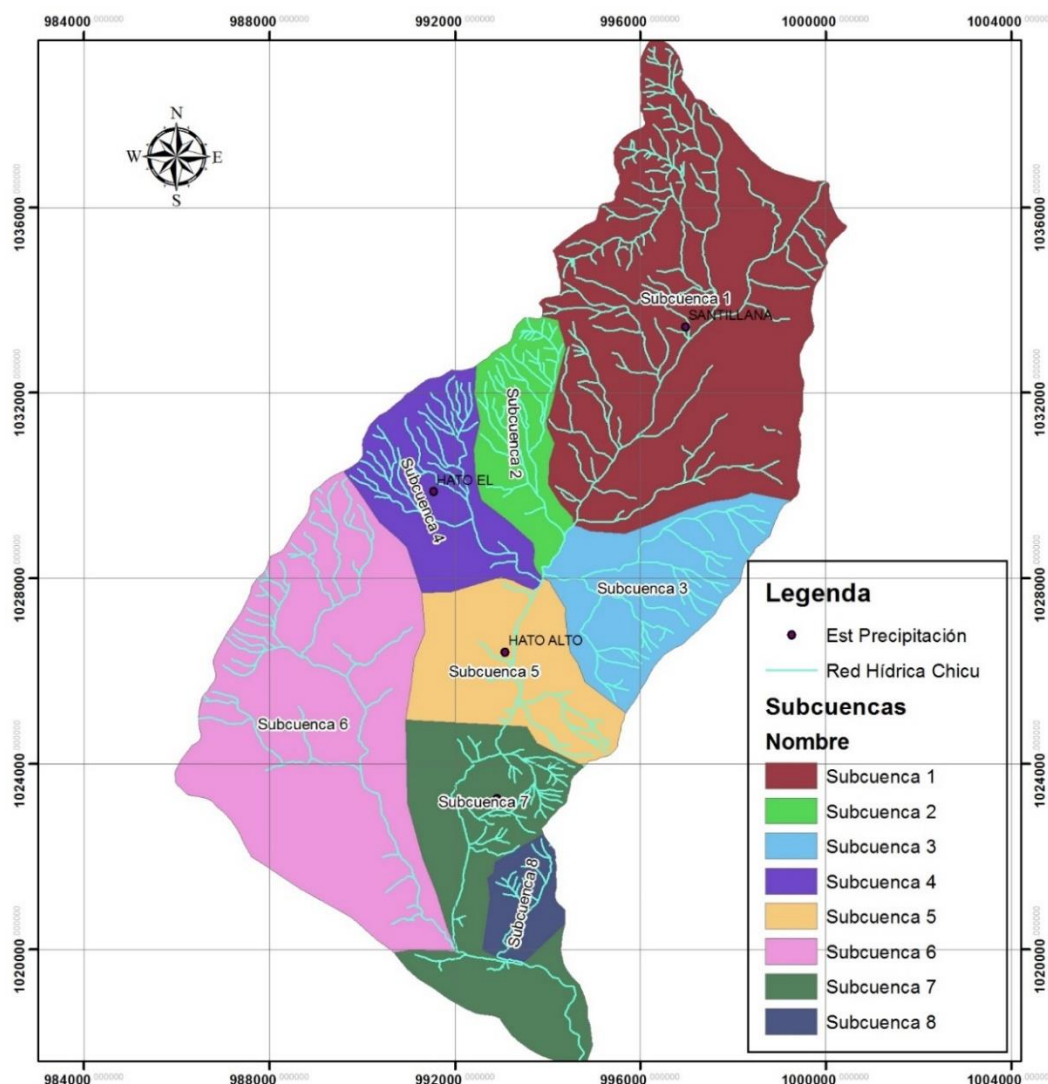


Ilustración 9-1 Subcuencas – Cuenca del río Chicú

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR.

9.2 TRAZADO DEL MODELO BASE

HEC-HMS permite la utilización de *shapes* para la elaboración de la red principal o modelo base. Para este caso se utilizó el mapa de subcuencas mostrado anteriormente para la elaboración del modelo.

Se debe conocer la dirección del flujo de la cuenca para llevar un orden lógico desde el punto más alto hasta el punto de salida de la cuenca. Teniendo en cuenta lo anterior se tiene la Ilustración 9-2 el modelo básico trazado.

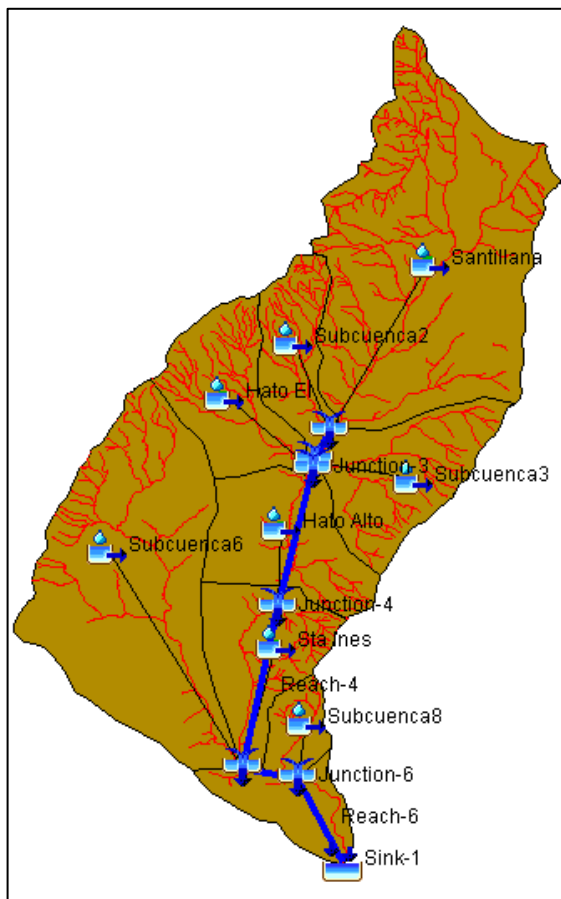


Ilustración 9-2 Modelo básico trazado - Cuenca río Chicú
 Fuente: Elaboración propia con base en software HEC – HMS

9.3 ASIGNACIÓN DE INFORMACIÓN A SUBCUENCAS, UNIONES Y RIOS

Para cada una de las subcuencas se tomó como dato inicial 10% de humedad existente en el suelo, ya que el clima de la cuenca es particular de páramo y la temperatura es baja, por lo que el suelo puede mantener una condición de humedad natural.

De acuerdo con la información del POMCA del río Chicú el valor de almacenamiento del suelo es de 50 mm para todos los suelos de la cuenca, por lo tanto, debido a la necesidad de información más específica, se toma este valor como almacenamiento máximo del suelo.

La máxima infiltración se tomó en función del tipo de suelo y su capacidad para permitir el flujo a través de él. Para esto se utilizó el software *Soil Water Characteristics*, el cual sirve para obtener los parámetros hidráulicos a partir de los parámetros físicos y químicos como salinidad, compactación, textura, humedad, etc. de un determinado tipo de suelo.

En cuanto al porcentaje de impermeabilidad, para su cálculo, se tuvo en cuenta a las zonas impermeables como centros urbanos, lagos, y algunos cultivos de hortalizas. En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos para la subcuenca 1.

Tabla 9-2 Cálculo de porcentaje de impermeabilidad

COBERTURA	AREA (km)	% IMPERMEABILIDAD	AREA*%IMPERMEABILIDAD
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	0.54	0.4	0.21
CULTIVOS CONFINADOS	0.34	0.75	0.25
PASTOS ARBOLADOS	4.42	0.15	0.66
PASTOS	0.25	0.2	0.051
BOSQUES MANGLE	9.52	0.12	1.14
AREAS PERMEABLES	28.98	0	0
TOTAL			2.32
AREA DE LA SUBCUENCA (km)			44.05
% IMPERMEABILIDAD DE SUBCUENCA			5.3

Fuente: Elaboración propia

Para el almacenamiento del suelo se toma como el doble del volumen retenido con la condición de mantener un valor de 50 mm en el suelo, para la subcuenca 1, mientras que, para las otras subcuencas, se toma dependiendo el tipo de suelo y las características obtenidas con el software *Soil Water Characteristics*.

Por último, se tiene el apartado de flujo base o *Base flow*, este se tomó como el mínimo registrado por la estación limnigráfica Las Mercedes, el cual es de 0.06 m³/s, para todas las subcuencas.

Los Reach corresponden a los conectores entre *junctions*, son los semejantes en los ríos, y por tal motivo su la información requerida para su utilización es importante. Para este apartado, se requiere conocer la longitud del río que conecta las subcuencas, el tipo de sección transversal y el número de Manning.

En el apartado de *Routing Method* se escogió *Muskingum – Cunge*, debido a que la información como longitud del cauce principal, pendiente, número de Manning, se encuentra disponible para todas las subcuencas.

Cabe resaltar que se realizó una serie de salidas de campo en la que se midieron las secciones transversales de los ríos en varios puntos de la cuenca, con base en esta información se introdujeron estos perfiles al modelo mediante la herramienta Paired Data y dependiendo de su localización se le asignó a los reaches una sección transversal.

Para finalizar, se utiliza la herramienta SINK que permite definir el final de la cuenca, para este caso se localizó en la parte sur de la cuenca, donde el río Chicú vierte sus aguas al río Bogotá.

Tabla 9-3 Valores ingresados para las ocho subcuencas.

SUB	ÁREA (km ²)	SOIL (%)	MAX INFILTRATION (MM/HR)	% IMPERVIOUS	SOIL STORAGE (MM)	TENSION STORAGE (MM)	SOIL PERCOLATION (MM/HR)	GW 1 STORAGE (MM)	GW 1 PERCOLATION (MM/HR)	GW 1 COEFFICIENT (HR)	GW 2 STORAGE (MM)	GW 2 PERCOLATION (MM/HR)	GW 2 COEFFICIENT (HR)	LAG TIME (min)
1	44.05	10	4	5.3	100	50	2	400	0	3000	300	0	10000	135.54
2	7.48	10	5	5.4	150	50	5	380	0.15	4500	300	0	10000	65.238
3	12.57	10	4	7.3	110	50	5	210	0.15	2500	150	0	10000	115.554
4	11.00	10	3	5.4	150	50	7	380	0.15	4500	300	0	10000	71.34
5	11.85	10	4	3.1	180	50	7	410	0.15	2500	350	0	10000	103.728
6	35.03	10	4	3.2	180	50	7	410	0.15	2500	350	0	10000	200.274
7	16.79	10	4	24.4	180	50	4	360	0.15	2500	300	0	10000	333.228
8	3.47	10	4	27	150	50	5	310	0.15	3000	200	0	10000	54.36

Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica

Para conocer específicamente que significa cada uno de los parámetros, se recomienda leer el manual, en el capítulo de Soil Moisture Accounting.

9.4 MODELO METEOROLÓGICO

Para este ítem del modelo se ingresa la información de las variables climáticas, relacionando las áreas obtenidas con los Polígonos de Thiessen y las áreas de las subcuencas. A continuación, se presenta una tabla con el peso de cada estación de acuerdo al área del polígono de Thiessen para cada subcuenca.

Tabla 9-4 Pesos de las estaciones para cada subcuenca

SUBCUENCA	ÁREA (km ²)	SANTILLANA	HATO EL	HATO ALTO	STA INES
SUB 1	44.05	94.01%	4.62%	1.37%	0.00%
SUB 2	7.48	15.91%	79.04%	5.04%	0.00%
SUB 3	12.57	19.63%	0.00%	80.37%	0.00%
SUB 4	11.00	0.00%	90.83%	9.17%	0.00%
SUB 5	11.85	0.00%	0.00%	91.25%	8.75%
SUB 6	35.03	0.00%	26.84%	20.24%	52.92%
SUB 7	16.79	0.00%	0.00%	0.00%	100%
SUB 8	3.47	0.00%	0.00%	0.00%	100%

Fuente: Elaboración propia con base en información CAR

9.5 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Para la calibración del modelo en HEC-HMS se hace uso de la comparación entre los caudales transpuestos al final de la cuenca a partir de la estación de Las Mercedes y los caudales modelados por medio del software en el periodo de abril a noviembre, para poder realizar este proceso se hace uso de la metodología de calibración de parámetros sensibles del modelo.

9.5.1 Método Soil Conservations Service (SCS)

Con base en la información contenida obtenida aplicando el método SCS, se calcularon los CN para las 8 subcuencas modeladas, a continuación, se muestra el CN de cada una:

Tabla 9-5 CN para las ocho subcuencas - Cuenca del río Chicú

SUBCUENCA	ÁREA (km ²)	CN
Subcuenca 1	44.05	73
Subcuenca 2	7.48	78
Subcuenca 3	12.57	83
Subcuenca 4	11.00	80
Subcuenca 5	11.85	86
Subcuenca 6	35.03	83
Subcuenca 7	16.79	83
Subcuenca 8	3.47	83

Fuente: Elaboración propia.

En los anexos se presenta el proceso de cálculo para obtener el número de curva para cada subcuenca.

9.5.2 Aplicación del método de transposición de caudales

Para la aplicación de este método se tomó la serie de registros de caudal de la estación piloto, Las Mercedes, desde el mes de abril hasta el mes de noviembre de 2010, ya que no se cuenta con información ni de los meses anteriores a abril, ni de los meses posteriores a noviembre.

Para obtener la serie de caudales para la subcuenca Santillana se utilizó la ecuación 11 anteriormente mostrada en el capítulo 7. A continuación se presenta un gráfico el cual muestra el comportamiento de la serie de tiempo de caudal, calculada para la subcuenca 1 (Santillana).

Se observa en el gráfico, el mes de mayor registro de caudal fue noviembre con un valor de $9.27 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el menor fue junio con un caudal registrado de $0.43 \text{ m}^3/\text{seg}$, en ambos casos a mediados del mes. Adicionalmente, se observa el comportamiento característico de los periodos climáticos del país, donde en los meses de abril, mayo y desde septiembre a noviembre se presentan los registros más altos de caudal, sin embargo, para este año en especial se observa que en el mes de julio hubo un aumento repentino de los caudales, debido a la influencia de los eventos climáticos ENSO.

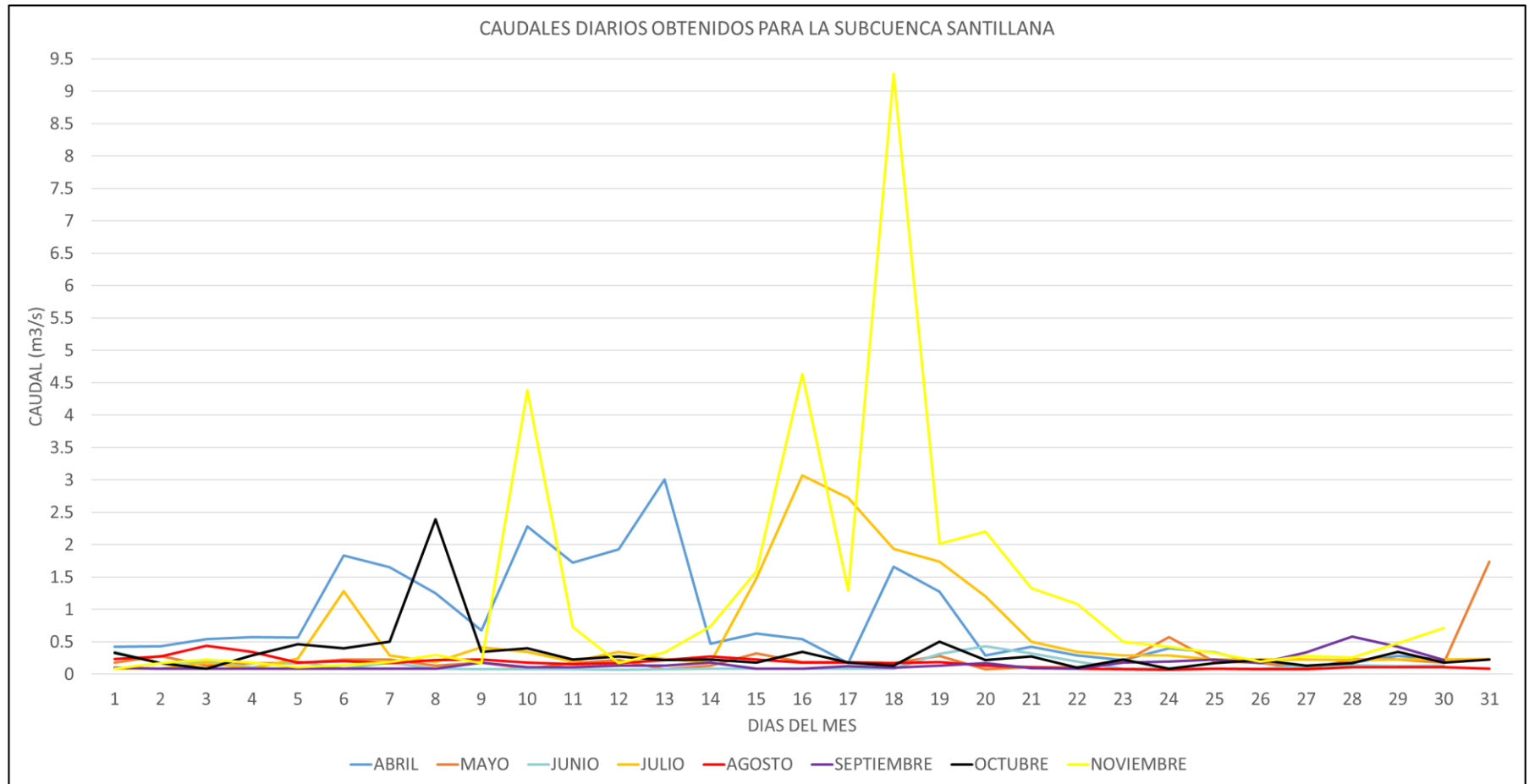


Gráfico 9-1 caudales obtenidos para la subcuenca Santillana
Fuente: Elaboración propia con base en información climatológica

9.5.3 Calibración y Validación del Modelo Hidrológico

El uso de modelos hidrológicos tiene por finalidad simular los fenómenos que ocurren en la realidad. Sin embargo, a pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen. Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración (Cabrera, s.f.).

El proceso de calibración de un modelo consiste en la identificación de los valores de parámetros inciertos o simulados para los que una serie de datos observados se ajusta de manera adecuada.

Existen básicamente dos procesos o metodologías para calibrar un modelo hidrológico:

- A prueba y error: consiste en el cambio sistemático manual de los parámetros con el fin de encontrar el mejor ajuste a la información observada. Proceso lento, pero sencillo.
- Automática: consiste en la utilización de metodologías numéricas para encontrar el ajuste adecuado a los datos observados. Proceso rápido, pero complejo.

Los leves desfases mostrados anteriormente en el gráfico 9-1, no se pudieron controlar o reducir, debido a que se desconoce la información física de los cuerpos de agua subterráneos, y teniendo en cuenta que estos tienen una significativa influencia en el comportamiento hidrológico de la cuenca, por lo que para realizar la modelación se tuvo que tomar valores sistemáticos, debido a que el software HEC-HMS, a pesar de que posee nuevas herramientas que permiten el análisis de eventos continuos, su base o programación principal está enfocada en los modelos concretos o discretos, por lo que presenta fallos para el análisis de los picos en los eventos máximos continuos, como el caso de este estudio. Pero a pesar de esto, se obtuvieron resultados que permiten seguir con el modelo hidráulico en el software HEC-RAS.

El proceso consistió en realizar iteraciones de los parámetros sensibles del modelo, verificando a su vez los resultados versus los datos extrapolados de la estación Las Mercedes. Es un proceso lento, por lo que tomó bastante tiempo encontrar un conjunto de datos que reflejaran un buen ajuste.

La siguiente tabla representa los valores sensibles del modelo hidrológico, los cuales se relacionan principalmente con el método de perdidas (SMA). Para este modelo los parámetros sensibles fueron la máxima infiltración, la percolación del suelo, el almacenamiento del acuífero 1, el coeficiente del acuífero 1 para devolver el agua a la superficie y el almacenamiento del acuífero 2.

Tabla 9-6 Parámetros de mejor ajuste – Método de pérdida SMA.

METRICA	MAX INFILTRATION			SOIL PERCOLATION			GW 1 STORAGE			GW 1 COEFICIENT			GW 2 STORAGE		
	2.5	4	6	0.5	1	2	200	400	600	200	3000	6000	120	250	300
NASH	0.3	0.57	0.59	0.25	0.33	0.61	0.41	0.67	0.31	0.4	0.68	0.05	0.71	0.4	0.7
r	0.1	0.79	0.34	0.72	0.62	0.76	0.51	0.86	0.67	0.1	0.85	0.56	0.14	0.27	0.92
SCHULTZ	1	1.9	1.5	2.7	2.4	2.7	1.7	2.1	2	1.47	2.9	2.4	1.2	1.9	2.9

Fuente: Elaboración propia

Los valores resaltados en color, fueron los datos con los que se obtuvo el mejor ajuste para la subcuenca Santillana. Estos fueron colocados sistemáticamente con el fin de realizar iteraciones hasta encontrar el mejor ajuste.

La máxima infiltración se relaciona con la máxima capacidad del suelo para permitir el flujo del agua a través de él. Con el software Soil Water Characteristics se encontró un valor inicial para dar comienzo a la calibración de este parámetro.

Para este caso, el parámetro de percolación hace referencia a la facilidad con que el suelo permite el paso lento del fluido hacia las capas inferiores.

El parámetro de almacenamiento del acuífero 1, hace referencia a la cantidad de volumen de agua que este puede almacenar dependiendo de sus características físicas y químicas, para este parámetro se tomó un valor de 200 mm, como punto de partida, ya que se observó en algunos ejemplos del programa. De igual manera para los demás parámetros de los acuíferos.

Con el conjunto de parámetros estratégicamente escogidos se obtuvo la siguiente gráfica, donde la serie naranja corresponde a la información observada y la serie azul a la información modelada.

Debido a que se modeló un evento extremo, el programa no tiene la capacidad de interpretar de una forma adecuada los picos en el histograma por lo que, al inicio y fin de la modelación se presentaron desfases importantes al realizar la comparación de datos simulados vs los observados, como se observa en el gráfico siguiente. Sin embargo, se nota que a lo largo del proceso de modelación a la altura del día 62 (01 junio 2010), el histograma muestra un mejor ajuste hasta el día 190 (7 de octubre de 2010).

Teniendo en cuenta lo anterior, se decide calibrar el modelo a partir del día 62 (01 junio 2010) hasta el día 190 (7 octubre 2010) de la modelación, lo cual abarca un total de 129 días modelados (4 y medio meses aprox.). El cual se muestra en el Gráfico 9-3, donde se observa un ajuste más adecuado.

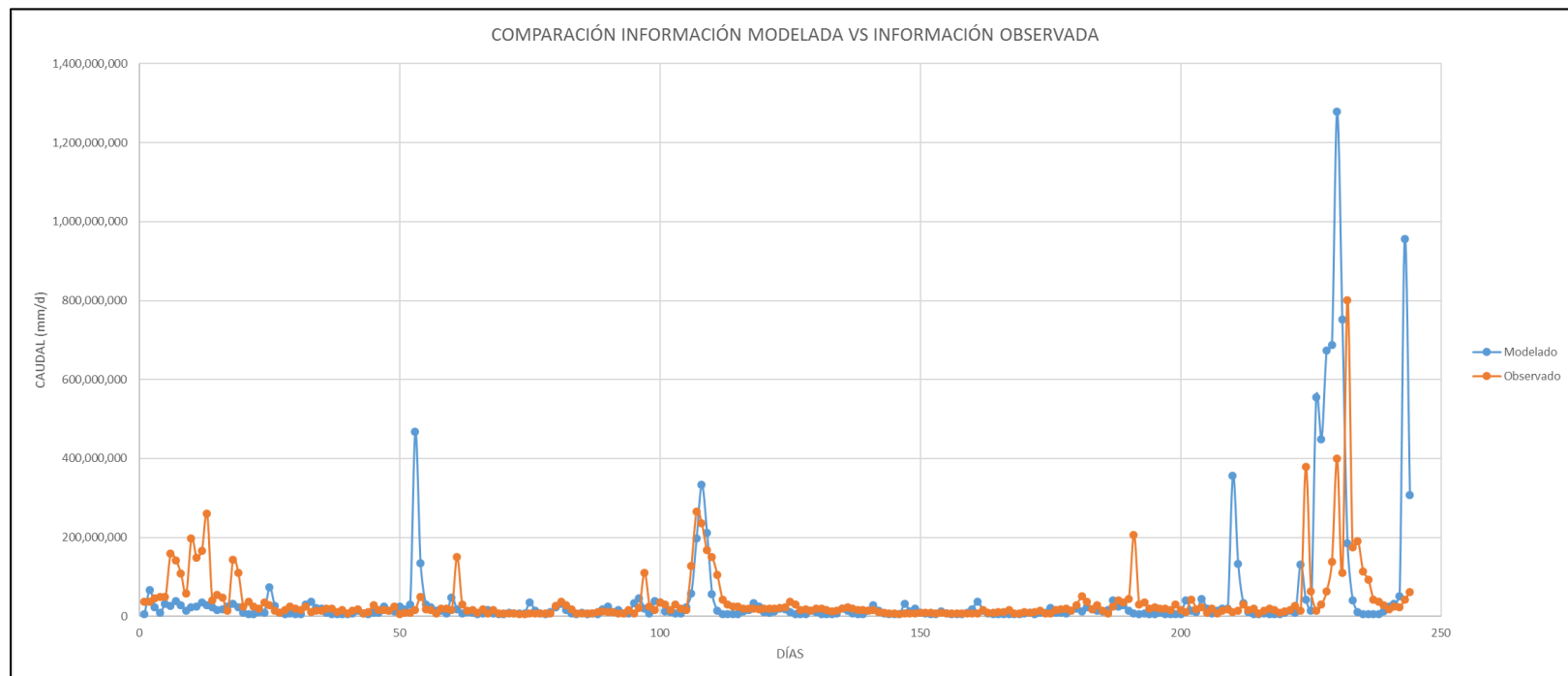


Gráfico 9-2 Comparación datos modelados vs datos observados – Total
Fuente: Elaboración propia

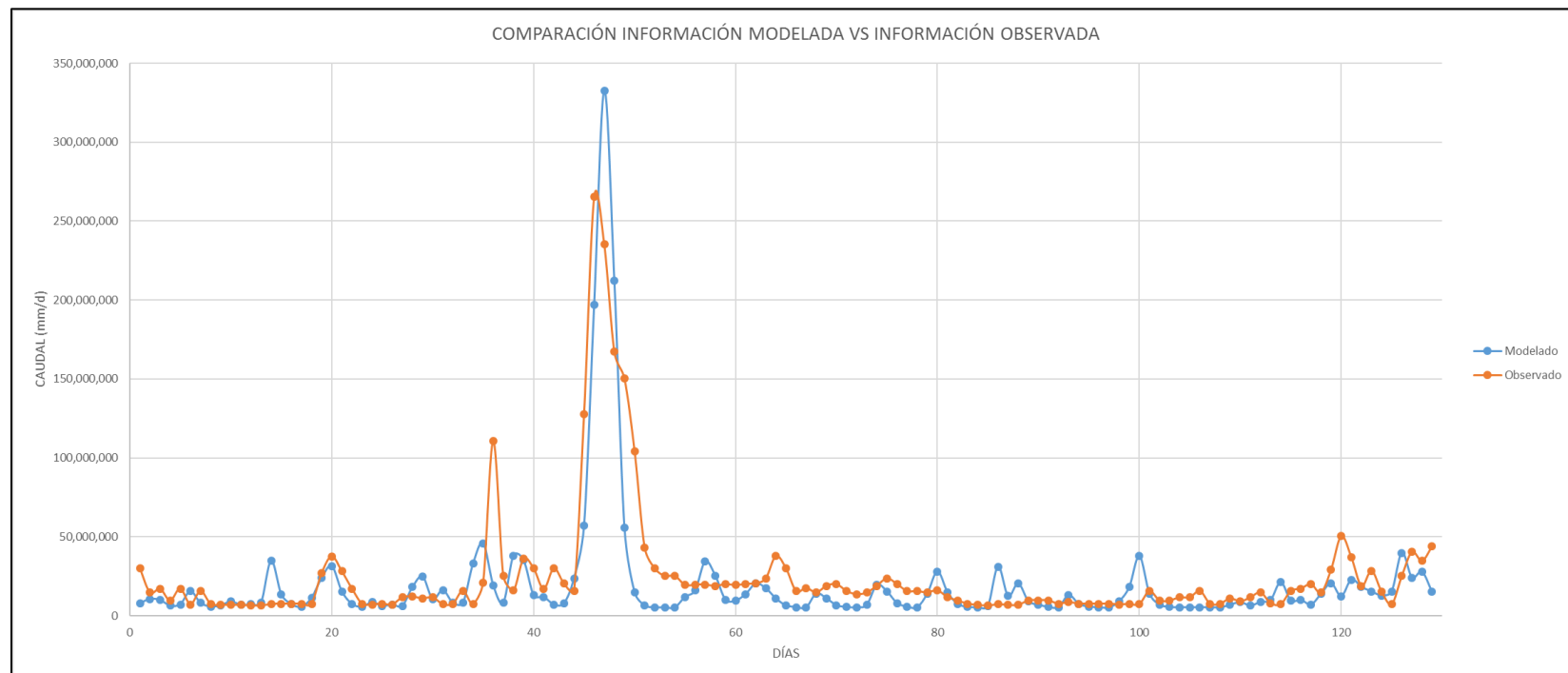


Gráfico 9-3 Comparación datos modelados vs datos observados - Periodo de tiempo a calibrado

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el periodo de tiempo a calibrar, se procedió a realizar la comparación de la información obtenida con el software y la información obtenida de los datos observados, para esto, se realizó un ajuste lineal en el software Microsoft Excel, graficando la información observada en el eje de las abscisas y la información obtenida del modelo en las ordenadas. De este proceso se obtuvo un valor de R^2 de 0.6985, lo cual indica una aceptable relación entre las variables modeladas y las simuladas. En el Gráfico 9-4 se muestra la relación entre las variables.

Es importante mencionar que las gráficas obtenidas con el software HEC – HMS, no son confiables ya que el programa manipula las unidades del gráfico de forma indiscriminada por lo que se presentan errores al momento de leer la información en los histogramas, por tal motivo, se tuvo la necesidad de extraer las series de tiempo del programa y graficarlas nuevamente en el software Excel. Se graficó en unidades de milímetros/día, ya que se quería manejar un solo tipo de unidades en el desarrollo del modelo en relación a volumen de agua.

Con el objetivo de verificar aún más la aceptabilidad del modelo se aplicaron otras tres métricas de calibración, y así tener un mayor criterio admitir la calidad de la simulación.

A continuación, se describen las tres métricas de calibración aplicadas, éstas se escogieron del documento Calibración de Modelos Hidrológicos escrito por Juan Cabrera (Ing. Civil):

a. Coeficiente de calibración: expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en este caso, son los caudales observados y los caudales simulados. Se formula como:

Para el caso del modelo hidrológico de la cuenca del río Chicú, teniendo en cuenta el periodo escogido para su calibración, que es desde el día 62 hasta el día 190, se obtuvo un valor de r de 0.84, lo cual le da un ajuste muy bueno.

Tabla 9-7 Coeficiente de correlación – Cuenca río Chicú

r	0.84
-----	------

Fuente: Elaboración propia.

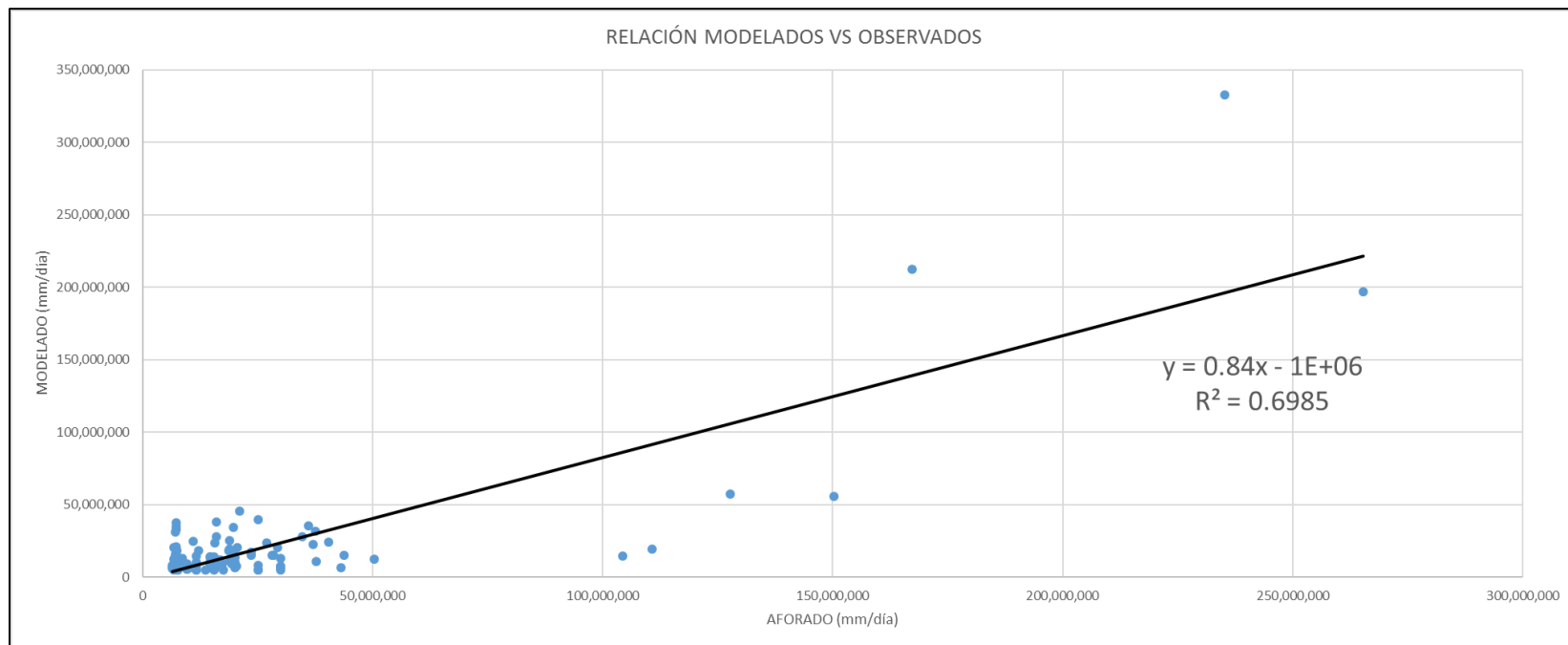


Gráfico 9-4 Relación Serie Modelada Vs Serie Observada

Fuente: Elaboración propia

b. Criterio de Schultz (D):

Q_{max} es la descarga máxima observada en el periodo de estudio. Para este caso fue de 3.07 m³/s.

Para el caso del modelo hidrológico de la cuenca del río Chicú, teniendo en cuenta el periodo escogido para su calibración, que es desde el día 62 hasta el día 190, se obtuvo un valor de:

Tabla 9-8 Criterio de Schultz

D	2.50
----------	-------------

Fuente: Elaboración Propia.

Lo cual se clasifica como muy bueno.

c. Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E):

Para el caso del modelo hidrológico de la cuenca del río Chicú, teniendo en cuenta el periodo escogido para su calibración, que es desde el día 62 hasta el día 153, se obtuvo un valor, $E=0.65$, por lo que se considera como Muy Bueno.

Tabla 9-9 Índice de Nash - Sutcliffe

Índice de Nash	0.65
-----------------------	-------------

Fuente: elaboración Propia.

Con base en los resultados de las métricas de calibración y el coeficiente de correlación de la

Gráfico 9-4, se puede concluir que el modelo se encuentra calibrado y la serie resultante de la modelación se presenta en el anexo.

9.6 RESULTADOS MODELO HIDROLOGICO

9.6.1 Resultados Modelo Hidrológico Subcuenca Santillana

Para el histograma de la subcuenca 1, presenta unos picos en los meses de mayo, junio, octubre y noviembre, los cuales, si se comparan con los datos obtenidos a partir de la estación limnigráfica Las Mercedes, se nota leve desfase. Esto se debe a la baja capacidad del software para analizar los eventos máximos en periodos continuos, por lo que se presentan estas discrepancias, pero observando la gráfica continuamente se determina que en el periodo del 1 de junio hasta el 7 de octubre el comportamiento del modelo es similar a la serie de tiempo obtenida mediante el proceso de transposición de caudales.

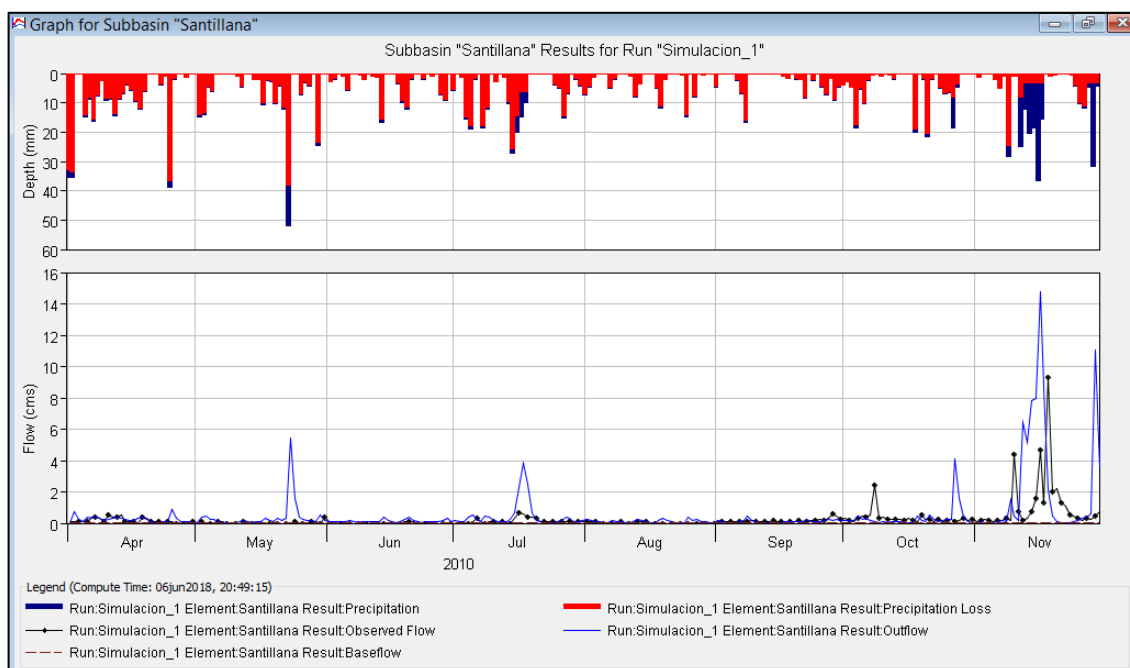


Gráfico 9-5 Resultados obtenidos para la Subcuenca Santillana
Fuente: Elaboración propia con base en software HEC – HMS

Analizando el Gráfico 9-5, el mes de mayo, julio, octubre y noviembre se presentó un importante caudal el cual superó la capacidad de almacenamiento del suelo y de los cuerpos de agua subterráneos, por lo que produjo un aumento del volumen de agua transportado por el cauce, generando desbordamientos del río, el cual ocupó las zonas naturales de inundación, coincidiendo con los reportes de inundación de la sabana de Bogotá en la misma época, afectando económicamente a los habitantes del territorio.

Más detalladamente, se observa que, durante el mes de mayo, a finales, el suelo alcanza la máxima capacidad de almacenamiento, llegando casi a los 40 mm, a partir de ese momento dejó de infiltrarse y se convirtió en escorrentía, lo cual se observa en la parte baja del gráfico. Así mismo, se observa picos importantes a finales de octubre y todo el mes de noviembre.

9.6.2 Resultados Modelo Hidrológico cuenca Chicú

Luego de calibrar el modelo hidrológico en Hec-Hms, se procede con la obtención de los caudales a la salida de la cuenca. Para el modelo total de la cuenca se tomaron valores similares a los de la subcuenca Santillana y algunos otros fueron escogidos aleatoriamente, a prueba y error.

Con el fin de verificar que los resultados obtenidos tengan la mayor similitud con la realidad, se realizó una extrapolación de caudales mediante la metodología propuesta por el POMCA para la determinación de los caudales de la cuenca del río Chicú. La ecuación 8 fue la que se utilizó para este procedimiento.

Esta ecuación representa la ecuación uno presentada anteriormente para la extrapolación de caudales. Para este caso se tomó la misma estación piloto Las Mercedes, pero la información utilizada para la transposición de caudales fue los datos medios mensuales de esta estación. A continuación, se presenta los valores registrados por la estación piloto y los calculados para toda la cuenca del río Chicú.

Tabla 9-10 Caudales estación piloto y calculados cuenca río Chicú

ESTACIÓN	CAUDAL (m ³ /s)							
	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE
LAS MERCEDES	0.173	0.052	0.031	0.137	0.037	0.033	0.072	0.253
CUENCA CHICU	2.549	0.766	0.457	2.019	0.545	0.486	1.061	3.728

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

Teniendo en cuenta que el área tributaria de la estación Las Mercedes es de 9.654 km² y el área tributaria de la cuenca del río Chicú es de 142.237 km².

En la tabla siguiente se presentan los valores medios de caudal obtenidos con el modelo, donde se aprecia la desviación estándar entre los modelados y los observados, la cual es relativamente baja, lo que hace confiable la serie de tiempo obtenida por el programa, además en la Gráfico 9-6 se presenta el histograma obtenido para todo el periodo de tiempo modelado y en la Gráfico 9-7 se presenta desde el 1 de junio hasta el 7 de octubre, el cual fue el intervalo de tiempo con que se calibró el modelo.

Tabla 9-11 Valores medios de Caudal obtenidos con el modelo Hec – Hms

ESTACIÓN	CAUDAL (m ³ /s)							
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEPTI	OCT	NOV
CUENCA CHICU	2.549	0.766	0.457	2.019	0.545	0.486	1.061	3.728
CUENCA CHICU MODELADO	1.208	1.148	0.589	1.507	0.686	0.511	0.987	3.567
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.948	0.270	0.094	0.362	0.100	0.018	0.052	0.114

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CAR

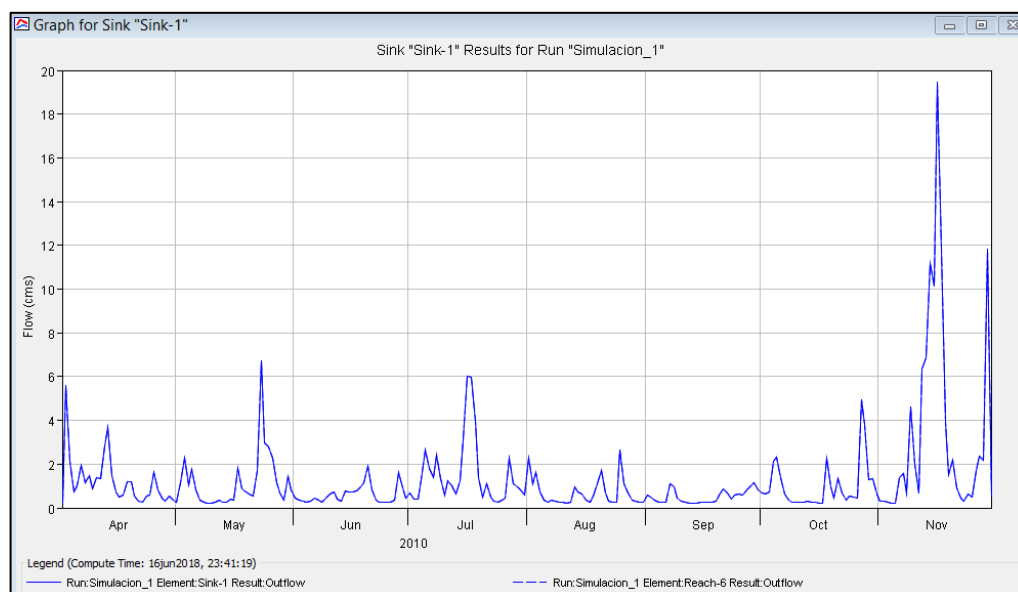


Gráfico 9-6 Histograma Cuenca Chicú

Fuente: Elaboración propia con base en software Hec – Hms

Tabla 9-12 Resultados obtenidos para cada subcuenca

SUBCUENCA	MAX INFILTRACIÓN (mm)	CAUDAL MAX (m3/seg)	CAUDAL BASE (m3/seg)	CAUDAL MODELADO (m3/seg)
SUBCUENCA 1	40	3.85	0.06	3.79
SUBCUENCA 2	45	0.14	0.06	0.08
SUBCUENCA 3	65	2.57	0.06	2.51
SUBCUENCA 4	45	0.22	0.06	0.16
SUBCUENCA 5	75	0.12	0.06	0.06
SUBCUENCA 6	57	0.33	0.06	0.27
SUBCUENCA 7	52	1.09	0.06	1.03
SUBCUENCA 8	50	0.25	0.06	0.19

Fuente: Elaboración propia con base en resultados modelo hidrológico

La Tabla 9-12 presenta los valores obtenidos de máxima infiltración para cada subcuenca, luego de realizar el modelo hidrológico. Se observa que la subcuenca con mayor capacidad de almacenamiento es la subcuenca 5, la cual se ubica en la parte central de la cuenca, donde el cuerpo de agua subterráneo posee una buena productividad, por lo que la recarga en esta área es alta. Mientras que la infiltración más baja se presenta en la subcuenca 1 (Santillana), donde los acuíferos se recargan mediante el flujo de agua entre acuíferos y por medio de la precipitación, por lo que el suelo alcanza su máxima capacidad de infiltración rápidamente. Además, se observa en la tabla anterior, el caudal máximo en el periodo de estudio para cada subcuenca, y el caudal base ingresado al modelo.

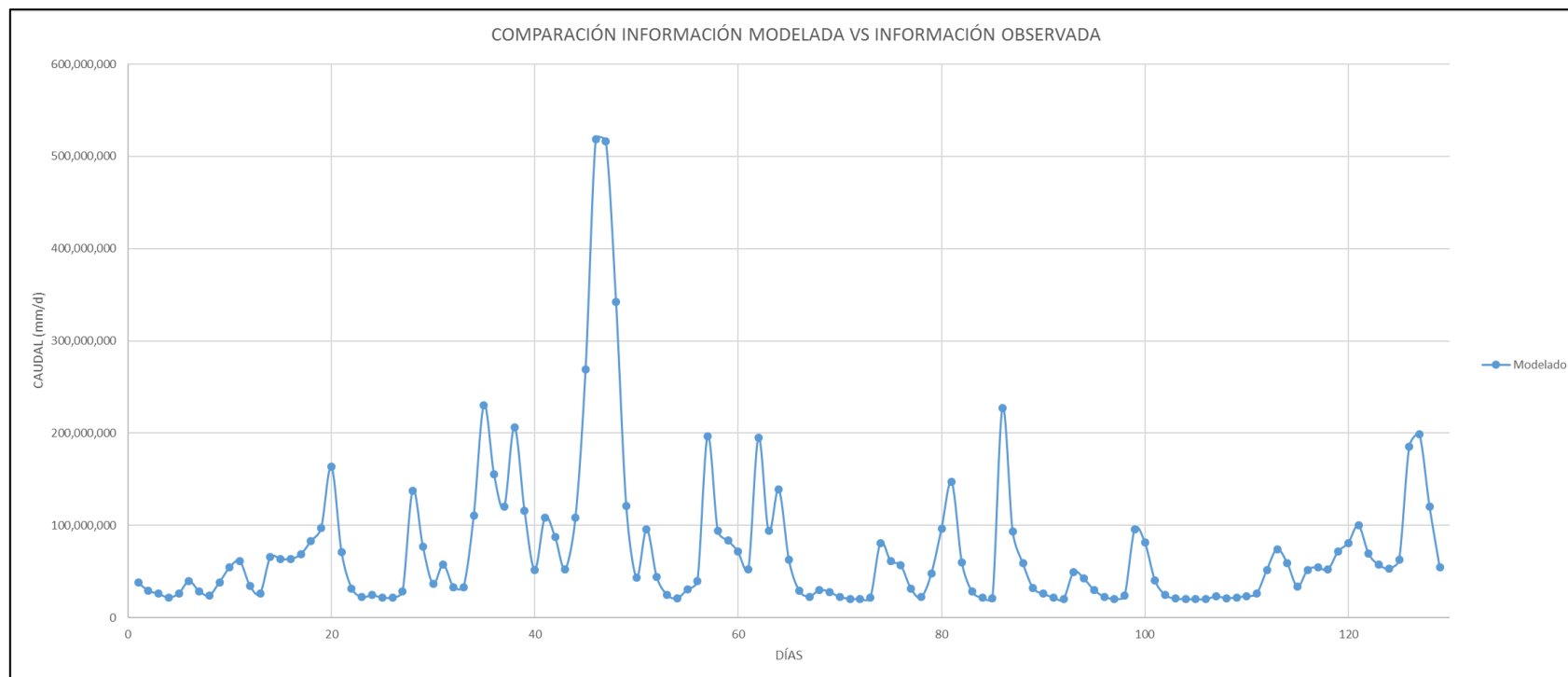


Gráfico 9-7 Histograma del periodo de tiempo calibrado el modelo para la cuenca del río Chicú
Fuente: Elaboración propia con base en HEC-HMS

10. MODELO HIDRÁULICO

Para la realización del modelo hidráulico de la cuenca del río Chicú se empleó el software HEC – RAS, en cuanto a los parámetros de entrada que requiere la modelación se obtuvieron tanto en campo como en información secundaria como cartografía y datos hidroclimáticos suministrados por las entidades de la CAR, IDEAM e IGAC.

10.1 LEVANTAMIENTO Y PREPROCESO DE DATOS PARA MODELO HIDRÁULICO

10.1.1 Topografía

La información cartográfica se obtuvo de los archivos del IGAC, el cual abarca la cuenca en su totalidad. Las siguientes tablas relacionan las planchas que fueron recopiladas que cubrían el área de estudio.

Tabla 10-1. Información Cartográfica IGAC de la cuenca del río Chicú.

PLANCHA	ESCALA
227	1:100.000
227IIB	1:25.000
227IID	1:25.000

Fuente: IGAC, 2017.

Para complementar esta información se utilizó imágenes de radar del satélite ALOS PALSAR, lanzado en enero del 2006 por la agencia japonesa de exploración aeroespacial. La resolución espacial del DEM (Modelo de Elevación Digital) es de 12.5 m de precisión en formato Tiff como se puede ver en la ilustración 10-1, , en donde por medio de herramientas SIG se construyen la curva de nivel cada 25 m y así generar un TIN el cual es una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos) (ESRI, 2016)².