

DIAGNÓSTICO DE LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN LA
CUENCA DEL RÍO CHICÚ, GENERADO POR MEDIO DE BALANCES HÍDRICOS

KEVIN DAVISON GALVIS
ESTEBAN MARTÍNEZ FERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2016

DIAGNÓSTICO DE LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN LA
CUENCA DEL RÍO CHICÚ, GENERADO POR MEDIO DE BALANCES HÍDRICOS

KEVIN DAVISON GALVIS
ESTEBAN MARTÍNEZ FERNÁNDEZ

TRABAJO DE GRADO
Para obtener el título de Ingeniero Civil

Director: Ing. John Alexander Segura Bolívar
Par Académico: Ing. José Luis Díaz Arévalo

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2016

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO

JURADO

Bogotá, / / 2016.

AGRADECIMIENTOS

Queremos darle las gracias en primer lugar a la Universidad Santo Tomás y la facultad de Ingeniería Civil y su planta docente por el proceso de formación del que hicimos parte los últimos cinco años.

A nuestro director JOHN ALEXANDER SEGURA BOLIVAR, por su ayuda desde la concepción del proyecto, a los ingenieros JOSE LUIS DIAZ ARÉVALO, JORGE PINEDA JAIMES por sus comentarios, sugerencias y paciencia, durante todo el proceso de la tesis, y por último al ingeniero VICTOR MENDOZA M. por su ayuda como director del comité de grado.

Tabla de contenido

RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	12
JUSTIFICACIÓN.....	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
OBJETIVOS.....	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. ANTECEDENTES	17
1.1.1. <i>El Balance Hídrico y variables del ciclo hidrológico</i>	17
1.1.2. <i>Desecación de Arcillas en el Occidente de la Sabana de Bogotá</i>	18
1.1.3. <i>Geología del Occidente de la Sabana de Bogotá</i>	20
1.2. ASPECTOS BÁSICOS DE LA HIDROLOGÍA	21
1.2.1. <i>Conservación de la masa en Hidrología</i>	21
1.2.2. <i>El modelo del sistema hidrológico</i>	22
2. ZONA DE ESTUDIO	24
2.1. LOCALIZACIÓN.....	24
2.2. RÍO CHICÚ	24
2.3. MUNICIPIO DE TENJO	25
2.3.1. <i>Descripción física:</i>	25
2.3.2. <i>Límites del municipio:</i>	25
2.4. DATOS DEMOGRÁFICOS:.....	25
2.4.1. <i>Distrito de riego la ramada</i>	26
2.5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS CUENCA RÍO CHICÚ.....	26
2.5.1. <i>Curva Hipsométrica</i>	27
3. METODOLOGÍA	29
3.1. INFORMACIÓN DISPONIBLE	30
3.2. TRATAMIENTO DE SERIES DE TIEMPO	32
3.3. SEGMENTACIÓN POR KMEANS	32
3.3.1. <i>Algoritmo Kmeans</i>	34
3.4. DATOS FALTANTES	34
3.5. MICE: MULTIVARIATE IMPUTATION BY CHAINED EQUATIONS.....	37
3.6. REGIONALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN USANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	38
3.6.2. <i>Macros Visual Basic</i>	39
3.6.3. <i>Model Builder ArcGIS</i>	40
3.7. EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	41
3.7.1. <i>Evapotranspiración Potencial (ETP) método de Turc</i>	43
3.7.2. <i>Evapotranspiración Potencial (ETP) método de Thornthwaite</i>	44
3.7.3. <i>Evapotranspiración Potencial (ETP) método de García y López</i>	45
3.8. BALANCES HÍDRICOS.....	45
3.8.1. <i>Balance Hídrico Climático (B.H.C.)</i>	45
3.8.2. <i>Balance Hídrico de Suelo (B.H.S.)</i>	47
3.8.3. <i>Balance Hídrico Agrícola (B.H.A.)</i>	48
4. RESULTADOS.....	49
4.1. PRECIPITACIÓN	49
4.1.1. <i>Precipitación media, máxima y mínima mensual multianual</i>	53
4.2. EVAPORACIÓN.....	58
4.3. TEMPERATURA	60

4.4.	BRILLO SOLAR.....	63
4.5.	HUMEDAD RELATIVA.....	64
4.6.	CLIMATOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	65
4.6.1.	<i>Clasificación de Köppen (1918)</i>	66
4.6.2.	<i>Clasificación de Strahler</i>	67
4.7.	CAUDALES Y NIVELES	67
4.8.	ESTADÍSTICAS ZONALES CARRETERA SIBERIA – TENJO.....	68
5.	BALANCES HÍDRICOS.....	69
5.1.	RESULTADOS EVAPOTRANSPIRACIÓN (ETP).....	70
5.2.	BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO.....	72
5.3.	BALANCE HÍDRICO DE SUELO (B.H.S.)	73
5.4.	BALANCE HÍDRICO AGRÍCOLA (B.H.A.).....	75
5.4.1.	<i>B.H.A. de la Papa</i>	75
5.4.2.	<i>B.H.A. del tomate</i>	76
5.4.3.	<i>B.H.A. del fríjol</i>	77
6.	CONCLUSIONES	79
	REFERENCIAS	82
	BIBLIOGRAFÍA	86

Índice de Gráficas

Grafica 1. Precipitación mensual (1980 - 2015), grupo 1, arriba series de datos observados, abajo series de datos imputados, Fuente: Autores 2016.....	50
Grafica 2. Precipitación mensual (1980 - 2015), grupo 2, Fuente: Autores 2016 ..	50
Grafica 3. Precipitación mensual (1980 - 2015), grupo 3, Fuente: Autores 2016 ..	51
Grafica 4. Precipitaciones anuales, comportamiento bimodal, [A] pertenece al cluster 1, [B] y [D] al grupo 3, y [C] al grupo 2, Fuente: Autores 2016	52
Grafica 5. Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: Flores Colombianas, Fuente: Autores 2016.....	53
Grafica 6, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: La Esperanza, Fuente: Autores 2016.	53
Grafica 7, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: Santillana, Fuente: Autores 2016.	54
Grafica 8, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: El Hato, Fuente: Autores 2016	55
Grafica 9, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: Santa Inés, Fuente: Autores 2016	55
Grafica 10, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: La Primavera, Fuente: Autores 2016	56
Grafica 11, Evaporación media mensual multianual, estación: Providencia, Fuente: Autores 2016.....	58
Grafica 12. Evaporación, promedio, máxima y mínima series inputadas, Fuente: Autores 2016.....	59
Grafica 13, Temperatura media mensual multianual, estación: Providencia, Fuente: Autores 2016.....	60
Grafica 14. Temperatura media mensual, Fuente: Autores 2016	61
Grafica 15, Brillo solar medio mensual multianual, estación: Providencia, Fuente: Autores 2016.....	63
Grafica 16. Humedad relativa media mensual multianual, estación: Providencia, Fuente: Autores 2016	64
Grafica 17, Climodiagrama valores promedio Precipitación, temperaturas medias y máximas. 8 estaciones empleadas, Fuente: Autores 2016.....	66

Índice de Figuras

Figura 1. Zona de estudio, tomada de RUEDA y PINEDA (2011) ³	19
Figura 2. Transecto Geológico F-F', fuente	20
Figura 3. Zona de estudio, Fuente, Autores, 2016	24
Figura 4. Curva Hipsométrica del área de la Cuenca del río Chicú, Fuente: Autores 2016	27
Figura 5. Visualización Aster DEM (digital elevation model), cuenca del Río Chicú, Fuente:	28
Figura 6. Matriz de metadatos de estaciones hidrometeorológicas en Euler math toolbox Fuente: Autores 2016	33
Figura 7. Esquema de datos mensuales faltantes, en rojo oscuro: datos observados, en pardo claro: datos faltantes, Fuente: Autores 2016	36
Figura 8. Capa del buffer y la cuenca sobrepuestos sobre Google Earth.	39
Figura 9. Tabla, precipitaciones mensuales, Julio del 2002, Fuente: Autores 2016	40
Figura 10. Model builder Importar, Fuente: Autores 2016	40
Figura 11 Dos casos de localización del tanque de evaporación y sus alrededores. Fuente: ver referencia 21, figura 19, p. 64	42
Figura 12. Índice de Aridez, Fuente: IDEAM	46
Figura 15, Isoyetas medias multianuales, Fuente: Autores 2016	57
Figura 16, Isolineas de evaporación media multianual, Fuente: Autores 2016	59
Figura 17, Isotermas medias multianuales, Fuente: Autores 2016	62
Figura 18, Isohelias medias mensuales multianuales, Fuente: Autores 2016	64
Figura 19, Isóhumas medias multianuales, Fuente: Autores 2016	65
Figura 20, Caudales Medios Mensuales Multianuales, Fuente: Ecoforest y Planeación Ecológica	67

Índice de Tablas

Tabla 1. Características Físicas Cuenca Río Chicú, Fuente: Autores 2016	26
Tabla 2. Información espacial recolectada.....	30
Tabla 3. Estaciones hidrometereológicas obtenidas.....	31
Tabla 4 Estaciones meteorológicas segmentadas. *Nota: las precipitaciones promedio están indicadas únicamente con los datos observados, Fuente: Autores 2016.....	33
Tabla 5. Coeficientes Kc para evaporímetro de tanque	43
Tabla 6. Balances Mensuales Multianuales, Fuente: Autores 2016.....	68
Tabla 7. Balance mensual, máximo, mínimo y promedio año 1993.....	69
Tabla 8, Evapotranspiración potencial (ETP) obtenida por el método de TURC, Fuente: Autores 2016	70
Tabla 9, Evapotranspiración potencial (ETP) obtenida por el método de THORMTHWAITE, Fuente: Autores 2016	70
Tabla 10, Evapotranspiración potencial (ETP) obtenida por el método de GARCÍA Y LÓPEZ, Fuente: Autores 2016	71
Tabla 11, B.H.C.M. determinado con la ETP según Turc Fuente: Autores 2016...	72
Tabla 12, B.H.C.M. determinado con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016.....	72
Tabla 13, B.H.C.M. determinado con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016.....	73
Tabla 14, B.H.S.M. determinado con la ETP según Turc, Fuente: Autores 2016 ..	73
Tabla 15, B.H.S.M. determinado con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016.....	74
Tabla 16, B.H.S.M. determinado con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016.....	74
Tabla 17, B.H.A. de la papa con la ETP según Turc, Fuente: Autores 2016	75
Tabla 18, B.H.A. de la papa con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016	75
Tabla 19, B.H.A. de la papa con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016.....	76
Tabla 20, B.H.A. del tomate con la ETP según Turc, Fuente: Autores 2016	76
Tabla 21, B.H.A. del tomate con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016	76
Tabla 22, B.H.A. del tomate con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016.....	77
Tabla 23, B.H.A. del frijol con la ETP según Turc, Fuente: Autores 2016.....	77
Tabla 24, B.H.A. del frijol con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016 ..	78
Tabla 25, B.H.A. del frijol con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016	78

RESUMEN

El proyecto “Diagnóstico de la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Chicú, generado por medio de balances hídricos” tiene como objeto generar el diagnóstico medio mensual multianual de la disponibilidad hídrica de la cuenca, denotando su estado predominante: Superávit o Deficitario. Para ello se plantea la metodología del balance hídrico (B.H.) como indicador directo del estado de recarga de la cuenca; por ello se plantean los balances hídricos climático (B.H.C.), de suelo (B.H.S.) y agrícola (B.H.A.).

Se incluye el inventario de las siguientes variables del ciclo hidrológico; precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y evaporación, incluyendo la variabilidad espacio-temporal de las variables seleccionadas de la zona de estudio partiendo de 1980 hasta el 2015, ya que la mayoría de estaciones presentes en la zona tienen registros en ese rango de tiempo además de que en 1980 se construyó la primera vía intermunicipal trayendo consigo mayor intervención antrópica, lo cual es apoyado por la teledetección descriptiva y la serie de tiempo hidrológica.

Estos datos son consultados de las bases de datos de las entidades competentes como La CAR, el IDEAM, entre otras entidades locales y regionales. Esto con la finalidad de ratificar si dichos balances hídricos tienen una variación dentro de la cuenca.

Además de realizar el cálculo de la evapotranspiración potencial (etp) por las metodologías de Turc, García y López, y Thornthwaite creando escenarios desfavorables y favorables; obedeciendo las ecuaciones de los balances hídricos:

- B.H.C.

$$P = ETR + ES$$

Dónde:

P = Precipitación

ETR = Evapotranspiración Real

ES = Escorrentía superficial

- B.H.S.

Reserva: SI $(RA + (P - ETR) > Res\ max; Res = Res\ max; Res = RA + (P - ETR)$

Excedentes: SI $(RA + (P - ETR) > Res\ max; EXC = RA + (P - ETR) - Res\ max; EXC = 0)$

P = Precipitación

RA = Reserva Acumulada

ETP = Evapotranspiración potencial

Excedentes (mm)

ETR = Evapotranspiración real

Res max = Reserva Máxima

- B.H.A.

$$\text{Dotación bruta de riego} = ETR - P_{\text{efectiva}}$$

P_{efectiva} = Precipitación efectiva

ETR = Evapotranspiración real

Obteniendo en forma general, que aún si la cuenca se encuentra en el escenario más desfavorable (etp según Turc), en la mayor parte del año tendría disponibilidad del recurso hídrico, incluso para sustentar los cultivos de la cuenca. Siempre y cuando se manejen las variables seleccionadas bajo condiciones naturales, excluyendo las captaciones del río Chicú y la hidrogeología de la cuenca.

INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico como sistema cerrado presenta un equilibrio que fácilmente puede verse comprometido bajo interacciones de todo tipo de influencia; al partiendo de un esquema general se observa que el ciclo hidrológico depende principalmente de factores meteorológicos, atmosféricos y geológicos en cuanto a la continuidad del mismo, por ello cuando alguno de estos presenta algún tipo de variación se obtiene como resultado un cambio que bien puede ser importante (incremento o disminución de precipitaciones como la frecuencia de las mismas) o insignificante, pero ciertamente estos cambios sin importar su magnitud tiende a alterar en diferente medida el medio ambiente respecto a condiciones medioambientales (clima) y geológicas (morfología – erosión).

Cuando se tiene como uno de los elementos primarios el agua para sustentar la vida en la tierra, es trascendental el llevar a cabo estudios que abarquen todos sus frentes y que conserven una continuidad para determinar la generalidad de su condición. Dentro de estos estudios un indicador de sustentabilidad hidrológica y eje central de la presente investigación es el Balance Hídrico, que tiene como fin determinar si en una cuenca hidrográfica el agua que entra por condiciones naturales es igual, menor o mayor a la que se pierde en procesos como la evaporación, escorrentía, infiltración y uso humano. Con este resultado se expone el estado favorable o desfavorable del sistema hídrico, las causales de dicha condición y las medidas para poder reequilibrar el sistema en caso de que sea necesario.

Por esto se implementan 3 metodologías del Balance Hídrico (climático, suelo y agrícola) para generar el diagnóstico de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Chicú en lo corrido del año. Pero para llegar a ese punto es necesario recorrer una serie de pasos partiendo de la descripción de la zona de estudio, seguido de la recopilación de datos de variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura, brillo solar, humedad relativa y evaporación), efectuándoles su respectivo tratamiento estadístico y caracterización; continuando con el cálculo de la evapotranspiración potencial (etp), variable que es indispensable para llevar a cabo los balances hídricos, siendo calculada por tres métodos (Turc, Thornthwaite y García y López) planteando 3 escenarios posibles que son analizados de acuerdo a sus resultados; y con las etps efectuar los balances hídricos, determinando en qué meses la cuenca presenta disponibilidad hídrica y en cuales presenta déficit.

Es preciso resaltar las limitantes existentes que para el presente proyecto fueron: analizar la cuenca desde un contexto hidrometeorológico, sin llegar a incluir agua subterránea ni su comportamiento; asimismo tampoco se incluyeron las captaciones al río Chicú para diferentes usos. Delimitando a las condiciones naturales.

JUSTIFICACIÓN

Desde una perspectiva global la principal afectación sobre el ciclo hidrológico es marcada por la actividad humana, afectaciones como la pérdida o modificación de cobertura vegetal, producción de gases contaminantes y residuos sólidos, tiene relación con la crisis mundial del agua, esta crisis como lo plantea el informe de la UNESCO, *water for people, water for life*¹, se relaciona con la disponibilidad y la gestión del recurso, siendo nosotros importantes actores dentro del ciclo hidrológico, al hacer tomar 26% de la evapotranspiración anual y 54% de la escorrentía superficial para nuestro uso, siendo la problemática proporcional a la vasta población mundial.

Al dirigirse hacia un marco nacional se observa que Colombia (a pesar de tener una oferta hídrica tres veces mayor que el promedio sudamericano²) no está alejada de los hechos anteriormente mencionados, por el contrario, hace parte de los mismos, aunque en menor medida que otras naciones. Haciendo un acercamiento local en la Sabana de Bogotá nos encontramos con una ciudad de 9 millones de habitantes con continuos requerimientos de abastecimiento de alimentos y materias primas y por otro lado sus alrededores con ciudades y poblados pequeños primando la cobertura vegetal agrícola con una fracción mínima de la cobertura de bosques y vegetación características de la región. Los poblados que circundan Bogotá abastecen la ciudad día a día con productos como hortalizas y vegetales, y además Bogotá como centro económico del país concentra una gran cantidad de empresas y actividades productivas. Es por esto que la mitad de la población de Cundinamarca (cerca de 1'400.000 personas para el año 2014³) se concentra en la Sabana de Bogotá, junto con este crecimiento en los alrededores de Bogotá llegan nuevos desafíos como es la conectividad entre Bogotá y alrededores. En el caso de Bogotá y Tenjo la vía de conexión está mal estado, esto primero, va a deteriorar la experiencia del usuario, con riesgo de deteriorar la seguridad, y segundo incrementará los tiempos de transporte afectando la productividad de la región.

¹ UNESCO. Water for people, water for life: The United Nations World Water development report [PDF]. Unesco publishing y Berghahn Books. 2003. P 4 – 8.

² CEPAL. Agua para el siglo XXI para América del sur: Informe Colombia [PDF]. Global water partnership. 2000. p. 11.

³ Periódico El Tiempo [en línea]. Bogotá, Colombia. 23 de enero de 2014. [Citado 3 Septiembre del 2016]. Diario. En: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13397801>. ISSN 0121 - 9987

Ahora en cuanto a la influencia del clima (y del clima en la disponibilidad de recurso hídrico), sin necesidad de entrar a observar los registros del tiempo es notable un cambio en el estado del tiempo en estos últimos años, la estacionalidad no es tan marcada, ya no es seguro que el mes de abril sea de lluvias, los vientos de agosto se pueden manifestar con más fuerza mucha antes a finales de Julio, las épocas secas prolongadas y las lluviosas extremas, pero efímeras. Cuestiones que los habitantes de la zona de Bogotá y alrededores no están habituados. Cambios visibles y cuantificables en los registros y tienden a afectar a las actividades del hombre dejando pérdidas económicas debido al dinero invertido en atender emergencias causadas por la falta de agua, pero también están otras consecuencias como un descenso del nivel freático, lo cual puede potencialmente afectar estructuras de pavimentos flexibles y cimentaciones superficiales, lo cual conlleva un importante gasto en mantenimiento y arreglos también.

De manera particular la pregunta de investigación planteada en el proyecto surge como apoyo a una investigación de un problema específico que se presenta en la subrasante de la vía Siberia - Tenjo en el occidente de la sabana de Bogotá, siendo este un problema generalizado a lo largo de toda la vía afectado el debido funcionamiento de esta, dicho esto en el presente proyecto se aborda esta problemática aportando exclusivamente los valores de balances hídricos determinados, realizando un análisis espacio temporal en la cuenca desde el año 1980 que es un año donde hay información continua y de más estaciones tanto de la Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR) como del IDEAM.

Dentro del alcance del proyecto estará la hidrología superficial con sus variables, considerando las coberturas vegetales; respecto al flujo de agua bajo la rasante de la vía está contemplado para investigaciones posteriores del semillero de suelos de la Universidad Santo Tomás, donde se incorporará información más puntual del sitio, realizando apiques y un levantamiento del lugar. Este trabajo vendría siendo un primer avance dentro del macro proyecto que es estudiar estas patologías y las arcillas sobre las que se encuentra la vía.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El manejo y administración de los recursos hídricos es un reto importante en el presente siglo, considerando que el desarrollo y crecimiento poblaciones terminan siempre afectando las corrientes de agua superficial al ser el sustento de las poblaciones humanas y verse la gran mayoría de ríos y quebradas bajo la influencia del hombre, ya que la vida se da alrededor de estas corrientes y por ende los centros urbanos desde las grandes capitales hasta las poblaciones como los son Tenjo y Tabio en el departamento de Cundinamarca, y entre esta interacción del medio con el hombre surgen problemas socioambientales, la mayoría de veces generados por mal manejo y administración de los recursos, sobreexplotación de acuíferos, ganadería y agricultura extensiva afectando la flora, fauna y disponibilidad del recurso, el ecosistema en general, causando un desequilibrio en este.

Para establecer la importante influencia del ser humano en su entorno existe un principal indicador que es el clima y la atípica variación que éste presenta con respecto a unos antecedentes no tan lejanos. Al enfocar el problema puede verse delimitado al ciclo hidrológico y su tan delicado equilibrio, debido a esto es pertinente el determinar la medida en que se ha venido alterando éste vital ciclo natural y para ello existe una excelente herramienta que es la de la metodología del balance hídrico en un periodo importante de tiempo sobre un área que arroje diferentes puntos de análisis. De esto surge la pregunta de investigación

¿Según el diagnóstico del cambio de excedentes, déficit y reserva del recurso hídrico, cuál es el estado predominante de la disponibilidad hídrica?

OBJETIVOS

General:

Implementar el balance hídrico climático, suelo y agrícola, generando el diagnóstico de la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río Chicú.

Específicos:

- Llevar a cabo el tratamiento estadístico a las series de tiempo de la precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y evaporación considerando: calidad de información, varianza, homogeneidad, registro y llenado de datos faltantes
- Realizar un análisis de la variación espacio temporal de las variables compiladas precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y evaporación, con información obtenida en la zona de estudio.
- Caracterizar hidrometeorológicamente la zona de estudio empleando sistemas de información geográfica con las variables hidrometeorológicas.
- Calcular la evapotranspiración potencial (ETP) por los métodos de Turc, Thornthwaite y García y López.
- Realizar el Balance Hídrico Climático a la zona de estudio determinando el índice de aridez.
- Realizar el Balance Hídrico de Suelo a la zona de estudio determinando la reserva, excedentes y déficit de agua del suelo.
- Realizar el Balance Hídrico Agrícola de los cultivos predominantes en la zona de estudio.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

En la revisión de antecedentes se tuvieron en cuenta tres áreas de interés, los estudios geológicos, los estudios hidrológicos y meteorológicos y por último los estudios del caso de estudio de las patologías debido a arcillas fisuradas. Estos estudios previos fueron un punto de partida, pero también hay otros que le aportarán al proyecto en su debido momento incluidos en la bibliografía.

1.1.1. El Balance Hídrico y variables del ciclo hidrológico

Hay que considerar aspectos elementales consignados en el manual de la Unesco para balances hídricos, “El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.”⁴

La consulta de balances hídricos hechos para otros designios pero en la zona de la sabana de Bogotá e incluso en otras zonas tropicales con climas y relieve similares pueden ser de ayuda en cuanto a la metodología teniendo en cuenta recomendaciones, fuentes de información y el tratamiento de datos descrito, un caso de estudio que puede ser relevante es el realizado en los andes ecuatorianos titulado: spatial and temporal rainfall variability in mountainous área: A case study from the south Ecuadorian Andes⁵. Como en el caso de los métodos de interpolación empleados pbmetara espacializar información puntual.

En un balance hídrico se calculan las entradas al sistema sea un embalse, lago o río, e igualmente las salidas de agua del sistema además de un término adicional que es la incertidumbre o residual, esto igualado al almacenamiento en el sistema que puede ser positivo o negativo. Las entradas y salidas del sistema pueden constar de uno o más términos, dependiendo del grado de complejidad necesario, las dimensiones de la masa de agua, características hidrográficas y la duración del balance, siendo lo usual que en periodos cortos (días, semanas, meses) el cambio

⁴ A.A. SOKOLOV, T.G. CHAPMAN. Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos. Insittuto de Hidrologia de España y UNESCO. 1981

⁵ W. BUYTAERT, R CELLERI, P WILLEMS, B. DE BIÉVRE y G. WYSEURE. spatial and temporal rainfall variability in mountainous área: A case study from the south Ecuadorian Andes. Journal of Hydrology, Volume 329, Issues 3–4, 15. Octubre 2006. Pags 413-421. Base de datos: Elsevier,

de almacenamiento será distinto a cero por lo que hay un mayor grado de complejidad siendo necesario agregar más términos a la ecuación del balance. EN el caso de una cuenca fluvial el manual de la UNESCO⁶ recomienda usar la ecuación de balance con cinco términos incluyendo la incertidumbre. [1]

$$P - E - Q - \Delta S - v = 0 \quad [1]$$

La ecuación [1] de balance hídrico para cuencas fluviales es útil cuando se desea hacer un balance solo del agua superficial, pero como hay libertad de agregarle más términos según el nivel de complejidad para un intervalo de tiempo mensual, puede ser importante incluir la humedad retenida en el suelo y agregarle al flujo base la escorrentía superficial. Para esto a lo largo de los años se han trabajado diversos modelos conceptuales y empíricos. Con aplicaciones y parámetros diferentes, estando desde modelos de 2 parámetros hasta modelos de 8 o más parámetros

1.1.2. Desección de Arcillas en el Occidente de la Sabana de Bogotá

En lo que respecta a la zona de estudio la investigación hecha en el año 2011 por Rueda y Pineda⁷ se realizaron 4 apiques de la zona de interés, dos de ellos sobre la vía Siberia – El Rosal (uno a cada lado de la calzada), y los otros dos en el kilómetro 2 de la vía Siberia-Tenjo y Kilómetro 5 vía El Rosal-Subachoque. Los apiques describen lo siguiente, “Los materiales encontrados corresponden a arcillas limosas, con lentes de arena o con limo orgánico” y los resultados del estudio de estos suelos donde encontraron fisuras asociadas a la desecación.

Existe la posibilidad que una pérdida de humedad en el suelo sumado a una presión negativa sean las culpables del agrietamiento por desecación, sucediendo esto en suelos finos como los presentes en gran parte de la sabana de Bogotá, produciendo estos cambios volumétricos y afectando la estructura del pavimento, en el estudio de la zona occidental el área peri urbana de Bogotá del 2014⁸. Se mencionan investigaciones del comportamiento volumétrico de las arcillas cuaternarias de origen lacustre de la sabana de Bogotá, y la influencia que pueden tener árboles de especies no nativas, al ejercer una gran cantidad de succión y requerir un considerable volumen de agua. Algunas de las conclusiones citadas por Pineda, Garcia y Cabana indican que, durante los procesos de desecado, la

⁶ A.A. SOKOLOV, T.G. CHAPMAN. Op. Cit., p. 20.

⁷ M. Y. RUEDA, J.A. PINEDA. Patologías asociadas a fenómenos de desecación en pavimentos flexibles del occidente de la sabana de Bogotá. XVIII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería De Pavimentos, At CARTAGENA, COLOMBIA, Volumen: 1. Abril 2011.

⁸ J.A. PINEDA, D. A. GARCIA, M. CABANA. Propiedades de Retención de Humedad de Arcillas Fisuradas: Una herramienta para el análisis de problemas asociados a desecación. 12th latin american and caribbean conference for engineering and technology [Conference Paper]. Julio 22 del 2014. Guayaquil, Ecuador.

balance hídrico que ocurre en algunos meses del año en Bogotá. Hay que considerar esta recomendación, para establecer si hay algún patrón anual a través de la vida útil del pavimento, o si el balance hídrico es casi siempre negativo.

1.1.3. Geología del Occidente de la Sabana de Bogotá

Debido a que Bogotá presenta suelos que pueden ser potencialmente problemáticos desde el punto de vista geotécnico, hay gran cantidad de estudios específicos del suelo de la ciudad tanto geotécnicos, de microzonificación sísmica y geológicos, estando la mayoría del occidente de la ciudad sobre depósitos Fluvio-Lacustres y depósitos aluviales más jóvenes constituidos por arcillas y limos en las cuencas de los Ríos Bogotá y Tunjuelito. Entre mayor cercanía a los cerros orientales de Bogotá la geología se hace más heterogénea, incorporando formaciones como Guaduas, Tilatá, Cacho y Chipaque entre otras.

Los estudios geológicos (Periodos plioceno y cuaternario) más completos que se han hecho a la fecha de la zona de la sabana de Bogotá, fueron los llevados a cabo por los holandeses Thomas Van der Hammen y Henry Hooghiemstra publicados en la revista análisis geográficos Vol. 24 en el año 1995, donde se describe la litología presente, la estratigrafía, y cambios en el clima de los últimos 3 millones de años, con un importante aporte a la formalización de la nomenclatura del Plioceno y Cuaternario en el país. Pero de todo lo consignado en este volumen de estudios el de mayor relevancia para el proyecto es la descripción y mapas del Neogeno- cuaternario en la cuenca alta del río Bogotá (T. Van der Hammen y K. Helmens), el cual abarca todo el altiplano entre los 4° 30' y 5° 15' de latitud N y 73° 45' y 74° 30' de longitud W.

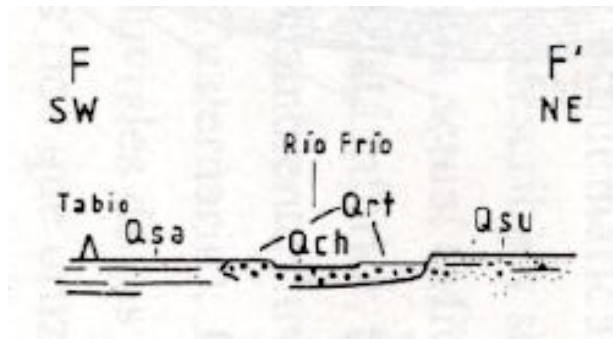


Figura 2. Transecto Geológico F-F', fuente¹⁰

¹⁰ HELMENS, Karin F.; HAMMEN, Thomas van der. Memoria explicativa para los mapas del neogeno-cuaternario de la sabana de Bogotá-cuenca alta del río Bogotá. Bogotá, Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1995. Vol. 24. p. 99.

Dentro del mapa “depósitos relacionados con la cuenca tectónica de Bogotá” se indican 7 transectos geológicos (cortes transversales), en la Figura 2 se observa uno de los cortes donde se identifican los estratos superficiales en la subcuenca del río Frío colindante con la cuenca del Río Chicú, donde superficialmente se identifican los siguientes depósitos:

1. Qsa: Formación Sabana
2. Qch: Formación Chía
3. Qrt: Formación Río Tunjuelito
4. Qsu: Formación Subachoque

En el caso de la cuenca del Río Chicú y según se puede percibir en el mapa elaborado por Helmens y van der Hammen¹¹, predominan dos tipos de formaciones: (1) Formación Sabana: arcillas arenosas y arenas (arcillosas) intercaladas. (2) Formación Guadalupe: presente en las colinas que limitan la cuenca, arcillas compactas y friables con intercalaciones de limolitas y de lutitas. Además de depósitos de pendiente en una pequeña proporción presentándose como límite entre la formación Sabana y Guadalupe (Figura 2).

1.2. ASPECTOS BÁSICOS DE LA HIDROLOGÍA

El ciclo hidrológico es un proceso por el cual, el agua circula en la tierra, con ayuda de las fuerzas gravitatorias y los vientos, actualmente se hablan de 18 variables del ciclo, las cuales involucran todos los cambios de estado del agua, siendo algunas de volúmenes muy pequeños en comparación al volumen de agua oceánica evaporada. El estudio de los procesos hidrológicos comprende la comprensión de las diferentes variables hidrológicas y climatológicas involucradas, así como las herramientas matemáticas y estadísticas a emplear según la situación y el área de estudio. Como dicen Breña y Jacobo¹², para cuantificar cualquier variable hidrológica involucrada en un proceso determinado, se hace uso de los principios de conservación, así como de expresiones empíricas y semi-empíricas que se han obtenido a través de años de investigación.

1.2.1. Conservación de la masa en Hidrología

Expresada en la ecuación

¹¹ HELMENS, Karin F.; HAMMEN. Op. Cit. p 134-144

¹² BREÑA, Agustín F; JACOBO, Marco A. Principios y fundamentos de la hidrología Superficial. Tlalpan, D.F. México. Universidad Autónoma Metropolitana. 2006.

$$I = O + \Delta S \quad (1)$$

Siendo, I las entradas al sistema o volumen de control (inflow), O, las salidas de agua del sistema y ΔS la variación en el almacenamiento. Esta conservación de masa se varía según el subsistema que se estudie, en el subsistema de agua superficial la entrada (precipitación) y funcionamiento es diferente que en el subsistema atmosférico, lo mismo pasa con el subsistema subterráneo, presentan funcionamientos bastante distintos, y la matemática aplicada a estos subsistemas varía, siendo uno de los puntos neurálgicos en la modelación la interacción entre lo superficial y lo subterráneo, siendo necesario el uso métodos numéricos iterativos u otros para llegar a una solución aproximada. Siendo el objeto del presente estudio abarcar la hidrología superficial de la zona, con énfasis en el aspecto climatológico.

El balance hídrico se vale de la ecuación fundamental de la hidrología para cuantificar las entradas y salidas, para finalmente cuantificar con la diferencia de entradas y salidas.

1.2.2. El modelo del sistema hidrológico

Con la finalidad de poder predecir la salida, está el concepto de transformación de sistema, esto para poder analizar un sistema, como está planteado en Hidrología Aplicada de Chow et al. (2014)

El sistema realiza una transformación de la entrada en la salida representado por

$$Q(t) = \Omega I(t) \quad (2)$$

Donde Ω viene siendo la función de transformación, si esta relación es expresada como una relación algebraica, entonces Ω es un operador algebraico, como se muestra

$$Q(t) = CI(t) \quad (3)$$

Donde C es una constante, entonces la función de transformación es el operador

$$\Omega = \frac{Q(t)}{I(t)} = C \quad (4)$$

Si la transformación es descrita por una ecuación diferencial, entonces la unción de transformación sirve como un operador diferencial. Por ejemplo, un reservorio lineal tiene un almacenaje S relacionado con el caudal de salida Q por

$$S = kQ \quad (5)$$

Donde k es una constante dimensional del tiempo. Por continuidad, la tasa de flujo del cambio de almacenamiento dS/dt es igual a la diferencia entre la entrada y la salida.

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (6)$$

Eliminando S entre las dos ecuaciones y reorganizando,

$$k \frac{dQ}{dt} + Q(t) = I(t) \quad (7)$$

Entonces

$$\Omega = \frac{Q(t)}{I(t)} = \frac{1}{1+kD} \quad (8)$$

Donde D es el operador diferencial d/dt .

Esto buscando una operación al sistema real, identificando las entradas y salidas del sistema real, teniendo en cuenta el periodo de tiempo a analizar, y la confiabilidad de los datos disponibles, además de la metodología a utilizar para el cálculo de las variables faltantes del sistema, y la selección del modelo a utilizar.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1. LOCALIZACIÓN

La zona a estudiar está ubicada en el occidente de la sabana de Bogotá departamento de Cundinamarca, al Nor Occidente del Río Bogotá. Comprendiendo los municipios de Tenjo, Tabio y el municipio de Cota más específicamente la glorieta de Siberia donde comienza la carretera que va hasta Tenjo.

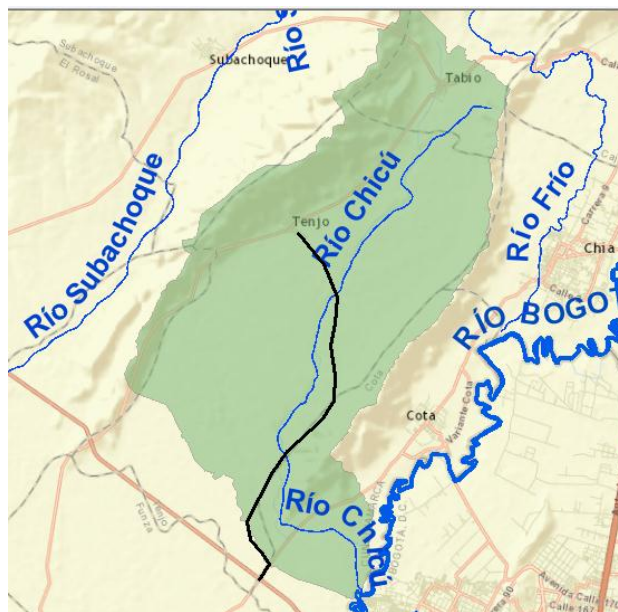


Figura 3. Zona de estudio, Fuente, Autores, 2016

2.2. RÍO CHICÚ

El río Chicú constituye una subcuenca del río Bogotá, cruza por tres municipios del departamento de Cundinamarca, Tenjo donde nace muy cerca de su casco urbano a los 2750 msnm, atraviesa todo el Municipio de Tabio, para desembocar finalmente en el río Bogotá a los 2560 msnm.

La cuenca cuenta con una extensión de 138.04 km² y en su parte más ancha (ortogonal al río) hay 12 kilómetros; el largo 18 kilómetros aproximadamente. Según el Plan de Ordenamiento del río Bogotá realizado por la CAR, los caudales del Chicú fluctúan entre 0.61 y 1.12 m³/s en periodo seco y húmedo respectivamente.¹³

Según un estudio de la CAR del año 95, este río presenta un caudal medio de 1.11 m³/s y un rendimiento de 5.78 l/seg*km², entre sus afluentes principales se encuentran: Quebrada Chucua, Quebrada Galay y la Quebrada Salitre.

2.3. MUNICIPIO DE TENJO¹⁴

2.3.1. Descripción física:

Es un municipio de Cundinamarca (Colombia), ubicado en la Provincia de Sabana Centro, se encuentra a 37 kilómetros de Bogotá. Hace parte del Área Metropolitana de Bogotá, según el censo DANE 2005.

2.3.2. Límites del municipio:

Se encuentra ubicado al noreste de Bogotá a 57 Km pasando por Chía, Cajicá y Tabio, puede llegarse también por la autopista Medellín a 21 Km de la capital, vía Siberia – Tenjo. Con una población de veinte mil (20.000) habitantes y una superficie de 108 Km² de los cuales 106 se hallan en piso térmico frío y los 2 restantes corresponden al páramo. Los actuales límites fueron definidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi en 1941 y aprobados mediante ordenanza 36 de 1945, delimitando con los municipios de Subachoque, Tabio, Chía, Cota, Funza y Madrid. Dentro de su división administrativa cuenta con un casco urbano, una inspección de Policía en la vereda de la Punta y el sector rural conformado por 15 veredas.

2.4. DATOS DEMOGRÁFICOS:

Población total: 19.176 habitantes

Población cabecera Municipal: 3.065 habitantes

¹³ CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Plan de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá [PDF]. 2006. [Citado 12 de mayo 2016].

¹⁴ Alcaldía de Tenjo: Nuestro Municipio [en línea]. Fecha de última actualización: 17 de marzo 2015, [citado 12 de mayo del 2016]. URL: <http://www.tenjo-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml>

Población rural:	16.282 habitantes
Población masculina:	49.92%
Población femenina:	50.08%
Menores de 40 años:	78%
En edad productiva:	49%

2.4.1. Distrito de riego la ramada

El distrito de riego y drenaje La Ramada, cuenta con un área de 18.000 hectáreas distribuidas en los municipios de Tenjo, Cota, Funza, Madrid y Bojacá, abarcado en el área de Tenjo la cuenca media baja del Río Chicú, el distrito de riego “capta sus aguas del río Bogotá a la altura de la desembocadura del río Chicú, por medio de cuatro bombas de tipo tornillo, cada una con capacidad de 1.5 m³/s, para un total de 6 m³/s.”¹⁵

2.5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS CUENCA RÍO CHICÚ

En la tabla 1. Se consignan las características físicas de la cuenca del Río Chicú, delimitada con base en un DEM 12 x 12 metros de resolución y rectificada con base en la divisoria de aguas identificada en la plancha 227-II-B (obtenida del IGAC), curvas de nivel cada 4 metros.

Con un área de 138.04 Kilómetros cuadrados, la subcuenca del río Chicú representa un 2.3% del área de la cuenca del río Bogotá de aproximadamente 6.000 km². La cuenca del río Chicú presenta un ancho medio considerable de 7.8 km considerando su longitud axial. ($B = L/A$), lo que nos lleva a ver el índice de Gravellus de 1.5 siendo 1 de este índice una cuenca casi redondeada y 2 una cuenca muy alargada. Estando el valor de 1.48 en la mitad.

El valor de la densidad de drenaje es alto y puede dar una idea cualitativa de la capacidad de infiltración del suelo, litología y cobertura vegetal, lo cual coincide con nuestra zona geológica donde predominan materiales blandos en el suelo dando lugar a erosión fluvial más fácilmente.

Tabla 1. Características Físicas Cuenca Río Chicú, Fuente: Autores 2016

CUENCA RÍO CHICÚ		
(Los valores fueron medidos empleando el software ArcGIS 10.2.2.)		
A : Área de drenaje	138.04	km ²

¹⁵ _____, CARTa ambiental [Formato PDF]. Bogotá D.C. diciembre de 2010. Edición N° 25. ISSN-0213

Perímetro	62.327	km
L : longitud Axial	18.000	km
B : ancho medio	7.686	km
ℓ : longitud de las corrientes de agua	82.411	km
Índice de Gravellus K_c	1.484	
Factor de Forma K_f	0.427	
Densidad de drenaje D_d	0.596	km/km ²

2.5.1. Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica muestra el relieve la una hoyo o cuenca, se ven los valores extremos de elevación presentes en la hoyo en rojo, siendo 3260 y 2564 msnm, en esta curva se ve que la cuenca alta presenta elevaciones altas, con cambio abruptos de altura (pendientes altas), ya que la variación desde 2600 a 3260 metros tiene apenas un 25% del área acumulada, mientras la parte más lineal de la curva representa el relieve dominante en la cuenca siendo una diferencia de alturas muy pequeña de 36 metros para el 75% del área acumulada como bien se aprecia en la Figura 4 de la curva hipsométrica.

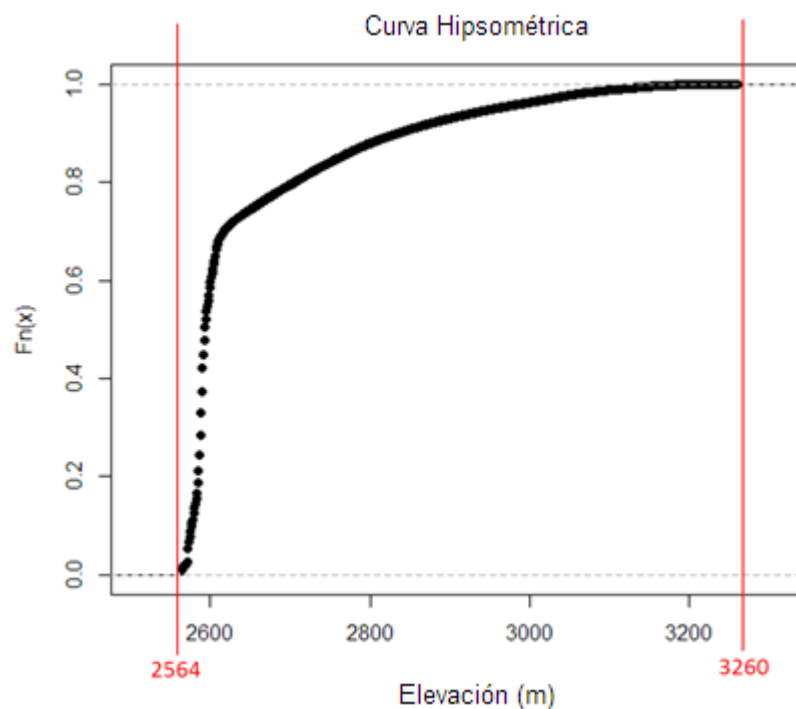


Figura 4. Curva Hipsométrica del área de la Cuenca del río Chicú, Fuente: Autores 2016

La curva fue realizada empleando “rgdal” paquete del lenguaje de programación R, librería de abstracción geoespacial por sus siglas.¹⁶ En base a las elevaciones que brinda el Aster DEM (modelo de elevación digital), de resolución de 12.5 x 12.5 metros de la cuenca. En la Figura 5. Está el DEM de la cuenca visualizado en tres dimensiones con una exageración vertical de x3 y las corrientes de agua presentes.

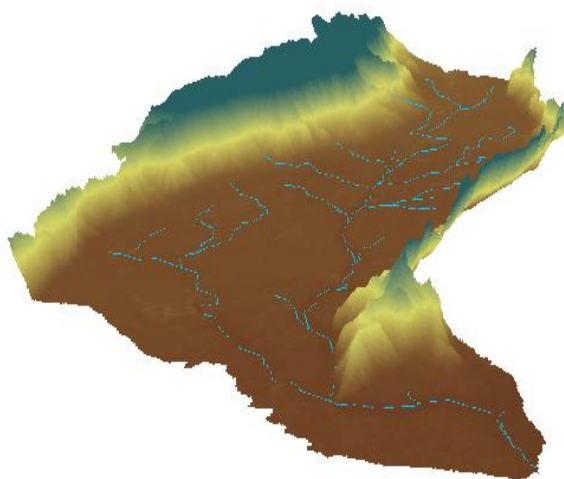


Figura 5. Visualización Aster DEM (digital elevation model), cuenca del Río Chicú, Fuente: Autores 2016

El modelo de elevación digital fue recortado a los límites delimitados, no se identificaron píxeles sin valor asignado.

¹⁶ BIVAND, ROGER. KEITT, TIM. Rgdal: bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. R package version 1.1-10. 2016. URL < <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal> >

3. METODOLOGÍA

Generar el diagnóstico de disponibilidad hídrica de la cuenca del río Chicú a lo largo del año requiere implementar 3 metodologías del Balance Hídrico (climático, suelo y agrícola) para tener diferentes puntos de observación siendo atmosférico, suelo superficial y actividad antrópica; asimismo bajo diferentes escenarios posibles demarcados por la evapotranspiración potencial (ETP) que es calculada por los métodos de Turc, Thornthwaite y García y López. Pero para ello es necesario iniciar con la recopilación de datos de variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura, brillo solar, humedad relativa y evaporación), datos que son consultados de las bases de datos de las entidades competentes como La CAR, el IDEAM, entre otras entidades locales y regionales; aplicando el respectivo tratamiento estadístico en cuanto a la calidad de la información e igualmente lo métodos de completar datos faltantes en el caso de la precipitación, incluyendo la respectiva caracterización de cada una de éstas variables.

Para determinar la disponibilidad hídrica media mensual multianual en la cuenca del río Chicú se lleva a cabo la siguiente metodología:

Recopilar información hidrometeorológica disponible en las estaciones hidrometeorológicas de la zona de estudio de las entidades CAR e IDEAM de las siguientes variables:

- Precipitación
- Temperatura
- Humedad Relativa
- Brillo Solar
- Evaporación

Aplicar tratamiento estadístico a las variables hidrometeorológicas seleccionadas por los siguientes métodos:

- Segmentación por Kmeans
- Datos Faltantes de según S. Monsalve Germán
- Homogeneidad de Datos según S. Monsalve Germán
- Lenguaje de programación R

Realizar el análisis temporal y espacial de cada una de las variables hidrometeorológicas seleccionadas a través de:

- Histogramas
- Isolineas

Calcular la evapotranspiración potencial (ETP) por los siguientes métodos:

- Turc
- Thornthwaite
- García y López

Efectuar los siguientes tipos de balances hídricos:

- Balance Hídrico Climático
- Balance Hídrico de Suelo
- Balance Hídrico Agrícola

3.1. INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se recopila la información espacial disponible de la cuenca para determinar cuáles arrojan la suficiente información para ser usadas para el presente estudios.

Tabla 2. Información espacial recolectada

Nº	Nombre	Año	Escala	Entidad a cargo	Observaciones
1	Mapa de cobertura vegetal	2007	1 : 350.000	Secretaría de planeación de Cundinamarca	Información satelital, teledetección
2	Carta general departamento Cundinamarca	1978	1 : 25000	Instituto Agustín Codazzi	Curvas de nivel cada 4 metros, cartografía detallada pero desactualizada.
3	Mapa geológico unidades litológicas	No indicado	No se indica	Secretaría de planeación de Cundinamarca	Es un mapa muy esquemático y le falta información como el sistema de proyección, la escala, la cuadrícula con coordenadas.
4	Mapa de cuencas Hidrográficas	2007	1 : 325.000	Secretaría de planeación de Cundinamarca	Divide el territorio del departamento entre 10 cuencas
5	Mapa de clasificación del territorio municipio de Tabio	2007	1 : 25.000	Oficina de Sistemas de información, análisis y estadística	Se pueden ver con detalle las quebradas y ríos pequeños.
6	Mapa de Clasificación del territorio municipio de Tenjo		1 : 25000		Se pueden ver con detalle las quebradas y ríos pequeños.
7	Modelo de Elevación Digital	-	-	NASA. Reverb I Echo: repositorio de Información geoespacial	Modelo de elevación Digital de muy buena calidad y resolución.

En cuanto a la información de las estaciones meteorológicas, dentro de la zona de estudio se encuentra que existe cubrimiento de estaciones hidrometeorológicas de las redes de estaciones del IDEAM, la CAR Cundinamarca y el Acueducto de Bogotá. Debido a la escases de estaciones del Acueducto de Bogotá (sólo hay una estación presente en la zona de estudio) se decide el no tomar ésta entidad para el desarrollo del presente trabajo.

Inicialmente se localizan las estaciones tanto de La CAR como del IDEAM existentes en la zona y se determina que éstas son las más apropiadas para extracción de datos.

Una parte del mapa de cobertura vegetal listado en la tabla fue digitalizado y actualizado empleando Google Earth con imágenes de marzo del año 2016, en este hay principalmente cobertura de tipo agropecuario, los límites agropecuarios no se han extendido considerablemente desde el 2007, pero en cuanto los invernaderos y la cobertura urbana sí hay un crecimiento.

Tabla 3. Estaciones hidrometeorológicas obtenidas

Estación	Código	Institución	Categoría	Estación	Código	Institución	Categoría
Pantano Redondo	21201060	IDEAM	PM	La Pradera	2120044	CAR	PG
Tabio GJA	21201630	IDEAM	PM	Las Margaritas	2120071	CAR	PM
Santillana	21206060	IDEAM	ME	Venecia	2120057	CAR	PM
El Hato	21201210	IDEAM	PM	La Unión	2120055	CAR	PM
Guanata	21205890	IDEAM	ME	La Primavera	2120557	CAR	CP
Sabaneta	23065100	IDEAM	PM	Tesoro	2120069	CAR	PM
El corazón	21201070	IDEAM	PM	Bojacá	2120075	CAR	PM
Casablanca	21206020	IDEAM	ME	Santa Inés	2120136	CAR	PM
El Roble	21201550	IDEAM	PM	Tisquesusa	2120631	CAR	AU
Providencia GJA	21205980	IDEAM	CO	Campobello	2120173	CAR	PM
Flores Colombianas	21206210	IDEAM	ME	PM -> Pluviométrica PG -> Pluviográfica ME -> Meteorológica Especial CO -> Climatológica Ordinaria			AM -> Agrometeorológica
La Esperanza	25021340	IDEAM	PM				AU -> Automática
Base Aérea	21205770	IDEAM	CO				
Tibaitata	21205420	IDEAM	AM				

También fueron adquiridos datos de dos estaciones limnigráficas sobre el Río Chicú, una de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y otra de la CAR. Para todas las estaciones hay datos faltantes siendo un 2% de datos sin registrar el mínimo, y hasta el 50% para algunas estaciones.

Las estaciones anteriormente mencionadas se encuentran distribuidas de modo dentro del occidente de la sabana de Bogotá como se muestra en la siguiente imagen, encontrado algunas dentro de la cuenca del Chicú como otras fuera, que servirán para la interpolación. Esto se puede apreciar en el PLANO 1 adjunto, con la tabla de información relacionada, como el código, la altura, la fecha de instalación y si tiene asignado algún cluster o grupo.

3.2. TRATAMIENTO DE SERIES DE TIEMPO

Todas las variables hidrológicas requieren de un desarrollo estadístico ya que es muy difícil realizar una interpretación matemática y física de los fenómenos que rigen la hidrología, siendo variables en el espacio y tiempo. Por esto se utilizan métodos estadísticos y probabilísticos para interpretar los datos, identificar controlar y reducir posibles errores y predecir eventos futuros. Las principales herramientas utilizadas para procesar las series de tiempo fueron los softwares de licencia libre, Euler mathtoolbox¹⁷ y R¹⁸ además de hojas de cálculo de Excel y Libre Office Calc.

Fue definido un periodo de tiempo entre enero 1980 y diciembre 2015 considerando un tiempo prudencial para poder tener una interpretación lo más fiel posible al clima de la zona, y la duración de la subrasante de la vía que fue construida a mediados de los 80. En este periodo se ve una calidad de datos relativamente buena, antes de los 80 hay estaciones que aún no han sido instaladas y la cantidad de datos disminuye conforme son más antiguos. Se van a trabajar con los datos mensuales, para un total de 432 meses en el periodo mencionado.

3.3. SEGMENTACIÓN POR KMEANS

Empleando el algoritmo iterativo propuesto por Lloyd¹⁹ se segmenta el grupo de datos en n particiones asignadas con base en n dimensiones, usando *Euler Math Toolbox* se aplica la función de Kmeans (Figura 6. Matriz de metadatos de estaciones hidrometeorológicas en Euler math toolbox Fuente: Autores 2016 3) asignando 3 particiones en la matriz de 4 x 23 siendo las filas coordenada Este, coordenada Norte, precipitación promedio de los 35 años a analizar y altura de cada una de las 23 estaciones.

¹⁷ RENÈ GROTHMANN. Euler Mathtoolbox: numerical and Algebraic Package for Mathematics.

¹⁸ R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2016. ISBN 3-900051-07-0.

¹⁹ LLOYD, Stuart P. Least Squares Quantization in PCM. En: IEEE transactions on information theory. Marzo 1982. Vol IT-28, No 2.p. 129-137

```

EMT x64 (Cluster) (changed)
File Recent Edit Extras Options User Menu Tasks Help
>A=[1004281.247,991845.806,1000460.656,994639.826,1001962.185,980839.117,984246.957,980309.949,992840.641,978196.766,990935.652,983335.481,985794.348,990611.537,98682'
>show A'
Real 23 x 4 matrix
1004281.247    1053280.649    ...
991845.806    1046560.219    ...
1000460.656    1037638.451    ...
994639.826    1034993.99    ...
1001962.185    1032665.652    ...
980839.117    1029997.269    ...
984246.957    1028536.766    ...
980309.949    1026822.262    ...
992840.641    1025742.76    ...
978196.766    1030669.312    ...
990935.652    1030178.564    ...
983335.481    1022809.903    ...
985794.348    1021852.887    ...
990611.537    1016777.391    ...
986827.988    1024344.49    ...
972765.768    1035976.864    ...
960677.827    1030579.353    ...
969790.095    1016133.074    ...
972520.6    1023837.756    ...
979651.151    1013549.468    ...
...
>A'; k=3; load clustering
Functions for clustering data.
>j=meanscluster(p,k);
>plot3d(A[1],A[2],A[3],color=2+j,points=4,style="..",>user)
>format(4,0); j', longformat:
Real 23 x 1 matrix

```

Figura 6. Matriz de metadatos de estaciones hidrometeorológicas en Euler math toolbox Fuente: Autores 2016

Como salida el programa de una matriz de una columna con 24 filas, asignando grupos 1, 2, 3 según el algoritmo. Esto finalmente se organiza en la Tabla 4. A la columna de la precipitación promedio se le dio un mayor peso al agregarle un multiplicador, de lo contrario el algoritmo va a segmentar solo según la distancia ya que las magnitudes son mucho mayores en las distancias. Realizada la segmentación los análisis y relaciones posteriores se harán tomando estos 4 grupos o clusters de estaciones. Las 24 estaciones seleccionadas son las que presentan una mejor calidad de datos en el periodo de tiempo seleccionado.

El grupo uno se le fueron asignadas ocho estaciones, el grupo dos, cinco estaciones y el grupo tres once estaciones para un total de 24 (ver Tabla 4).

Grupo	Estación	Código	Grupo	Estación	Código
● 1	La Pradera	2120044	● 3	Bojacá	2120075
● 1	Las Margaritas	2120071	● 3	Santa Inés	2120136
● 1	Pantano Redondo	21201060	● 3	Tisquesusa	2120631
● 1	Tabio GJA	21201630	● 3	Campobello	2120173
● 1	Santillana	21206060	● 3	Casablanca	21206020
● 1	El Hato	21201210	● 3	El Roble	21201550
● 1	Guanata	21205890	● 3	Providencia GJA	21205980
● 1	Sabaneta	23065100	● 3	Flores Colombianas	21206210
● 2	Venecia	2120057	● 3	La Esperanza	25021340
● 2	La Unión	2120055	● 3	Base Aérea	21205770
● 2	La Primavera	2120557	● 3	Tibaitata	21205420
● 2	Tesoro	2120069			
● 2	El corazón	21201070			

Tabla 4 Estaciones meteorológicas segmentadas. *Nota: las precipitaciones promedio están indicadas únicamente con los datos observados, Fuente: Autores 2016

3.3.1. Algoritmo Kmeans

Es uno de los algoritmos más usados y sencillos para agrupar datos según la semejanza en n número de dimensiones, asumiendo un centroide por cada cluster ubicando estos lo más alejados posible uno del otro, luego de esto se asocian los puntos más cercanos a estos centroides, al asociar los puntos a cada cluster se recalculan los centroides cambiando de ubicación y así comienza una nueva iteración hasta que los centroides no se muevan lo que quiere decir que la función objetivo ya fue reducida a su mínima expresión.

3.4. DATOS FALTANTES

Antes de lidiar con datos faltantes de series de tiempo, hay que fijar los objetivos o lo que se va a sacar al emplear las series de tiempo con datos continuos y si hay verdadera necesidad de hacerlo, ya que los grados de complejidad pueden variar mucho, desde métodos sencillos de Promedio con estaciones aledañas como está indicado en las ecuaciones 9 y 10, o relación normal entre estaciones, agregándole un peso al tener en cuenta la precipitación anual.

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} P_i \quad (9)$$

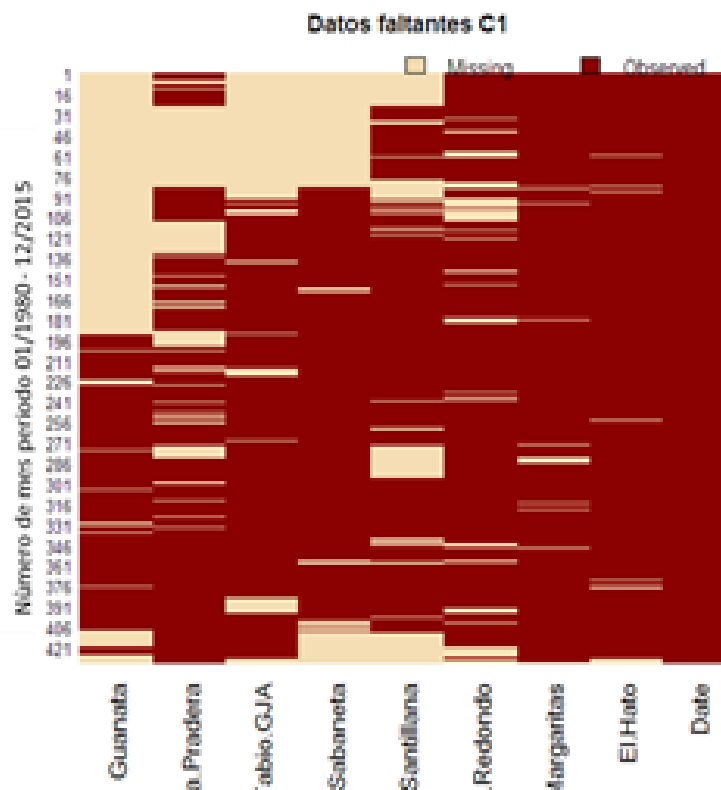
$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{N_x}{N_i} P_i \quad (10)$$

Hasta la elaboración de modelos predictivos y algoritmos empleando métodos numéricos. Los métodos de interpolación y regresión lineal simple para poder llenar datos faltantes en series de tiempo pueden dar lugar a series continuas, pero también suelen ser coincidentes y no diferenciables en los diferentes puntos de la serie de tiempo original. También es altamente improbable obtener estimaciones confiables ya que los valores generados de esta manera están ligados estrictamente a los valores existentes y por ello, tienden a subestimar los “valores verdaderos” en promedio. Como lo expresan Musai, Verstraete y Gobron.²⁰

²⁰ MUSAI, J.P. VERSTRAETE, M.M. GOBRON, N. Comparing the Effectiveness of recent algorithms to fill and smooth incomplete and noisy time series. En: Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. Vol. 11. 10 mayo 2011. Pags.: 14259-14308

Se empleó el algoritmo de Expectacia – maximización para llenar los datos faltantes de las series de tiempo, pero no se logró una convergencia satisfactoria quedando algunos valores fuera de los rangos esperados, por esto se optó por usar MICE empleándolo el paquete de R project de el mismo nombre²¹

En la Figura 7. se muestra el esquema de datos faltantes para cada uno de los clusters en orden descendente de datos faltante de derecha a izquierda para cada uno de los 432 meses comprendidos entre enero de 1980 a diciembre de 2015. Hay estaciones que tienen 156 registros faltantes de 432 otras tiene solo 12 de 432. Para cada cluster hay por lo menos dos estaciones de referencia con alto grado de confiabilidad de datos observados.



²¹ BUUREN, VAN, STEF. GROOTHUIS, KARIN. Mice: multivariate Imputation by Chained Equations in R. En: Journal of Statistical Software. Volumen 45, número 3. Pags. 1-67. URL:< <http://www.jstatsoft.org/v45/i03/> >

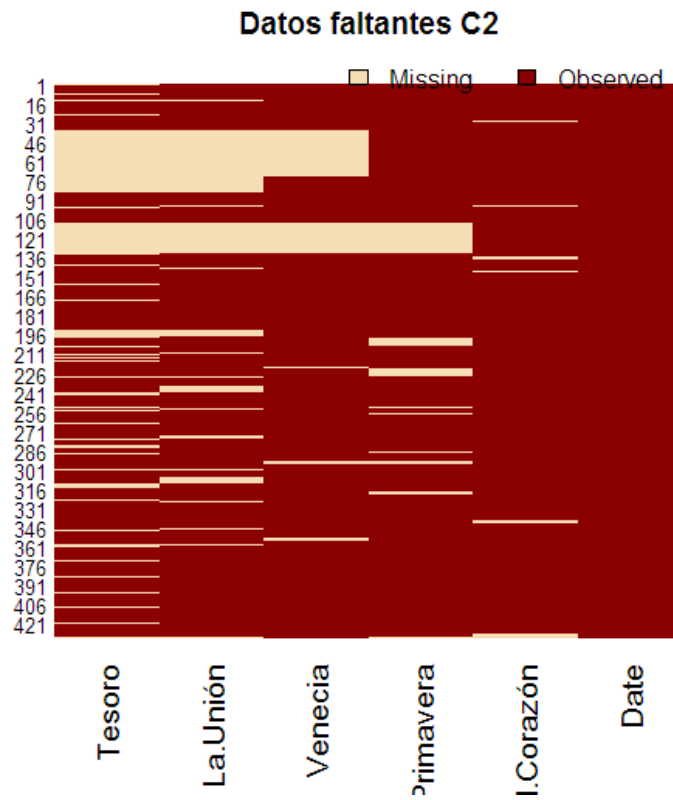
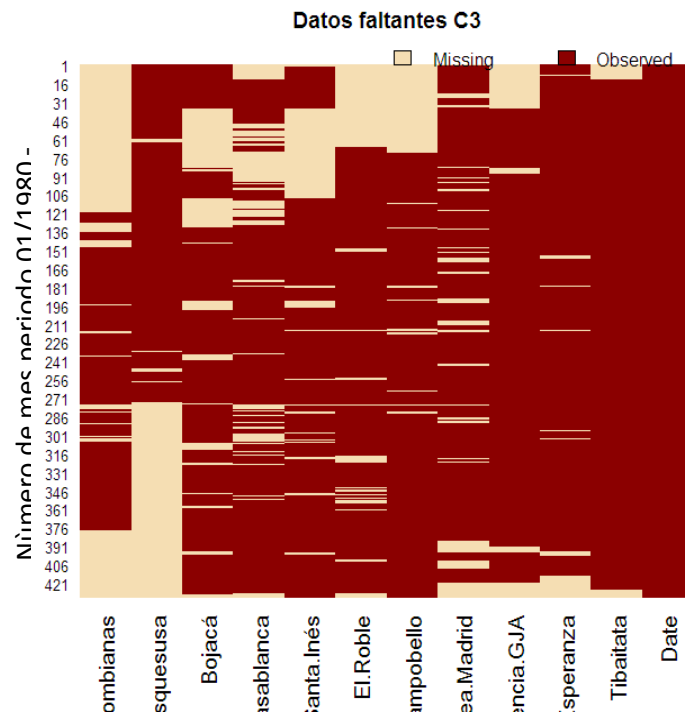


Figura 7. Esquema de datos mensuales faltantes, en rojo oscuro: datos observados, en pardo claro: datos faltantes, Fuente: Autores 2016

En las anteriores imagines se observan los datos faltantes y existentes en cada una de las estaciones analizadas, siendo las secciones blancas datos faltantes de las estaciones y los valores rojos datos existentes

Los esquemas mostrados en la Figura 7. Pertenecen a las series de tiempo de precipitación, donde se hizo la división en grupos y hay un mayor volumen de datos, pero también una gran variabilidad espacio temporal. Para las series de temperatura media y evaporación se tienen 7 estaciones que registran estos datos.

Además de lo anterior también se llevó a cabo el análisis de homogeneidad de las estaciones y asimismo completando los datos faltantes por la metodología de Monsalve, aunque al poseer herramientas más fiables estos análisis se mueven a anexos (ver Anexo C)

3.5. MICE: MULTIVARIATE IMPUTATION BY CHAINED EQUATIONS

Considerando que la componente espacial del balance hídrico es importante ya que hay que tratar del puntualizar los datos al área aferente de la carretera Siberia – Tenjo. Se decidió emplear el método de asignación múltiple por ecuaciones anidadas, empleado para tratar problemas complejos de datos faltantes, o MICE²² por sus siglas en inglés, útil cuando las distribuciones multivariadas no se ajustan a los datos. Lo importante del algoritmo en el caso en que se aplicó es que este preserva las relaciones entre los grupos de datos, así como la incertidumbre.

Al emplear el algoritmo en R fue necesario subir los datos de las estaciones separados en tres clusters que se segmentaron previamente y por requerimientos del paquete mice, todos los datos a analizar deben tener una ventana de tiempo común, en este caso se fijaron todos los meses comprendidos entre 1980 y 2015, y se obtuvieron como datos de salida todas las series de tiempo ya procesadas por el algoritmo, luego de esto se hace una revisión de los datos que ha llenado el algoritmo. Todos los datos impuestos no se van a conservar, se seguirá la recomendación de la World Meteorological Organization²³, que indica que no más de un 10% del total de observaciones deberá ser estimado, esto siendo de importancia cuando se busca correr un modelo.

La metodología de imputar datos faltantes por ecuaciones múltiples anidadas (MICE), es empleada para cualquier tipo de datos faltantes sea en Ingeniería,

²² SCHAFER J.L. Analysis of Incomplete Multivariate Data. Ed. Chapman & Hall. Londres 1997

²³ WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Technical Regulations: Volume III Hydrology. WMO-No. 49. Genova. 2008

medicina o estudios económicos, como sucede con las redes neuronales artificiales, pero hay antecedentes de la aplicación de MICE en series de tiempo climáticas e hidrológicas, por ejemplo E. Barca y G. Passarella²⁴ realizaron un estudio comparativo de 4 métodos de imputación de datos faltantes, incluyendo MICE, terminan por concluir que a pesar de tener un comportamiento equivalente MICE es uno de métodos más confiables disponibles en la literatura y en el estudio fue usado como un “benchmark” para evaluar el comportamiento de los otros métodos propuestos (ver Anexo D).

3.6. REGIONALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN USANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La finalidad de buscar el método más óptimo para imputar los datos de las diferentes series de tiempo de precipitación, es subir los datos mensuales y ubicar estos en el espacio de la cuenca con la finalidad de interpolar, y así generar una superficie que indique la variación de una variable en el espacio de la zona de estudio en un mes determinado.

Se regionalizaron las variables de precipitación, evapotranspiración de referencia y temperatura, se puede tener ya claro la variación espacio temporal de la variable que se esté analizando facilitando la detección de patrones o tendencias, y por ende el análisis y visualización de la información.

Las superficies generadas van a ser del tipo raster (matriz de píxeles), de un tamaño de pixel asignado de 100 metros x 100 metros, estas superficies raster, cada pixel tiene un valor de precipitación asignado por la interpolación y estos píxeles pueden ser operados, es decir sumados, multiplicados, divididos y demás operaciones matemáticas, sea por una constante, una función u otra superficie raster.

3.6.1. Buffer en la zona de interés

Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos van a servir para otros estudios en la subrasante de la vía Siberia Tenjo, se analizaron los resultados de las

²⁴ BARCA, Emanuele y PASSARELLA Giuseppe. Similarity índices of meteo-climatic gauging stations for missing data handling: definition and comparison with the MICE method. Conferencia: Procedimietnos del GRASPA2015. Bari, Italia. Junio 2015. En: https://www.researchgate.net/publication/278390150_Similarity_indices_of_meteo-climatic_gauging_stations_for_missing_data_handling_definition_and_comparison_with_the_MICE_method.

superficies dentro de un área definida de 500 metros a lado y lado de la carretera, definiendo así el buffer como se ven en la imagen, con un área de $14,9 \text{ km}^2$ es decir 149 pixeles de 100×100 a analizar y sacar estadísticas de estos.

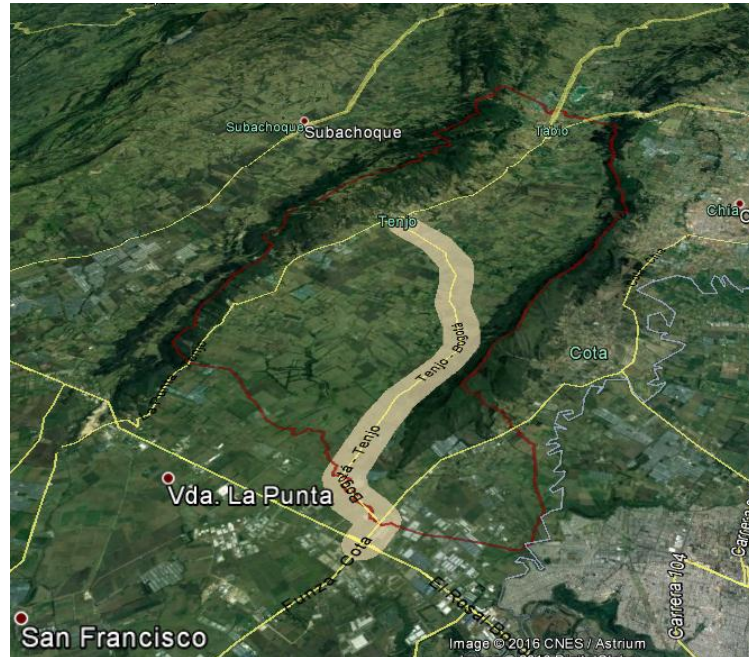


Figura 8. Capa del buffer y la cuenca sobrepuestos sobre Google Earth.

3.6.2. Macros Visual Basic

Los datos de salida del algoritmo MICE mencionado anteriormente quedan en columnas continuas numeradas del 1 al 432, para subir los datos en ArcGIS deberán estar ordenadas las estaciones por filas con su fecha y valor de precipitación o evaporación respectiva más las coordenadas (ver Figura 9).

1	X	Y	Nombre	Fecha	P_(mm)
2	976959	1015765	Base_Aérea_Madrid	07/2002	27.7
3	969790.1	1016133	Bojacá	07/2002	51.5
4	975212.8	1019450	Campobello	07/2002	41.6
5	994639.8	1034994	Casablanca	07/2002	24.2
6	983335.5	1022810	El_Roble	07/2002	12.8
7	990611.5	1016777	Flores_Colombianas	07/2002	23.1
8	986828	1024344	La_Esperanza	07/2002	13.7
9	985794.3	1021853	Providencia_GJA	07/2002	51.4
10	992840.6	1025743	Santa_Inés	07/2002	31.0
11	984237.5	1013854	Tibaitata	07/2002	17.4
12	967394.3	1022823	Tisquesusa	07/2002	12.5
13	978196.8	1030669	El_Corazón	07/2002	25.7
14	984247	1028537	La_Primavera	07/2002	22.5
15	980839.1	1029997	La_Unión	07/2002	5.0
16	972520.6	1023838	Tesoro	07/2002	92.7
17	960677.8	1030579	Venecia	07/2002	23.0
18	990935.7	1030179	El_Hato	07/2002	28.3
19	1001962	1032666	Guanata	07/2002	73.8
20	991845.8	1046560	La_Pradera	07/2002	57.6
21	980309.9	1026822	Las_Margaritas	07/2002	36.6
22	1004281	1053281	Pantano_Redondo	07/2002	112.5
23	972765.8	1035977	Sabaneta	07/2002	34.2
24	979651.2	1013549	Santillana	07/2002	11.6
25	1000461	1037638	Tabio_GJA	07/2002	67.0

Figura 9. Tabla, precipitaciones mensuales, Julio del 2002, Fuente: Autores 2016

Con macros se genera 1 tabla por mes, y con los valores organizados de esta forma, se procede a trabajar en el model builder de ArcGIS.

3.6.3. Model Builder ArcGIS

El model builder es una herramienta de interfaz gráfica que permite programar como un flujograma, asignando variables, parámetros, condicionales e iteradores como, permitiendo generar secuencias automáticas que de otra manera tomarían horas hacerlo paso a paso. Se usaron cuatro secuencias en el model builder. Ya que se hizo el proceso con todos los meses siendo 432 capas de puntos que se generarían al correr la secuencia “importar” que está en la Figura 10.

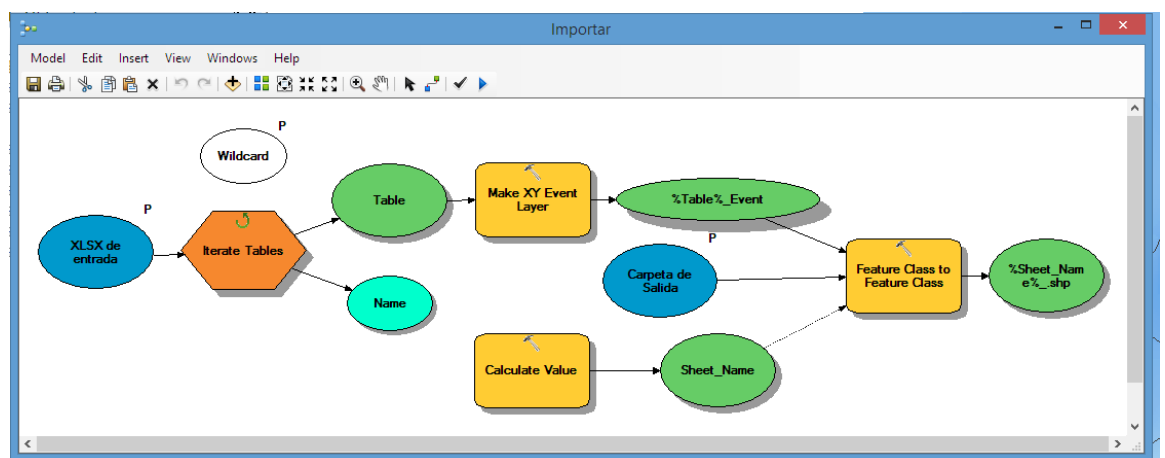


Figura 10. Model builder Importar, Fuente: Autores 2016

A partir de los puntos es que se interpola para las superficies, en este caso de elegido el método Spline ya que se evaluaron los resultados de los otros métodos (kriging, natural neighbor e IDW) los cuales tienden a centrarse en la interpolación y no en su contorno. Los valores medidos más cercanos al lugar sin datos son los que tienen mayor influencia.

3.7. EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los datos recolectados de evaporación se consideran de buena calidad además de haber 8 estaciones con evaporímetro que presentan mediciones, lo cual se considera suficiente para hacer la superficie.

La evapotranspiración (ET), dicen Sánchez y Carvacho²⁵ que esta: *depende de numerosos factores meteorológicos, entre ellos la radiación solar como la fuente de energía fundamental para el desarrollo del proceso, la temperatura del aire como consecuencia de la anterior, la humedad relativa como medida de la capacidad evaporativa del ambiente y de la velocidad del viento que remueve constantemente el agua desde la superficie evaporante y transporta, en ocasiones, calor para mantener activo el proceso; pero, además, depende de las características de la vegetación del área, su tipo, densidad y estado de crecimiento, como también del suelo, sus propiedades y su contenido de humedad.*

La evapotranspiración potencial (ETP), es otro concepto similar a la ET, introducido por Thornthwaite, en el modelo que lleva su mismo apellido, a finales de la primera mitad del siglo pasado, definida esta como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación y son limitaciones en su desarrollo, es decir con buena disponibilidad de agua. Un concepto equivalente a la ETP que se comenzó a emplear décadas más tarde de ser introducido el concepto de ETP en 1948, es el de Evapotranspiración de referencia (ET_0), al hablar de las pérdidas de agua en un sistema como una cuenca, ambos términos son equivalentes (ETP y ET_0), indicando ambas cantidades máximas de agua perdida, como lo indican

²⁵ MARTINEZ M., MARCELA y CARVACHO B., LUIS. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Revista de Geografía Norte Grande. Vol. 50. p. 171-186. 2011.

Mackenney y Rosenberg en su estudio de sensibilidad de métodos de cálculo de evapotranspiración.²⁶

En el presente trabajo se va a calcular la Evapotranspiración de referencia, tomando los datos directamente medidos del evaporímetro o tanque de evaporación, los cuales intrínsecamente responden a la influencia de la temperatura, vientos, radiación solar y vegetación, siendo de más certeza que emplear una ecuación empírica para su cálculo. Estos tanques de evaporación o evaporímetros son instrumentos de medición de la evaporación (EV), obteniendo la medida al observar el nivel de la lámina de agua en un tanque metálico de medidas estándar y aisladas del suelo. Esta tasa de evaporación al ser sobre una lámina de agua va a ser mucho más acelerada por lo que se emplea un factor de minoración K_p teniendo en cuenta condiciones ambientales como la humedad relativa. Para este factor se distinguen dos casos en cuanto a la ubicación del tanque, para la clase A, el tanque se localiza en una zona de pasto corto verde y está rodeado por un suelo en barbecho, el caso B se localiza sobre un suelo en barbecho y rodeado por un cultivo verde.

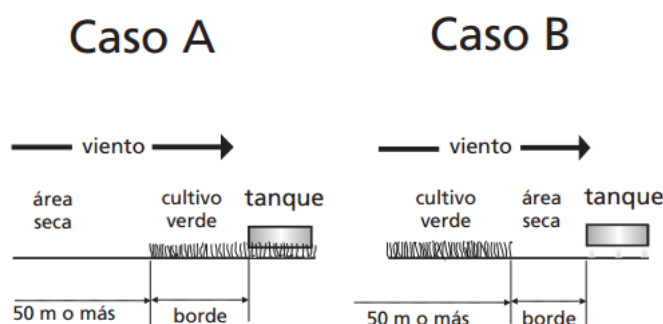


Figura 11 Dos casos de localización del tanque de evaporación y sus alrededores. Fuente: ver referencia 21, figura 19, p. 64

Para ambos casos se considera la humedad relativa y el viento en la tabla abajo y así obtener el K_p . Esta metodología expuesta fue tomada de la publicación de la Food and Agriculture Organization (FAO) de las naciones unidas.²⁷ Los valores de velocidad de tiempo disponibles de la estación Planadas (código 2120691), la velocidad del viento promedio registrada entre los años 2007 y 2014 es de 4.5 m/s

²⁶ MCKENNEY, M. S. & ROSENBERG, N. J. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, vol. 64, p. 81-110.

²⁷ ALLEN, Richard, et al. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación. Roma. 2006. ISBN 92-5-304219-2

principalmente en dirección Sur Este la mayor parte del año. La humedad relativa es de un valor promedio de 80.5% promediada de las mediciones de 5 estaciones que tenían datos de esta variable climática: Sabaneta, Tachi, Bilbao Máximo Ponti, Santillana y Providencia GJA.

Para todos los casos se tomó el caso A siendo este el caso más probable considerando la zona, y que habrá en todos los casos una distancia de cultivo a barlovento de 1 metro. Por lo que de los valores de la Tabla 5. Se toma un Kp de 0.65, es decir que $0.65 \cdot EV = ET_0$ teniendo así los valores de evapotranspiración mucho más aproximados a la realidad.

Tabla 5. Coeficientes Kc para evaporímetro de tanque

Tanque Clase A	HR media	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada			Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo		
		baja < 40	media 40-70	alta > 70	baja < 40	media 40-70	alta > 70
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Distancia del cultivo a barlovento (m)	Distancia del barbecho a barlovento (m)					
Baja < 2	1	,55	,65	,75	1	,7	,85
	10	,65	,75	,85	10	,6	,7
	100	,7	,8	,85	100	,55	,65
	1 000	,75	,85	,85	1 000	,5	,6
Moderada 2-5	1	,5	,6	,65	1	,65	,75
	10	,6	,7	,75	10	,55	,65
	100	,65	,75	,8	100	,5	,6
	1 000	,7	,8	,8	1 000	,45	,55
Alta 5-8	1	,45	,5	,6	1	,6	,65
	10	,55	,6	,65	10	,5	,55
	100	,6	,65	,7	100	,45	,5
	1 000	,65	,7	,75	1 000	,4	,45
Muy alta > 8	1	,4	,45	,5	1	,5	,6
	10	,45	,55	,6	10	,45	,5
	100	,5	,6	,65	100	,4	,45
	1 000	,55	,6	,65	1 000	,35	,4

3.7.1. Evapotranspiración Potencial (ETP) método de Turc

El método de Turc (1961) consiste en calcular la ETP (mm/mes) para cada mes en función de la radiación solar media diaria de ese mes ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{d}^{-1}$) sobre una superficie horizontal, la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y una corrección basada en la humedad relativa mensual (%) que es aplicada cuando esta es menor a 50%, lo que no aplica para éste caso. Por ello la ecuación usada es la siguiente:

$$ETP_i = k * \left(\frac{T_i}{T_i + 15} \right) * (Rg + 50) \quad (11)$$

$$Rg = Ra * \left(a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right) \quad (12)$$

Dónde:

a = Coeficiente de regresión para zonas frías y templadas

b = Coeficiente de regresión para zonas frías y templadas

n = Brillo solar - horas de sol diaria

N = Duración de la insolación posible desde el punto de vista astronómico

Ra = Radiación solar recibida en el límite superior de la atmósfera (radiación extraterrestre)

Rg = Radiación global en cal/cm².día

K = Factor en función de los meses

T = Temperatura media mensual (°C)

3.7.2. Evapotranspiración Potencial (ETP) método de Thornthwaite

Los cálculos de Thornthwaite (1948) están basados en la determinación de la ETP en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes.

$$ETP_{THO} = e * L \quad (13)$$

$$e = 16 * \left(10 * \left(\frac{tm}{I} \right) \right)^a \quad (14)$$

$$L = \left(\frac{Nd}{30} \right) * \left(\frac{N}{12} \right) \quad (15)$$

Dónde:

e = Evapotranspiración mensual sin ajustar (mm/mes)

tm = Temperatura media mensual (°C)

I = Índice de calor

a = Parámetro que se calcula en función de I

L = Factor de corrección del número de días del mes (Nd) y la duración astronómica del día (N) –horas de sol-

3.7.3. Evapotranspiración Potencial (ETP) método de García y López

Este método está adaptado al trópico al permitir estimar la ETP diaria entre las latitudes 15°N y 15 °S. Desarrollada partiendo de la correlación de los datos de temperatura y déficit de saturación con los de la evapotranspiración potencial medidos en seis estaciones tropicales.

$$ETP = 1.21 * 10^{F_t} (1 - 0.01HR_D) + 0.21t - 2.3 \quad (16)$$

$$F_t = \frac{7.45t}{234.7+t} \quad (17)$$

Dónde:

HR_D = Humedad relativa media diurna, que para éste caso se tomó la humedad relativa media

t = Temperatura media mensual (°C)

F_t = Factor de temperatura

El resultado obtenido se multiplica por el número de días correspondiente de cada mes.

3.8. BALANCES HÍDRICOS

3.8.1. Balance Hídrico Climático (B.H.C.)

El balance hídrico climático (B.H.C.) es el modelo estándar de balance hídrico en el cual se busca determinar el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo de manera natural en un intervalo de tiempo, obedeciendo a la siguiente ecuación.

$$P = ETR + ES \quad (18)$$

$$ETR = P - ES \quad (19)$$

$$ES = R * \#días * \frac{86400}{1000000} \quad (20)$$

$$R = \frac{Q * 1000}{A} \quad (21)$$

Dónde:

P = Precipitación (mm)

ETR = Evapotranspiración real (mm)

ES = Escorrentía superficial (mm)

R = Rendimiento (l/seg*Km²)

Q = Caudal (m³/seg)

A = Área (Km²)

$$\text{Índice de Aridez } (I_a) = \frac{ETP - ETR}{ETP} \quad (22)$$

Y al clasificar el Índice de Aridez como se muestra en la Figura 12 generar un estado más preciso del estado de la cuenca o zona de estudio respecto a la disponibilidad de su recurso hídrico.



Figura 12. Índice de Aridez, Fuente: IDEAM

3.8.2. Balance Hídrico de Suelo (B.H.S.)

En este caso se usa el método propuesto por Thornthwaite y Matter en el cual se estudia la manera en la que se va perdiendo el agua para poder generar la ETP hasta agotar la reserva del suelo correspondiente a la capa vegetal. Éste tipo de balance se realiza ya que con él se puede evaluar la disponibilidad de agua para cultivos, estudios hidrológicos, de conservación de suelos, de drenaje, de recuperación de suelos salinos, de repoblación forestal, o el establecimiento del régimen de humedad de los suelos o de criterios de diferenciación climática²⁸.

El balance hídrico de suelo consiste en definir mes a mes los siguientes parámetros:

- **P** = Precipitación media mensual (mm)
- **ETP** = Evapotranspiración potencial (mm)
- **ETR** = Evapotranspiración real (mm)
- **RA** = Reserva Acumulada/Variación de la reserva (%)
- Déficit (mm)
- Excedentes (mm)

De forma que:

$$\text{ETR: SI (ETP} < \text{P} + \text{RA; ETR} = \text{ETP; ETR} = \text{P} + \text{RA)} \quad (23)$$

$$\text{Déficit: ETP} - \text{ETR} \quad (24)$$

$$\text{Reserva: SI (RA} + (\text{P} - \text{ETR}) > \text{Res max; Res} = \text{Res max; Res} = \text{RA} + (\text{P} - \text{ETR}) \quad (25)$$

$$\text{Excedentes: SI (RA} + (\text{P} - \text{ETR}) > \text{Res max; EXC} = \text{RA} + (\text{P} - \text{ETR}) - \text{Res max; EXC} = 0 \quad (26)$$

Esto se aplica con los tres valores de evapotranspiración potencial (ETP) calculados por tres métodos diferentes que serán expuestos posteriormente. El valor de la reserva máxima tomada es 70% correspondiente a la humedad del suelo máxima encontrada en el suelo de la cuenca del río Chicú²⁹.

²⁸ VALDIVIESO OÑATE Fernando, Hidrología, Balance Hídrico, pag. 55 [citado el 16 de agosto de 2016]

²⁹ DURAN A. María Margarita y CIABATO J. Diego Alejandro, Evaluación de los Impactos Ambientales asociados a la contaminación en Agua, Suelo y Sedimento por Cromo y Zinc, en los municipios de Tabio y Tenjo – Cundinamarca (Sub-Cuenca del río Chicú), pag. 94, [citado el 16 de agosto de 2016]

3.8.3. Balance Hídrico Agrícola (B.H.A.)

El balance hídrico agrícola es una aplicación del balance hídrico climático en el cual se toma en cuenta un Factor de Cultivo (K_c)³⁰ exclusivo para cada cultivo (toma en cuenta las 4 etapas del cultivo: inicial, desarrollo, medio y maduración) que se usa para determinar la ETR, además de agregar otros factores como lo son el periodo vegetativo, precipitación efectiva, eficiencia de riego y dotación bruta; éste último es el que indica la disponibilidad extra del recurso hídrico para que el cultivo en cuestión pueda desarrollarse satisfactoriamente, se realiza siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$\text{Dotación bruta de riego} = ETR - P_{efectiva} \quad (27)$$

$$P_{efectiva} = P_{total} * 0,6 \quad (28)$$

$$ETR = ETP * K_c \quad (29)$$

Dónde:

P_{total} = Precipitación (mm)

ETR = Evapotranspiración real (mm)

ETP = Evapo. potencial (mm)

K_c = Coeficiente de cultivo

Este método de balance hídrico se aplica únicamente a la cuenca del río Chicú y no a la Zona General para enfocarse en los cultivos predominantes que existen en la cuenca en cuestión (papa, frijol y tomate)³¹⁻³²; igualmente usando las 3 ETPs.

³⁰ FAO, Evaporación del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, pag. 111, [citado el 12 de agosto de 2016]

³¹ Alcaldía de Tabio – Cundinamarca, Información General, recurso en línea disponible en: http://www.tabio-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml [consultado el 12 de agosto de 2016]

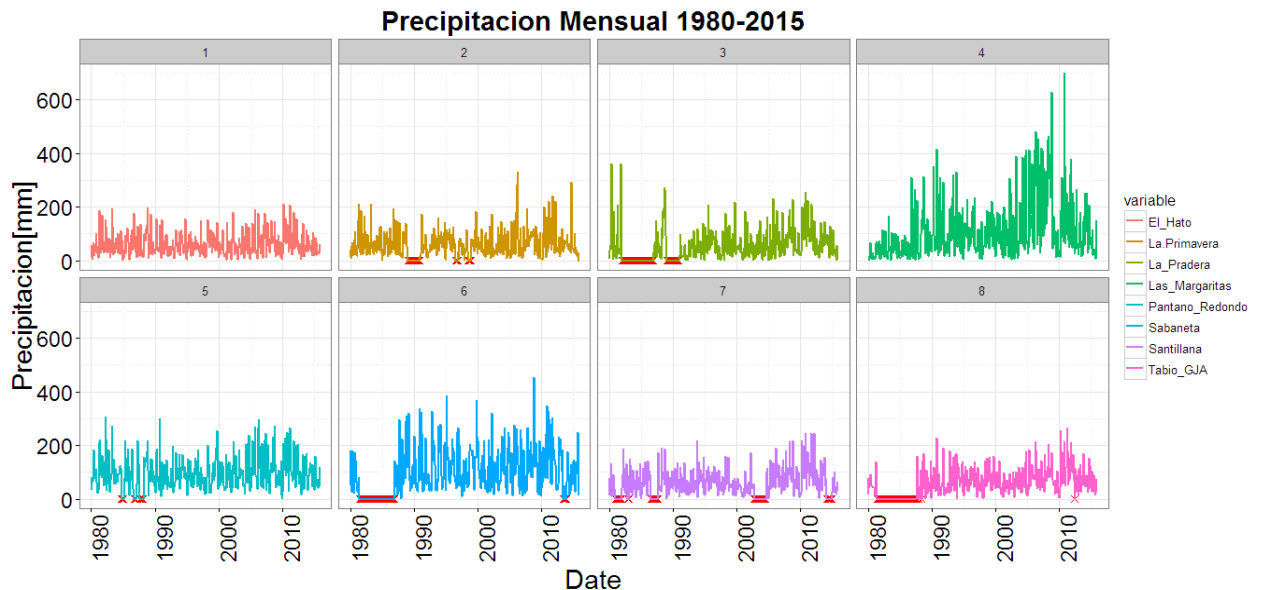
³² Mi tierra es Tenjo, Datos ambientales, recurso en línea disponible en: <http://mitierraestenjo.page.tl/Datos-ambientales.htm> [consultado el 12 de agosto de 2016]

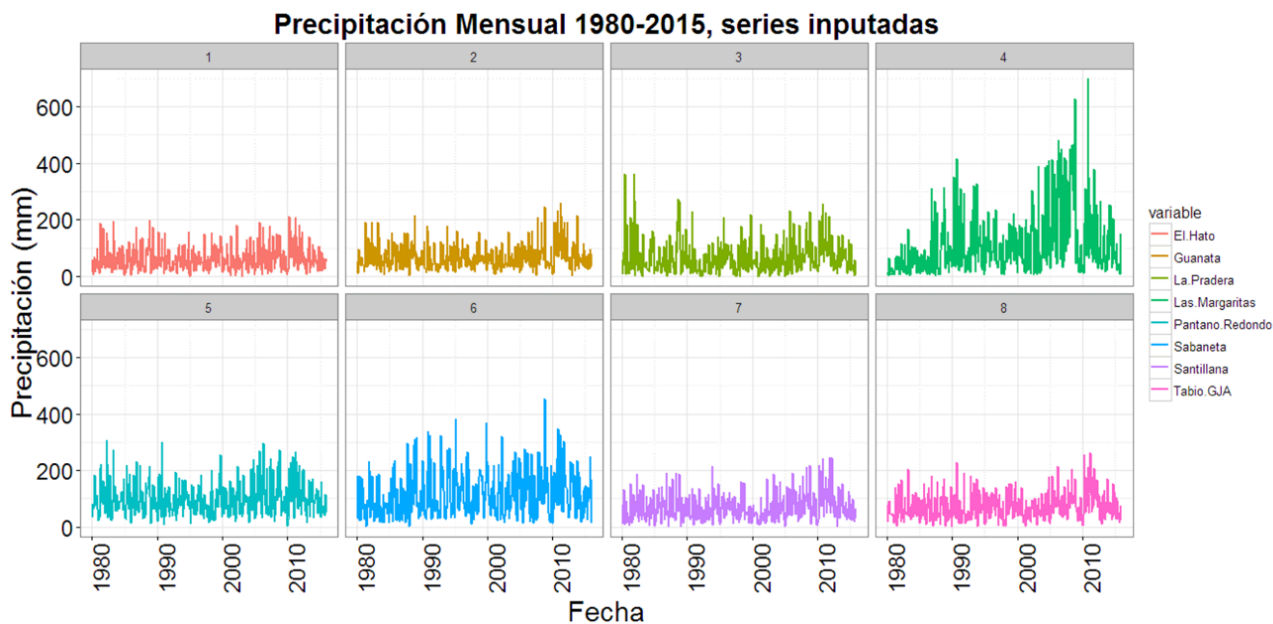
4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de los análisis de las series de tiempo de las variables de precipitación, evaporación, radiación solar y humedad relativa. Para el desarrollo del proyecto se plantearon por un lado los balances de la cuenca y la zona empleando el promedio de los datos observados de todos los meses, para realizar un diagnóstico general, así como plantear balances agrícolas de los cultivos que priman en la zona. Y por otro lado un análisis mes a mes tomando una única entrada precipitación y una única salida evapotranspiración, realizando esto para la zona para ver la variación espacial, para identificar zonas críticas y aplicadas a un buffer para cuantificar esta diferencia de las entradas y las salidas.

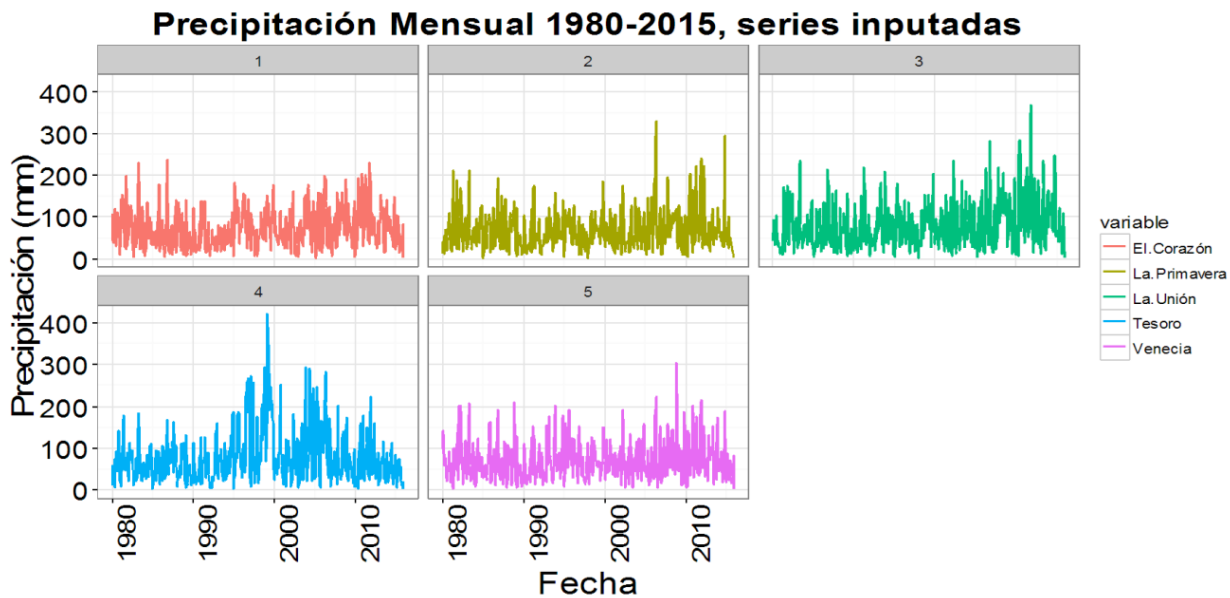
4.1. PRECIPITACIÓN

Se analizaron 24 estaciones 3 de ellas dentro de la cuenca del Río Chicú, la mayoría de ellas distribuidas en dirección sur occidental, es decir en el sector de la parte baja de la cuenca, con una distancia de 49 kilómetros entre la estación de Pantano Redondo y Bojacá, las estaciones ubicadas en los extremos.

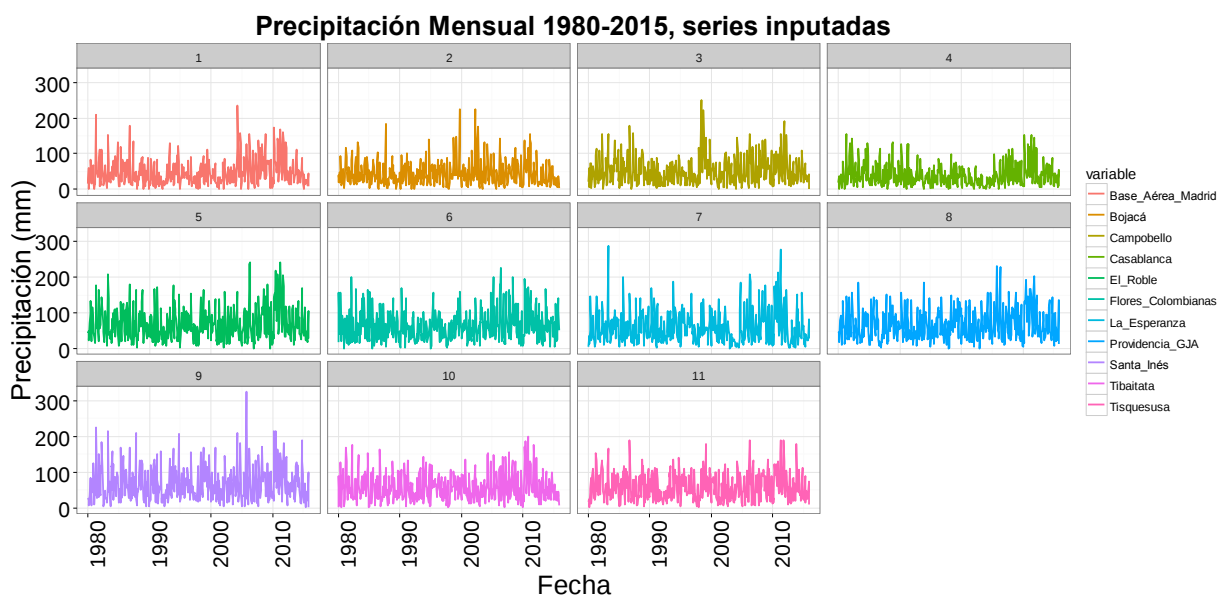
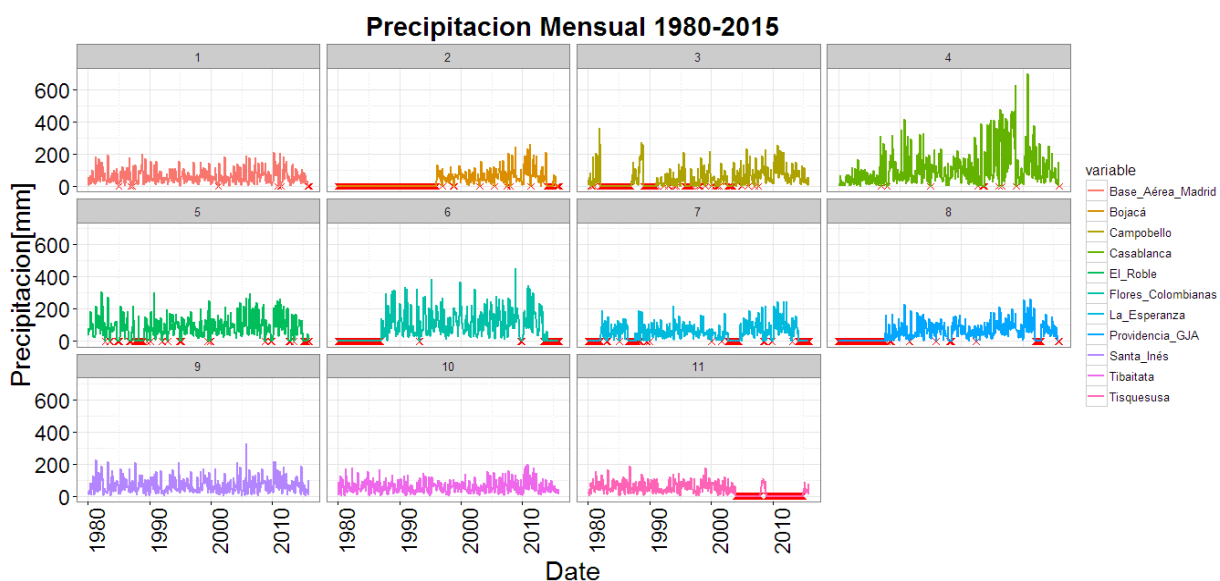




Grafica 1. Precipitación mensual (1980 - 2015), grupo 1, arriba series de datos observados, abajo series de datos imputados, Fuente: Autores 2016



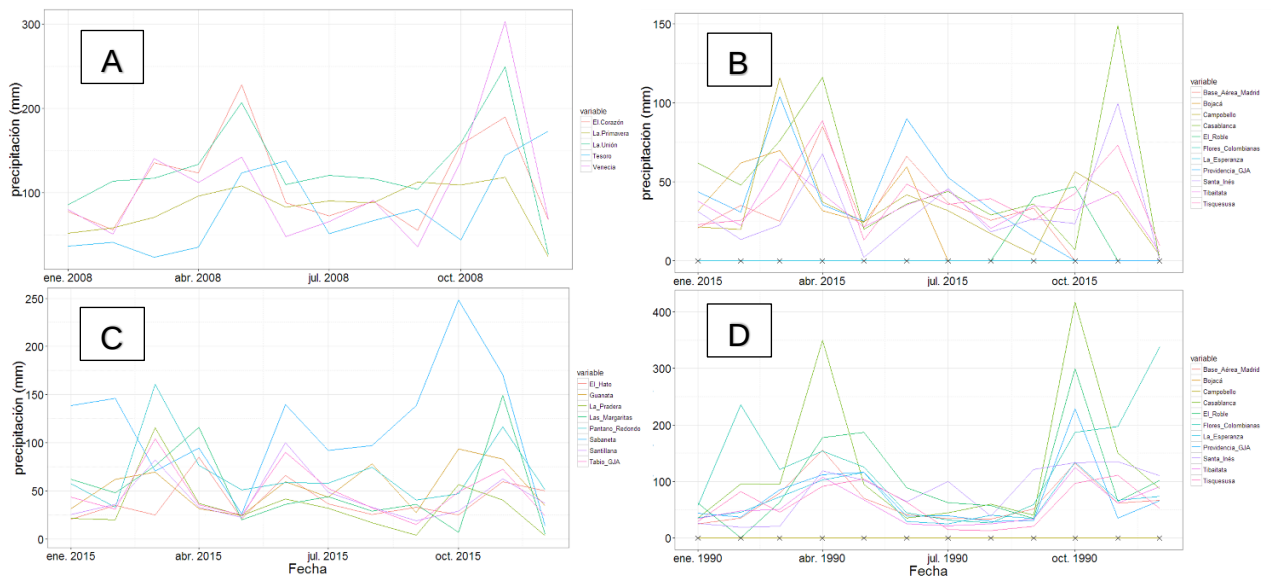
Grafica 2. Precipitación mensual (1980 - 2015), grupo 2, Fuente: Autores 2016



Grafica 3. Precipitación mensual (1980 - 2015), grupo 3, Fuente: Autores 2016

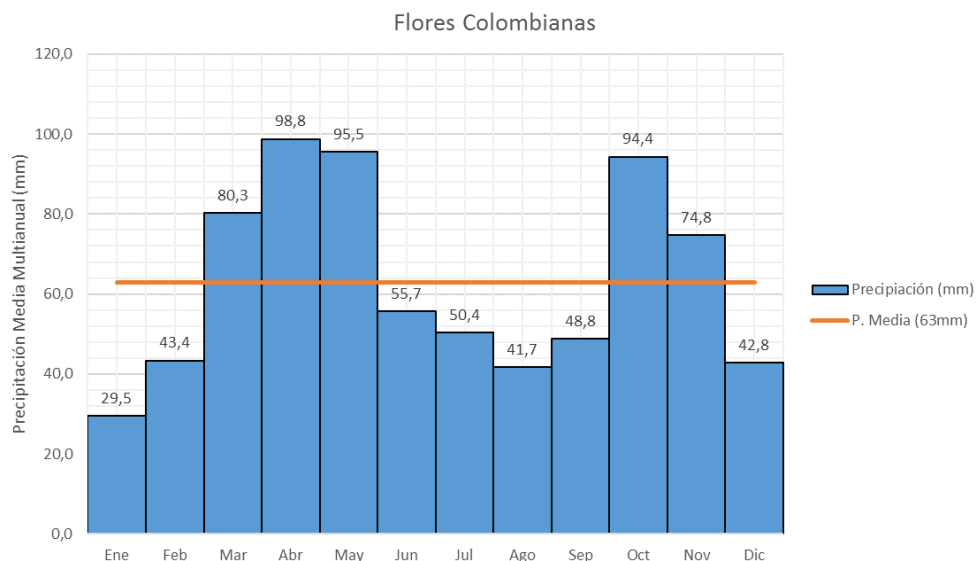
Al observar las series de tiempo en todo el periodo de estudio, se ve que estas tienen una tendencia estacionaria, algunas con una dispersión muy grande como Tesoro (Grafica 2, *serie No 4*) y Casablanca (Grafica 3. *Serie No. 4*), otras tienen una estacionalidad muy bien definida sin valores extremos o que se alejen demasiado de la media como las estaciones Tibaita (Grafica 3. *Serie 9*) y El hato (Grafica 1 *serie 1*). Los datos faltantes se identifican en las gráficas con una letra x roja.

Luego al analizar intervalos más cortos de tiempo se observa un comportamiento bimodal a lo largo de los diferentes años, esto se repite en gran mayoría de los años independientemente sean precipitaciones observadas o impuestas. El periodo comprendido entre junio y agosto se presenta una disminución de las precipitaciones, aunque a veces no llega a ser muy marcada esta tendencia (Ver Grafica 4 [C]), el periodo de diciembre y enero extendiéndose en algunos casos hasta febrero si se ve una clara disminución de las precipitaciones, los meses de marzo, abril, mayo y septiembre a noviembre, son los meses que marcan el comportamiento bimodal mencionado anteriormente. (Gráfica 4.)



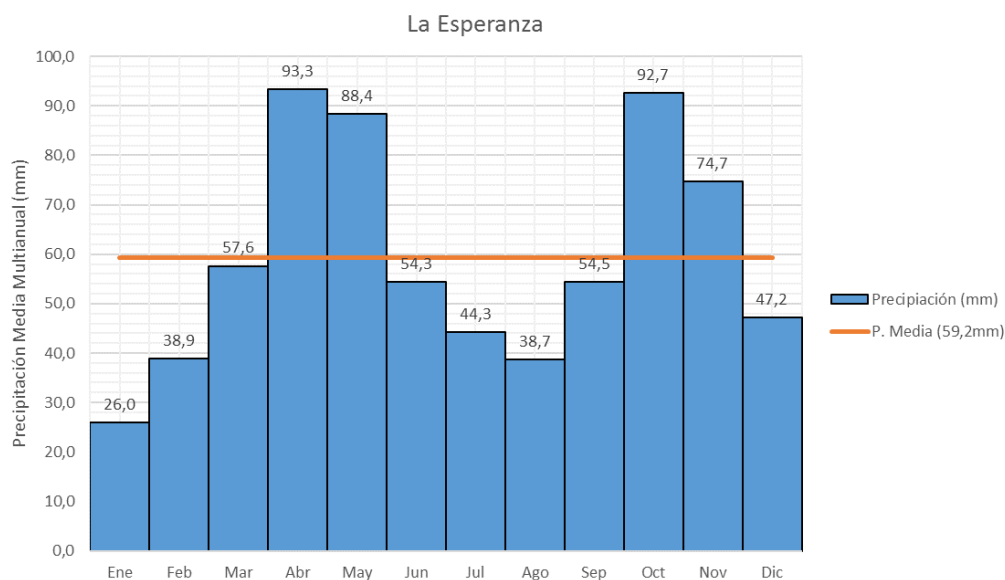
Grafica 4. Precipitaciones anuales, comportamiento bimodal, [A] pertenece al cluster 1, [B] y [D] al grupo 3, y [C] al grupo 2, Fuente: Autores 2016

4.1.1. Precipitación media, máxima y mínima mensual multianual



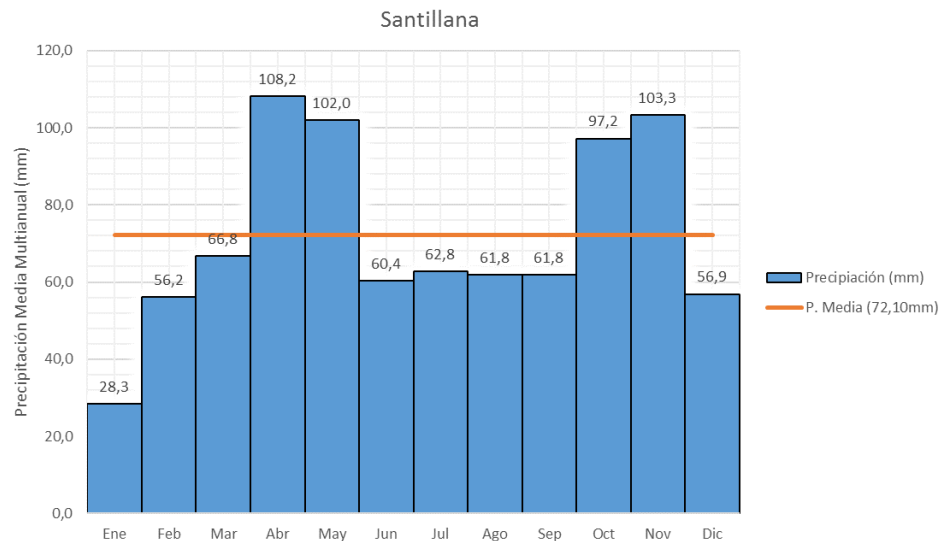
Grafica 5. Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: Flores Colombianas, Fuente: Autores 2016.

En la estación Flores Colombianas se presenta una tendencia bimodal distribuyendo las temporadas lluviosas en los meses de marzo, abril, mayo y octubre, noviembre como se observa en la Grafica 5, además se tiene la precipitación máxima de 98,8mm/mes en el mes de abril y la precipitación mínima de 29,5mm/mes en el mes de enero; el valor medio de la precipitación es de 63mm/mes.



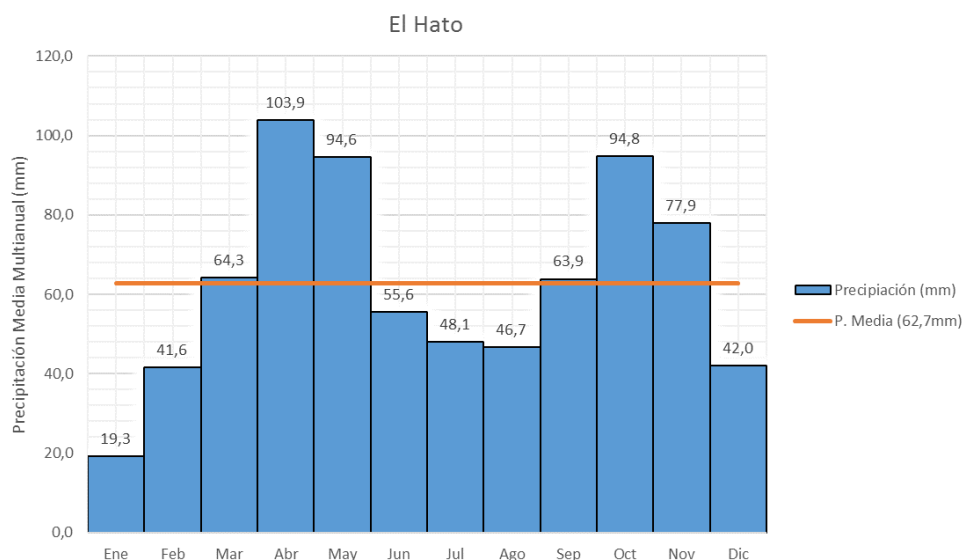
Grafica 6, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: La Esperanza, Fuente: Autores 2016.

En la estación La Esperanza se presenta una tendencia bimodal distribuyendo las temporadas lluviosas en los meses de marzo, abril, mayo y octubre, noviembre como se observa en la Grafica 6, además se tiene la precipitación máxima de 93,3mm/mes en el mes de abril y la precipitación mínima de 26mm/mes en el mes de enero; el valor medio de la precipitación es de 59,2mm/mes.



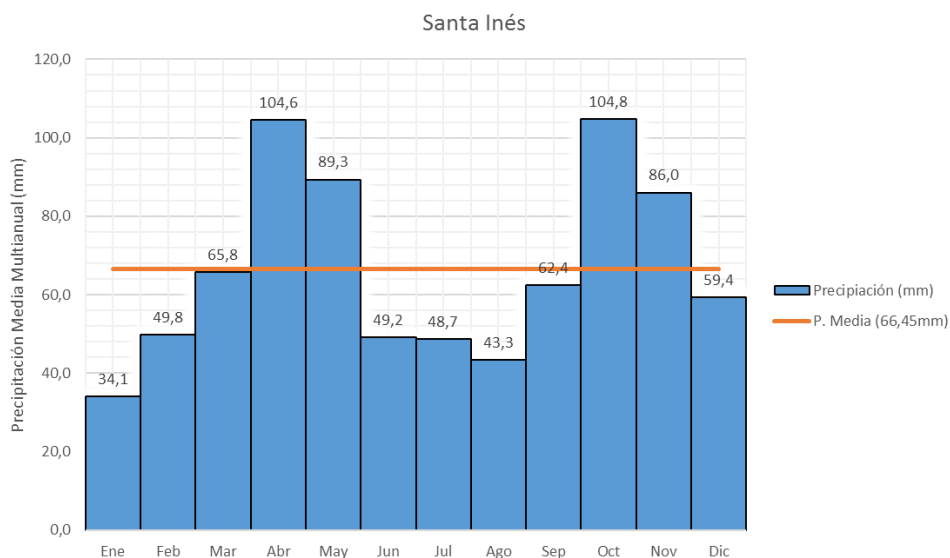
Grafica 7, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: Santillana, Fuente: Autores 2016.

En la estación Santillana se presenta una tendencia bimodal distribuyendo las temporadas lluviosas en los meses de abril, mayo y octubre, noviembre como se observa en la Grafica 7, además se tiene la precipitación máxima de 108,2mm/mes en el mes de abril y la precipitación mínima de 28,3mm/mes en el mes de enero; el valor medio de la precipitación es de 72,1mm/mes.



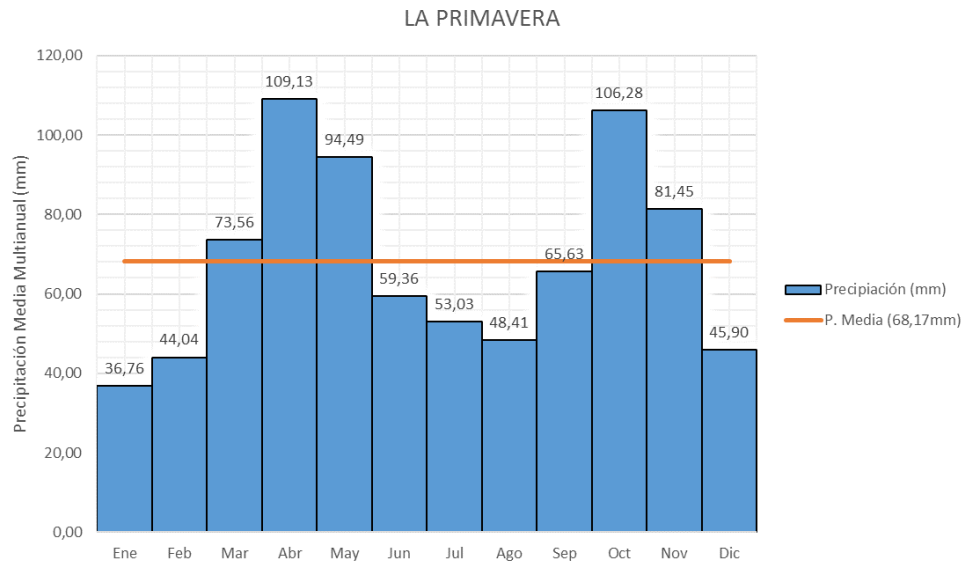
Grafica 8, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: El Hato, Fuente: Autores 2016

En la estación El Hato se presenta una tendencia bimodal distribuyendo las temporadas lluviosas en los meses de marzo, abril, mayo y septiembre, octubre, noviembre como se observa en la Grafica 8, además se tiene la precipitación máxima de 103,9/mes en el mes de abril y la precipitación mínima de 19,3mm/mes en el mes de enero; el valor medio de la precipitación es de 62,2mm/mes.



Grafica 9, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: Santa Inés, Fuente: Autores 2016

En la estación Santa Inés se presenta una tendencia bimodal distribuyendo las temporadas lluviosas en los meses de marzo, abril, mayo y octubre, noviembre como se observa en la Grafica 9, además se tiene la precipitación máxima de 104,8mm/mes en el mes de octubre y la precipitación mínima de 34,1mm/mes en el mes de enero; el valor medio de la precipitación es de 66,45mm/mes.



Grafica 10, Precipitaciones medias mensuales multianuales, estación: La Primavera, Fuente: Autores 2016

En la estación La Primavera se presenta una tendencia bimodal distribuyendo las temporadas lluviosas en los meses de marzo, abril, mayo y octubre, noviembre como se observa en la Grafica 10, además se tiene la precipitación máxima de 109,13mm/mes en el mes de abril y la precipitación mínima de 36,76mm/mes en el mes de enero; el valor medio de la precipitación es de 68,17mm/mes.

Todas las estaciones analizadas presentan comportamiento bimodal en el mismo rango de tiempo para cada una de las temporadas secas y lluviosas, encontrando los periodos más lluviosos en los meses de abril y octubre, y el periodo más seco en el mes de enero. Se realiza el llenado de datos por las metodologías de datos faltantes y por lenguaje de programación R, conservando los de éste último por presentar una mayor fiabilidad. Por el contrario, para las demás variables al no haber metodologías para su llenado se trabaja con la información disponible directamente de las estaciones a excepción de la evaporación donde sí se efectúa (ver Anexo D).

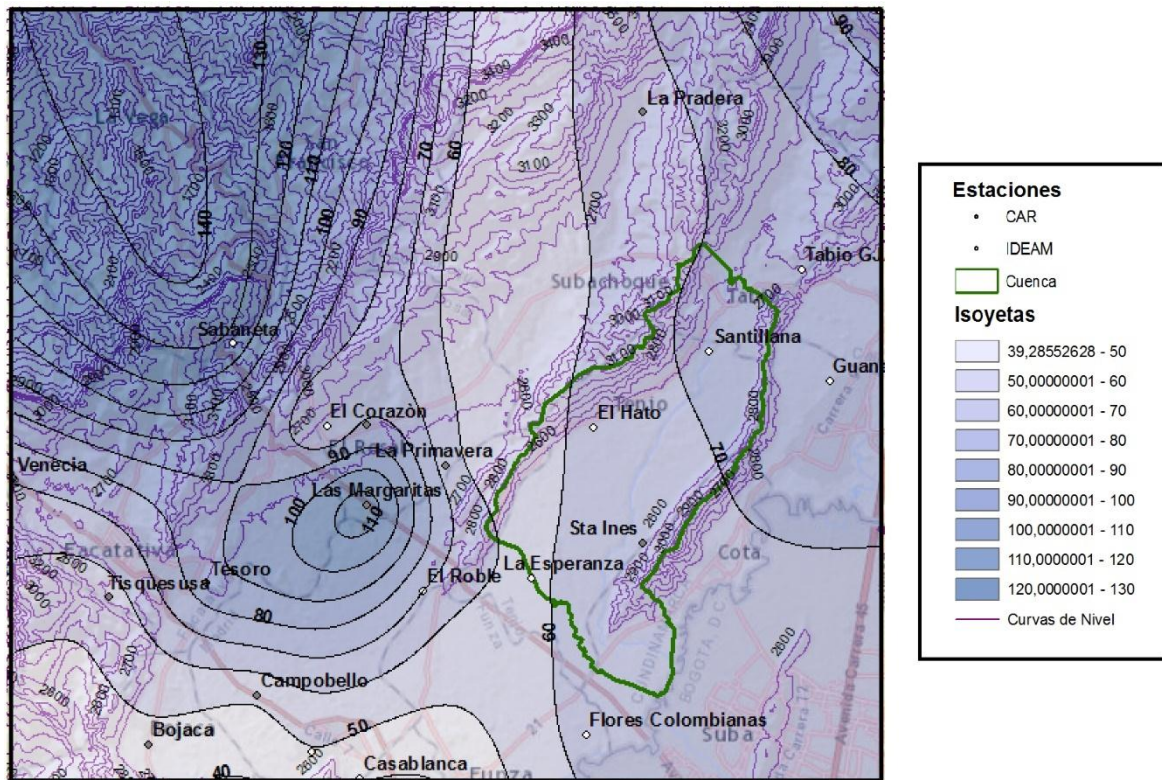
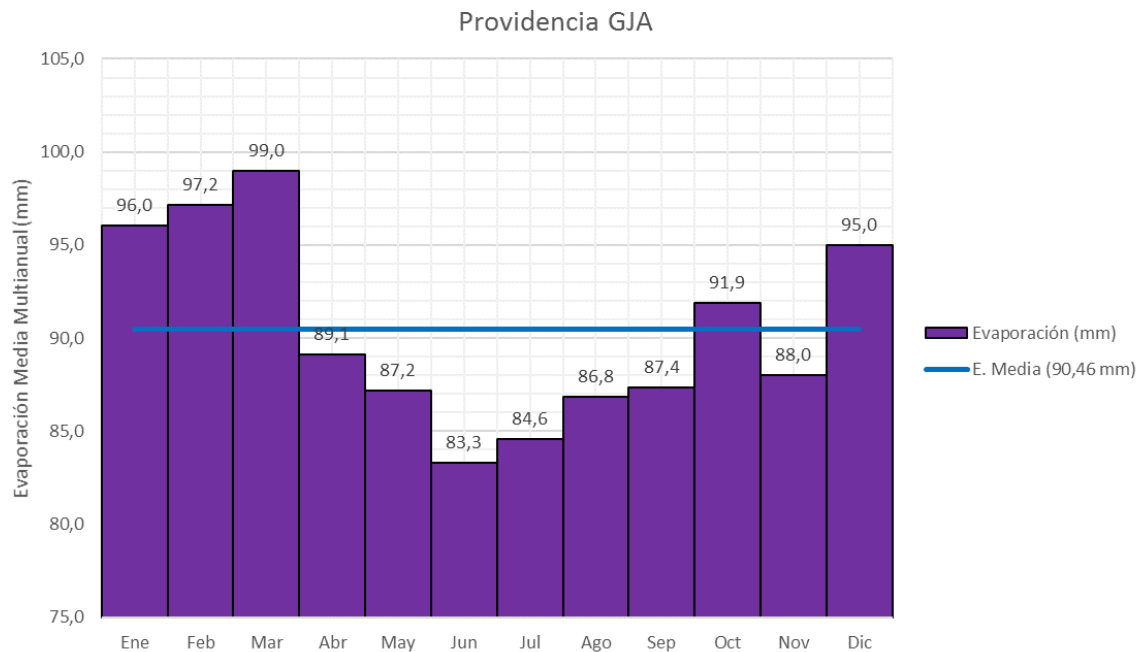


Figura 13, Isoyetas medias multianuales, Fuente: Autores 2016

En la Figura 13 se observa la distribución de la precipitación en la cuenca en estudio y sus alrededores, observando que en la zona montañosa ubicada en la parte superior izquierda existen las precipitaciones más altas, lo que puede ser producido por su orografía principalmente al funcionar como laderas de barlovento y produciendo eventos de precipitación orográficos; con respecto a la cuenca en estudio se observan que las condiciones están más estables con respecto a la orografía, funcionando como zona de sotavento de la zona montañosa, adicionalmente la cuenca al encontrarse entre 2 terrenos montañosos posee las condiciones adecuadas para mantener presentes eventos de precipitación.

4.2. EVAPORACIÓN

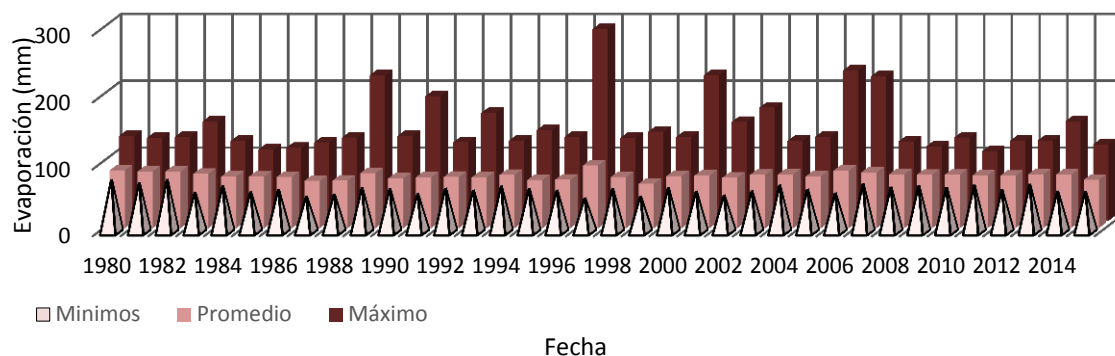


Grafica 11, Evaporación media mensual multianual, estación: Providencia, Fuente: Autores 2016

La evaporación tiene una tendencia escalatoria partiendo en el mes de junio con su valor más bajo correspondiente a 83,3mm/mes, hasta alcanzar su pico más alto en el mes de marzo con un valor de 99mm/mes, siendo su valor medio en lo corrido del año de 90,46mm/mes, presentando casi una tendencia monomodal en la que la evaporación aumenta en la temporada seca inicial del año y disminuyendo en la temporada lluviosa siguiente, esto para la primera mitad del año, y para la segunda mitad del año la evaporación en general continua ascendiendo, lo cual puede ser producido por la segunda temporada seca del año y en la temporada lluvia debido a que hay mucho mucha más agua disponible para evaporar sumado a otros factores como, viento, brillo solar, etc.

Se realiza el llenado de datos por la metodología de lenguaje de programación R para poder generar los cluster sobre las zonas de interés (ver Anexo D).

Evaporación (1980 - 2015)



Grafica 12. Evaporación, promedio, máxima y mínima series inputadas, Fuente: Autores 2016

La evaporación promedio anual no tiene variaciones excesivas, y es relativamente constante durante todo el año y a través del periodo de tiempo en que es estudiada esta variable.

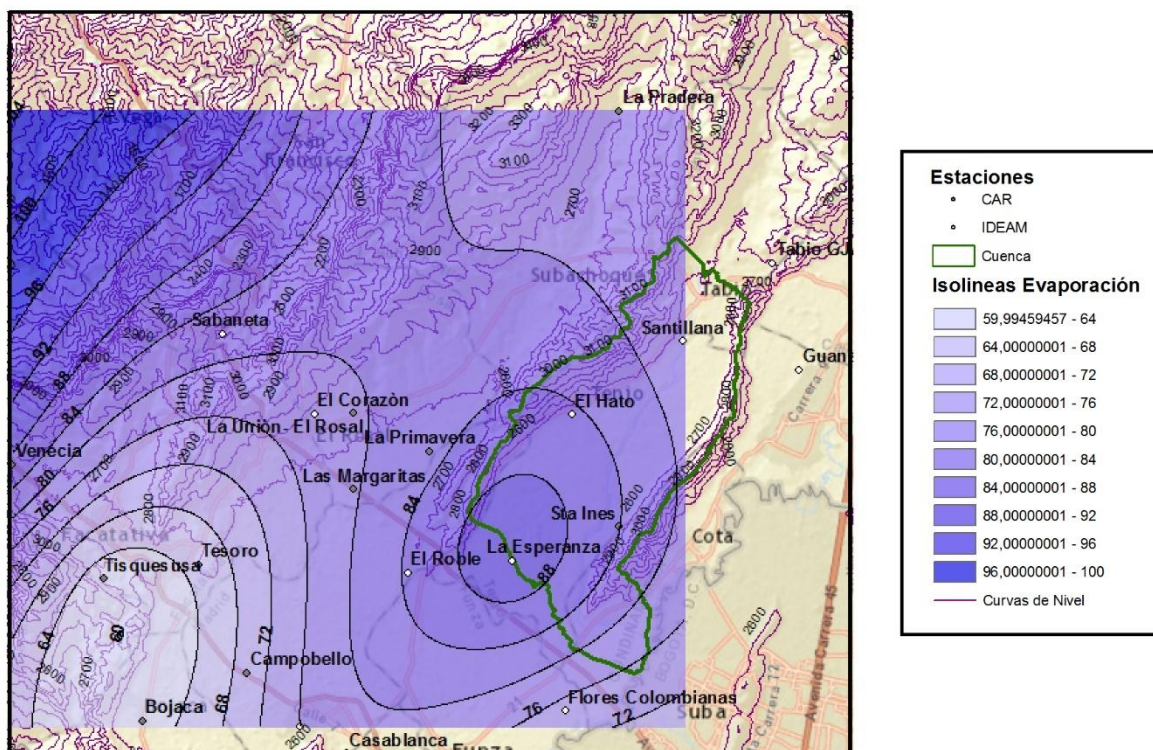
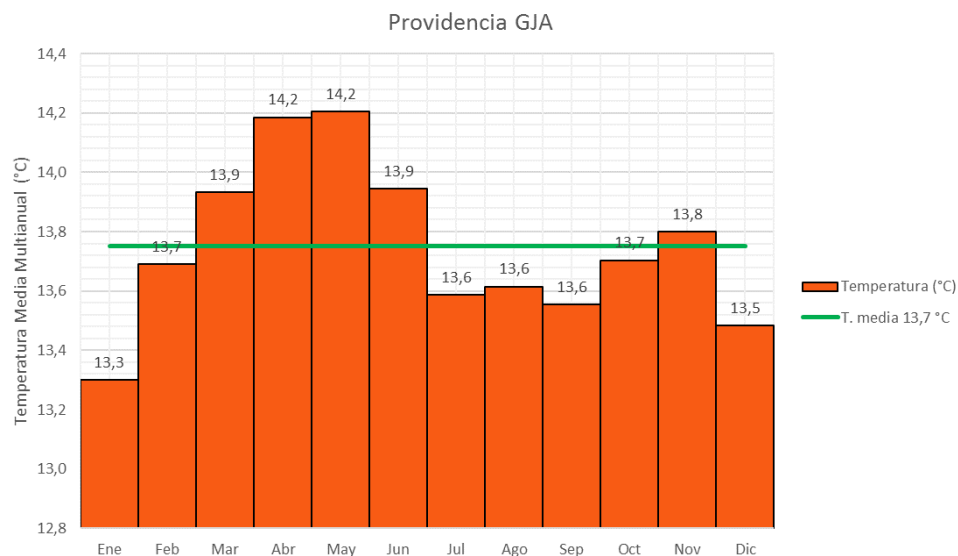


Figura 14, Isolneas de evaporación media multianual, Fuente: Autores 2016

La distribución de la evaporación está ligada principalmente a la cantidad de agua presente en la zona producto de las precipitaciones; inicialmente se observa que

los valores de evaporación son mayores a los de la precipitación dentro de la cuenca en cuestión lo cual indicaría un déficit predominante del recurso hídrico predominante en el año, sin embargo, dentro de la cuenca sólo hay una estación que mide los valores de evaporación y ésta está al final de la misma, por lo que se excluyen los valores medios dentro de la misma que arrojarían un comportamiento más exacto.

4.3. TEMPERATURA



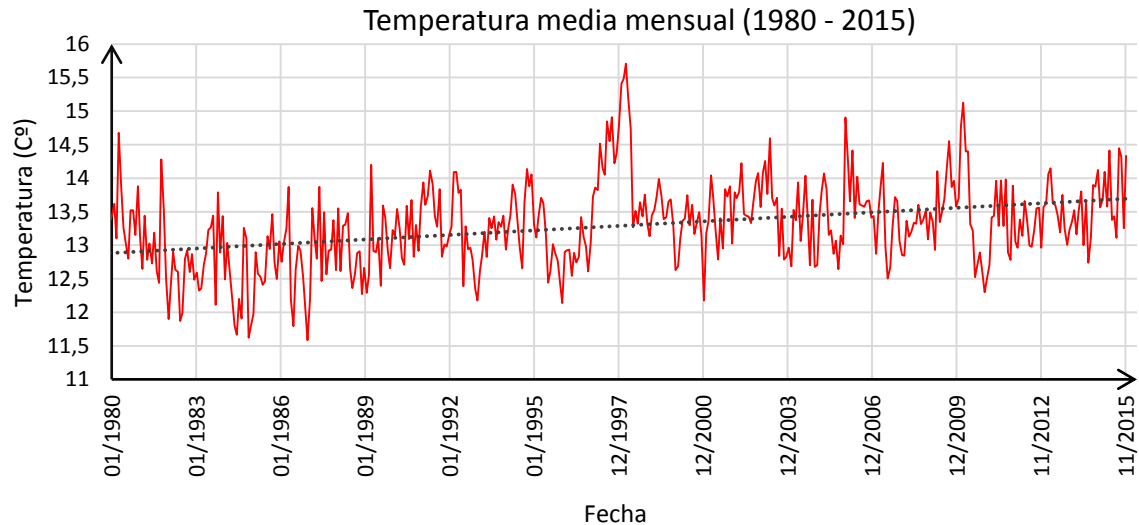
Grafica 13, Temperatura media mensual multianual, estación: Providencia, Fuente: Autores 2016

Los registros de temperatura de la zona son muy pocos, dentro del área de la cuenca no se encuentra ninguna estación que registre temperatura siendo la más cercana Providencia GJA a 2.7 km del límite de esta. Las otras estaciones con registros de temperaturas son: Guanata, La Primavera, Sabaneta, Tachi, Tisquesusa y Venecia.

La temperatura en la zona fluctúa entre 25° y -3° como valores extremos, siendo la temperatura promedio de 13.7 grados centígrados. Los valores registrados de temperaturas máximas y mínimas eran bastante escasos, en cuanto a las temperaturas medias, había algunos valores observados por un periodo de tiempo relativamente continuo que permitió realizar las series de tiempo imputadas, empleando 6 de las 7 estaciones con registros. Tomando el promedio por mes de las 6 estaciones se realizó la Grafica 14. Esta gráfica de temperatura promedio mensual muestra una tendencia positiva, siendo esto un indicador de cambio climático en la zona, el promedio en el año 2015 se incrementa 0.78 °c con

respecto a 1980, Hurtado³³ calcula en promedio un crecimiento de 0.25 °C / 10 años para la temperatura mínima. En el anuario climático del IDEAM para los primeros meses del presente año (2016), dice: “El año 2015 ha sido el más cálido de los últimos 35 años, con una anomalía de 0,85 °C por encima de los valores promedios respecto al periodo 1981 – 2010”³⁴. Dando un valor muy similar al calculado con la tendencia de la Grafica 14.

En el estudio del IDEAM titulado *Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia*³⁵ dice que los años más calientes entre el periodo 1960 – 2011, fueron 1998 seguidos de 1997, 2004, 2003 y 1995. En la gráfica abajo se observa bien el punto más alto de la gráfica que pertenece al mes de marzo de 1998 y los demás meses con valores ubicados por encima de la línea de tendencia, lo mismo para el año 1997.



Grafica 14. Temperatura media mensual, Fuente: Autores 2016

Para poder interpolar se necesita una mejor cobertura de las estaciones en la parte norte y sur de la cuenca, las estaciones que quedan ya en la ciudad de Bogotá no se consideran debido al *efecto isla* que genera alteraciones en las

³³ HURTADO M., Gonzalo. Análisis del Comportamiento Promedio y Tendencias de Largo Plazo de las Temperaturas Mínimas Medias para las Regiones Hidroclimáticas de Colombia.[Citado 23 de Agosto de 2016]. IDEAM. URL: < <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Analisis+del+Comportamiento+de+la+Temperatura+Minima.pdf/fc5b3bcb-ae84-413b-873d-fa7e3f06e8c6> >

³⁴ IDEAM. Anuario Climatológico 2015. [Citado 23 de Agosto 2016]. URL: < <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual> >

³⁵ BENAVIDES, H. ROCHA, C., Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [Citado 23 de Agosto 2016]. Bogotá. 2012. URL: < <http://documentacion.ideam.gov.co> >

temperaturas y vientos debido a las obras civiles como grandes edificios, carreteras y puentes, que hacen que la absorción / irradiación de calor sea alterada.

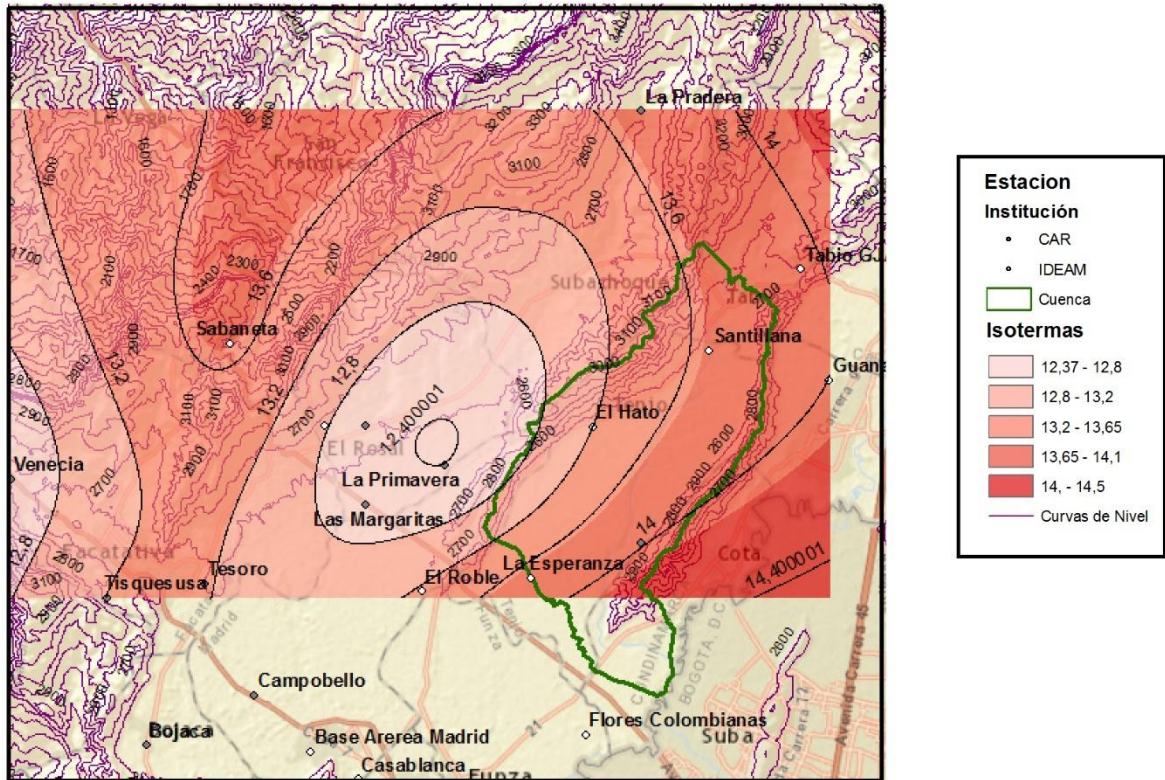
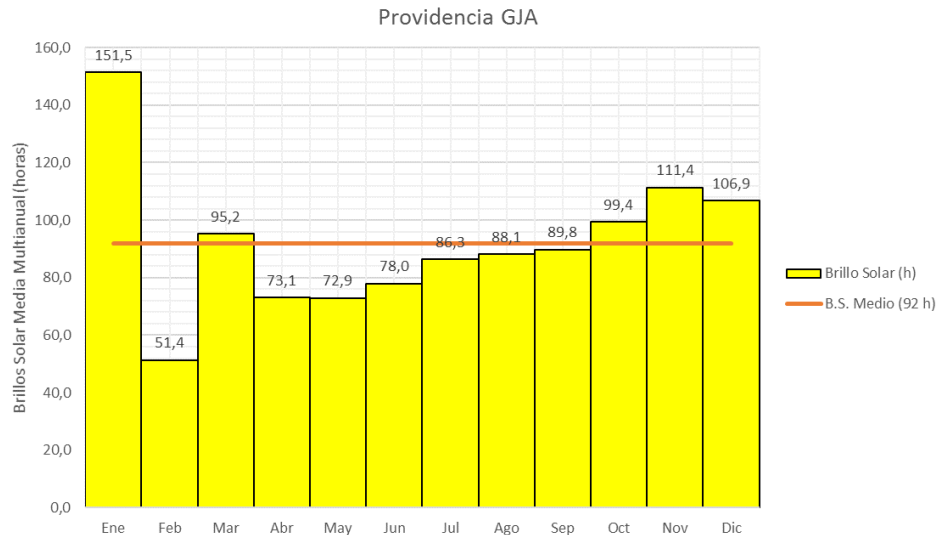


Figura 15, Isotermas medias multianuales, Fuente: Autores 2016

Al carecer de mayor número de estaciones con registros de temperatura, las isotermas no presentan la tendencia habitual que consiste en disminuir la temperatura a medida que aumenta la elevación, aunque en de manera global si se observaría ésta tendencia, llevando los mayores valores de temperatura hacia la zona de la ciudad de Bogotá. Dentro de la cuenca se observa que los valores medios oscilan entre 12 °C y 14 °C.

4.4. BRILLO SOLAR



Grafica 15, Brillo solar medio mensual multianual, estación: Providencia, Fuente: Autores 2016

El brillo solar presenta un comportamiento escalonado partiendo ascendentemente desde febrero encontrándose aquí su valor más bajo correspondiente a 51,4h/mes, hasta llegar a su valor más alto en el mes de enero siendo un pico bastante alto cuyo valor es de 151,5h/mes, lo cual es coherente con las bajas precipitaciones que se presentan en el mes de enero; por último, su valor medio es de 92h/mes

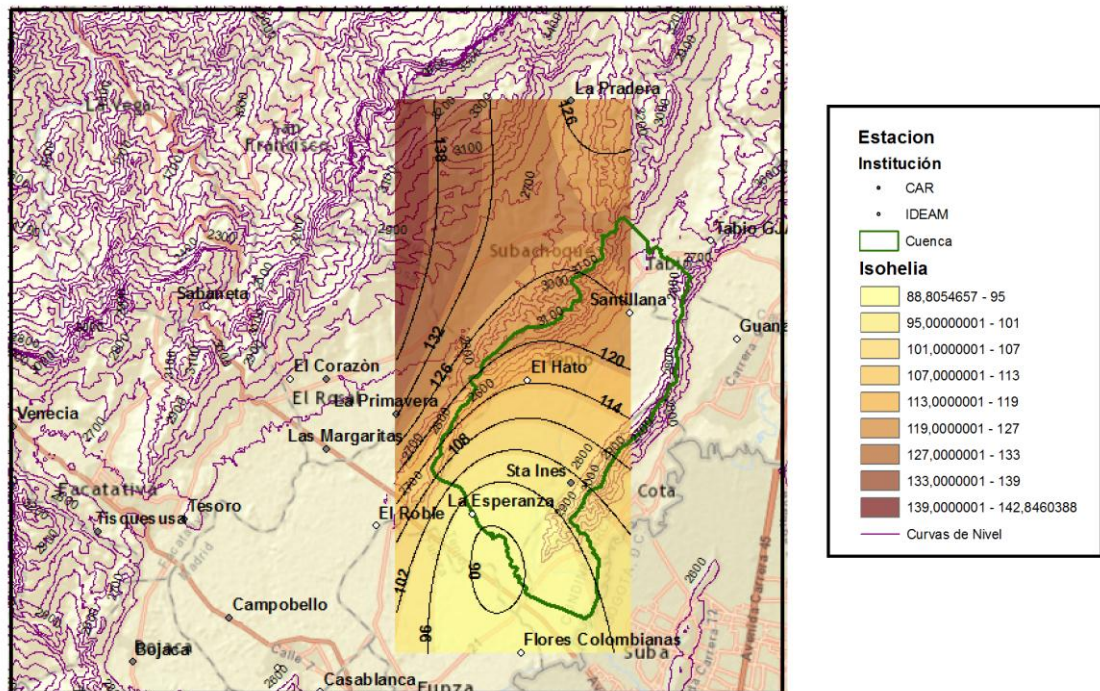
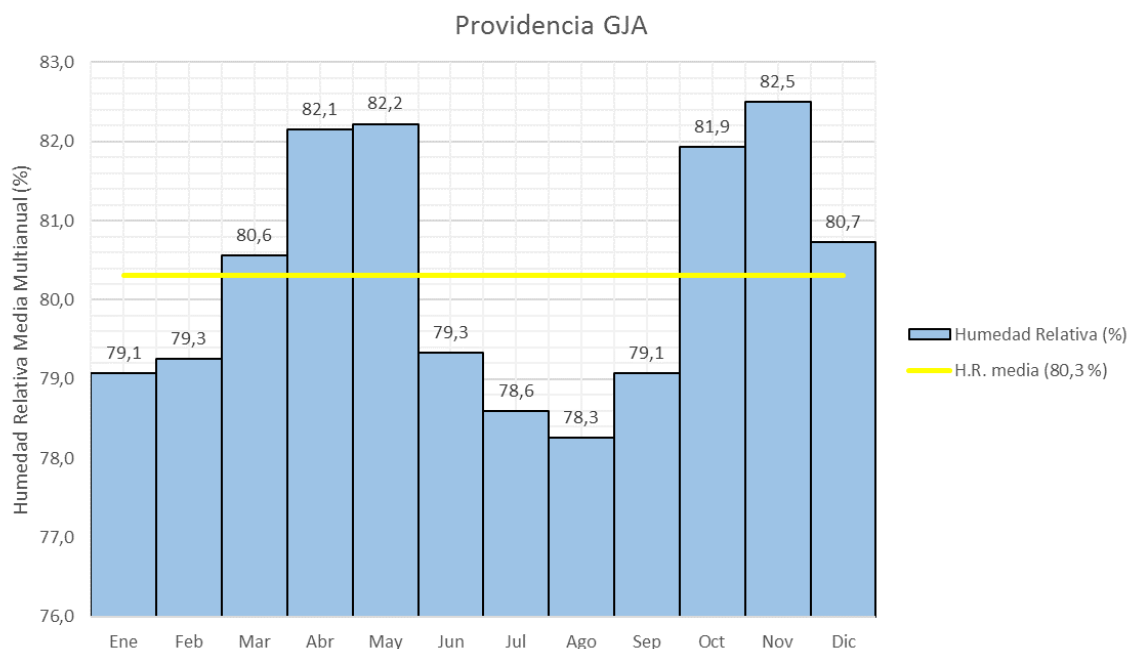


Figura 16, Isohelias medias mensuales multianuales, Fuente: Autores 2016

Al no contar con información de nubosidad y reducción sobre los rayos directos del sol sobre la cuenca en estudio, los datos de brillo solar son sometidos a un análisis gráfico de su comportamiento, indicando que el brillo solar aumenta a medida que se aproxima a la zona montañosa ubicada al oeste de la cuenca.

4.5. HUMEDAD RELATIVA



Grafica 16. Humedad relativa media mensual multianual, estación: Providencia, Fuente: Autores 2016

La humedad relativa tiene un comportamiento bimodal semejante al de la precipitación, encontrando su valor pico en el mes de noviembre con 82,5% y su valor más bajo se encuentra en agosto con 78,3% lo cual va acorde a las temporadas secas y lluviosas; asimismo su valor medio es de 80,3%.

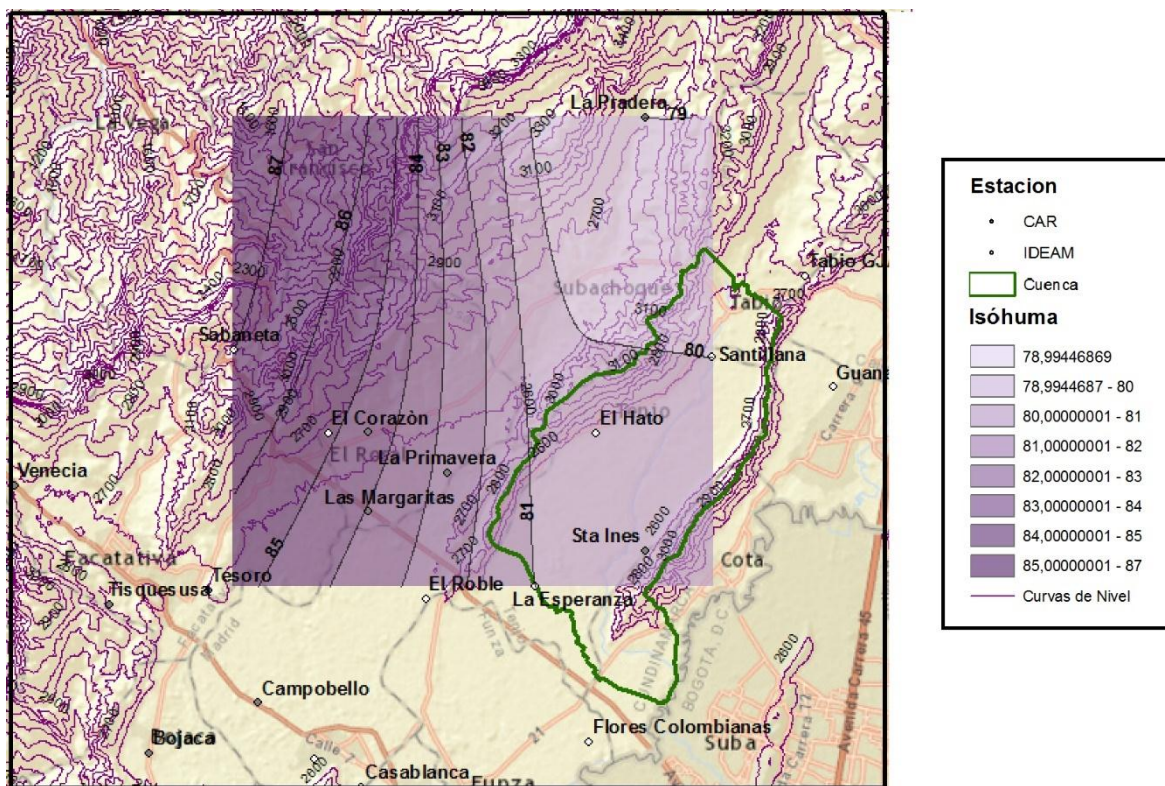


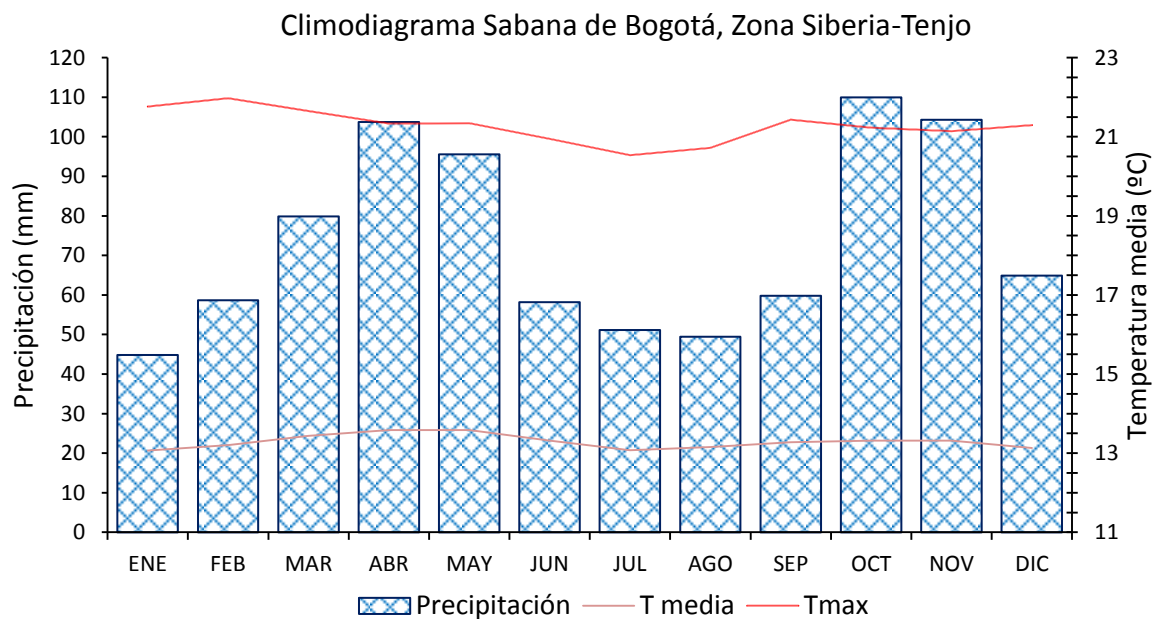
Figura 17, Isóhumas medias multianuales, Fuente: Autores 2016

De igual manera las pocas estaciones con registros de humedad relativa no permiten tener un escenario preciso del comportamiento de ésta variable. Pero al acogerse en estos resultados la humedad relativa en casi la totalidad de la cuenca es la equivalente a su valor medio obtenido del histograma. Además, se observa que la humedad relativa aumenta a medida que se entra a la zona montañosa ubicada en la parte izquierda de la Figura 17 lo cual se asemeja al comportamiento de la precipitación y evaporación, señalando que el comportamiento de éstas variables se ve incrementado en las zonas montañosas.

4.6. CLIMATOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Por lo general las temperaturas son bastante estables durante los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre. Estos meses también suelen ser los más lluviosos. En promedio las temperaturas no presentan variaciones significativas como está graficado en el climodiagrama de las estaciones de la cuenca del Chicú, la tendencia de la temperatura media en color anaranjado y la temperatura máxima en color rojo es similar con un valle suave que se traduce en disminución de la temperatura en los meses de julio y agosto debido posiblemente a la circulación de frentes de aire frío durante esos meses.

Toda la zona de la Sabana de Bogotá a pesar de su nombre comúnmente usado para nombrar esta zona homogénea ubicada en el sur del altiplano Cundiboyacense, el clima que se presenta no entra dentro de la clasificación de clima tropical de Sabana, caracterizado por una corta estación húmeda con lluvias torrenciales, alta oscilación térmica y temperaturas altas durante todo el año.



Grafica 17, Climodiagrama valores promedio Precipitación, temperaturas medias y máximas. 8 estaciones empleadas, Fuente: Autores 2016

4.6.1. Clasificación de Köppen (1918)

Esta clasificación subdivide el clima en 5 grandes grupos, y a su vez estos son subdivididos teniendo en cuenta la temperatura y la precipitación media anual de la zona, como condicionantes de la región climática y por ende de la vegetación resultante.

Geográficamente la zona está ubicada en un clima Templado, oceánico en la clasificación de Koppen, lo que indica por definición que la temperatura media del mes más cálido no llega a los 22 °C pero se superan los 10 °C durante cuatro o más meses en el año. Otra característica de este clima es que las precipitaciones exceden la evaporación.

4.6.2. Clasificación de Strahler

Este sistema de clasificación se basa en las corrientes de aire principales que circulan en el planeta y como contribuyen a aumentar o disminuir los factores climáticos.

La zona estudiada se halla, en la categoría de Clima subtropical húmedo, en la estación donde el sol está alto hay un incremento de las precipitaciones y de la temperatura.

4.7. CAUDALES Y NIVELES

Sobre la corriente del Río Chicú hay dos estaciones, la estaciones Las Mercedes de la CAR y la estación Río Bogotá – Chicú, la cual se ubica en la desembocadura del Chicú. Esta segunda estación no puede ser tenida en cuenta debido a que toma el Caudal del Río Bogotá más lo que le aporta el Chicú que no puede ser diferenciable fácilmente pues el Caudal medio de esta estación está sobre los 13.5 m³/s, mientras que la oferta del Chicú en periodo húmedo es de 1.12 m³/s según la tabla de características hidrológicas de las subcuencas del R. Bogotá³⁶, según los datos de la estación las Mercedes en el punto de medición a 3.4 kilómetros del nacimiento del Río hay un caudal medio de 0.036 m³/s.

El Río durante su recorrido recibe los caudales de las demás corrientes tributarias además pero también es conducida mucha agua para usos en la industria principalmente. Se hace necesario buscar más información de Caudales y por ello se seleccionan los caudales medios mensuales de la siguiente tabla:

Código	Cuenca	Area (Km ²)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Annual
2120-19	Rio Alto Bogota	275,15	0,63	0,53	0,78	1,41	2,94	4,51	6,41	4,76	2,52	2,51	2,45	1,34	2,57
2120-18	Embalse Siga	155,26	0,43	0,40	0,60	1,27	2,67	4,77	6,61	4,32	2,46	1,92	1,20	0,85	2,30
2120-17	Embalse Tominé	374,28	1,71	1,44	1,99	3,39	5,88	9,81	12,44	8,60	4,90	4,59	4,68	2,98	5,22
2120-16	Sector Siga - Tibitoc	1059,67	7,57	7,94	7,79	8,07	9,62	10,00	13,16	11,86	8,66	8,94	9,76	7,27	9,22
2120-15	Rio Neusa	447,35	2,69	1,98	3,06	4,46	4,29	3,50	3,54	4,32	5,17	5,97	4,95	3,34	3,94
2120-14	Rio Negro	33,90	0,19	0,18	0,22	0,42	0,47	0,47	0,39	0,31	0,33	0,59	0,59	0,39	0,38
2120-13	Rio Teusacá	358,18	6,75	6,41	6,30	9,15	10,63	11,32	14,28	17,97	13,69	7,58	9,24	9,81	10,50
2120-12	Rio Frio	201,60	1,16	1,07	1,33	2,48	2,82	2,77	2,29	1,82	1,96	3,51	3,51	2,35	2,25
2120-11	Rio Chicú	141,89	0,56	0,46	0,52	0,64	0,99	1,08	1,10	0,83	0,69	1,26	1,40	0,91	0,86
2120-10	Sector Tibitoc - Soacha	2955,43	12,94	13,74	14,88	18,46	21,44	19,91	19,20	16,71	15,73	19,88	25,16	17,30	17,94
2120-08	Rio Balsillas	624,42	2,67	2,57	2,74	5,39	7,07	6,34	4,41	3,69	3,95	8,26	10,07	5,73	5,28
2120-07	Rio Soacha	40,52	0,16	0,13	0,15	0,18	0,28	0,31	0,32	0,24	0,20	0,36	0,40	0,26	0,25
2120-06	Embalse del Muña	134,22	0,53	0,43	0,49	0,61	0,94	1,02	1,04	0,78	0,65	1,19	1,32	0,86	0,82
2120-05	Sector Salto - Soacha	4277,17	18,73	19,88	21,53	26,71	31,02	28,82	27,78	24,18	22,76	28,77	36,41	25,04	25,97
2120-04	Sector Salto - Apulo	4862,06	27,78	28,89	33,76	42,61	43,00	34,61	28,86	24,91	25,81	39,14	53,65	37,78	34,96
2120-03	Rio Calandaima	268,40	2,26	1,54	1,72	2,24	2,66	2,41	1,86	2,00	2,12	2,75	3,50	2,84	2,33
2120-02	Rio Apulo	485,06	6,73	7,31	8,38	8,72	6,65	4,83	4,02	3,52	5,07	9,12	11,02	9,15	6,87
2120-01	Rio Bajo Bogota	5891,43	33,66	35,00	40,91	51,63	52,11	41,94	34,97	30,18	31,28	47,43	65,01	45,78	42,36

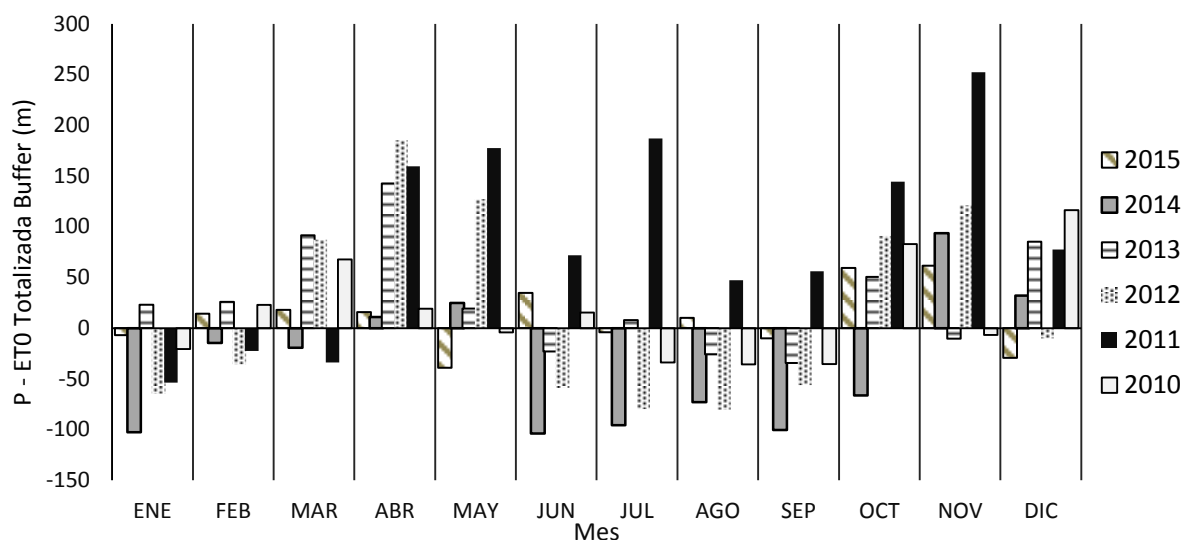
Figura 18, Caudales Medios Mensuales Multianuales, Fuente: Ecoforest y Planeación Ecológica

³⁶ CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Plan de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá [PDF]. 2006. Pag. 7 [Citado 07 de Agosto 2016].

4.8. ESTADÍSTICAS ZONALES CARRETERA SIBERIA – TENJO

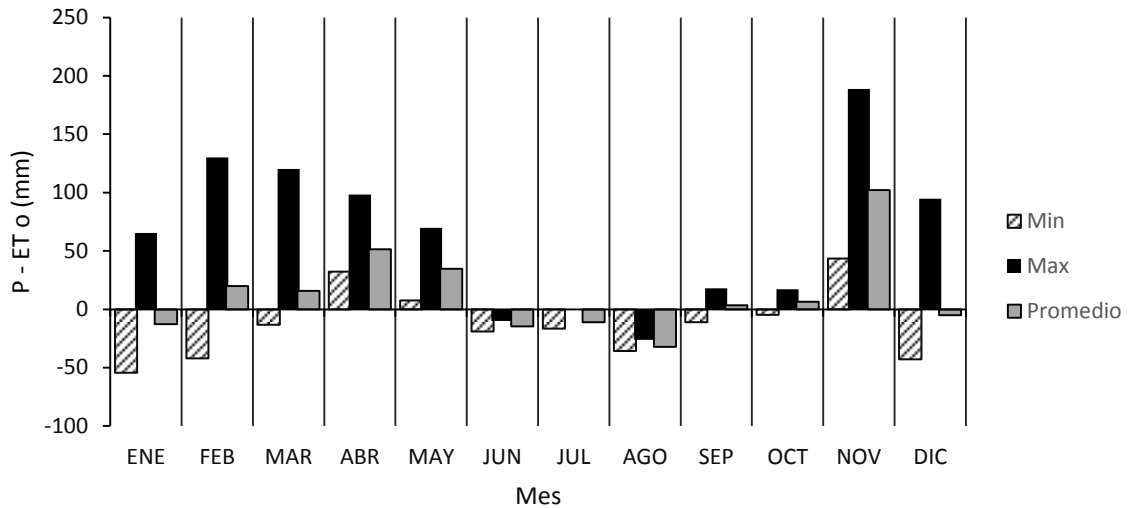
A continuación, se presentan los resultados de las estadísticas zonales de la precipitación menos la evapotranspiración de referencia, la Tabla 6. Muestra los resultados de la sumatoria de cada pixel dentro del buffer definido para la carretera Siberia – Tenjo para los últimos 5 años, vale la pena recordar que el buffer tiene un área de 14,9 kilómetros cuadrados y una longitud de 15 kilómetros, con un kilómetro de ancho. Esta sumatoria da una idea del almacenamiento, vale la pena resaltar que el año 2015 es el que menos precipitaciones registra y el 2011 el más lluvioso en los registros de la zona entre 1980 y 2015. El año 2015 en solo tres de los doce meses del año presenta una sumatoria de precipitación menos evapotranspiración favorable, lo opuesto pasa con el año 2011 que en nueve de los doce meses tienen sumatoria de precipitación menos evapotranspiración favorable.

Tabla 6. Balances Mensuales Multianuales, Fuente: Autores 2016



Hay que tener en cuenta que las magnitudes presentadas en el eje de las ordenadas se dan por área, entonces en noviembre del 2011 hubo un balance favorable del orden de 250 metros repartidos en 14,9 kilómetros cuadrados de área. El año que más se ajusta al promedio de las series de tiempo es el año de 1993.

Tabla 7. Balance mensual, máximo, mínimo y promedio año 1993



En la Tabla 7. Se ve que el promedio del año 1993 en el buffer presenta valores por debajo de cero en los meses de menos lluvias, y por encima en los meses húmedos, no hay una tendencia marcada de un balance desfavorable, la sumatoria anual de estos promedios da un valor de 158,3 mm/año, para este año en específico. En caso de querer ver los resultados de cada uno de los años remitirse a los Anexos.

Estas son estadísticas mensuales de todos los años entre 1980 y 2015, la confiabilidad de las estadísticas depende de la calidad de los datos, si bien se buscó el mejor método para llenar los datos faltantes y así trabajar con series continuas, claramente es preferible un dato observado.

5. Balances Hídricos

Realizado todo lo anterior se procede a efectuar los balances energéticos de la cuenca en cuestión, que en este caso de estudio son los balances hídricos climático, de suelo y agrícola. Estos 3 tipos de balance hídrico son seleccionados para observar el comportamiento del recurso hídrico dentro de la cuenca desde 3 puntos de vista diferentes los cuales son: climático (B.H.C.), suelo (B.H.S.) y agrícola (B.H.A.).

Para realizar cualquiera de los tres tipos de balances hídricos, la variable determinante es la evapotranspiración potencial (ETP), por ello se le destina un subíndice que se muestra a continuación.

Los diferentes tipos de balances medios (B.M.) se obtienen con el promedio de los valores de precipitación y ETP esto de las estaciones que entran a pertenecer a la cuenca rio Chicú de acuerdo a su área de influencia en cada caso, así mismo se obtiene el valor del área.

5.1. RESULTADOS EVAPOTRANSPIRACIÓN (ETP)

Efectuando los tres métodos mencionados en la metodología se procede a realizar los respectivos cálculos de los cuales se obtienen las siguientes tablas:

Tabla 8, Evapotranspiración potencial (ETP) obtenida por el método de TURC, Fuente: Autores 2016

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL TURC (mm)												
Estaciones	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Pantano Redondo	81,78	75,41	77,81	73,88	71,31	68,91	71,76	73,14	73,38	72,90	75,65	78,00
La Pradera	81,81	75,42	77,82	73,87	71,30	68,89	71,75	73,13	73,38	72,91	75,68	78,04
Venecia	81,93	75,48	77,84	73,85	71,24	68,82	71,69	73,08	73,40	72,98	75,79	78,17
La Unión	81,91	75,47	77,84	73,85	71,25	68,83	71,70	73,08	73,40	72,97	75,78	78,15
La Primavera	74,56	69,36	69,38	66,21	64,23	63,23	65,37	65,93	67,60	65,05	66,50	68,87
Tabia GJA	81,87	75,45	77,83	73,86	71,27	68,86	71,72	73,10	73,39	72,95	75,73	78,10
Bojacá	82,02	75,53	77,87	73,82	71,19	68,77	71,64	73,04	73,42	73,03	75,88	78,27
Tesoro	81,97	75,50	77,85	73,84	71,22	68,80	71,67	73,06	73,41	73,00	75,83	78,21
Las Margaritas	81,94	75,49	77,85	73,84	71,23	68,81	71,68	73,07	73,41	72,99	75,81	78,18
Santa Inés	81,96	75,50	77,85	73,84	71,22	68,80	71,67	73,06	73,41	73,00	75,82	78,20
El Corazón	81,91	75,47	77,84	73,85	71,25	68,83	71,70	73,08	73,40	72,97	75,78	78,15
Casablanca	82,03	75,53	77,87	73,82	71,19	68,76	71,64	73,03	73,42	73,04	75,89	78,28
El Hato	81,92	75,48	77,84	73,85	71,24	68,83	71,69	73,08	73,40	72,98	75,78	78,16
Santillana	81,89	75,46	77,84	73,85	71,26	68,85	71,71	73,09	73,40	72,96	75,75	78,12
Tisquesusa	78,65	72,13	71,37	66,85	64,69	64,23	66,45	68,09	70,61	68,17	70,06	73,77
Campobello	82,00	75,52	77,86	73,83	71,20	68,78	71,65	73,04	73,42	73,02	75,87	78,25
El Roble	81,97	75,50	77,86	73,83	71,21	68,79	71,66	73,06	73,41	73,01	75,84	78,22
Flores Colombianas	82,02	75,53	77,87	73,82	71,19	68,77	71,64	73,04	73,42	73,03	75,88	78,27
La Esperanza	81,97	75,50	77,85	73,84	71,22	68,80	71,67	73,06	73,41	73,00	75,83	78,21
Guanata	83,60	77,60	78,42	73,37	70,05	68,41	70,69	71,78	72,40	69,67	72,01	80,30
Base Aérea Madrid	82,02	75,53	77,87	73,82	71,19	68,77	71,64	73,04	73,42	73,03	75,88	78,27
Sabaneta	89,41	81,64	88,89	85,31	82,50	77,52	81,83	83,75	81,50	85,17	89,60	87,19

Tabla 9, Evapotranspiración potencial (ETP) obtenida por el método de THORMTHWAITE, Fuente: Autores 2016

ETP THORMRHWAIT												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tisquesusa	27,0	22,1	19,2	16,0	16,6	16,8	18,4	18,3	18,4	18,2	20,5	24,9
La Primavera	25,0	21,1	18,8	16,4	17,1	17,0	18,6	17,8	17,4	17,0	19,0	22,3
Sabaneta	26,3	21,3	29,1	27,3	28,1	21,2	24,3	25,5	19,7	29,4	37,0	29,9
Guanata	28,7	24,4	22,5	18,7	18,6	17,9	19,3	18,9	17,7	17,4	19,9	28,6
Venecia	19,1	18,3	16,3	14,0	14,7	14,9	15,6	14,5	14,6	14,3	16,0	20,0
Otras Estaciones	25,5	21,6	20,8	18,0	18,6	17,5	19,2	18,8	17,6	18,8	21,6	25,1

Tabla 10, Evapotranspiración potencial (ETP) obtenida por el método de GARCÍA Y LÓPEZ,
Fuente: Autores 2016

ETP GARCÍA Y LÓPEZ												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tisquesusa	26,4	23,7	25,0	23,4	26,2	25,9	23,3	27,4	28,5	29,8	25,9	27,5
La Primavera	17,5	17,7	20,1	21,7	24,9	23,2	20,5	21,8	21,1	21,5	17,4	16,1
Sabaneta	54,9	48,5	82,3	87,0	93,1	70,4	72,7	80,5	61,6	93,1	94,4	68,7
Guanata	38,5	37,2	44,5	41,6	42,2	37,8	34,6	37,6	33,3	34,1	31,1	45,6
Venecia	21,7	19,5	21,9	21,9	25,7	25,4	20,8	20,1	21,1	21,1	17,5	20,5
Otras Estaciones	31,7	29,3	38,5	38,8	42,1	36,4	34,2	37,2	33,0	39,6	36,9	35,5

Al observar los resultados de las ETPs obtenidos por cada uno de los métodos efectuados se presenta una cierta similitud entre los resultados de los métodos de Thornthwaite y García y López, aunque en éste último se alcanzan valores mucho más altos, que por el contrario en el método de Thornthwaite se maneja un rango de datos más estable; cabe resaltar que los resultados del método de Turc están más alejados de los demás, esto puede ser causado por el número variables que método maneja, al ser mucho mayor que los otros dos métodos.

Siendo ajenos a las diferencias entre los resultados de cada método, se decide efectuar los balances hídricos climático, de suelo y agrícola con los resultados de los 3 métodos para tener un margen de observación mucho más amplio respecto al comportamiento del recurso hídrico bajo diferentes valores de la evapotranspiración potencial (ETP).

Nota: Las estaciones seleccionadas para determinar las ETPs son las que tienen todas las variables que exige cada uno de los métodos, además de esto, se toman estaciones aledañas a la cuenca para observar el comportamiento general de la zona, exceptuando el método de Turc en el cual se usaron los valores medios debido al número de variables requeridas y la existencia dispersa de estos en las estaciones.

5.2. BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO

• ETP TURC

Tabla 11, B.H.C.M. determinado con la ETP según Turc Fuente: Autores 2016

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
P (mm)	31,68	46,84	65,74	98,61	91,96	55,23	53,22	46,95	57,93	99,34	88,29	51,25
Q m³/seg	0,56	0,46	0,52	0,64	0,99	1,08	1,10	0,83	0,69	1,26	1,40	0,91
Área	138,04											
Rendimiento (l/seg*Km²)	4,06	3,33	3,77	4,64	7,17	7,82	7,97	6,01	5,00	9,13	10,14	6,59
Escorrentía (mm)	10,87	8,06	10,09	12,02	19,21	20,28	21,34	16,10	12,96	24,45	26,29	17,66
Volumen miles de m³	1499,90	1112,83	1392,77	1658,88	2651,62	2799,36	2946,24	2223,07	1788,48	3374,78	3628,80	2437,34
ETR (mm)	20,82	38,78	55,65	86,59	72,75	34,95	31,88	30,85	44,98	74,89	62,01	33,59
ETP (mm)	80,45	74,23	75,79	71,79	69,28	67,39	69,90	70,94	71,73	70,47	72,91	76,26
Índice Aridez	0,74	0,48	0,27	-0,21	-0,05	0,48	0,54	0,57	0,37	-0,06	0,15	0,56

Con los valores de la evapotranspiración potencial (ETP) en el rango de 68mm/mes y 81mm/mes, la cuenca presenta un comportamiento deficitario en los meses de enero, febrero, junio, julio, agosto y diciembre; por el contrario, los meses de abril, mayo, octubre y noviembre tendrían excedentes de agua y en los meses restantes se encontrarían con disponibilidad moderada de agua.

• ETP THORNTHWAITE

Tabla 12, B.H.C.M. determinado con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
P (mm)	31,68	46,84	65,74	98,61	91,96	55,23	53,22	46,95	57,93	99,34	88,29	51,25
Q m³/seg	0,56	0,46	0,52	0,64	0,99	1,08	1,10	0,83	0,69	1,26	1,40	0,91
Área	138,04											
Rendimiento (l/seg*Km²)	4,06	3,33	3,77	4,64	7,17	7,82	7,97	6,01	5,00	9,13	10,14	6,59
Escorrentía (mm)	10,87	8,06	10,09	12,02	19,21	20,28	21,34	16,10	12,96	24,45	26,29	17,66
Volumen miles de m³	1499,90	1112,83	1392,77	1658,88	2651,62	2799,36	2946,24	2223,07	1788,48	3374,78	3628,80	2437,34
ETR (mm)	20,82	38,78	55,65	86,59	72,75	34,95	31,88	30,85	44,98	74,89	62,01	33,59
ETP (mm)	25,85	21,92	20,78	17,92	18,39	17,51	19,11	18,67	17,60	18,37	21,10	25,16
Índice Aridez	0,19	-0,77	-1,68	-3,83	-2,96	-1,00	-0,67	-0,65	-1,56	-3,08	-1,94	-0,34

Al usar los valores de evapotranspiración potencial (ETP) en el rango de 18mm/mes y 26mm/mes que son los valores más bajos obtenidos de las ETP calculadas, indican que la cuenca presentaría altos excedentes de agua en lo corrido del año a excepción de enero, dónde habría una disponibilidad de agua moderada con tendencia a generar excedentes de agua; de igual forma éstos excedentes de agua se ajustan a las temporadas secas y lluviasas.

- **ETP GARCÍA Y LÓPEZ**

Tabla 13, B.H.C.M. determinado con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
P (mm)	31,68	46,84	65,74	98,61	91,96	55,23	53,22	46,95	57,93	99,34	88,29	51,25
Q m³/seg	0,56	0,46	0,52	0,64	0,99	1,08	1,10	0,83	0,69	1,26	1,40	0,91
Área	138,04											
Rendimiento (l/seg*Km²)	4,06	3,33	3,77	4,64	7,17	7,82	7,97	6,01	5,00	9,13	10,14	6,59
Escorrentía (mm)	10,87	8,06	10,09	12,02	19,21	20,28	21,34	16,10	12,96	24,45	26,29	17,66
Volumen miles de m³	1499,90	1112,83	1392,77	1658,88	2651,62	2799,36	2946,24	2223,07	1788,48	3374,78	3628,80	2437,34
ETR (mm)	20,82	38,78	55,65	86,59	72,75	34,95	31,88	30,85	44,98	74,89	62,01	33,59
ETP (mm)	30,80	28,80	36,98	37,05	39,96	34,92	32,53	35,33	31,55	36,63	33,71	34,32
Índice Aridez	0,32	-0,35	-0,50	-1,34	-0,82	0,00	0,02	0,13	-0,43	-1,04	-0,84	0,02

Empleando los valores de evapotranspiración potencial (ETP) en el rango de 29mm/mes y 43mm/mes que son los valores medios contrastando los obtenidos de los demás métodos, destacando que dentro de la cuenca en el mes de enero habría una disponibilidad moderada con tendencias a generar excedentes de agua; por el contrario, los demás meses presentarían altos excedentes de agua ajustándose a las temporadas secas y lluviosas.

Al aplicar estos 3 métodos de cálculo de la ETP se observa que mayoritariamente la cuenca en lo corrido del año, va a tener disponibles excedentes de agua y en los meses correspondientes a las temporadas secas se llegaría a tener una disponibilidad moderada pero aún existente del recurso hídrico lo cual se observa por los métodos de Thornthwaite y García y López; aunque en el caso del método de Turc la disponibilidad se ve directamente relacionada a las temporadas secas y lluviosas en lo corrido del año, existiendo excedentes de agua en las temporadas lluviosas y déficit y disponibilidad moderada en las temporadas secas cuando la ETP supera el valor de la precipitación media mensual.

5.3. BALANCE HÍDRICO DE SUELO (B.H.S.)

- **ETP TURC**

Tabla 14, B.H.S.M. determinado con la ETP según Turc, Fuente: Autores 2016

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
P (mm)	32,2	48,0	68,5	102,1	94,5	56,0	54,4	48,2	60,5	101,6	89,3	52,0	807,4
ETP (mm)	80,5	74,2	75,8	71,8	69,3	67,4	69,9	70,9	71,7	70,5	72,9	76,3	871,1
ETR (mm)	32,2	48,0	68,5	71,8	69,3	67,4	69,9	70,9	66,4	70,5	72,9	76,3	784,0
Déficit (mm)	48,3	26,2	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	0,0	0,0	0,0	87,1
Reserva (mm)	0	0,0	0,0	30,3	55,5	44,2	28,7	5,9	0,0	31,1	47,6	23,4	266,6
Excedentes (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Con una ETP entre 68mm/mes y 82mm/mes la cuenca del río Chicú presentaría un comportamiento bajo éstas condiciones de ETP, el cual se distribuye así: Para los meses de enero, febrero, marzo y septiembre habría un déficit de agua entre bajo y alto, y para los demás meses existiría una reserva considerable de agua; pero igualmente no se encontrarían excedentes en lo corrido del año.

- **ETP THORNTHWAITTE**

Tabla 15, B.H.S.M. determinado con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016

Parámetro		Reserva Máxima(%)												70
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
P (mm)		32,2	48,0	68,5	102,1	94,5	56,0	54,4	48,2	60,5	101,6	89,3	52,0	807,4
ETP (mm)		25,9	21,9	20,8	17,9	18,4	17,5	19,1	18,7	17,6	18,4	21,1	25,2	242,4
ETR (mm)		25,9	21,9	20,8	17,9	18,4	17,5	19,1	18,7	17,6	18,4	21,1	25,2	242,4
Déficit (mm)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reserva (mm)	0	6,3	32,4	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	738,7
Excedentes (mm)		0,0	0,0	10,1	84,2	76,1	38,5	35,3	29,5	42,9	83,2	68,2	26,9	495,0

Con los valores bajos de ETP entre 17mm/mes y 27mm/mes a lo largo del año no se presentarían déficits de agua, por el contrario, en casi todos los meses habría una reserva correspondiente a la reserva máxima del suelo; así como en la mayoría de los mismos existirían excedentes de agua considerables.

- **ETP GARCÍA Y LÓPEZ**

Tabla 16, B.H.S.M. determinado con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016

Parámetro		Reserva Máxima(%)												70
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
P (mm)		32,2	48,0	68,5	102,1	94,5	56,0	54,4	48,2	60,5	101,6	89,3	52,0	807,4
ETP (mm)		25,9	21,9	20,8	17,9	18,4	17,5	19,1	18,7	17,6	18,4	21,1	25,2	242,4
ETR (mm)		25,9	21,9	20,8	17,9	18,4	17,5	19,1	18,7	17,6	18,4	21,1	25,2	242,4
Déficit (mm)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reserva (mm)	0	6,3	32,4	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	738,7
Excedentes (mm)		0,0	0,0	10,1	84,2	76,1	38,5	35,3	29,5	42,9	83,2	68,2	26,9	495,0

Para los valores altos de ETP entre 29mm/mes y 43mm/mes en lo corrido del año la cuenca del río Chicú presentaría reserva de agua en el suelo, alcanzando su máxima capacidad en abril para continuar de igual manera en los demás meses del año y generando excedentes desde éste mismo mes.

Hecho esto se obtiene que en lo corrido del año siguiendo los resultados de los métodos de Thornthwaite y García y López, la cuenca tendrá disponible completamente su reserva máxima, presentando igualmente excedentes de agua los cuales, siguiendo la teoría del Thornthwaite del balance hídrico de suelo se dividen en partes iguales convirtiéndose en escorrentía que alimenta los cauces de la cuenca y en infiltración que traspasa el estrato orgánico hacia los estratos

más profundos. Por el contrario, por el método de Turc no se generarían excedentes y se presentarían déficits de agua correspondientes a la primera temporada seca del año y una parte de la segunda, sin embargo, aunque se presentan déficits de agua, la reserva acumulada total es mayor que los déficits totales haciendo que predomine un estado positivo de disponibilidad hídrica en lo corrido del año.

Además, se realiza el B.H.S. distribuido dentro de la cuenca de acuerdo a los polígonos de Thiessen generados. (Ver Anexos H, I y J)

5.4. BALANCE HÍDRICO AGRÍCOLA (B.H.A.)

A continuación, se realizan los B.H.A. con las 3 ETPs calculadas, aplicándolo a los cultivos predominantes en la cuenca suponiendo la presencia de estos cultivos en toda el área de la cuenca en cuestión. Cabe resaltar que los resultados obtenidos no toman en cuenta la explotación de pozos subterráneos, ni diferentes captaciones del recurso hídrico en la extensión de la cuenca; por ello el resultado arroja un escenario general de la afectación de dichos cultivos en la cuenca.

5.4.1. B.H.A. de la Papa

Tabla 17, B.H.A. de la papa con la ETP según Turc, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DE LA PAPA												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	80,45	74,23	75,79	71,79	69,28	67,39	69,90	70,94	71,73	70,47	72,91	76,26
Kc	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30	0,45	0,45	0,45	0,30	0,30	0,30
Etr (mm)	20,11	18,56	18,95	21,54	20,78	20,22	31,45	31,92	32,28	21,14	21,87	22,88
Pre Total (mm)	32,17	47,99	68,48	102,09	94,50	56,02	54,43	48,16	60,53	101,60	89,34	52,05
Pre efec (mm)	19,30	28,80	41,09	61,25	56,70	33,61	32,66	28,90	36,32	60,96	53,61	31,23
Dotacion Bruta (mm)	0,81	0	0	0	0	0	0	3,03	0	0	0	0
Eficiencia de Riego	1,35	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
Volumen (m³)	4441,17	6624,80	9452,35	14092,59	13044,34	7733,15	7513,06	6647,88	8355,81	14024,91	12333,04	7184,78
Caudal (m³/seg)	1,59	2,15	3,39	4,89	4,68	2,69	2,70	2,39	2,90	5,03	4,28	2,58
Caudal (L/s*ha)	0,12	0,16	0,25	0,35	0,34	0,19	0,20	0,17	0,21	0,36	0,31	0,19
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

Tabla 18, B.H.A. de la papa con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DE LA PAPA												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	25,85	21,92	20,78	17,92	18,39	17,51	19,11	18,67	17,60	18,37	21,10	25,16
Kc	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30	0,45	0,45	0,45	0,30	0,30	0,30
Etr (mm)	6,46	5,48	5,19	5,37	5,52	5,25	8,60	8,40	7,92	5,51	6,33	7,55
Pre Total (mm)	39,09	50,20	70,68	102,44	94,02	58,18	59,17	49,41	64,49	105,74	93,48	49,99
Pre efec (mm)	23,45	30,12	42,41	61,46	56,41	34,91	35,50	29,65	38,70	63,44	56,09	29,99
Dotacion Bruta (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eficiencia de Riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volumen (m³)	5396,06	6930,07	9756,06	14140,80	12978,78	8030,61	8167,82	6820,42	8902,43	14596,46	12904,00	6900,27
Caudal (m³/seg)	1,94	2,25	3,50	4,91	4,66	2,79	2,93	2,45	3,09	5,24	4,48	2,48
Caudal (L/s*ha)	0,14	0,16	0,25	0,36	0,34	0,20	0,21	0,18	0,22	0,38	0,32	0,18
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

Tabla 19, B.H.A. de la papa con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DE LA PAPA												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	30,80	28,80	36,98	37,05	39,96	34,92	32,53	35,33	31,55	36,63	33,71	34,32
Kc	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30	0,45	0,45	0,45	0,30	0,30	0,30
Etr (mm)	7,70	7,20	9,24	11,11	11,99	10,48	14,64	15,90	14,20	10,99	10,11	10,30
Pre Total (mm)	39,09	50,20	70,68	102,44	94,02	58,18	59,17	49,41	64,49	105,74	93,48	49,99
Pre efec (mm)	23,45	30,12	42,41	61,46	56,41	34,91	35,50	29,65	38,70	63,44	56,09	29,99
Dotacion Bruta (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eficiencia de Riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volumen (m³)	5396,06	6930,07	9756,06	14140,80	12978,78	8030,61	8167,82	6820,42	8902,43	14596,46	12904,00	6900,27
Caudal (m³/seg)	1,94	2,25	3,50	4,91	4,66	2,79	2,93	2,45	3,09	5,24	4,48	2,48
Caudal (L/s*ha)	0,14	0,16	0,25	0,36	0,34	0,20	0,21	0,18	0,22	0,38	0,32	0,18
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

Bajo las ETPs calculadas por los 3 métodos la cuenca podría tolerar los cultivos de papa sin llegar a necesitar excedentes de riego, exceptuando por el mes de enero por el método de Turc que necesitaría un suministro extra muy bajo.

5.4.2. B.H.A. del tomate

Tabla 20, B.H.A. del tomate con la ETP según Turc, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DEL TOMATE												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	80,45	74,23	75,79	71,79	69,28	67,39	69,90	70,94	71,73	70,47	72,91	76,26
Kc	0,60	0,60	0,60	0,85	0,85	0,85	1,15	1,15	1,15	0,80	0,80	0,80
Etr (mm)	48,27	44,54	45,47	61,02	58,89	57,28	80,38	81,58	82,49	56,37	58,33	61,00
Pre Total (mm)	32,17	47,99	68,48	102,09	94,50	56,02	54,43	48,16	60,53	101,60	89,34	52,05
Pre efec (mm)	19,30	28,80	41,09	61,25	56,70	33,61	32,66	28,90	36,32	60,96	53,61	31,23
Dotacion Bruta (mm)	28,97	15,74	4,39	0	2,19	23,67	47,73	52,68	46,18	0	4,72	29,78
Eficiencia de Riego	48,28	26,24	7,31	0	3,65	39,45	79,54	87,80	76,96	0	7,87	49,63
Volumen (m³)	4441,17	6624,80	9452,35	14092,59	13044,34	7733,15	7513,06	6647,88	8355,81	14024,91	12333,04	7184,78
Caudal (m³/seg)	1,59	2,15	3,39	4,89	4,68	2,69	2,70	2,39	2,90	5,03	4,28	2,58
Caudal (L/s*ha)	0,12	0,16	0,25	0,35	0,34	0,19	0,20	0,17	0,21	0,36	0,31	0,19
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

Tabla 21, B.H.A. del tomate con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DEL TOMATE												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	25,85	21,92	20,78	17,92	18,39	17,51	19,11	18,67	17,60	18,37	21,10	25,16
Kc	0,60	0,60	0,60	0,85	0,85	0,85	1,15	1,15	1,15	0,80	0,80	0,80
Etr (mm)	15,51	13,15	12,47	15,23	15,63	14,89	21,98	21,47	20,24	14,70	16,88	20,13
Pre Total (mm)	39,09	50,20	70,68	102,44	94,02	58,18	59,17	49,41	64,49	105,74	93,48	49,99
Pre efec (mm)	23,45	30,12	42,41	61,46	56,41	34,91	35,50	29,65	38,70	63,44	56,09	29,99
Dotacion Bruta (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eficiencia de Riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volumen (m³)	5396,06	6930,07	9756,06	14140,80	12978,78	8030,61	8167,82	6820,42	8902,43	14596,46	12904,00	6900,27
Caudal (m³/seg)	1,94	2,25	3,50	4,91	4,66	2,79	2,93	2,45	3,09	5,24	4,48	2,48
Caudal (L/s*ha)	0,14	0,16	0,25	0,36	0,34	0,20	0,21	0,18	0,22	0,38	0,32	0,18
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

Tabla 22, B.H.A. del tomate con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DEL TOMATE												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	30,80	28,80	36,98	37,05	39,96	34,92	32,53	35,33	31,55	36,63	33,71	34,32
Kc	0,60	0,60	0,60	0,85	0,85	0,85	1,15	1,15	1,15	0,80	0,80	0,80
Etr (mm)	18,48	17,28	22,19	31,49	33,97	29,69	37,41	40,63	36,28	29,30	26,97	27,46
Pre Total (mm)	39,09	50,20	70,68	102,44	94,02	58,18	59,17	49,41	64,49	105,74	93,48	49,99
Pre efec (mm)	23,45	30,12	42,41	61,46	56,41	34,91	35,50	29,65	38,70	63,44	56,09	29,99
Dotacion Bruta (mm)	0	0	0	0	0	0	0	10,98	0	0	0	0
Eficiencia de Riego	0	0	0	0	0	0	0	18,30	0	0	0	0
Volumen (m³)	5396,06	6930,07	9756,06	14140,80	12978,78	8030,61	8167,82	6820,42	8902,43	14596,46	12904,00	6900,27
Caudal (m³/seg)	1,94	2,25	3,50	4,91	4,66	2,79	2,93	2,45	3,09	5,24	4,48	2,48
Caudal (L/s*ha)	0,14	0,16	0,25	0,36	0,34	0,20	0,21	0,18	0,22	0,38	0,32	0,18
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

A excepción de los casos de las ETPs según Thornthwaite y García y López, con una ETP entre 68mm/mes y 82mm/mes en lo corrido del año la cuenca necesitaría un suministro adicional para dar abasto a la necesidad de agua de los cultivos de tomate, ésta suministro extra aumenta notablemente en las temporadas secas.

5.4.3. B.H.A. del fríjol

Tabla 23, B.H.A. del frijol con la ETP según Turc, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DEL FRÍJOL												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	80,45	74,23	75,79	71,79	69,28	67,39	69,90	70,94	71,73	70,47	72,91	76,26
Kc	0,50	0,50	0,50	0,80	0,80	0,80	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90
Etr (mm)	40,23	37,12	37,89	57,43	55,42	53,91	76,89	78,03	78,91	63,42	65,62	68,63
Pre Total (mm)	32,17	47,99	68,48	102,09	94,50	56,02	54,43	48,16	60,53	101,60	89,34	52,05
Pre efec (mm)	19,30	28,80	41,09	61,25	56,70	33,61	32,66	28,90	36,32	60,96	53,61	31,23
Dotacion Bruta (mm)	20,92	8,32	0	0	0	20,30	44,23	49,13	42,59	2,46	12,01	37,40
Eficiencia de Riego	34,87	13,87	0	0	0	33,83	73,72	81,89	70,98	4,10	20,02	62,33
Volumen (m³)	4441,17	6624,80	9452,35	14092,59	13044,34	7733,15	7513,06	6647,88	8355,81	14024,91	12333,04	7184,78
Caudal (m³/seg)	1,59	2,15	3,39	4,89	4,68	2,69	2,70	2,39	2,90	5,03	4,28	2,58
Caudal (L/s*ha)	0,12	0,16	0,25	0,35	0,34	0,19	0,20	0,17	0,21	0,36	0,31	0,19
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

Tabla 24, B.H.A. del frijol con la ETP según Thornthwaite, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DEL FRIJOL												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	25,85	21,92	20,78	17,92	18,39	17,51	19,11	18,67	17,60	18,37	21,10	25,16
Kc	0,50	0,50	0,50	0,80	0,80	0,80	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90
Etr (mm)	12,93	10,96	10,39	14,33	14,71	14,01	21,02	20,54	19,36	16,53	18,99	22,64
Pre Total (mm)	39,09	50,20	70,68	102,44	94,02	58,18	59,17	49,41	64,49	105,74	93,48	49,99
Pre efec (mm)	23,45	30,12	42,41	61,46	56,41	34,91	35,50	29,65	38,70	63,44	56,09	29,99
Dotacion Bruta (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eficiencia de Riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volumen (m³)	5396,06	6930,07	9756,06	14140,80	12978,78	8030,61	8167,82	6820,42	8902,43	14596,46	12904,00	6900,27
Caudal (m³/seg)	1,94	2,25	3,50	4,91	4,66	2,79	2,93	2,45	3,09	5,24	4,48	2,48
Caudal (L/s*ha)	0,14	0,16	0,25	0,36	0,34	0,20	0,21	0,18	0,22	0,38	0,32	0,18
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²2)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

Tabla 25, B.H.A. del frijol con la ETP según García y López, Fuente: Autores 2016

BALANCE AGRICOLA DEL FRIJOL												
Parámetros	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etp (mm)	30,80	28,80	36,98	37,05	39,96	34,92	32,53	35,33	31,55	36,63	33,71	34,32
Kc	0,50	0,50	0,50	0,80	0,80	0,80	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90
Etr (mm)	15,40	14,40	18,49	29,64	31,97	27,94	35,79	38,86	34,70	32,96	30,34	30,89
Pre Total (mm)	39,09	50,20	70,68	102,44	94,02	58,18	59,17	49,41	64,49	105,74	93,48	49,99
Pre efec (mm)	23,45	30,12	42,41	61,46	56,41	34,91	35,50	29,65	38,70	63,44	56,09	29,99
Dotacion Bruta (mm)	0	0	0	0	0	0	0	9,22	0	0	0	0
Eficiencia de Riego	0	0	0	0	0	0	0	15,36	0	0	0	0
Volumen (m³)	5396,06	6930,07	9756,06	14140,80	12978,78	8030,61	8167,82	6820,42	8902,43	14596,46	12904,00	6900,27
Caudal (m³/seg)	1,94	2,25	3,50	4,91	4,66	2,79	2,93	2,45	3,09	5,24	4,48	2,48
Caudal (L/s*ha)	0,14	0,16	0,25	0,36	0,34	0,20	0,21	0,18	0,22	0,38	0,32	0,18
Periodo vegetativo	31,00	28,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00	31,00	30,00	31,00	30,00	31,00
Area de la cuenca (km²2)	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04	138,04
Area de la cuenca (Ha)	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00	13804,00

Al igual que en los cultivos de papa y tomate, con las ETPs según Thornthwaite y García y López, los cultivos de frijol podrían subsistir sin un suministro extra en lo corrido del año, por el contrario, bajo una ETP entre 68mm/mes y 82mm/mes exceptuando los meses de marzo, abril y mayo, a lo largo del año sería necesario un suministro de agua extra que aumenta en las temporadas secas, que es similar al del tomate.

Al examinar los cultivos de tomate, papa y frijol en la cuenca se observa que los cultivos de papa no necesitarían un suministro extra importante para subsistir satisfactoriamente en ninguno de los casos de las ETPs, por el contrario, para los cultivos de tomate y frijol se necesitaría un suministro extra (a excepción del método de Thornthwaite donde no se necesita suministro extra) para mantener los cultivos en las temporadas secas del año. Teniendo en cuenta que la metodología del balance hídrico agrícola no contempla dentro de sus cálculos un sistema de riego para cada cultivo, los cultivos analizados no llegarían a generar un impacto negativo sobre el suelo mientras estos tengan su respectivo sistema de riego.

6. CONCLUSIONES

- Al analizar las series de tiempo entre 1980 y 2015 no se puede concluir que exista un déficit de agua en la cuenca, de los 36 años analizados en el área aledaña a la vía, únicamente cinco años presentaron un balance desfavorable, el 2014 es el más crítico con 227 mm por hectárea en promedio en el área aledaña a la vía, en cuanto a la variación de las entradas menos las salidas ($P - ET_0$), la tendencia bimodal de las precipitaciones no se ve afectada. Por lo que en los primeros meses las evapotranspiraciones van a ser mayor a las precipitaciones en muchos de los casos, pero en los meses de mitad de año las lluvias se incrementan y se subsana este déficit. Omitiendo el año 2015 los últimos 10 años ha habido seis años por debajo del promedio de lluvias.
- Las superficies y las estadísticas zonales, son dos productos de este estudio que sirven para ver tendencias, y cuantificar estas con las tablas de estadísticas zonales por lo que son complementarias. Se detectó como patrón una tasa alta de evapotranspiración en el sector sur de la cuenca, arriba de su desembocadura con el río Bogotá.
- La precipitación en la zona de estudio tiene un comportamiento bimodal la cual se divide en temporada lluviosa (marzo, abril, mayo – septiembre, octubre, noviembre) y temporada seca (diciembre, enero, febrero – junio, julio, agosto).
- La evapotranspiración con cultivo de referencia calculada en base a la Evaporación de lámina de agua, siempre va a estar por debajo de los 1000 mm anuales, aunque esta depende del coeficiente de cada cultivo. Se puede afirmar que esta variable es constante a lo largo de los 36 años en que se estudió, y a lo largo del año las variaciones no son una tendencia en todas las estaciones.
- Efectuar cualquier método de cálculo de la ETP depende de la calidad de los datos (existencia y coherencia de los mismos) que se tengan de las variables requeridas para efectuar cada uno de ellos, evitando el usar métodos de completar datos faltantes y alterar el producto final.
- La Cuenca del río Chicú va a presentar déficits de agua en las temporadas secas del año siempre y cuando esté presente una ETP mayor a 68mm/mes o al valor de la precipitación correspondiente al mes en cuestión, de lo contrario la cuenca presentará excedentes de agua al presentarse una ETP inferior a 43mm/mes.

- Al aplicar estos 3 métodos de cálculo de la ETP se observa que mayoritariamente la cuenca en lo corrido del año, va a tener disponibles excedentes de agua y en los meses correspondientes a las temporadas secas se llegaría a tener una disponibilidad moderada pero aún existente del recurso hídrico lo cual se observa por los métodos de Thornthwaite y García y López; aunque en el caso del método de Turc la disponibilidad se ve directamente relacionada a las temporadas secas y lluviosas en lo corrido del año, existiendo excedentes de agua en las temporadas lluviosas y déficit y disponibilidad moderada en las temporadas secas cuando la ETP supera el valor de la precipitación media mensual.
- Para una ETP superior a 68mm/mes la cuenca del río Chicú presentan déficit hídrico en los meses de enero, febrero, marzo, septiembre y diciembre siendo el total anual de 74,2 para la Zona General y 95,1 para la cuenca del río Chicú, y para los demás meses habrá una reserva cuyo total anual es de 246mm para la cuenca del río Chicú.
- Para valores de la ETP menores a 43mm/mes la zona de estudio presentaran excedentes superiores a 380mm anuales y la reserva del suelo en su mayoría a lo largo del año se encontrará en su capacidad máxima.
- En lo corrido del año siguiendo los resultados de los métodos de Thornthwaite y García y López, la cuenca tendrá disponible completamente su reserva máxima, presentando igualmente excedentes de agua los cuales, siguiendo la teoría del Thornthwaite del balance hídrico de suelo se dividen en partes iguales convirtiéndose en escorrentía que alimenta los cauces de la cuenca y en infiltración que traspasa el estrato orgánico hacia los estratos más profundos. Por el contrario, por el método de Turc no se generarían excedentes y se presentarían déficits de agua correspondientes a la primera temporada seca del año y una parte de la segunda, sin embargo, aunque se presentan déficits de agua, la reserva acumulada total es mayor que los déficits totales haciendo que predomine un estado positivo de disponibilidad hídrica en lo corrido del año.
- La evapotranspiración potencial (ETP) presenta sus picos más altos por los 3 métodos del cálculo usados, en los periodos de tiempo donde se producen los mayores eventos de precipitación. Esto es ocasionado debido a que hay mayor disponibilidad del recurso hídrico para que se infiltre, se escurra y evapore.
- La cuenca del río Chicú podrá sustentar satisfactoriamente los cultivos de papa, frijol y tomate mientras se encuentre una ETP menor de 43mm/mes, en el caso de que la ETP sea mayor a 68mm/mes los cultivos de frijol y tomate

necesitaran un sistema de riego complementario para evitar la sobreexplotación del suelo.

RECOMENDACIONES

- Para un estudio más completo es importante ampliar los límites del sistema e involucrar lo que es flujo de agua subterránea, incorporando las características del suelo, puede ser de utilidad estudiar en primer lugar el primer tramo de la carretera que colinda con los límites de la cuenca hacia en Sur.
- Agregar las intervenciones antrópicas sobre el uso del agua como las captaciones del río y explotación de agua subterránea, incluyendo las diferentes especies de vegetación foránea.
- Determinar la distribución de caudales dentro de la cuenca para poder observar el B.H.C. sectorizado dentro de la cuenca e igualmente en las zonas aledañas para comparar el comportamiento. Esto también para el B.H.S. con respecto a la reserva del suelo de las zonas aledañas.
- Para incorporar la variable del suelo es necesario incorporar datos actualizados del estado actual del suelo arcilloso de la subrasante de la vía, así como el suelo cercano a esta.
- Algo de importancia para un estudio posterior sería en base a esa tendencia de temperatura, validar estos cálculos hechos e indagar si hay una tendencia mayor a la de la región de Cundinamarca a incrementarse la temperatura, también puede ser interesante ver cómo podrían estar afectando la gran cantidad de invernaderos.
- Llevar a cabo mediciones de los caudales en las zonas de estudio para obtener una completa veracidad en los datos a tratar y no requerir a aproximaciones conceptuales.
- Agregar a los cálculos de la ETP un método que use el viento como variable, para ampliar los escenarios de estudio.

REFERENCIAS

_____.CARta ambiental [Formato PDF]. Bogotá D.C. diciembre de 2010. Edición N° 25. ISSN-0213

_____. Mi tierra es Tenjo, Datos ambientales, recurso en línea disponible en: <http://mitierraestenjo.page.tl/Datos-ambientales.htm> [consultado el 12 de agosto de 2016]

_____.Fondo Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres, Colombia Humanitaria Una iniciativa nacional [página web]. En: <<http://www.colombiahumanitaria.gov.co/Paginas/QueesColombiaHumanitaria.aspx>>

A.A. SOKOLOV, T.G. CHAPMAN. Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos. Insittuto de Hidrolog{ia de España y UNESCO. 1981.

Alcaldía de Tabio – Cundinamarca, Información General, recurso en línea disponible en: http://www.tabio-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml [consultado el 12 de agosto de 2016]

Alcaldía de Tenjo: Nuestro Municipio [en línea]. Fecha de última actualización: 17 de marzo 2015, [citado 12 de mayo del 2016]. URL: <http://www.tenjo-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml>

ALLEN, Richard, et al. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación. Roma. 2006. ISBN 92-5-304219-2

BARCA, Emanuele y PASSARELLA Giuseppe. Similarity índices of meteo-climatic gauging stations for missing data handling: definition and comparison with the MICE method. Conferencia: Procedimietnos del GRASPA2015. Bari, Italia. Junio 2015. En: https://www.researchgate.net/publication/278390150_Similarity_indices_of_meteo-climatic_gauging_stations_for_missing_data_handling_definition_and_comparison_with_the_MICE_method.

BENAVIDES, H. ROCHA, C., Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [Citado 23 de Agosto 2016].Bogotá. 2012. URL: <<http://documentacion.ideam.gov.co>>

BIVAND, ROGER. KEITT, TIM. Rgdal: bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. R package version 1.1-10. 2016. URL < <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>>

BREÑA, Agustín F; JACOBO, Marco A. Principios y fundamentos de la hidrología Superficial. Tlalpan, D.F. México. Universidad Autónoma Metropolitana. 2006.

BUUREN, VAN, STEF. GROOTHUIS, KARIN. Mice: multivariate Imputation by Chained Equations in R. En: Journal of Statistical Software. Volumen 45, número 3. Pags. 1-67. URL:< <http://www.jstatsoft.org/v45/i03/> >

CAR Y HIDROTEC. Estudio para la reglamentación de las corrientes de uso público, cuencas hidrográficas de los ríos Frío, Subachoque y Bogotá. Cuenca del río Subachoque. [en línea]. [Consultado: 27/03/2016]. Disponible en < <http://madridsanpedro.wikispaces.com/Hidrologia>>

CEPAL. Agua para el siglo XXI para América del sur: Informe Colombia [PDF]. Global water partnership. 2000. p. 11.

CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Plan de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá [PDF]. 2006. Pag. 7 [Citado 07 de Agosto 2016].

CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Plan de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá [PDF]. 2006. [Citado 12 de mayo 2016].

DURAN A. María Margarita y CIABATO J. Diego Alejandro, Evaluación de los Impactos Ambientales asociados a la contaminación en Agua, Suelo y Sedimento por Cromo y Zinc, en los municipios de Tabio y Tenjo – Cundinamarca (Sub-Cuenca del río Chicú), pag. 94, [citado el 16 de agosto de 2016]

FAO, Evaporación del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, pag. 111, [citado el 12 de agosto de 2016]

HELMENS, Karin F.; HAMMEN, Thomas van der. Memoria explicativa para los mapas del neogeno-cuaternario de la sabana de Bogotá-cuenca alta del río Bogotá. Bogotá, Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1995. Vol. 24. p. 99.

HURTADO M., Gonzalo. Análisis del Comportamiento Promedio y Tendencias de Largo Plazo de las Temperaturas Mínimas Medias para las Regiones Hidroclimáticas de Colombia.[Citado 23 de Agosto de 2016]. IDEAM. URL: <

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Analisis+del+Comportamiento+de+la+Temperatura+Minima.pdf/fc5b3bcb-ae84-413b-873d-fa7e3f06e8c6> >

IDEAM. Anuario Climatológico 2015. [Citado 23 de Agosto 2016]. URL: < <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual> >

J.A. PINEDA, D. A. GARCIA, M. CABANA. Propiedades de Retención de Humedad de Arcillas Fisuradas: Una herramienta para el análisis de problemas asociados a desecación. 12th latin american and caribbean conference for engineering and technology [Conference Paper]. Julio 22 del 2014. Guayaquil, Ecuador.

LLOYD, Stuart P. Least Squares Quantization in PCM. En: IEEE transactions on information theory. Marzo 1982. Vol IT-28, No 2.p. 129-137

M. Y. RUEDA, J.A. PINEDA. Patologías asociadas a fenómenos de desecación en pavimentos flexibles del occidente de la sabana de Bogotá. XVIII Simposio Colombiano Sobre Ingenieria De Pavimentos, At CARTAGENA, COLOMBIA, Volumen: 1. Abril 2011.

MARTINEZ M., MARCELA y CARVACHO B., LUIS. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Revista de Geografía Norte Grande. Vol. 50. p. 171-186. 2011.

MCKENNEY, M. S. & ROSENBERG, N. J. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, vol. 64, p. 81-110.

MUSAI, J.P. VERSTRAETE, M.M. GOBRON, N. Comparing the Effectiveness of recent algorithms to fill and smooth incomplete and noisy time series. En: Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. Vol. 11. 10 mayo 2011. Pags.: 14259-14308

Periódico El Tiempo [en línea]. Bogotá, Colombia. 23 de enero de 2014. [Citado 3 Septiembre del 2016]. Diario. En: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13397801>. ISSN 0121 – 9987

PINEDA, Jorge Arturo. Una contribución al entendimiento de las problemas de desecación de las arcillas de la Sabana de Bogotá. V jornada de pavimentos y mantenimiento vial: Sociedad Colombiana de Ingenieros [Conference Paper]. Octubre 2005. Bogotá, Colombia.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2016. ISBN 3-900051-07-0.

RENÉ GROTHMANN. Euler Mathtoolbox: numerical and Algebraic Package for Mathematics.

SCHAFER J.L. Analysis of Incomplete Multivariate Data. Ed. Chapman & Hall. Londres 1997

UNESCO. Water for people, water for life: The United Nations World Water development report [PDF]. Unesco publishing y Berghahn Books. 2003. P 4 – 8.

VALDIVIESO OÑATE Fernando, Hidrología, Balance Hídrico, pag. 55 [citado el 16 de agosto de 2016]

W. BUYTAERT, R CELLERI, P WILLEMS, B. DE BIÉVRE y G. WYSEURE. spatial and temporal rainfall variability in mountainous area: A case study from the south Ecuadorian Andes. Journal of Hydrology, Volume 329, Issues 3–4, 15. Octubre 2006. Pags 413-421. Base de datos: Elsevier.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Technical Regulations: Volume III Hydrology. WMO-No. 49. Genova. 2008

BIBLIOGRAFÍA

- A.A. SOKOLOV y T.C. CHAPMAN. Traducción: Rafael Heras Métodos de calculo del balance hídrico. Instituto de Hidrología de España, UNESCO
- CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. Applied Hydrology. Mcgraw-Hill. 1988. ISBN 0-07-010810-2.
- RAGHUNATH, H.M. Hydrology : Principles, Analysis and Design [PDF]. Editorial New Age International.2006. [Base de datos: ProQuest Ebrary]
- TODINI, E. Hydrological catchment modelling: past, present and future [PDF].Universidad de Boloña, Italia. 2007.
- MONSALVE, Germán. Hidrología en la Ingeniería. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería y Alfaomega. 2 Edición. 1999.
- XU, Yanchao. hyfo: Hydrology and Climate Forecasting R Package for Data Analysis and Visualization [en línea]. En: <<http://yuanchao-xu.github.io/hyfo/>>
- MUSIAL, Jan P., VERSTRAETE, Michel M. Y GOBRON Nadie. Technical Note: Comparing the effectiveness of recent algorithms to fill and smooth incomplete and noisy time series. En: Atmospheric Chemistry and Physics, Vol. 11. Agosto 2011. DOI: 10.5194/acp-7905-2011.