



**BALANCE HIDROLÓGICO SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA CACHIRA SUR
MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

AUTORES

Luciano Evelio Lizarazo León 1095932709
Heidy Yineth Perdomo Hernández 1098768715
María Fernanda Torres González 1098743943

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIAS
INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
30 DE NOVIEMBRE DE 2017**



**BALANCE HIDROLÓGICO SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA CACHIRA SUR
MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

AUTORES

Luciano Evelio Lizarazo León 1095932709
Heidy Yineth Perdomo Hernández 1098768715
María Fernanda Torres González 1098743943

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

DIRECTOR

Mauricio Andrés Ruiz Ochoa

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIAS
INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
30 DE NOVIEMBRE DE 2017**

Nota de Aceptación

Firma del jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis primeramente a Dios, quien nos brindó día a día la salud, la fortaleza espiritual y la sabiduría para culminar satisfactoriamente esta tesis de pregrado para obtener el título en ingeniería ambiental.

A nuestros padres, quienes nos dieron vida, educación, consejos y nos brindaron todo el apoyo económico y emocional necesario a lo largo de nuestra carrera profesional.

A todos los familiares que hicieron parte de nuestro proceso de formación como profesionales.

A todos ellos se los agradecemos desde el fondo de nuestra alma y es para ellos esta dedicatoria.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director de tesis el ingeniero Mauricio Andrés Ruiz Ochoa, por habernos brindado la oportunidad de recurrir a sus capacidades, conocimientos y experiencia en el tema elegido para nuestro proyecto de grado así como también habernos orientado durante todo el desarrollo del mismo.

Agradecemos también a las entidades ambientales como la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), por suministrarnos la información necesaria para la realización del presente proyecto.

Nuestro agradecimiento también va dirigido a todos los docentes que fueron partícipes durante todos los semestres de nuestra carrera profesional, por compartir con nosotros sus conocimientos en cada una de las áreas del saber correspondientes a la ingeniería ambiental y por todos los aprendizajes adquiridos gracias a su excelente labor.

Ya para finalizar, agradecemos a las personas que, de una manera u otra, han sido claves en nuestro desarrollo profesional, y por extensión, en lo personal. Gracias por todo el apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	14
1.3. OBJETIVOS	15
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES	15
2. MARCOS REFERENCIALES	17
2.1. MARCO LEGAL.....	17
2.2. MARCO CONCEPTUAL	18
2.2.1. BALANCE HIDROLÓGICO	18
2.2.2. PRECIPITACIÓN	18
2.2.3. ESCORRENTÍA	19
2.2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN	19
2.2.5. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	20
2.3. MARCO TEÓRICO	20
2.3.1. MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	20
2.3.2. MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL	23
2.4. MARCO HISTÓRICO	24
2.4.1. BALANCE HIDROLÓGICO EN COLOMBIA.....	24
3. DISEÑO METODOLÓGICO	26
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	26
3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	26
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA	27
3.3.1. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	29
3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	30
3.4.1. DATOS DE VARIABLES CLIMÁTICAS	30
3.4.2. DATOS DE ESTUDIOS REALIZADOS ANTERIORMENTE EN LA SUBCUENCA CACHIRA SUR	31
3.5. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	31
3.6. CANTIDAD DE AGUA QUE INGRESA A LA SUBCUENCA POR PRECIPITACIÓN	32
3.7. CANTIDAD DE AGUA QUE SALE DE LA SUBCUENCA POR	
EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	32

3.8. BALANCE HIDROLÓGICO SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA CACHIRA SUR	
32	
3.9. COMPARACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN CON ESTUDIOS REALIZADOS	
ANTERIORMENTE	33
<u>4. RESULTADOS</u>	<u>35</u>
4.1. CANTIDAD DE AGUA QUE INGRESA A LA SUBCUENCA POR PRECIPITACIÓN	
35	
4.2. CANTIDAD DE AGUA QUE SALE DE LA SUBCUENCA POR	
EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	42
4.3. BALANCE HIDROLÓGICO SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA CACHIRA SUR	
52	
4.4. COMPARACION INVESTIGACION CON ESTUDIOS REALIZADOS	
ANTERIORMENTE	57
.....	60
.....	60
<u>5. CONCLUSIONES</u>	<u>64</u>
<u>6. RECOMENDACIONES.....</u>	<u>65</u>
<u>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	<u>66</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema funcionamiento de un SIG.....	20
Figura 2. Localización de la Subcuenca Cachira Sur.	28
Figura 3. Ubicación estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación.....	30
Figura 4. Ciclo anual de la precipitación de la Subcuenca Cachira Sur.	35
Figura 5. Mapas de precipitación mensual multianual (1967-2016).....	37
Figura 6. Mapas de precipitación media mensual multianual y anual de la Subcuenca Cachira Sur.....	41
Figura 7. Mapas de evapotranspiración potencial mensual multianual (2011-2016).....	43
Figura 8. Mapas de evapotranspiración real mensual multianual (2011-2016).....	47
Figura 9. Mapas de evapotranspiración real media mensual multianual y anual.	51
Figura 10. Mapas del balance hidrológico superficial de la Subcuenca Cachira Sur.	53
Figura 11. Mapa del balance hidrológico superficial anual de la Subcuenca Cachira Sur.	56
Figura 12. . Mapas del balance hidrológico consultoría CE&A (2009).	59
Figura 13. Mapa del balance hidrológico anual obtenido del estudio realizado por la consultoría CE&A.	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco legal del proyecto.....	17
Tabla 2. Listado de las estaciones meteorológicas utilizadas.....	28

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto se enfocó en la realización de un balance hídrico superficial de la Subcuenca Cachira Sur usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de calcular la disponibilidad neta mensual del recurso hídrico. El balance fue calculado a través de datos de estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de influencia del proyecto e ingresados en *shapes* proporcionados por la CDMB correspondientes a la Subcuenca Cachira Sur. Para determinar la cantidad de agua que entra a la Subcuenca se utilizó el método de isoyetas para estimar la precipitación media en la Subcuenca. Para el caso de la cantidad de agua que sale por evapotranspiración se aplicaron diferentes métodos de cálculo de la misma. Con los resultados de precipitación y evapotranspiración real de la Subcuenca Cachira Sur, se realizó el balance hídrico a través de álgebra de mapas en ArcGIS. Estos resultados fueron comparados con estudios previos que usaron métodos manuales para el cálculo del balance hidrológico superficial. Luego se analizaron las diferencias y semejanzas entre cada uno de los métodos (manual vs. SIG), y con ello se estableció la efectividad de los SIG en la solución de cálculos hidrológicos. En promedio, la cantidad de agua que ingresó a la Subcuenca osciló entre 65.45 y 198.42 mm/mes y 1,282 mm/año de precipitación. La cantidad de agua que salió por evapotranspiración real fue 1,282 mm/año y se obtuvo un valor medio mensual de 106.84 mm/mes. Se dedujo que la disponibilidad neta anual de agua para la Subcuenca Cachira sur en el periodo de estudio analizado se encuentra entre rangos que van desde 148.07 hasta 1,233 mm/año.

PALABRAS CLAVE. SIG (Sistemas de Información Geográfica), Balance hidrológico, Precipitación, Evapotranspiración, Subcuenca, *Raster*.

ABSTRACT

This project focused in the achievement of a superficial water balance of the Subbasin South Cachira using Geographical information systems (SIG) with the target to calculate the monthly clear availability of the water resource. The balance was calculated across information of meteorological stations located in the area of influence of the project and deposited in shapes provided by the CDMB corresponding to the Subbasin South Cachira. To determine the water quantity that enters the Subbasin the isoyetas method was used to estimate the average precipitation in the Subbasin. For the case of the water quantity that goes out for evapotranspiration there were applied different methods of calculation of the same one. With the results of precipitation and real evapotranspiration of the Subbasin South Cachira, the water balance was realized across maps algebra in ArcGIS. These results were compared with previous studies that used manual methods for the calculation of the balance hidrologic superficially. Then the differences and resemblances were analyzed between each of the methods (manual vs. SIG), and with it the effectiveness of the SIG was established in the calculations solution hidrologic. In average, the water quantity that enters to the Subbasin ranged between 65.45 and 198.42 mm / month and 1,282 mm / year of precipitation. The water quantity that goes out for real evapotranspiration decided in 1,282 mm / year and a 106.84 mm / month monthly average value. It is deduced that the annual clear water availability for the Subbasin south Cachira in the period of analyzed study is between status that go from 148.07 up to 1,233 mm / year.

KEYWORDS: GIS (Geographic Information Systems), Hydrological balance, Precipitation, Evapotranspiration, Subbasin, raster.

INTRODUCCIÓN

El balance hidrológico está basado en el principio de que “durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua” (IDEAM, s.f.). Dicho en otras palabras, el balance hidrológico se da cuando la cantidad de agua que entra a una cuenca en forma de precipitación es la misma cantidad que sale en forma de evapotranspiración. Al ser éste un proceso natural de la tierra, el estudio del ciclo hidrológico se remonta desde hace miles de años.

Marcus Vitruvius, en el siglo I d.C., describió una teoría filosófica del ciclo hidrológico, en la cual se decía que la precipitación que cae en las montañas se infiltra en la superficie de la tierra y provoca corrientes y brotes en las tierras bajas. Con la adopción de un acercamiento más científico, Leonardo da Vinci y Bernard Palissy alcanzaron de forma independiente una representación exacta del ciclo hidrológico. Hasta el siglo XVII no empezaron a cuantificarse las variables hidrológicas (Ciclo Hidrológico, s.f.).

A medida que iban pasando los años, diversos autores fueron realizando aportes para que el estudio del balance hídrico fuera cada vez más exacto y se tuvieran en cuenta todos los factores o variables que intervienen en este proceso, tal es el caso de autores como Green & Ampt (1911), Kostiaknow (1932), Horton (1933, 1940), Kirkham (1947), Philip (1957), Tischendorf (1969), Holtan (1961, 1975), Sánchez & Blanco (1985), y Gandullo (1985). Cada uno de ellos mediante sus trabajos intentó dar explicación a los fenómenos hidrológicos que ocurren en una cuenca. De esta manera y basándose en la invención de nuevas teorías o en las observaciones producto de sus experiencias de campo, algunos desarrollaron expresiones para evaluar la capacidad de infiltración y su evolución en el tiempo, otros abarcaron temas como el movimiento del agua en la cuenca, la dependencia entre las tasas de infiltración y el contenido previo de humedad del suelo o los métodos indirectos basados en técnicas paramétricas para el cálculo de la capacidad de retención de agua, entre otros.

Sin embargo, los balances hidrológicos adquirieron mayor auge cuando se estableció el concepto de “evapotranspiración potencial” para un terreno (Thornthwaite, 1948, 1955).

Este climatólogo norteamericano halló una fórmula para su cálculo mensual, basada en experiencias realizadas con lisímetros. El cálculo pormenorizado, mes a mes, de las entradas de agua al sistema (lluvias), pérdidas por evaporación y transpiración de la vegetación, agua retenida en el perfil edáfico y agua percolada a drenaje profundo, permitía establecer balances hídricos para un lugar determinado y a lo largo de un año meteorológico o el año climático medio (Thornthwaite & Mather, 1957). Posteriormente, otros autores (Penman, 1948, 1963; Blaney & Criddle, 1950; Blaney, 1955; Turc, 1961; Van & Bavel, 1966; etc.) establecieron también métodos paramétricos de cálculo de la “evapotranspiración potencial”, que han sido manejados (lo son, en la actualidad) con mayor o menor éxito y que, a su vez, han sido utilizados en los balances hídricos con ligeras variantes (Cerezuela, 1977; Montero de Burgos y González Rebollar, 1974) (Blanco, Cisneros, Martínez, s.f., p. 12).

Con el paso del tiempo y el avance de la tecnología, se han logrado realizar estudios usando distintas herramientas que permitan garantizar que los resultados obtenidos sean más exactos. Un ejemplo de esto, ha sido el uso de los SIG para el desarrollo de proyectos de ingeniería que requieran resultados más precisos, rápidos, con manejo de grandes cantidades de datos, menores porcentajes de error y de aplicación no sólo en las ramas de la hidrología sino también en otras áreas del saber. En Colombia, en las universidades de todas las ciudades se han desarrollado proyectos de balances hidrológicos mediante el uso de SIG y los resultados han sido muy satisfactorios. Por ejemplo, en la Universidad de Manizales, un estudiante orientó su proyecto hacia la determinación de áreas estratégicas para el abastecimiento hídrico de la zona urbana del municipio de Ortega-Tolima a través de ArcGIS. Los resultados obtenidos fueron importantes, ya que permitieron brindar información desconocida hasta el momento sobre el recurso hídrico en una zona donde poco se habían realizado estudios de investigación sobre ese tema y usando una herramienta digital, lo cual genera mayor certeza e innovación.

Con base en esto, el presente proyecto está enfocado en la realización del balance hidrológico superficial en la Subcuenca Cachira Sur, la cual está localizada en los municipios de Suratá, El Playón y Rionegro en el departamento de Santander, para así conocer la disponibilidad neta mensual del recurso hídrico. Basados en los SIG, específicamente usando como herramienta computacional el software ArcGIS, se pretende mostrar a través de álgebra de mapas y usando distintos métodos de cálculo, cómo ha sido la variación de la precipitación y la evapotranspiración, para así determinar los déficits y excesos presentes en la Subcuenca que le permitan a las autoridades ambientales establecer planes de manejo, estrategias de conservación, control y toma de decisiones de forma más rápida y efectiva sobre el uso óptimo, adecuado y racional de la Subcuenca Cachira Sur. Las observaciones e investigaciones relacionadas con procesos hidrológicos son útiles ya que proporcionan conocimientos para la ingeniería ambiental, política y planificación. Además de esto, también se usan para hacer predicciones sobre el futuro comportamiento de los sistemas hidrológicos, sobre todo en cuencas donde existen muy pocos datos o no se tiene ninguno, como es el caso de la Subcuenca Cachira Sur.

Por otro lado, el establecimiento del balance hídrico en una cuenca o región determinada permite obtener información sobre: (1) las características de una cuenca, (2) el volumen anual de precipitación y evapotranspiración, (3) el período en el que se producen excesos de agua y por ende, la infiltración o recarga de la cuenca y (4) el período en el que se produce un déficit de agua, escasez o sequía y el cálculo de demanda de agua para riego en ese período. Por todas estas razones, se puede afirmar que la realización de este proyecto enfocado en el cálculo del balance hidrológico en la Subcuenca Cachira Sur es necesaria para conocer con exactitud su funcionamiento y el movimiento del agua para posteriormente definirlo y así aprovechar de forma racional este recurso hídrico en el espacio y en el tiempo así como para mejorar su control y redistribución. Además, es un aporte para el conocimiento de una zona en la cual no se han realizado estudios de investigación que brinden información sobre si la oferta y demanda hídrica necesaria para abastecer a la población de esta zona es la adecuada.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Subcuenca Cachira Sur hace parte de la jurisdicción de la CDMB, se encuentra localizada al Nor-orienté del departamento de Santander, ocupa parte de tres municipios (Suratá, Rionegro y El Playón) y 47 veredas en total. Los municipios en donde se encuentra localizada la Subcuenca hacen parte de una de las provincias más importantes del departamento por estar ubicada allí la mayor concentración de población y porque su capital de provincia es también la capital de departamento, la sumatoria de las poblaciones de las cuales hace parte la Subcuenca es de 42185 habitantes (DNP, 2015) y cuenta con 52 fuentes hídricas superficiales. El crecimiento demográfico y las actividades de la región ha hecho que la disponibilidad del agua se convierta en una problemática actual debido a que no se conoce de forma concisa la cantidad de agua que ingresa-sale a la Subcuenca en forma de precipitación-evapotranspiración y que puede abastecer a la población del área de estudio. Como consecuencia a la falta de información acerca de estas disponibilidades hídricas no se pueden diseñar planes de control para el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades. Por ende, si esta situación continua no se tendrá un manejo adecuado de las fuentes hídricas superficiales, la población no estará preparada para afrontar situaciones de riesgo y emergencias relacionadas con el recurso agua tales como inundaciones, periodos de sequias, fenómenos El Niño y La Niña, entre otros.

Sumado a esto, los métodos manuales usados para el cálculo de balances hidrológicos son demorados e incluso no son 100% confiables, debido a que están sujetos a operaciones que involucran aproximaciones, redondeos, y errores de cálculo; además son un obstáculo para la toma rápida de decisiones por parte de las autoridades ambientales, quienes prefieren dar credibilidad a investigaciones o proyectos que involucren tecnologías y/o uso de sistemas de programación informática tales como los SIG que agilizan la obtención de resultados, y los porcentajes de error existen pero son mínimos en comparación con los métodos manuales.

Con base a esto, la pregunta de investigación se enfocó en determinar ¿De qué manera un SIG puede ser utilizado para realizar un balance hidrológico en la Subcuenca Cachira Sur? Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, surgieron otras preguntas de soporte:

1. ¿Cuál es la cantidad de agua que entra en forma de precipitación a la Subcuenca Cachira Sur?
2. ¿Cuál es la cantidad de agua que sale en forma de evapotranspiración a la Subcuenca Cachira Sur?
3. ¿Cuál ha sido la variación en la disponibilidad del recurso hídrico por precipitación y evapotranspiración en comparación con estudios realizados anteriormente?

1.2. JUSTIFICACIÓN

El balance hidrológico superficial es de vital importancia en la actualidad porque permite conocer en términos de masa el volumen hídrico; de este modo se realiza una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre.

La Subcuenca Cachira Sur consiste en una unidad de drenaje que forma parte de la cuenca del río Lebrija aportando importantes volúmenes de agua al sistema hídrico para así suplir las necesidades de la población, sus actividades diarias y actividades económicas. Realizar el balance hidrológico permite conocer la cantidad de agua que ingresa-sale a la Subcuenca por precipitación y evapotranspiración en un periodo de tiempo específico, que de forma directa contribuye a determinar el nivel de caudales medios de los tributarios que van a suplir las plantas de tratamiento de agua potable de la población, por lo tanto, permite definir los periodos de sequías y de tiempos lluviosos y tomar planes de acción como almacenamientos de agua o encauce de las fuentes hídricas en periodos de altas precipitaciones para evitar tragedias.

Por otro lado, cabe resaltar el uso de los SIG como herramientas en tecnologías que dinamizan no solo la solución de problemas sino que también generan nuevos conocimientos, partiendo de información geográfica ya establecida y que han sido aplicados en diferentes campos del desarrollo y en muchas disciplinas del saber. Una de ellas ha sido la hidrología, que al asociar datos geográficos, topográficos, geológicos, de drenajes, climatológicos, entre otros, ha visto en esta herramienta una base de desarrollo e investigación con aplicaciones al manejo de recursos hídricos. Además de esto, los SIG ofrecen herramientas que suelen ser mucho más rápidas y precisas a la hora de estimar las distintas variables hidrológicas. ArcGIS es una de las principales plataformas usadas en el campo de los SIG, sin embargo también se han creado otras de igual importancia tales como *ArcView*, *Map Windows*, *GvSIG*, o *Quantum SIG*, todas encaminadas hacia la recolección de grandes cantidades de datos vinculados a una referencia espacial, para su posterior organización, almacenamiento, manipulación, edición, análisis y modelización.

Con la presente investigación se calculó este balance hidrológico a partir de un SIG, para así automatizar los métodos manuales en el cálculo de variables hidrológicas y a su vez, convertirla en una fuente de consulta porque actualiza e incorpora datos de precipitación y evapotranspiración de la Subcuenca Cachira Sur de forma más práctica, permitiéndole a entidades ambientales como la CDMB tomar decisiones de una manera más rápida y eficaz en cuanto a su manejo. De otro modo, también permitirá planificar la Subcuenca cumpliendo con el decreto reglamentario 1729 de 2002, así como conocer como ha sido la variabilidad climatológica y definir de una forma actualizada los usos y concesiones de agua en base a valores reales para cumplir con el decreto 1541 de 1978.

Esta propuesta es importante porque permite automatizar el cálculo de los balances hidrológicos en cualquier cuenca o Subcuenca a partir de SIG. Además de esto, el desarrollo de esta propuesta es de aplicabilidad en el campo de la hidrología para que entidades ambientales tales como la CDMB actualicen en su base de datos la información

correspondiente a cuencas hidrográficas, específicamente la Subcuenca Cachira Sur y de esta manera, tener acceso con mayor facilidad a estos datos para la toma más rápida, eficiente y segura de decisiones que permitan mejorar el manejo de la Subcuenca, conservarla y a su vez crear estrategias, programas o normatividad para su uso sostenible.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Calcular la disponibilidad neta mensual del recurso hídrico en la Subcuenca Cachira Sur mediante la realización del balance hidrológico superficial basado en un SIG.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la cantidad de agua superficial que entra en forma de precipitación a la Subcuenca Cachira Sur mediante un SIG
- Determinar la cantidad de agua superficial que sale en forma de evapotranspiración de la Subcuenca Cachira Sur mediante un SIG
- Comparar los resultados obtenidos en la presente investigación con estudios previamente realizados en la zona para analizar las variaciones hídricas presentes en la Subcuenca luego de usar la metodología propuesta.

1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

La creciente necesidad de un conocimiento en hidrología Colombiana en áreas como el planeamiento territorial, ha motivado el estudio de la distribución espacial sobre Colombia del comportamiento a largo plazo de las variables hidrológicas de mayor importancia (precipitación, evaporación, escorrentía); por lo tanto se escogió una metodología de balances hídricos de largo plazo, para la cual es necesaria la construcción de mapas digitales a través de sistemas de información geográfica.

En el año 2008, (Mesa et al.), pertenecientes a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, pregrado de ingeniería civil, presentaron HidroSIG, el cual es:

Un sistema de información geográfico (SIG) para la estimación, despliegue, análisis y consulta interactiva de las variables más importantes del ciclo hidrológico en Colombia, tales como precipitación, evaporación potencial y real y escorrentía, tanto a nivel anual como mensual. El SIG ha sido creado utilizando el lenguaje IDL. Es un SIG flexible y versátil para la estimación hidrológica en cuencas con y sin medición, ya que permite estimar los caudales promedios de largo plazo en cualquier punto de la hidrografía Colombiana, usando la metodología de balances hídricos de largo plazo.
(Mesa et al., 2008, p.1)

De acuerdo a lo establecido en el presente artículo, se concluye que este método se realiza teniendo en cuenta la mayor cantidad de datos posibles, y que su principal objetivo es

convertirse en una herramienta de consulta versátil y fácil de manejar en todos los proyectos que necesiten determinar las características climáticas e hidrológicas de una determinada región, su potencial hídrico y características topográficas.

Estudios desarrollados en otros departamentos de Colombia aunque no han estado enfocados principalmente en la realización del balance hidrológico de una única cuenca, si ha sido necesario realizarlos para resolver otras investigaciones relacionadas con la oferta hídrica disponible en otras áreas de estudio y con el uso de SIG, tal es el caso del trabajo de grado presentado por Tafur en el año 2016, un estudiante de la Universidad de Manizales que orientó su proyecto hacia la determinación de áreas estratégicas para el abastecimiento hídrico de la zona urbana del municipio de Ortega-Tolima a través de ArcGIS 10.2.2. En busca de facilitar los cálculos hidrológicos, él utilizó ArcGIS como herramienta para hallar el balance hídrico a largo plazo y el caudal medio y de esta manera poder encontrar la oferta hídrica de la zona de estudio. Como se manifiesta en dicho trabajo:

Según (Cortolima, 2015), se calcula el área del tamaño de los píxeles, se desarrolla la ecuación del balance hídrico de largo plazo (1) y el resultado de esta operación, se multiplica por el área del píxel, obteniéndose el volumen de agua (caudal), que cada uno de los píxeles aporta durante el periodo de tiempo de datos analizados (Tafur, 2016).

De esta manera, se puede afirmar que ArcGIS se plantea como un software que permite realizar cálculos hidrológicos de forma fácil, eficiente y rápida con respecto a otros métodos que no pueden ser tan precisos ni totalmente confiables. Además, cabe destacar que poco a poco se ha ido implementando el uso de los SIG para el desarrollo de los proyectos en la actualidad porque son plataformas que cada día cogen mayor auge en un mundo donde la tecnología se hace cada vez más necesaria e importante para el avance de los procesos.

2. MARCOS REFERENCIALES

2.1. MARCO LEGAL

Tabla 1. Marco legal del proyecto.

ITEM	NORMA	CONCEPTO	ARTICULOS
1	Constitución de 1991	La constitución Política de Colombia de 1991 elevó a norma constitucional la consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente.	Artículos 7, 4, 49, 68, 63, 79, 80, 88, 95, 330
2	Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservaciones del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).	Artículos 2 y 3
3	Ley 388 de 1997	Por la cual se modifica la ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones.	Capitulo II, Artículo 5-90
4	Decreto Ley, 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Artículos 44 y 45
5	Decreto 1541 de 1978	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.	Capitulo III, sección I, Artículos: 36-53
6	Decreto Nacional 150	Por medio de la cual se reglamenta la ley 388 de 1997	Artículo 1-4
6	Decreto 1640 de 2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, orden y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos.	Artículos 2, 5, 8, 18.
7	Decreto 1729 de 2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título2, Capítulo III del decreto-Ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5º de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones.	Artículos 1-26
8	Decreto de 1999 507	Por la cual se modifica la Ley 388 de 1997.	Artículo 1-4
9	Decreto de 2002 932	Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 388 de 1997.	Artículo 1-8
10	Decreto de 2002 1337	Por el cual se reglamenta la Ley 388 de 1997 y el Decreto-Ley 151 de 1998, en relación con la aplicación de compensaciones en tratamientos de conservación mediante la transferencia de derechos de construcción y desarrollo.	Artículo 1-4
11	Decreto de 2004 975	Por el cual se reglamentan parcialmente las Leyes 49 de 1990, 3 de 1991, 388 de 1997, 546 de 1999, 789 de 2002 y 812 de 2003 en relación con el Subsidio Familiar de Vivienda de Interés Social en dinero para áreas urbanas.	Artículo 1- 84

12	Decreto 1788 de 2004	Por el cual se reglamentan parcialmente las disposiciones referentes a la participación en plusvalía de que trata la Ley 388 de 1997.	Artículo 1-7
13	Decreto 3600 de 2007	Por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones.	Artículo 1-27

Fuente: Autores

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Balance hidrológico

“Se denomina Ciclo Hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea” (Gwp.org, 2017); es decir, que es el proceso global por el cual se considera al agua un recurso natural renovable; debido a que en esa circulación espontánea y continua el líquido vital se purifica y retorna temporalmente a sus fuentes, que la ponen al alcance de sus múltiples demandantes”. Conocer este ciclo hidrológico se hace complicado ya que involucra múltiples variables las cuales se basan en toma de datos de estaciones climáticas, meteorológicas que en ocasiones no se encuentran definidas para un área de estudio o presentan fallas en su operación dificultando la recepción de información para establecer estos ciclos hidrológicos, la forma en que se expresa un ciclo hidrológico en términos de caudales en los ríos superficiales se le denomina balance hidrológico superficial y está definido mediante la ecuación:

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - E(t) - R(t),$$

Donde $S(t)$ representa el almacenamiento de agua en el suelo como una función del tiempo, $P(t)$ la Precipitación en mm por unidad de tiempo, $E(t)$ la Evapotranspiración real o efectiva en mm por unidad de tiempo y $R(t)$ la Escorrentía incluyendo el flujo base en mm por unidad de tiempo.

2.2.2. Precipitación

Se denomina precipitación a toda agua meteórica que cae en la superficie de la tierra, tanto en forma líquida (llovizna, lluvia, etc.), sólidas (nieve, granizo, etc.) y las precipitaciones ocultas (rocío, la helada blanca, etc.) Ellas son formadas en la troposfera con un diámetro de alrededor de 0.1 μm , donde partículas cargadas negativamente por el efecto de aerosoles principalmente ocasionados por los gases de efecto invernadero van creando la segregación de partículas, por la acción del sol estas partículas pierden tamaño

ocasionando una segregación con un tamaño óptimo de 3 a 5mm generando una gota que se precipita cuando la nube se satura.

2.2.3. Escorrentía

Es la parte del agua precipitada sobre el continente que se infiltra en el suelo, desde donde puede volver a evapotranspirar, o por el contrario, percolar en el subsuelo. La otra parte se escurre superficialmente por la red de drenaje hasta alcanzar la red fluvial (escorrentía superficial). Por lo tanto la escorrentía es debida a la incapacidad de los horizontes superficiales del suelo para transmitir el agua de la lluvia con la misma intensidad que cae (escorrentía superficial).

Pero tambien se puede deber a la excesiva saturación de la porosidad total en algun punto del perfil del terreno (escorrentía superficial y profunda). En todo caso, toda la escorrentía profunda acaba aflorando a la superficie, y supone un desarrollo de parte del ciclo hidrológico por el interior de la corteza terrestre (Climántica, s.f.).

2.2.4. Evapotranspiración

Es el total de agua convertida en vapor por una cobertura vegetal, incluye la evapotranspiración desde el suelo, la evaporación del agua interceptada y la transpiración por las estomas de las hojas. La evapotranspiración, es la combinación de dos procesos separados que originan pérdida de agua:

- **Evaporación:** Es el proceso por el cual el agua líquida es convertido en vapor de agua (vaporización). La energía requerida para cambiar el estado de las moléculas de agua a vapor es la radiación solar directa, la temperatura ambiental del aire.
- **Transpiración:** Consiste en la vaporización del agua líquida contenida en las plantas y el vapor removido a la atmósfera. La pérdida del agua es a través de las estomas de las plantas.

La transpiración, depende de la energía radiante, gradiente de presión de vapor y viento, radiación, temperatura del aire, humedad del aire y viento. La razón de la transpiración también está influenciada por, la característica de la vegetación, aspecto del ambiente y práctica de cultivo. Los factores que influyen en la evaporación son los siguientes:

- Radiación solar
- Temperatura
- Humedad: menos humedad, más evaporación
- Presión atmosférica: la altitud, la latitud y la longitud
- Viento: más viento, más evaporación

2.2.5. Sistema de información geográfica (SIG)

Es una integración organizada de *hardware*, *software* y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión (Laboratorio Unidad Pacifico Sur, 2010). Estos ofrecen interesantes perspectivas de hibridación, debido a los nuevos enfoques en las dinámicas de investigación (foco en los datos por ejemplo). En los SIG no se habla de digitalización de documentos cartográficos, sino de elementos digitales *ab initio*. Son sistemas dinámicos que representan al extremo la importancia de las coordenadas tiempo-espacio en el manejo de la información, pues llevan asociados posiciones y son capaces de conectarse con otros datos que puestos sobre un mapa base aportan mayor información (Aguilar y Granell & Canut, 2013).'

En definitiva, “un SIG es un conjunto de aplicaciones informáticas para la creación, tratamiento, análisis y visualización de datos geográficos” (Aguilar y Granell & Canut, 2013), tal como se evidencia en la Figura 1.

Figura 1. Esquema funcionamiento de un SIG.



2.3. MARCO TEÓRICO

2.3.1. Métodos de evapotranspiración potencial

2.3.1.1 Método de Holdridge

Holdridge (1959), publicó una simple expresión para estimar la evapotranspiración potencial, actualmente definida como evapotranspiración de referencia (ET_0) por Allen et al., (1998) y la Asce-ewri (2005), para regiones tropicales y subtropicales (excepto altas elevaciones). Esta expresión es función de la temperatura del aire comprendida entre los 0° y 30°C (biotemperatura), que determina el ritmo e intensidad de los procesos fisiológicos de las plantas (fotosíntesis, respiración y transpiración) y la tasa de evaporación directa del

agua contenida en el suelo y en vegetación. La ecuación general de Holdridge se plantea así:

$$ETP = 58.93 * Tma$$

Donde Tma es la temperatura media anual expresada en °C, ETP es la evapotranspiración potencial de Holdridge expresada en mm/año.

2.3.1.2 Método de Thornthwaite

El método de Thornthwaite fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escorrentía para diversas cuencas de drenaje. El resultado es básicamente una relación empírica entre la ETP y la temperatura del aire. Entre las diferencias más notorias del método de Thornthwaite se encuentra la suposición de que existe una alta correlación entre la temperatura y algunos de los otros parámetros pertinentes tales como radiación, humedad atmosférica y viento. La fórmula de Thornthwaite puede ser usada para cualquier zona en la cual se registran la temperatura máxima y temperatura mínima diarias.

La fórmula de Thornthwaite es la siguiente:

$$ETP_{sc} = 16 \left(10 * \frac{Tm}{I} \right)^a$$

Donde ETP_{sc} es la evapotranspiración potencial de Thornthwaite expresada en mm/mes, Tm es la temperatura media mensual en °C, I Índice calórico, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales i , donde i está en función de la temperatura media mensual expresada como:

$$i = \frac{Tm^{1.514}}{5}$$

a Es un exponente empírico, función de I , expresado mediante la siguiente expresión:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49239$$

Se calculó la ETP_{sc} para cada uno de los meses del año que corresponde a la evapotranspiración potencial sin corregir (sin tener en cuenta la latitud de cada una de las estaciones de estudio), finalmente se obtiene la evapotranspiración potencial de Thornthwaite mediante la siguiente ecuación:

$$ETP = ETP_{sc} * L$$

Donde, L es un valor de corrección obtenido mediante la expresión: $L = \frac{Ndi}{30} * \frac{Ni}{12}$ donde Ndi es el número de días del mes y Ni el número de horas de sol, dependiendo la latitud.

2.3.1.3 Método de Turc modificado (1961)

Esta metodología permite calcular la evapotranspiración potencial en mm/mes en función de la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa. Fue desarrollado en zonas de Europa pero fue ajustado para los casos en los que la humedad relativa es menor a 50%. A continuación se presenta la fórmula de ETP según Turc modificado (1961) para zonas donde la humedad relativa es mayor a 50% que es el caso de la Subcuenca Cahira Sur:

$$ETP = K * \left(\frac{Tm}{Tm + 15} \right) * (Rg + 50)$$

Donde, *ETP* es la Evapotranspiración potencial expresada en mm/mes, *K* es un factor de corrección mensual y sus valores son: 0.4 para meses de 30 y 31 días, 0.37 para febrero, *Tm* es la temperatura media mensual del aire expresada en °C, y *Rg* es la radiación solar incidente o radiación de onda corta que alcanza la superficie de la tierra, calculada mediante la expresión:

$$Rg = Ro * KT * (Tmax - Tmin)^{0.5}$$

Donde *Rg* es la radiación solar incidente expresada en $\frac{cal}{cm^2/dia}$, *Ro* es la radiación solar extraterrestre expresada en $\frac{MJ}{m^2/dia}$, *KT* es un factor empírico (0.162 zonas continentales y 0.19 zonas costeras), *Tmax* es la temperatura máxima mensual expresada en °C y *Tmin* es la temperatura mínima mensual expresada en °C.

2.3.1.4 Método de García y López

Es una fórmula adaptada al trópico que permite estimar la evapotranspiración potencial diaria, entre latitudes 15°N y 15°S. Desarrollada a partir de la correlación de los datos de temperatura y déficit de saturación con los de la evapotranspiración potencial medidos en seis estaciones tropicales. La ecuación se presenta a continuación:

$$ETP = 1.21 \times 10^{Ft} * (1 - 0.01HR) + 0.21Tm - 2.3$$

Ft Es el factor de temperatura el cual se define con la siguiente ecuación:

$$Ft = \frac{7.45 * Tm}{234.7 + Tm}$$

Donde *Tm* es la temperatura media mensual del aire en °C y *HR* es la humedad relativa media diurna que se define con la siguiente expresión:

$$HR = \frac{HR8:00am + HR2:00pm}{2}$$

2.3.1.5 Método de Hargreaves (1956)

La fórmula de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) para evaluar la evapotranspiración potencial necesita solamente datos de temperaturas y de Radiación Solar. La expresión general es la siguiente:

$$ET_o = 0.0135 (t_{med} + 17.78) * R_s$$

Donde ET_o es la evapotranspiración potencial diaria en mm/día, t_{med} es la temperatura media en °C y R_s es la radiación solar incidente, convertida en mm/día.

La radiación solar incidente R_s , se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); ésta última aparece según los autores como R_o o R_a , y se lee en tablas en función de la latitud del lugar y del mes. En este documento nos referiremos a ella como R_o .

Para la obtención de la radiación solar incidente (R_s), (Samani, 2000) propone la siguiente fórmula:

$$R_s = R_o * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

Donde R_s es la Radiación solar incidente, R_o es la radiación solar extraterrestre, KT es el coeficiente, t_{max} es la temperatura diaria máxima en °C, t_{min} es la temperatura diaria mínima en °C.

Puesto que los valores de R_o están tabulados y las temperaturas máximas y mínimas son datos empíricos relativamente fáciles de obtener, la dificultad para aplicar esta sencilla expresión se encuentra en el coeficiente KT . Para evaluar la radiación solar extraterrestre (R_o) existen varias tablas, todas ellas en función de la latitud y del mes.

El coeficiente KT de la ecuación es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves (Samani, 2000) recomienda $KT = 0.162$ para regiones del interior y $KT = 0.19$ para regiones costeras.

2.3.2. Métodos de evapotranspiración real

2.3.2.1 Método de Budyko

La evapotranspiración potencial se transforma a evapotranspiración real mediante la ecuación Budyko (Budyko, 1974):

$$ETR = \left\{ ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left[1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Donde, ETR es la evapotranspiración real (mm/mes), ETP es la evapotranspiración potencial (mm/mes), y P es la precipitación media mensual de la cuenca (mm/mes).

2.3.2.2 Método de Turc (Turc, 1954)

Turc propuso un método para el cálculo de la evapotranspiración real, basado en la precipitación y la temperatura. La ecuación fue establecida empíricamente comparando las precipitaciones y la escorrentía total de 254 cuencas, pero su aplicación no ha resultado en otras cuencas u otras regiones donde las características topográficas son diferentes. La fórmula de Turc se utiliza para calcular la evapotranspiración real anual en mm:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{[L(t)]^2}}}$$

P Es la precipitación media anual expresada en mm y la expresión $L(t)$ se define como:

$$L(t) = 300 + 25t + 0.05t^3$$

Donde t es la temperatura media anual del aire en °C. La ecuación de Turc es válida si se cumple la siguiente condición:

$$\frac{P}{L} > 0.316 \text{ En caso contrario: } ETP = P$$

2.4. MARCO HISTÓRICO

2.4.1. Balance hidrológico en Colombia

Entre 1996 y 1999, la Unidad de Planeación Minero/Energética del Ministerio de Minas y Energía y Colciencias patrocinaron el estudio “Balances Hidrológicos de Colombia” (1999), cuyo principal objetivo era la estimación del caudal medio en cualquier punto de la red hidrográfica de Colombia. La metodología escogida para enfrentar este tema fue la de balances hidrológicos de largo plazo, para la cual fue necesaria la construcción de mapas digitales de precipitación, evaporación y otras variables necesarias para los cálculos a escala nacional. Los grandes volúmenes de información que debían ser manejados hicieron evidente la necesidad del uso de un SIG para la visualización, el análisis y la presentación final de los resultados generados (Congreso, 2000).

Desde 1930 hasta 1970, aproximadamente se dan las bases científicas de la hidrología (Sherman, 1932, El Hidrograma Unitario; Richards; 1931, Las ecuaciones del flujo subterráneo; Horton, 1933, La teoría de la infiltración y en 1945, el análisis de la red de

drenaje de la cuenca; Gumbel, 1941, propone la aplicación de las leyes de valores extremos en los estudios hidrológicos) (Fatorelli & Fernández, 2011).

Pierre Perrault, en 1674, basándose en los valores obtenidos con toscos instrumentos instalados en la cuenca del río Sena, demostró que el volumen de agua caída era el adecuado para originar los caudales de los ríos y vertientes. Para ellos estimó el área de la cuenca del río Sena en un punto de Borgoña y midió la lluvia durante un período de tres años, así como los caudales del río en ese punto, llegando a la conclusión de que el volumen de agua caída era seis veces superior al volumen escurrido, lo que era adecuado para generar dicho escurrimiento. También realizó estudios experimentales de la evaporación natural del agua. Hacia 1700, Halley investiga la evaporación de aguas salinas, análogas a las del Mediterráneo, concluyendo que la evaporación desde el Mediterráneo y los océanos era suficiente para balancear el volumen de agua que desaguaban los ríos en el mar (Castellanos, 2015).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Este estudio del balance hidrológico superficial comprendió la determinación de la cantidad de agua que entra a la Subcuenca Cachira Sur en forma de precipitación, así como la cantidad de agua que sale en forma de evapotranspiración aplicando distintos métodos de evapotranspiración potencial y real con el objetivo de conocer los períodos mensuales en los cuales se presentan déficits y excesos.

Se analizaron los datos de temperatura, precipitación y humedad relativa de acuerdo con las mediciones registradas en estaciones meteorológicas pertenecientes al IDEAM y la CDMB, para así establecer el balance hidrológico superficial según el comportamiento que han presentado las variables mencionadas en el período comprendido desde el año 1967 al 2016 para el caso de la precipitación y de 2011 al 2016 para temperatura y humedad relativa.

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación fue de tipo descriptiva, porque tuvo como finalidad establecer y conocer el balance hidrológico superficial de la Subcuenca Cachira Sur para un período común a partir de un SIG. Por otra parte también fue de tipo correlacional, porque relacionó las variables climáticas temperatura, precipitación y humedad relativa dentro de la ocurrencia del balance hidrológico superficial. También se utilizó el método analítico, porque tomando como base la Subcuenca Cachira Sur, se analizó cada proceso de su balance hidrológico para así calcular la cantidad de agua que entra en forma de precipitación y el agua que sale en forma de evapotranspiración. De este modo se obtuvieron resultados con un enfoque cuantitativo, los cuales fueron presentados en forma de mapas que contienen los valores calculados del balance hidrológico superficial en una escala estacional. El sistema de coordenadas utilizado fue: Coordenadas geográficas GCS Magna, todos los mapas se presentan a escala 1:250000.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación fue de tipo no experimental ya que las variables que se manejaron (temperatura, humedad relativa y precipitación) no fueron sometidas a ningún tipo de alteración, simplemente se trabajó con los datos registrados por las estaciones meteorológicas para generar mapas de precipitación, evapotranspiración y balance hídrico que permitieron realizar una comparación entre estudios realizados anteriormente en la Subcuenca de forma manual.

Para realizar el presente proyecto de investigación se propuso la siguiente metodología basada en el logro de cada uno de los objetivos específicos:

Para calcular la cantidad de agua que entró a la Subcuenca Cachira Sur mediante un SIG, se utilizó uno de los métodos de cálculo de la precipitación media en la cuenca, el cual a través de procedimientos automáticos de interpolación permitió obtener un valor medio para

el área de estudio a partir de la información de precipitación de 35 estaciones meteorológicas pertenecientes al IDEAM y a la CDMB.

Para calcular la cantidad de agua que salió en forma de evapotranspiración mediante un SIG, se construyeron *rasters* de evapotranspiración a partir de cinco métodos de evapotranspiración potencial y dos de evapotranspiración real. Se tuvieron en cuenta los datos de temperatura y humedad relativa provenientes de cinco estaciones meteorológicas pertenecientes a la CDMB.

Una vez obtenidos los resultados de precipitación y evapotranspiración de la Subcuenca Cachira Sur, se realizó el balance hidrológico de acuerdo a las definiciones teóricas de balances hidrológicos (entra- sale). Estos resultados fueron comparados con un estudio realizado previamente por la CDMB, usando métodos manuales para el cálculo del balance hidrológico superficial. Luego se analizaron las diferencias y semejanzas entre cada uno de los métodos (manual vs. SIG), y con ello se establecieron las posibles ventajas de utilizar herramientas automatizadas como los SIG.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población estuvo constituida por las series de registro de datos climatológicos (precipitación, temperatura y humedad relativa) de las estaciones que conforman la red climatológica que posee el IDEAM y la CDMB en la Subcuenca Cachira Sur (Figura 2), por lo tanto, esta fue la materia prima con que se realizó la presente investigación. De este modo, para el cálculo de la cantidad de agua que entra a la Subcuenca, se tomó una muestra constituida por aquellas estaciones que cumplieron con el parámetro de presentar datos de precipitación, mientras que para el cálculo de la cantidad de agua que sale, se tomó muestra únicamente de las 5 estaciones de la CDMB por presentar datos de temperatura y humedad relativa en años cercanos entre sí (Tabla 2).

Es necesario resaltar que la información de temperatura y humedad relativa fue manejada y analizada sin tener en cuenta las estaciones del IDEAM, ya que no todas presentaban registros de estas variables y las pocas que suministraban estas mediciones abarcaban muchos años de diferencia con respecto a los registros de medición de las estaciones de la CDMB (Turbay, Betania, La Aguada, La Naranjera y Sena Aguas Calientes) que solo presentan datos desde el 2011 al 2016, como se puede ver en la Tabla 2.

Figura 2. Localización de la Subcuenca Cachira Sur.



Fuente: Consultoría Estructura y Ambiente (CE&A). Estudio Ambiental para el Ordenamiento y manejo de la Subcuenca Cachira Sur.

Tabla 2. Listado de las estaciones meteorológicas utilizadas.

ÍTEM	NOMBRE ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	DESDE	HASTA	PRECIPITACION	TEMP	HUMEDAD RELATIVA	SERIE (AÑOS)
1	Llano de Palmas	7.14	-73.109	1967	2016	X			50
2	La Caldera	7.189	-72.43	1976	2016	X			41
3	Portachuelo	7.189	-73.09	1967	2016	X			50
4	El Pozo-Vetas	7.179	-72.52	1971	2016	X			46
5	Vivero Suratá	7.209	-72.59	1968	2016	X	X	X	49
6	Esc. Agr. Cachira	7.439	-73.03	1972	2016	X	X	X	45
7	Los Planes	7.479	-73.189	1984	2016	X			33
8	Salazar	7.459	-72.489	1952	2016	X	X	X	65
9	Cachiri	7.279	-72.59	1971	2016	X	X	X	46
10	La Vega	7.389	-73.1	1976	2016	X			41

11	El Caobo	7.349	-73.19	1973	2016	X			44
12	El Porvenir	7.27	-73.28	1974	2016	X			43
13	Provincia	7.239	-73.26	1992	2016	X			25
14	Arboledas	7.379	-72.47	1958	2016	X			59
15	Cucutilla	7.319	-72.46	1955	2016	X			62
16	El Naranjo	7.12	-73.17	1971	2016	X			46
17	El Playón	7.119	-73.12	1958	2016	X			59
18	Matajira	7.119	-73.03	1967	2016	X			50
19	Berlín Automática	7.109	-72.52	1969	2016	X	X	X	48
20	Tona	7.109	-72.58	1958	2016	X			59
21	Palmas	7.119	-73.13	1967	2016	X			50
22	El Líbano	7.499	-73.25	1977	2016	X			40
23	El Campanario	8.004	-73.234	1965	2017	X			52
24	La María	7.934	-73.211	1985	2017	X			32
25	Bocatoma Rio Frio	8.036	-73.219	1966	2017	X			51
26	Abrego Centro Admo.	8.087	-73.223	1969	2017	X	X	X	48
27	Alto El Venado	8.088	-73.07	1973	2017	X			44
28	San Juan	8.025	-73.018	1973	2017	X			44
29	Villa Caro	7.914	-72.98	1973	2017	X			44
30	Montecitos	8.109	-73.14	1985	2006	X			32
31	Turbay	7.508	-73.056	2014	2016	X	X	X	3
32	Betania	7.567	-73.183	2011	2016	X	X	X	6
33	La Aguada	7.493	-73.102	2014	2016	X	X	X	3
34	La Naranjera	7.417	-73.223	2012	2016	X	X	X	5
35	Sena Calientes Aguas	7.521	-73.223	2011	2016	X	X	X	6

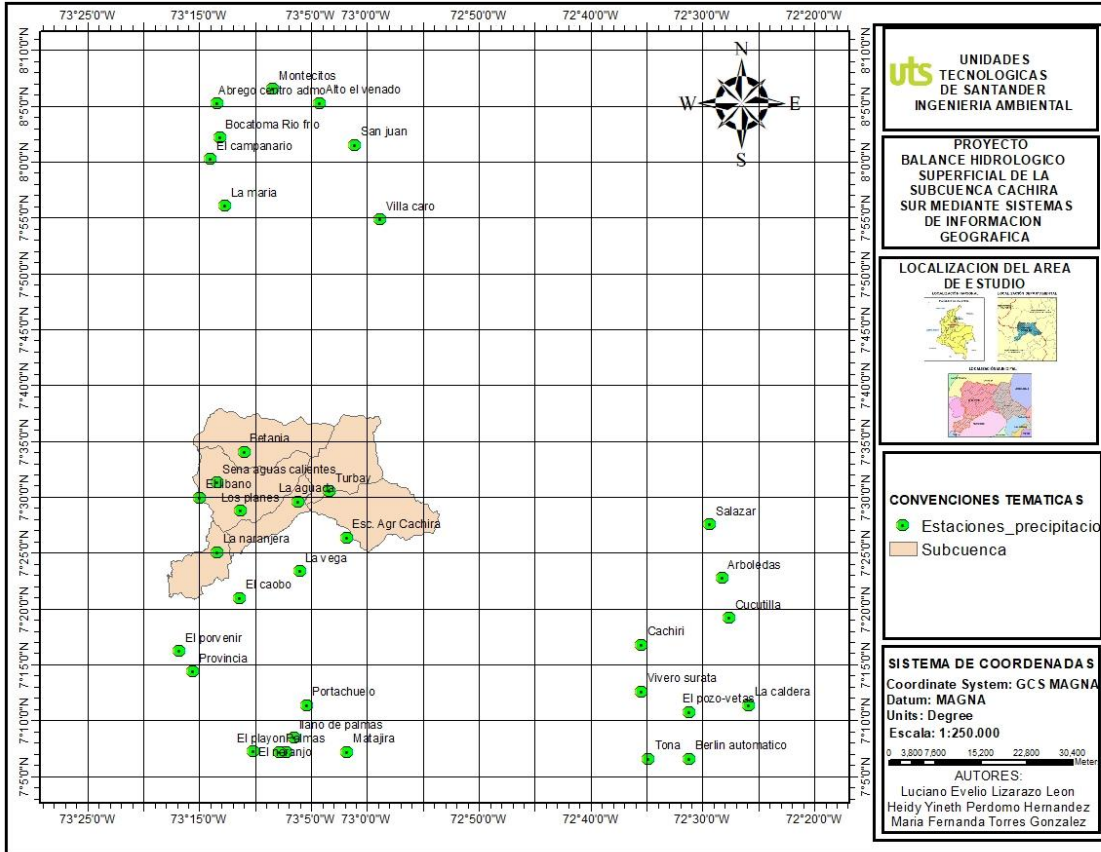
Fuente: Autores.

3.3.1. Localización de las estaciones meteorológicas en el área de estudio

La subcuenca Cachira Sur cuenta con cinco (5) estaciones meteorológicas de la CDMB que se encuentran dentro del área de estudio. Sin embargo, para los cálculos de precipitación se hizo necesario el uso de otras estaciones que proporcionaran más información de la Subcuenca, fue por esta razón que se utilizaron 30 estaciones meteorológicas del IDEAM circundantes al área de estudio que permitieron realizar una interpolación más exacta mediante ArcGIS. En total se trabajó con información de 35 estaciones meteorológicas para la realización del balance hidrológico.

En la Figura 3, se muestra el mapa con la ubicación geográfica de las 35 estaciones meteorológicas de la CDMB y el IDEAM dentro de la Subcuenca Cachira Sur y sus alrededores.

Figura 3. Ubicación estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación.



Fuente: Autores.

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Datos de variables climáticas

El IDEAM y la CDMB cuentan con una red de estaciones climatológicas que cubren la parte alta, media y baja de la Subcuenca Cachira Sur; esta red constituye los equipos primarios de captura de las series de datos de temperatura (°C), humedad relativa (%) y precipitación (mm) las cuales fueron suministradas mediante solicitud hecha personalmente en las instalaciones de la CDMB; entre tanto la información solicitada al IDEAM se hizo a través de la plataforma de solicitud disponible en la página web: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Usuarios&lTipo=usuarios&lFuncion=login&>.

3.4.2. Datos de estudios realizados anteriormente en la Subcuenca Cachira Sur

Para el análisis y comparación de la efectividad de los SIG con respecto al uso de métodos manuales de cálculo del balance hidrológico superficial, se utilizó un estudio realizado por la CDMB llamado “Estudio ambiental para el ordenamiento y manejo de la Subcuenca Cachira Sur”, disponible en la página web:

<http://www.cdm.gov.co/web/documentos/gestion-ambiental-1/395-pomca-cachira-1/file>

3.5. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Para realizar las operaciones de las variables y debido al gran volumen de información, fue necesario el uso de software, con el fin de organizar y manipular los datos de temperatura, humedad relativa y precipitación, elaborar gráficas y aplicar fórmulas matemáticas tales como promedios, sumas, entre otras, para todo lo anterior se usó Excel®; mientras que para el cálculo de la precipitación, evapotranspiración potencial y real así como la generación de mapas, se utilizaron los métodos de cálculo de Thornthwaite, Holdridge, Hargreaves, García y López, Turc modificado, Turc y Budyko, esto con el fin de determinar el área de influencia de cada estación así como el balance hídrico superficial de la Subcuenca Cachira Sur, para ello se utilizó el software ArcGIS® versión 10.5.

Al ordenar la información se identificaron datos inexistentes o faltantes en las series de tiempo. De este modo, con el fin de no alterar los resultados del balance hidrológico superficial, se procedió a rellenar los datos faltantes mediante el promedio mensual multianual de dicho dato para cada una de las estaciones. Así, a partir de los cálculos de temperatura, humedad relativa y precipitación media de la Subcuenca se obtuvieron tres series de tiempo consolidados de los meses de enero a diciembre desde 1967 al 2016 para el caso de precipitación y de 2011 a 2016 para el caso de temperatura y humedad relativa. Con esta información se procedió a utilizar ArcGIS. Para el tratamiento de los datos recolectados y su posterior análisis.

Para el análisis de las precipitaciones, y la temperatura y humedad relativa (estas últimas ya relacionadas en forma de evapotranspiración potencial y real), se tuvieron en cuenta los diferentes mapas de resultados obtenidos de los cálculos hechos a partir de álgebra de mapas usando ArcGIS. También se analizó la información teniendo en cuenta los regímenes de lluvias y sequías así: seca mayor (diciembre a febrero), lluviosa menor (marzo a mayo), seca menor (junio a agosto) y lluviosa mayor (septiembre a noviembre).

Ya para finalizar, los resultados del balance hidrológico superficial utilizando ArcGIS fueron comparados con los resultados obtenidos por la CDMB en su “Estudio Ambiental para el Ordenamiento y Manejo de la Subcuenca Cachira Sur” para así determinar la efectividad de los SIG con respecto al uso de los métodos manuales de cálculo de balances hidrológicos.

3.6. CANTIDAD DE AGUA QUE INGRESA A LA SUBCUENCA POR PRECIPITACIÓN

Para la determinación de la cantidad de agua que ingresó a la Subcuenca por medio de precipitación, se tabularon en Excel los datos correspondientes a las precipitaciones mensuales de cada estación, promediando los valores de cada estación desde 1967 hasta el 2016 para el caso de las estaciones (30) del IDEAM, y desde el 2011 hasta el 2016 para las estaciones (5) de la CDMB. Seguidamente se ingresaron estos valores a ArcGIS, donde mediante la herramienta de interpolación “IDW” se obtuvieron los mapas de precipitación mensual como se presentan en las Figuras 5 y 6 de la sección de resultados. Se debe tener en cuenta que los rangos de precipitación en cada mapa son diferentes.

3.7. CANTIDAD DE AGUA QUE SALE DE LA SUBCUENCA POR EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para la determinación de la cantidad de agua que salió de la Subcuenca Cachira Sur se utilizaron siete métodos en total, cinco de evapotranspiración potencial y dos de evapotranspiración real. Los métodos de evapotranspiración potencial fueron: Holdridge, Thornthwaite, Turc modificado, García y López, Hargreaves y evapotranspiración real: Budyko y Turc. Finalmente se realizó un promedio de todos los métodos de ETP y de ETR siendo este último el determinante para calcular la cantidad de agua que sale de la Subcuenca. Los resultados de ETP y ETR se presentan en las Figuras 7, 8 y 9 de la sección de resultados.

3.8. BALANCE HIDROLÓGICO SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA CACHIRA SUR

El balance hidrológico superficial de la Subcuenca Cachira Sur se realizó en base a los *rasters* de precipitación mensual multianual y de evapotranspiración real mensual multianual obtenidos anteriormente, definiendo el balance como la cantidad de agua que ingresa en forma de precipitación menos la cantidad de agua que sale en forma de evapotranspiración real. Cabe resaltar que la evapotranspiración real es la que ocurre en condiciones reales, teniendo en cuenta que no siempre la cobertura vegetal es completa ni el suelo se encuentra en estado de saturación; por lo tanto, la presente investigación trata de relacionar la mayor cantidad de variables que aporten valores más cercanos a la realidad.

Para la realización del balance hidrológico superficial se realizaron los siguientes pasos en ArcGIS:




1. Con base en el *raster* obtenido de precipitación mensual multianual y de evapotranspiración real multianual se aplicó la fórmula de balance hidrológico superficial definida como:

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - E(t)$$

Donde $S(t)$ representa el almacenamiento de agua en el suelo como una función del tiempo, $P(t)$ la precipitación en mm por unidad de tiempo, $E(t)$ la evapotranspiración real o efectiva en mm por unidad de tiempo

2. Seguidamente mediante la herramienta *Raster Calculator*, se aplicó la fórmula anteriormente especificada, obteniendo los *Raster* correspondientes al balance hidrológico superficial mensual multianual en la Subcuenca.

3. Los rangos de los mapas presentados en las Figuras 10 y 11 de la sección de resultados se clasificaron en:

- Déficit: $-\infty - 0.8$ 
- Estabilidad: $0.8 - 1.2$ 
- Exceso: $1.2 - \infty$ 

3.9. COMPARACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN CON ESTUDIOS REALIZADOS ANTERIORMENTE

En el año 2009, La Consultoría Estructura y Ambiente (CE&A) desarrolló un estudio ambiental para el ordenamiento y manejo de la Subcuenca Cachira Sur, donde se utilizaron 20 estaciones meteorológicas en la zona de estudio de la Subcuenca y en el cual se realizó un balance hidrológico para determinar los niveles de los caudales de la red hídrica, y la disponibilidad del recurso para un ordenamiento adecuado de la Subcuenca Cachira Sur.

El estudio fue realizado mediante el cálculo del balance hidrológico, definido mediante la ecuación:

$$B = P - ETR$$

Donde, B es el balance hidrológico expresado en mm/mes, P es la precipitación media mensual expresada en mm/mes y ETR es la evapotranspiración real expresada en mm/mes.

Cabe resaltar, que el estudio original fue realizado utilizando metodologías manuales que permitieron la generación de tablas donde se mostraron los resultados de precipitación obtenidos para cada una de las estaciones.

Para la determinación de la evapotranspiración real utilizaron el método de Turc (1961) donde presentaron tablas con los resultados obtenidos. Seguidamente, procedieron a realizar el balance hidrológico de la Subcuenca en cada una de las estaciones seleccionadas para este estudio.

Para el análisis de resultados de la presente investigación con el estudio realizado por CE&A, fue necesario crear los mapas de precipitación, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y balance hidrológico a partir de las tablas de resultados generadas en dicho estudio y utilizando las herramientas de *IDW* y *Raster Calculator* de ArcGIS. Es decir, se aplicó un SIG para hacer más fácil la comparación de resultados. Sin embargo, en

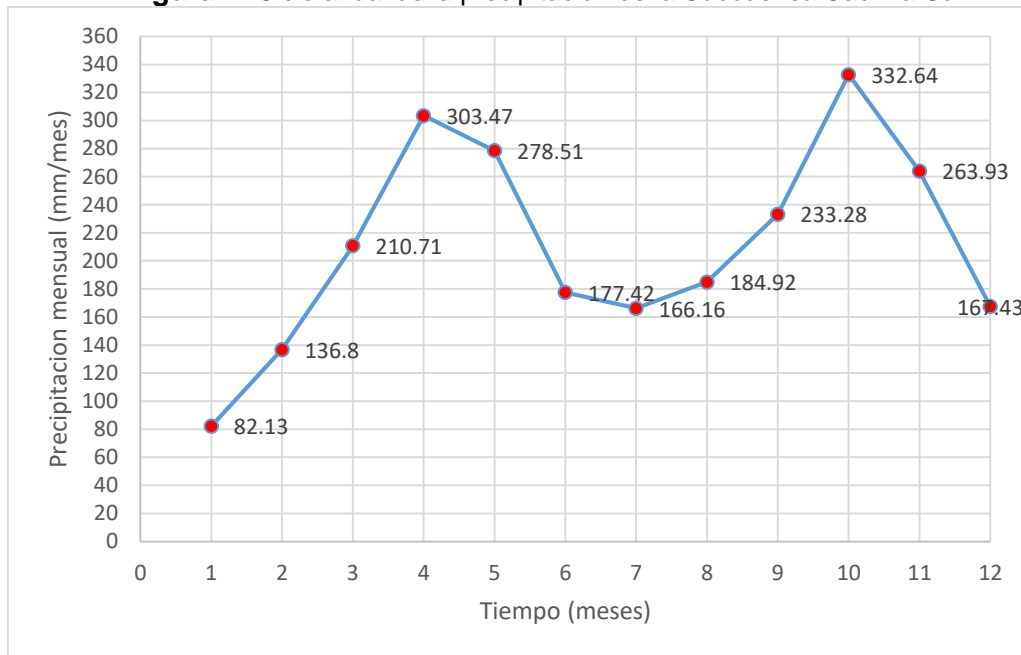
las Figuras 12 y 13 de la sección de resultados solo se presentan los mapas correspondientes al balance hidrológico mensual y anual. Los rangos de los mapas presentados en estas figuras se clasificaron de la misma forma que los del ítem anterior (Figuras 10 y 11).

4. RESULTADOS

4.1. CANTIDAD DE AGUA QUE INGRESA A LA SUBCUENCA POR PRECIPITACIÓN

En la Figura 4 se presenta el ciclo anual de la precipitación mensual de la Subcuenca Cachira Sur, donde se aprecia el comportamiento típico del régimen bimodal, que para el caso de la región Andina corresponde a dos períodos lluviosos, lo cual concuerda con Poveda (2004), en donde los valores máximos se presentan en los periodos de abril (lluviosa menor) y octubre (lluviosa mayor), y mínimos en junio (seca menor) y enero (seca mayor).

Figura 4. Ciclo anual de la precipitación de la Subcuenca Cachira Sur.



Fuente: Autores.

En relación con lo mencionado anteriormente, se identificó que los valores máximos de precipitación para todo el ciclo hidrológico se encuentran en los meses de octubre y abril con 332.64 y 303.47 mm/mes de precipitación, y los valores más bajos se presentan en los meses de enero y julio, con 82.13 y 166.16 mm/mes, respectivamente. El ciclo anual de la precipitación demuestra los valores máximos que pueden tener todos los meses durante el período de tiempo analizado (1967-2016); por lo tanto, se considera que el ciclo hidrológico presenta cuatro periodos definidos como seca mayor en los meses de diciembre a febrero (DEF), lluviosa menor de marzo a mayo (MAM), seca menor de junio a agosto (JJA) y lluviosa mayor de septiembre a noviembre (SON).

Por otro lado, en la Figura 5 se presenta la distribución espacial de la precipitación en función del ciclo estacional. En este caso, se encontró que los meses donde se presentaron

registros de menor precipitación fueron enero (17 mm/mes) y diciembre (19.41 mm/mes) hacia el sur de la Subcuenca entre $7^{\circ}25'-7^{\circ}33'$ N y $73^{\circ}08'-72^{\circ}58'$ W, principalmente en el municipio de Suratá (localizado entre $7^{\circ}25'-7^{\circ}38'$ N y $73^{\circ}05'-72^{\circ}53'$ W). Por otro lado, en enero la máxima precipitación fue de 82.13 mm/mes en comparación con diciembre (167.43 mm/mes), por lo tanto enero se clasificó como el mes más seco en la escala de tiempo estudiada (49 años).

Los meses de mayor precipitación se presentaron en el municipio de El Playón (localizado entre $7^{\circ}26'-7^{\circ}38'$ N y $73^{\circ}16'-73^{\circ}05'$ W), correspondiente a los meses de octubre (332.64 mm/mes) hacia el Noroeste de la Subcuenca entre $7^{\circ}32'-7^{\circ}37'$ N y $73^{\circ}16'-73^{\circ}09'$ W, y abril (303.47 mm/mes) pero esta vez entre $7^{\circ}27'-7^{\circ}32'$ N y $73^{\circ}16'-73^{\circ}09'$ W; por ende, octubre se clasificó como el mes más lluvioso en la escala de tiempo.

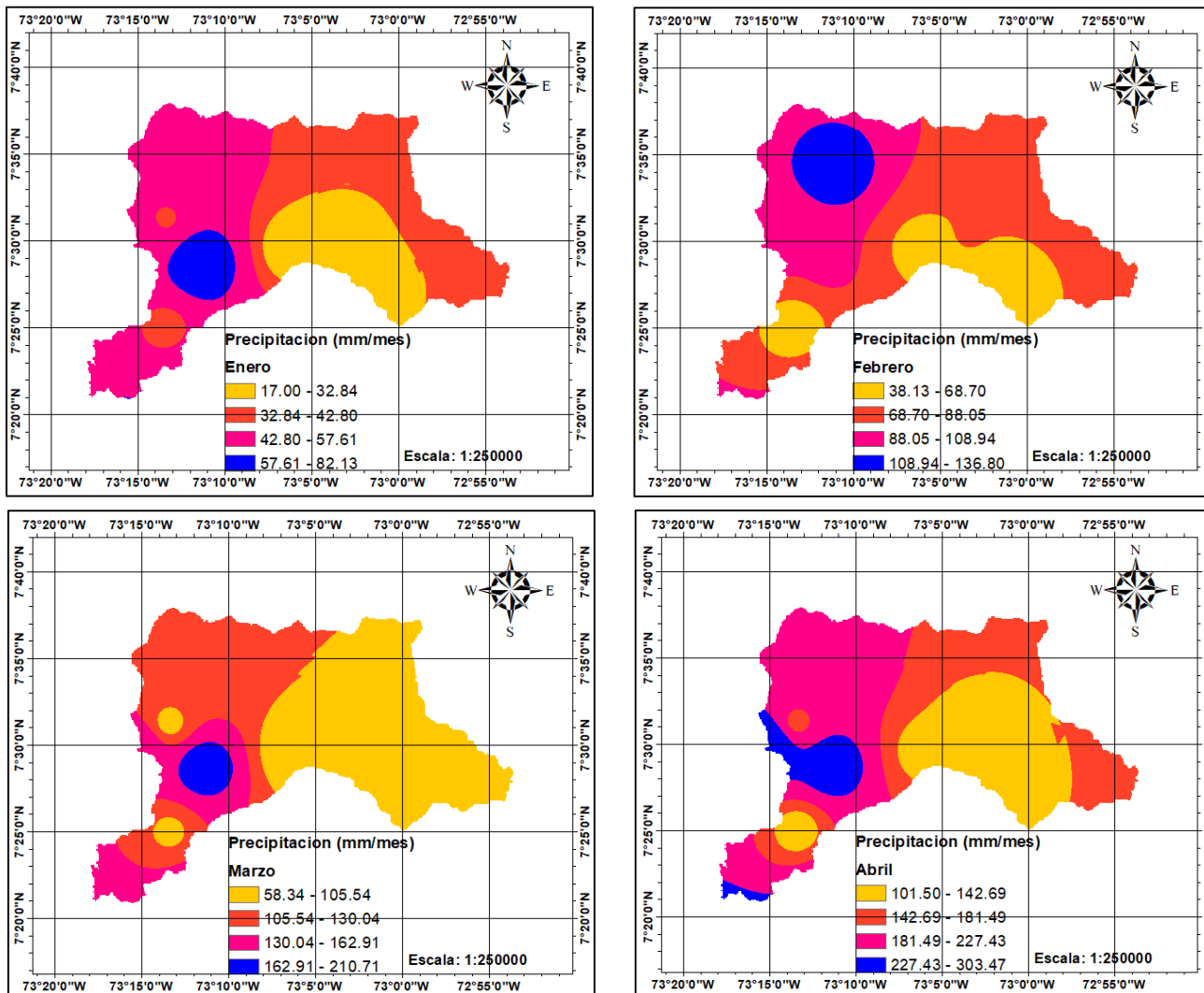
Por su parte, al analizar la información trimestralmente (Figura 5), de acuerdo al comportamiento típico del régimen bimodal en el período de seca mayor (DEF) del ciclo multianual, enero presentó el rango más bajo de precipitación (17.00-32.84 mm/mes) con respecto a los otros dos meses: diciembre (19.41-57.72 mm/mes) y febrero (38.13-68.70 mm/mes). Este comportamiento se vio reflejado en el municipio de Suratá, en las veredas de Santa Bárbara, Mesallana, Santa Rosa, Capacho, Gramalotico, El Silencio, San Isidro, Las Abejas y Filo. Cabe destacar que en el mes de febrero se presentó este comportamiento en zonas puntuales del municipio de Rionegro (localizado entre $7^{\circ}21'-7^{\circ}26'$ N y $73^{\circ}18'-73^{\circ}11'$ W) en las veredas de Miramar, Virginia, Calichana, Caimán, Algarruba, La Unión, Ceiba 1 y Ceiba 2.

Para el período de lluviosa menor (MAM), abril presentó el rango más alto de precipitación (227.43-303.47 mm/mes) con respecto a los otros dos meses: marzo (162.91-210.71 mm/mes) y mayo (214.88-278.51 mm/mes). Este comportamiento se vio reflejado en el municipio de El Playón, en las veredas Playón, Huchaderos y San Pedro, así como en el municipio de Rionegro en las veredas de Miralindo y Puyana (Figura 5).

Con respecto al período de seca menor (JJA), junio presentó el rango más bajo de precipitación (11.50-50.54 mm/mes). Este comportamiento fue similar en los tres meses dentro del municipio de Suratá, en las veredas de Santa Bárbara, Mesallana, Santa Rosa, Capacho, Gramalotico, El Silencio, San Isidro, Las Abejas, Filo, Cartagena, Las Abejas, Crucesitas, El Mineral, La Violeta y Pantanitos y también en el municipio de El Playón, en la zona sur de la vereda Rio Blanco, pero únicamente en el mes de junio (Figura 5).

En el trimestre correspondiente a la lluviosa mayor (SON, Figura 5), octubre fue el mes en el que se obtuvieron los valores máximos de precipitación (265.70 a 332.64 mm/mes) en comparación con septiembre (148.39-233.28 mm/mes) y noviembre (172.03-263.93 mm/mes). Las altas precipitaciones se dieron en diferentes zonas del municipio de El Playón y en zonas puntuales de los municipios de Suratá y Rionegro. Así, dentro de cada municipio se tienen las siguientes veredas: En El Playón (Playón, Huchaderos, San Pedro, Límites, Planadas, Miraflores y Betania), en Suratá (Mesallana, Santa Rosa y San Isidro) y en Rionegro (Centenario, Miralindo, Puyana, Golconda, Altamira, Tachuela, Galapagos y Cuesta).

Figura 5. Mapas de precipitación mensual multianual (1967-2016).



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

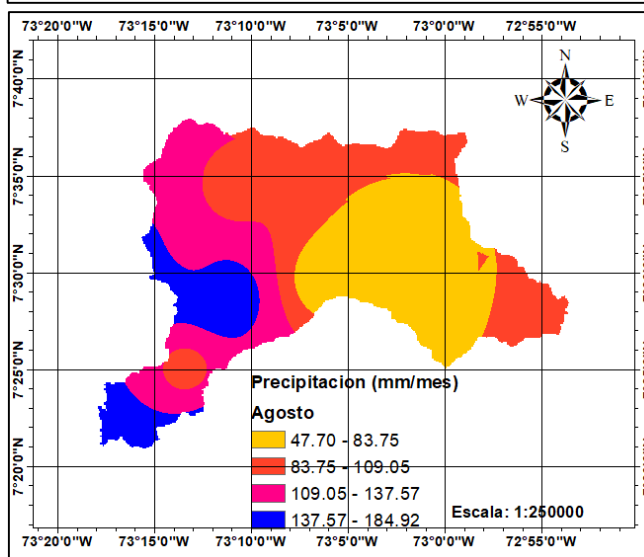
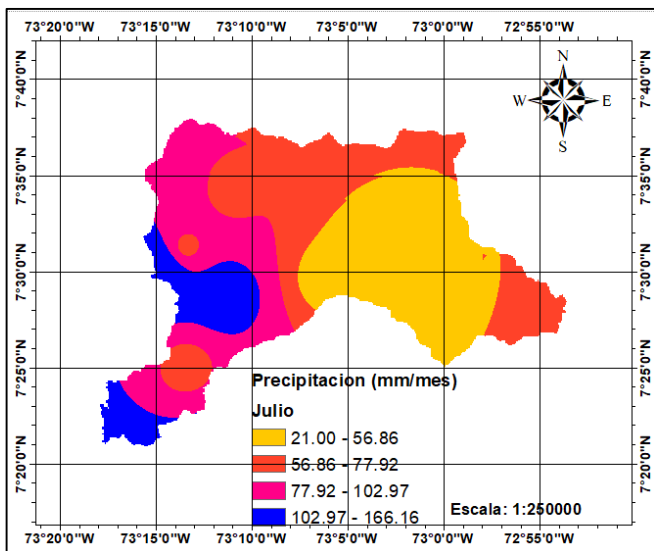
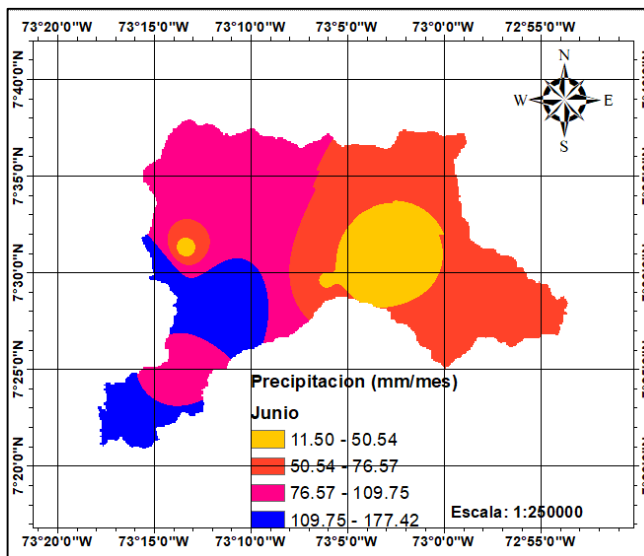
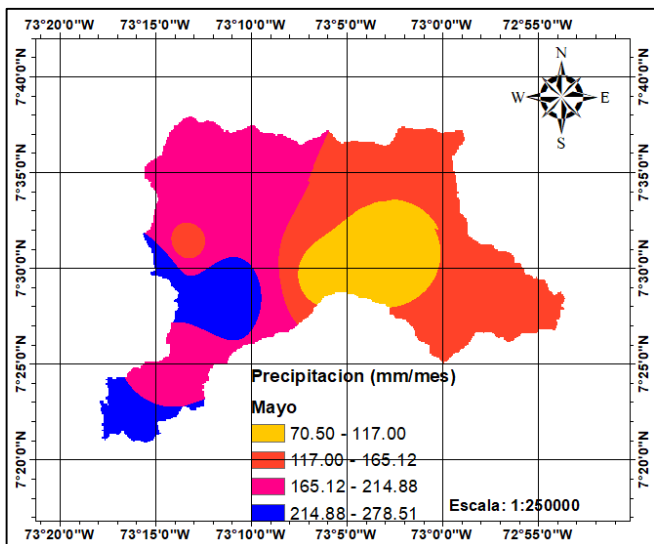
REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
PRÁCTICA

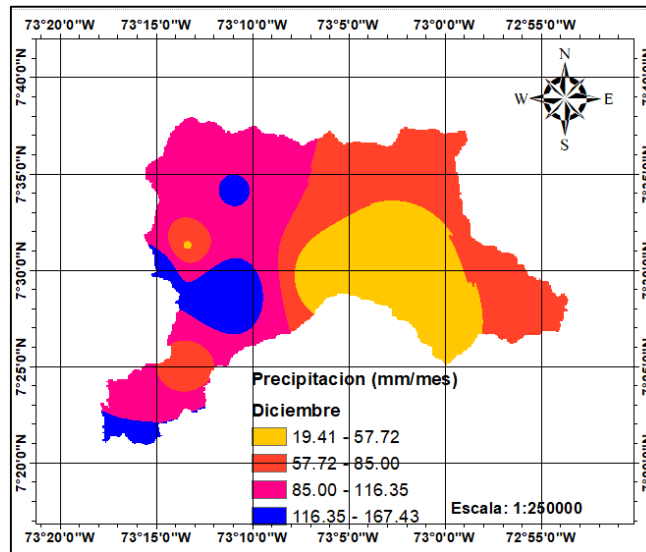
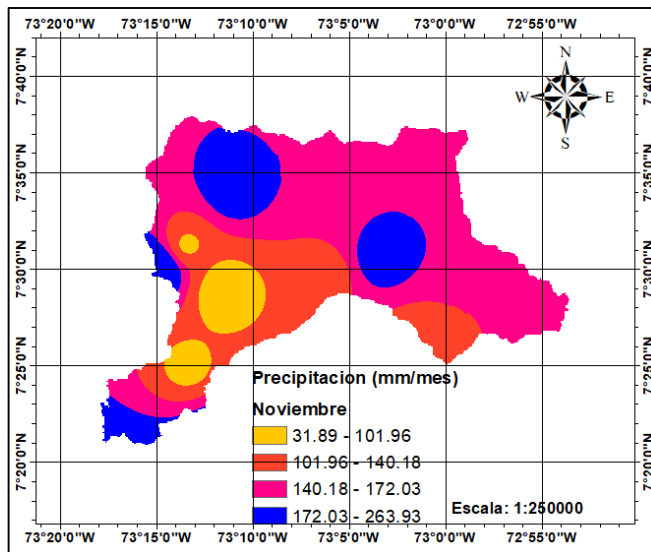
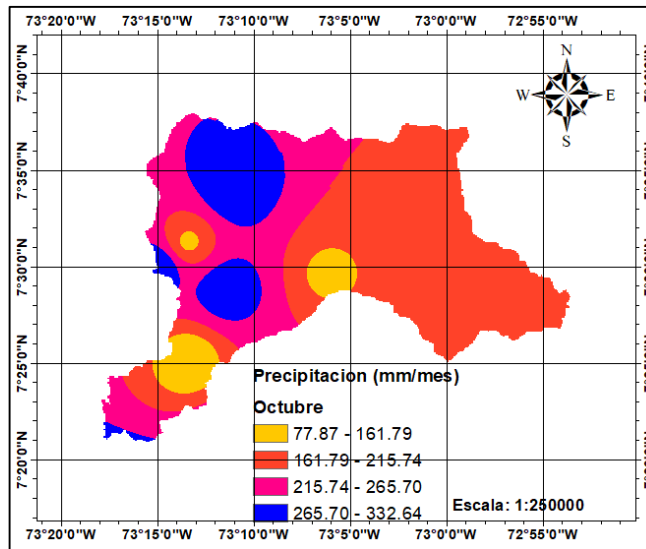
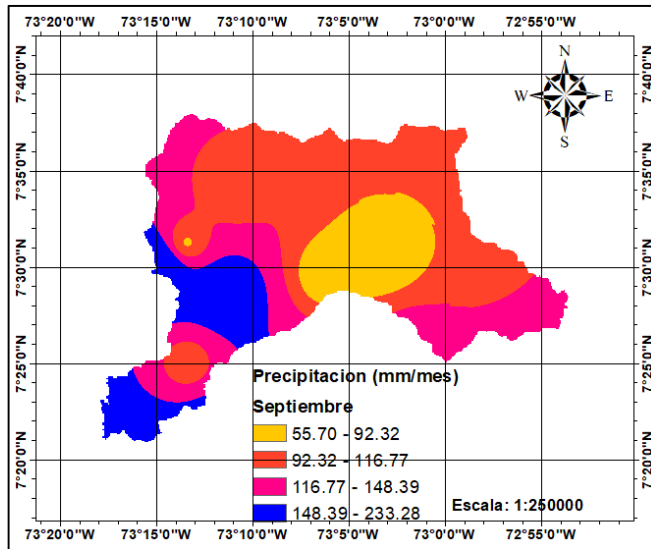
VERSIÓN: 01



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

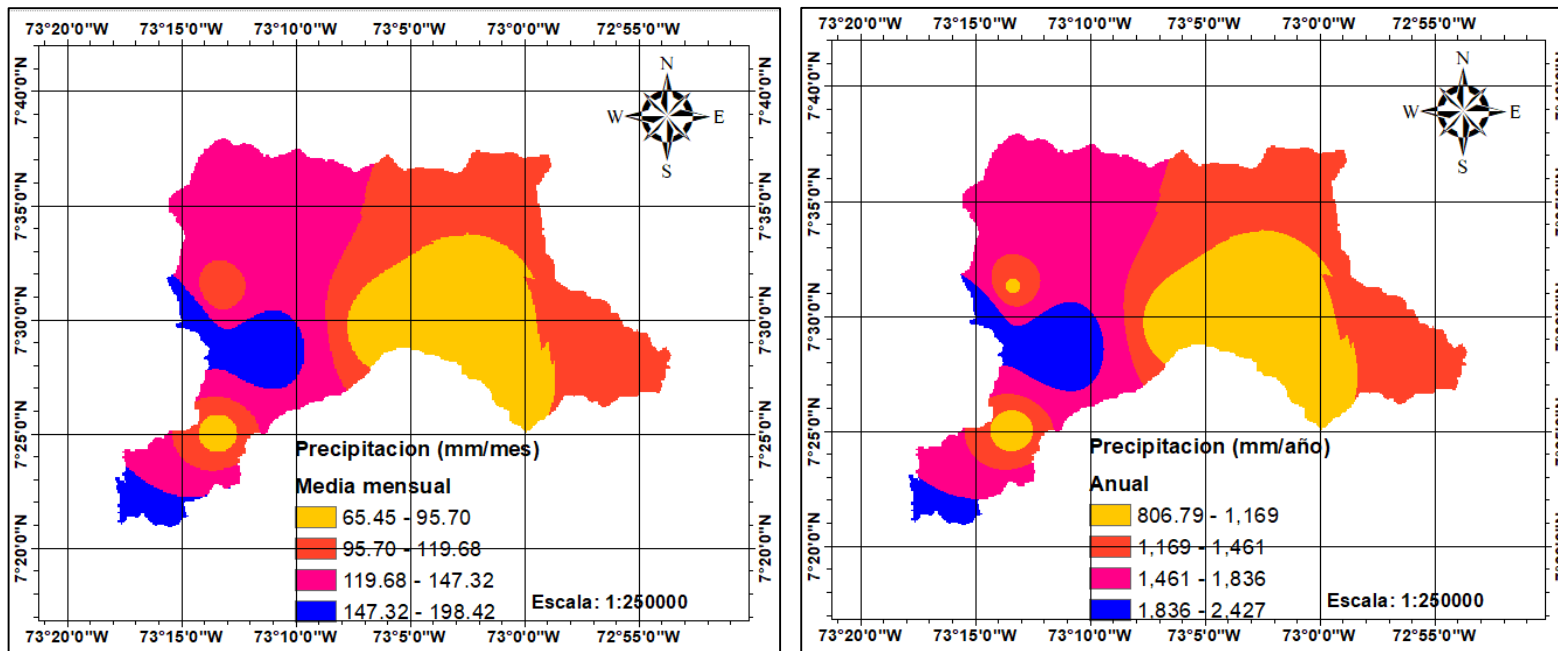
REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

En la Figura 6 se evidencia que el promedio mensual de la precipitación de la Subcuenca osciló entre 65.45 y 198.42 mm/mes, siendo notorio que la zona Sur y Sureste perteneciente al municipio de Suratá registra los menores valores (65.45-97.70 mm/mes), en comparación con la zona Suroeste y Oeste pertenecientes al municipio de El Playón donde se registra los mayores valores (147.32-198.42 mm/mes).

En cuanto a las variaciones anuales de la precipitación (Figura 6), estas fueron mayores en los municipios de El Playón (localizadas entre 7°25'-7°30' N y 73°15'-73°10' W) y Rionegro (localizadas entre 7°25'-7°30' N y 73°15'-73°10' W). Así, dentro del municipio de El Playón se tienen dos veredas: Playón (2,427 mm/año), y San Pedro (2,243 mm/año). En cuanto al municipio de Rionegro solo se tiene la vereda Miralindo (2,084 mm/año). De este mismo modo, las menores precipitaciones anuales estuvieron entre 806.79 -1,169 mm/año, y se presentaron en el municipio de Suratá (localizadas entre 7°25'-7°30' N y 73°15'-73°10' W) y en el municipio de Rionegro. Así, la localización geográfica de estos valores está dada para el municipio de Suratá exactamente por nueve veredas: Santa Bárbara, Mesallana, Santa Rosa, Capacho, Gramalotico, El Silencio, San Isidro, Las Abejas y Filo. Mientras que, para el municipio de Rionegro corresponde a dos veredas: Calichana y Caimán.

Figura 6. Mapas de precipitación media mensual multianual y anual de la Subcuenca Cachira Sur.



Fuente: Autores.

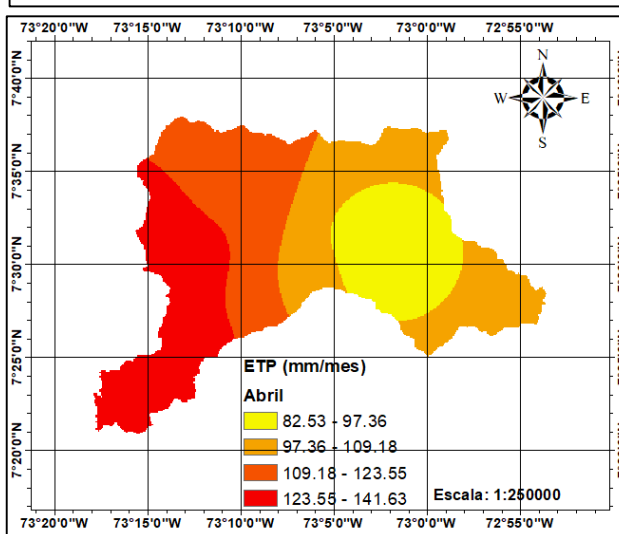
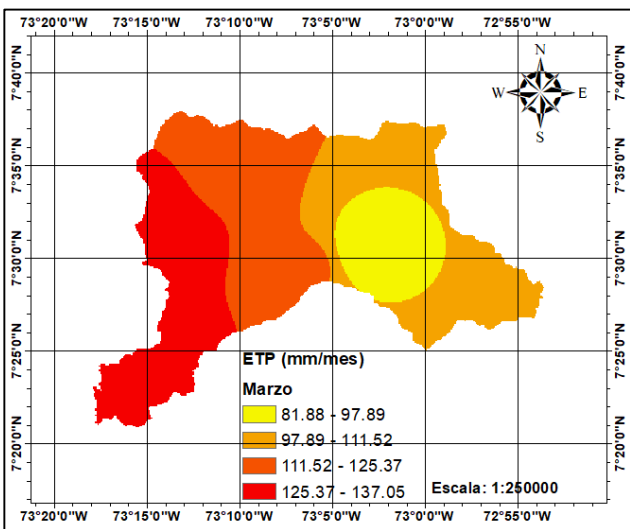
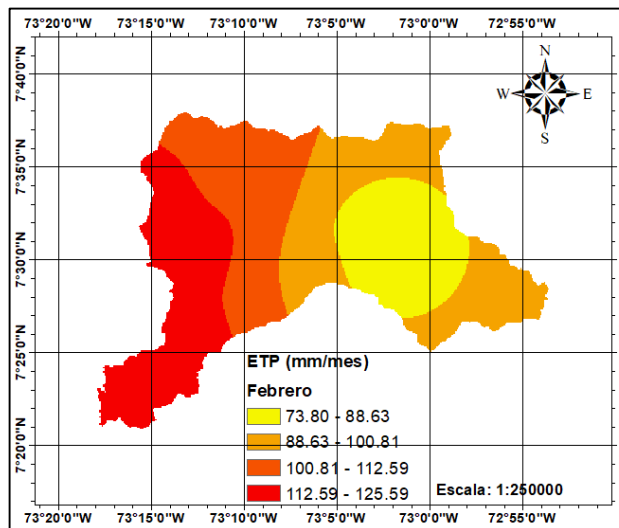
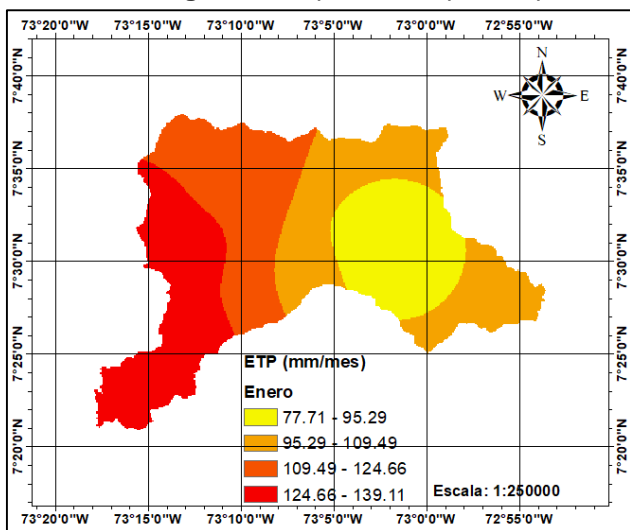
4.2. CANTIDAD DE AGUA QUE SALE DE LA SUBCUENCA POR EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los meses donde se presentó menor evapotranspiración potencial fueron noviembre con 71.31 mm/mes y febrero con 73.80 mm/mes, principalmente en el municipio de Suratá hacia el Sur y Sureste de la Subcuenca. En estos mismos meses, los valores máximos de evapotranspiración potencial fueron 126.42 y 125.59 mm/mes, respectivamente. Por otra parte, los meses donde se presentó mayor evapotranspiración potencial fueron: agosto con 145.95 mm/mes y julio con 143.26 mm/mes, mientras que en los mismos meses, los valores mínimos fueron 86.23 y 86.67 mm/mes, respectivamente (Figura 7).

En todos los meses de la presente investigación (2011-2016), una de las zonas puntuales en donde se presentó la mayor evapotranspiración potencial fue en la parte Suroeste de la Subcuenca, donde se ubica el municipio de Rionegro (localizado entre 7°21'-7°26' N y 73°11' W), en el cual se encuentran las veredas Miralindo, Puyana, Centenario, Golconda, Galapagos y Altamira (Figura 7).

A su vez, en todos los meses se presentó la menor evapotranspiración potencial en la parte central de la Subcuenca, donde se ubica el municipio de Suratá (localizado entre 7°25'-7°38'N y 73°5'-72°53') en el cual se encuentran las veredas de Gramalotico, Capacho, Filo, La Violeta, El Silencio, Mesallana, Santa Rosa, El Mineral, Crucesitas, Las Abejas, Santa Bárbara, y Cartagena. De forma general, la mayor evapotranspiración potencial se presentó en la parte Suroeste donde se localiza el municipio de Rionegro (localizado entre 7°21'-7°26'N y 73°18'-73°11'W) y Noroeste donde se localiza el municipio de El Playón (localizado entre 7°26'-7°38'N y 73°16'-73°5'W) de la Subcuenca (Figura 7).

Figura 7. Mapas de evapotranspiración potencial mensual multianual (2011-2016).



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

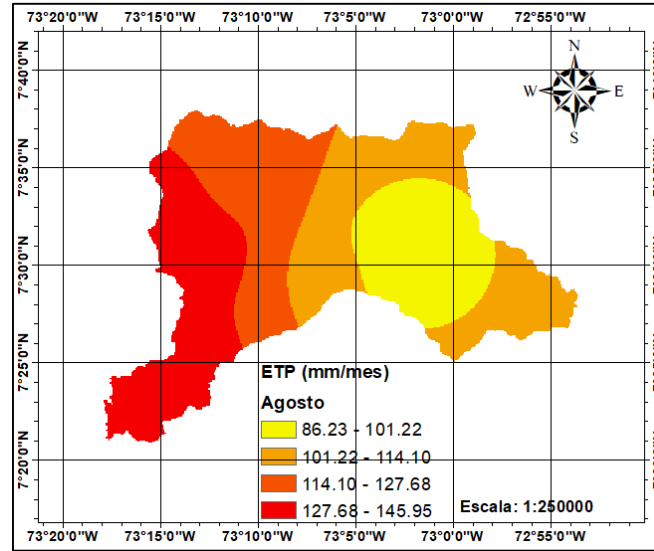
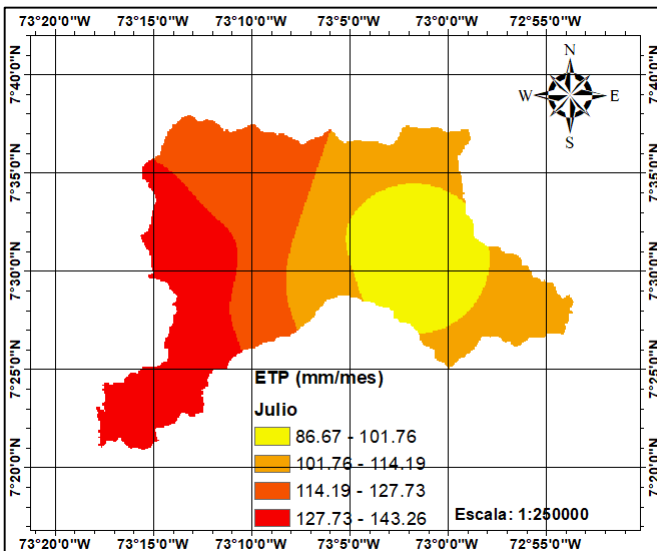
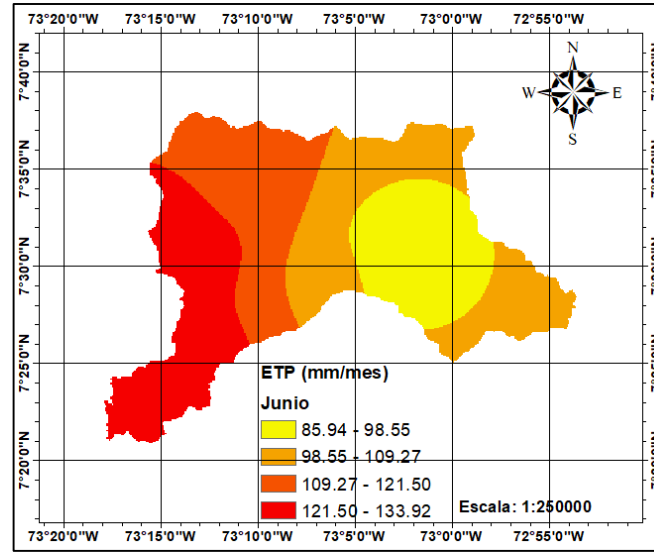
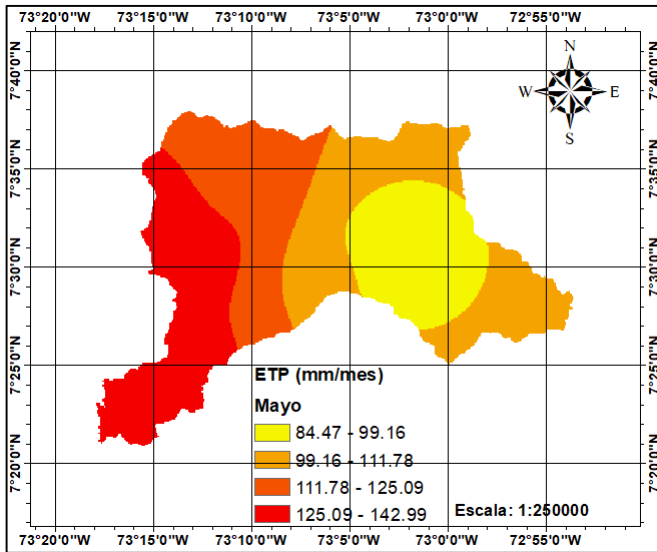
REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
 PRÁCTICA

VERSIÓN: 01



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

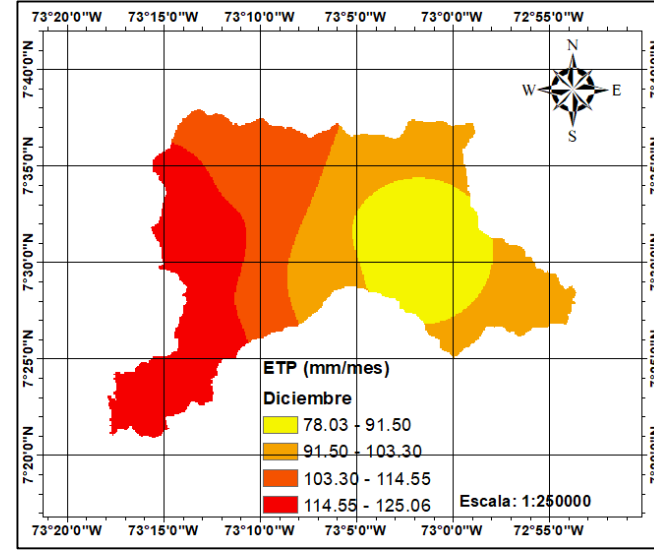
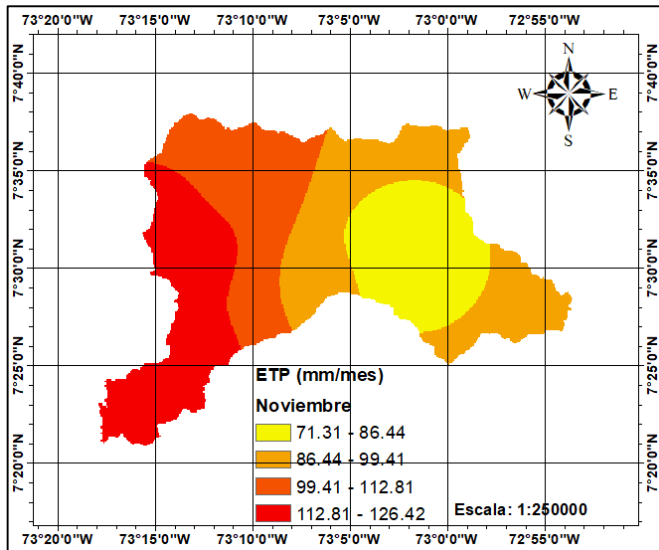
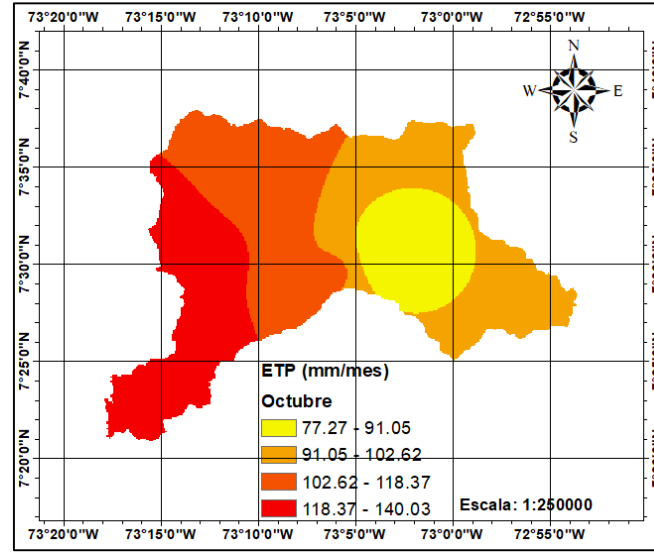
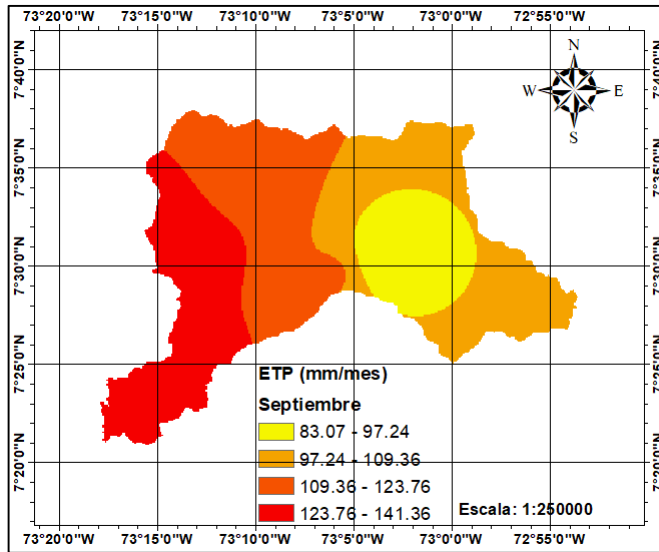
REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
 PRÁCTICA

VERSIÓN: 01



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

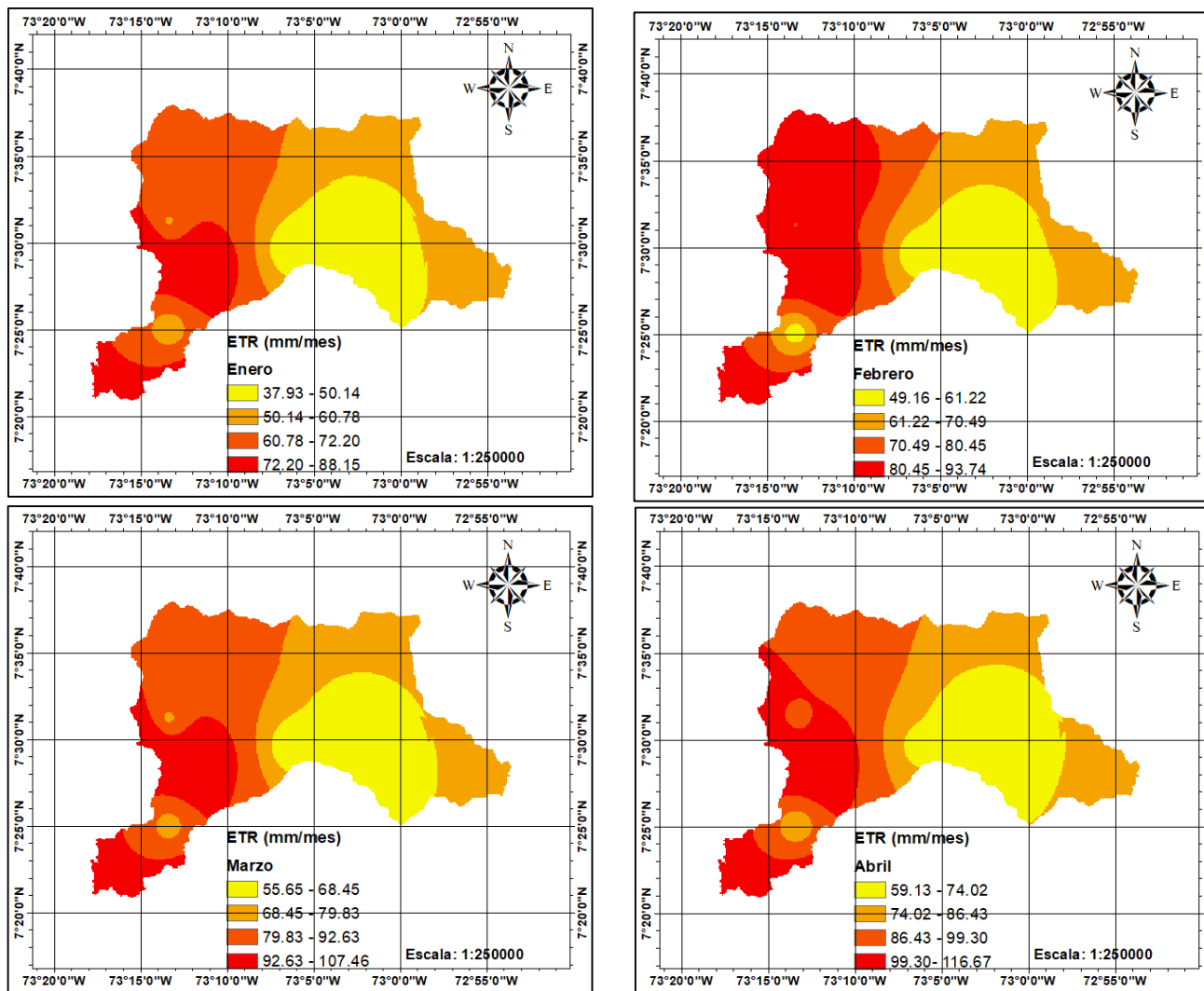
A partir de la evapotranspiración potencial se calculó la evapotranspiración real y se encontró que los meses donde se presentaron menores valores fueron junio con 33.52 mm/mes y enero con 37.93 mm/mes. En estos mismos meses, los valores máximos de evapotranspiración obtenidos fueron 107.51 y 88.15 mm/mes respectivamente; por lo tanto, enero se clasificó como el mes donde se registraron los menores valores de evapotranspiración real. Por otra parte, en este mismo mes (enero) se presentaron los menores valores de precipitación media mensual (Figura 8).

Los meses donde se presentaron mayores valores de evapotranspiración real fueron abril con 116.67 mm/mes y mayo con 116.16 mm/mes. En estos mismos meses los valores mínimos fueron 59.13 y 54.44 mm/mes respectivamente; por lo tanto, abril se clasificó como el mes donde se presentaron los mayores valores de evapotranspiración real mensual. En todos los meses de la presente investigación (2011-2016), una de las zonas puntuales en donde se presentó mayor evapotranspiración real fue en la parte Suroeste de la Subcuenca, donde se ubica el municipio de Rionegro (localizado entre 7°21'-7°26'N y 73°18'-73°11'W), en el cual se encuentran las veredas de Miralindo, Puyana, Centenario, Golconda, Galapagos y Altamira (Figura 8).

En todos los meses se presentó la menor evapotranspiración real en la parte central de la Subcuenca, donde se ubica el municipio de Suratá (localizado entre 7°25'-7°38'N y 73°5'-72°53') en el cual se encuentran las veredas de Gramalotico, Capacho, Filo, La Violeta, El Silencio, Mesallana, Santa Rosa, El Mineral, Crucesitas, Las Abejas, Santa Bárbara, y Cartagena (Figura 8).

De forma general, la mayor evapotranspiración real se presentó en la parte Suroeste donde se localiza el municipio de Rionegro (localizado entre 7°21'-7°26'N y 73°18'-73°11'W) y Noroeste donde se localiza el municipio de El Playón (localizado entre 7°26'-7°38'N y 73°16'-73°5'W) de la Subcuenca (Figura 8).

Figura 8. Mapas de evapotranspiración real mensual multianual (2011-2016).



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

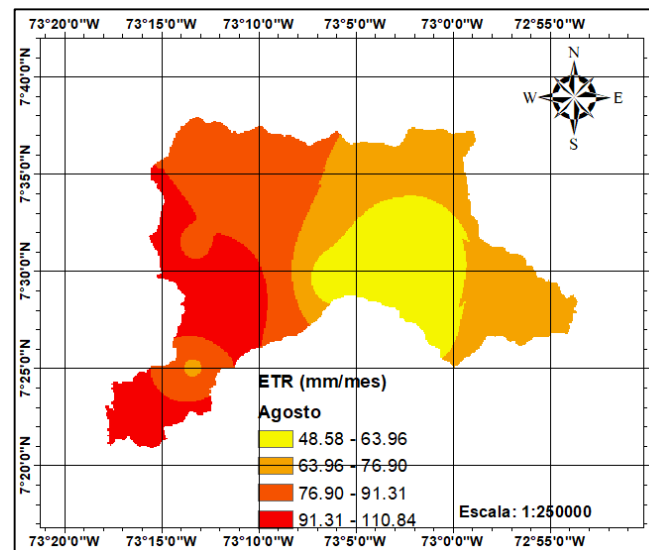
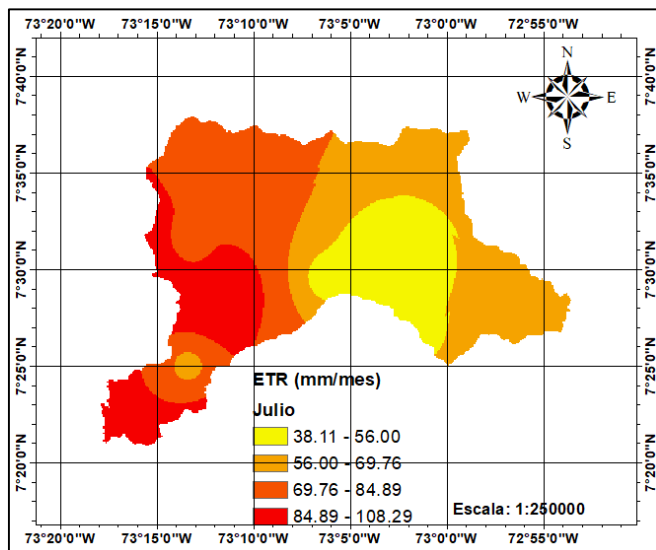
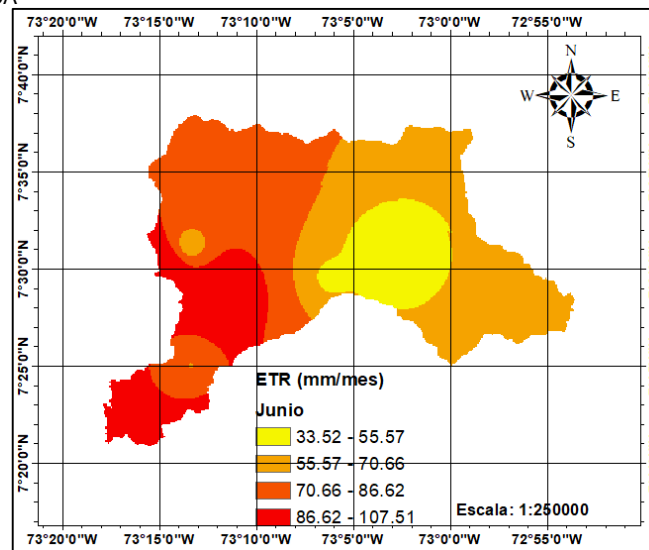
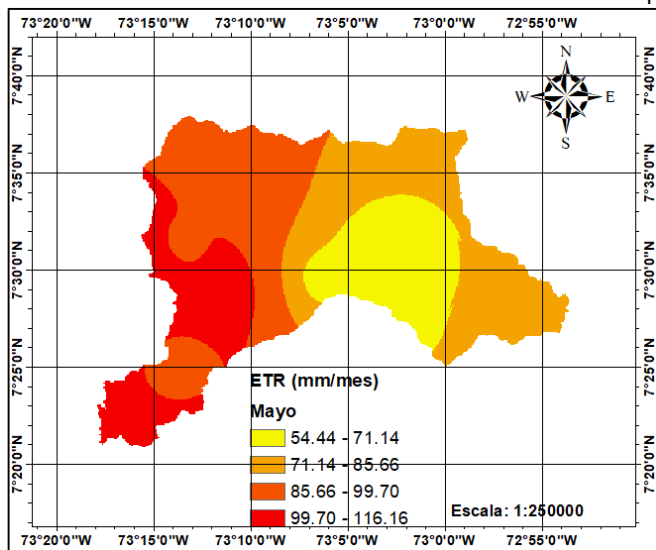
REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
 PRÁCTICA

VERSIÓN: 01



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

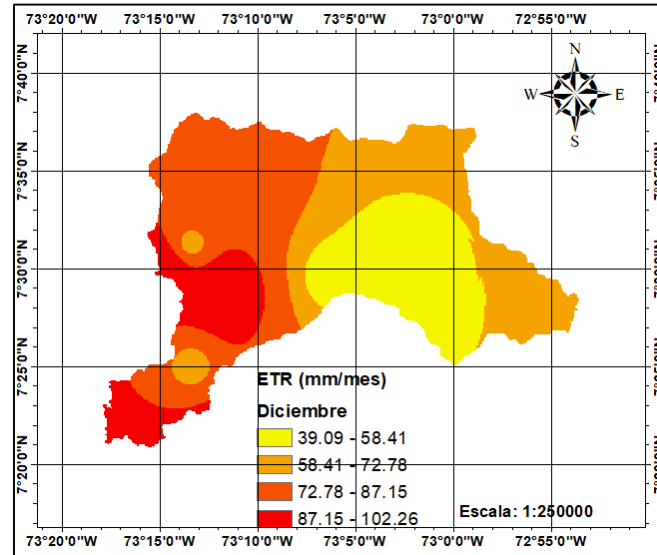
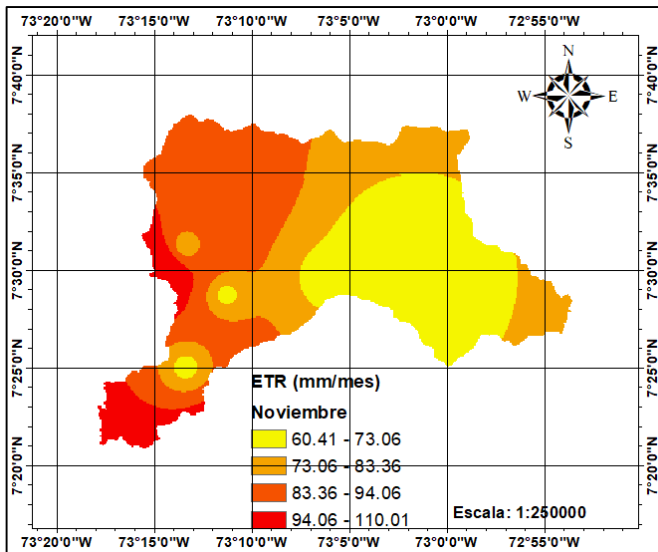
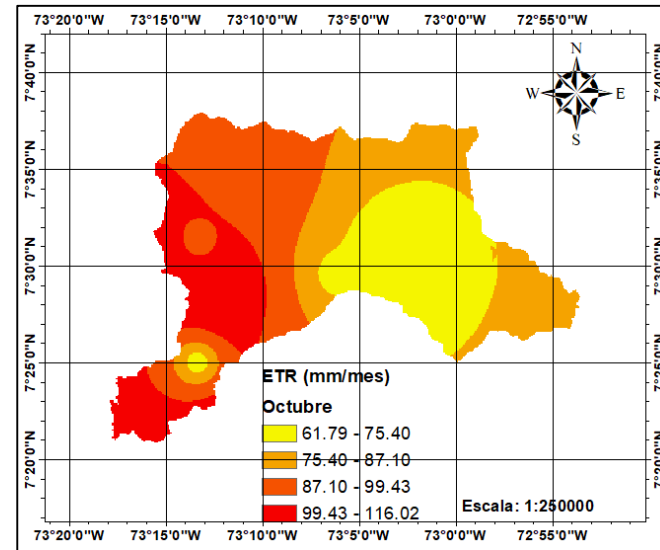
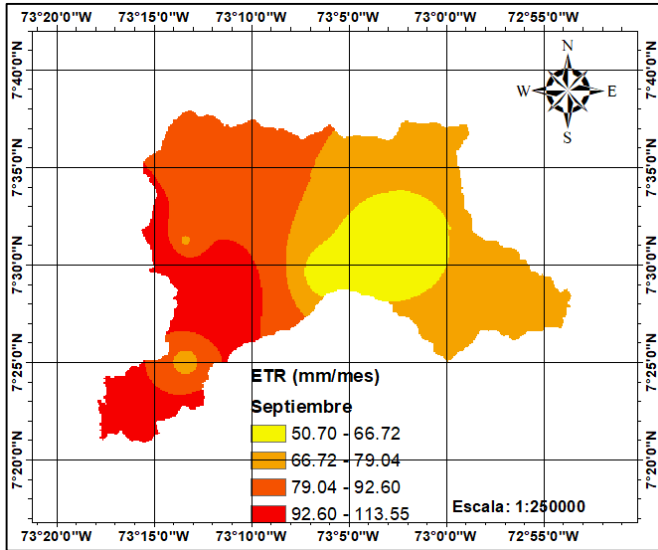
REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
PRÁCTICA

VERSIÓN: 01



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

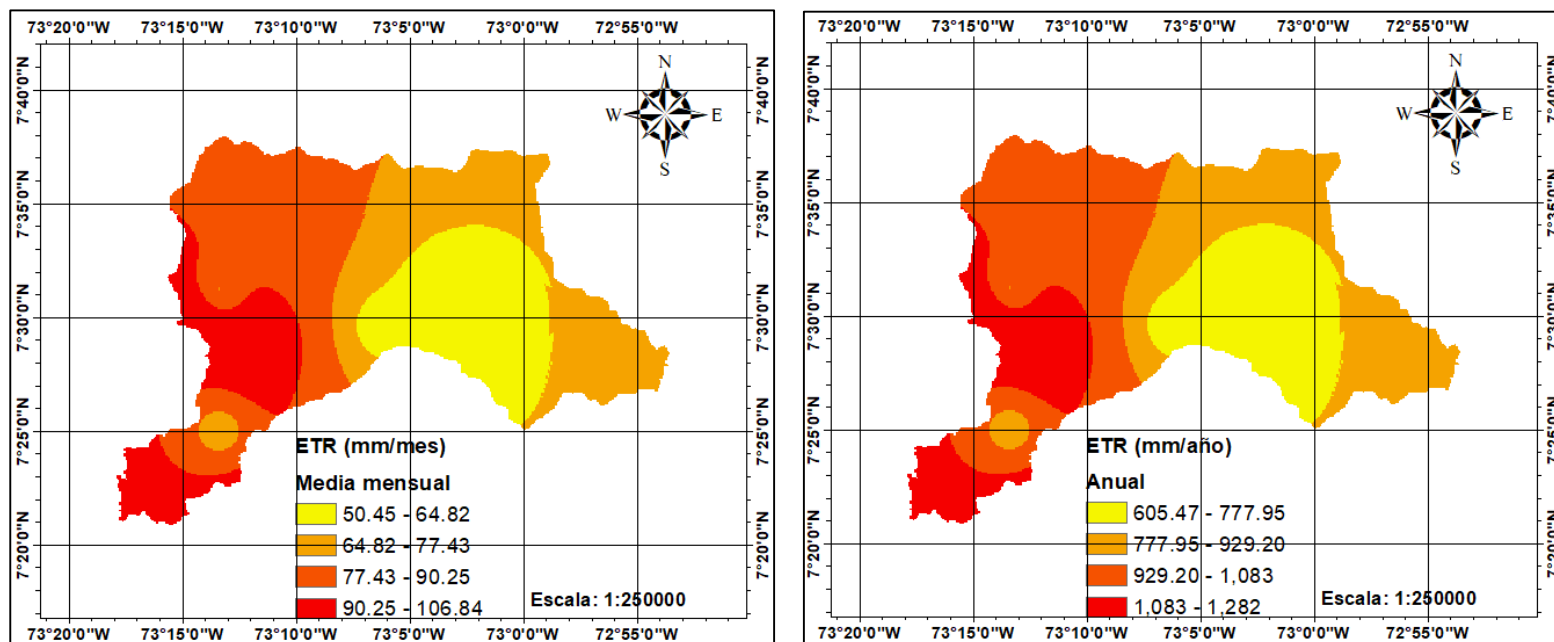
REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

Realizando una comparativa entre ETP y ETR se demostró que la evapotranspiración real es menor que la evapotranspiración potencial, debido a que la ETR analiza el estado del suelo de una forma más cercana a la realidad, al tener en cuenta que el suelo no se encuentra provisto en todo el área de estudio de una cobertura vegetal y tampoco se encuentra siempre saturado de agua. Los valores máximos de evapotranspiración potencial anual se encuentran entre 1,460 y 1,642 mm/año, mientras que los de evapotranspiración real se encuentran entre 1,083 y 1,282 mm/año (Figura 9).

En la figura 9, se presenta el total de la cantidad de agua que salió de la Subcuenca Cachira Sur por evapotranspiración real, con un valor de 1,282 mm/año y un valor medio mensual de 106.84 mm/mes. Los valores máximos según el mapa de evapotranspiración real anual se encuentran entre 1,083 y 1,282 mm/año y se registran en el municipio de Rionegro al Suroeste de la Subcuenca, donde se encuentran las veredas de Arrumbazon, San Pedro, Huchaderos, Playón, Cuesta, Tachuela, Galapagos, Golconda, Centenario, Miralindo y Puyana. También se afirma que en promedio en todos los meses se presentó una evapotranspiración real entre 50.45 – 106.84 mm/mes.

Figura 9. Mapas de evapotranspiración real media mensual multianual y anual.



Fuente: Autores

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

4.3. BALANCE HIDROLÓGICO SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA CACHIRA SUR

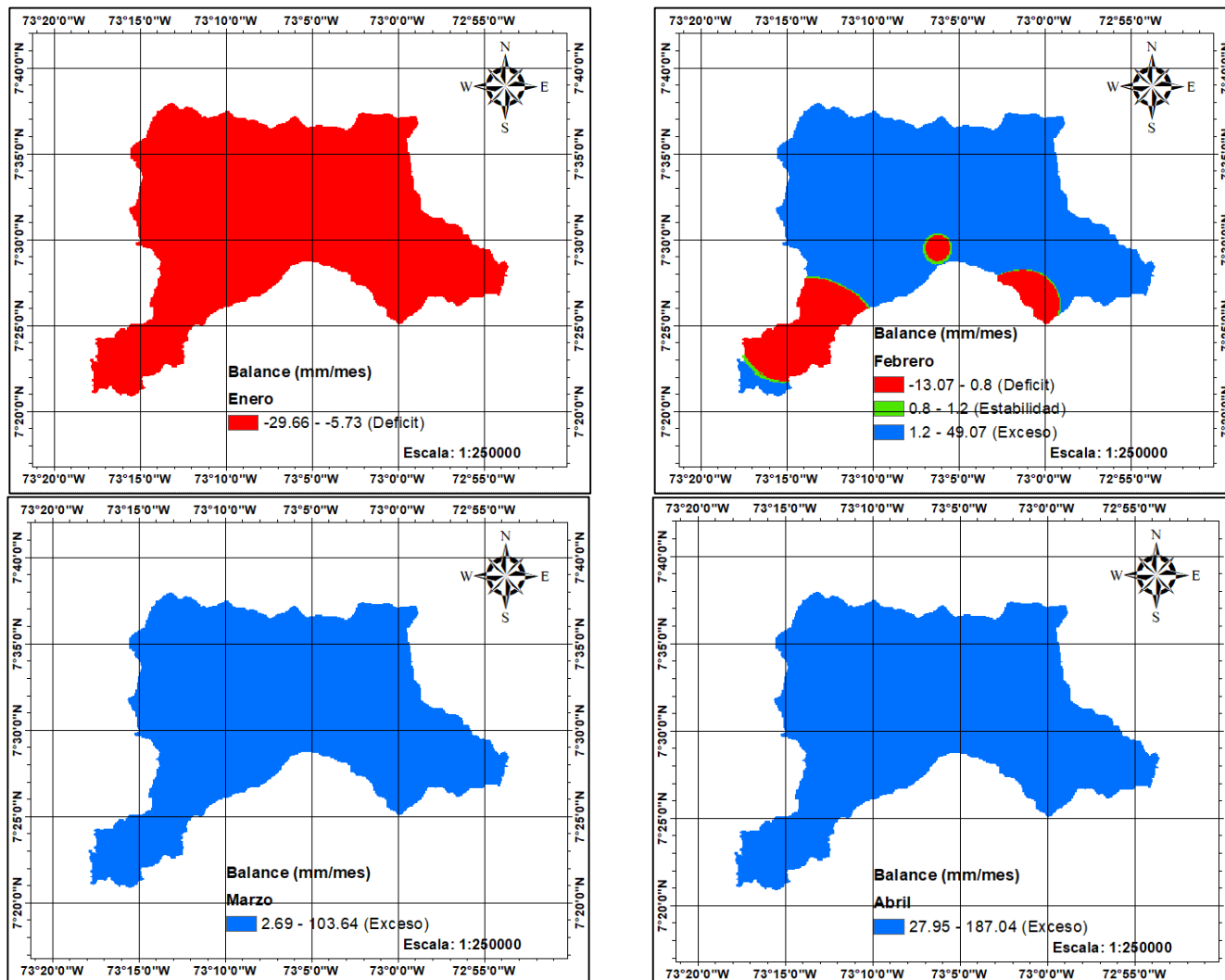
Según los resultados obtenidos en la Figura 10 que contiene los mapas del balance hidrológico superficial de la Subcuenca Cachira Sur, se puede denotar que el mes de enero fue el que presentó mayor déficit durante todo el periodo de estudio con registros desde 29.66 hasta 5.73 mm/mes. Igualmente, el mes de febrero presentó zonas con déficits en los municipios de Rionegro (localizado entre 7°21'-7°26'N y 73°18'-73°11'W) donde se encuentran las veredas de Galápagos, Altamira, Huchaderos, Miramar, Virginia, La Unión, La Ceiba, Tachuela, Cuesta, La Victoria, Calichana, Algarruba, y el municipio de Suratá (localizado entre 7°25'-7°38'N y 73°5'-72°53'), con las veredas Capacho y Gramalotico, con valores de 13.07 mm/mes.

El mes de junio presentó zonas con déficits, en los municipios de Suratá (localizado entre 7°25'-7°38'N y 73°5'-72°53') y El Playón (localizado entre 7°26'-7°38'N y 73°16'-73°5'W). Así, dentro del municipio de Suratá se tienen 12 veredas: Pantanitos, Las abejas, Crucecitas, El Mineral, El Silencio, San Isidro, Cartagena, Mesallana, Santa Bárbara, Sta.Rosa, Capacho, Filo. En cuanto al municipio de El Playón se tiene la vereda Arrumbazon. En cada una de ellas se presentaron déficits de 22.08 mm/mes. En julio se registraron déficits máximos de 17.10 mm/mes en la parte Noroccidental y central de la Subcuenca (Figura 10).

En el mes de junio la estabilidad hídrica se evidenció en zonas puntuales del municipio de Suratá (localizado entre 7°25'-7°38'N y 73°5'-72°53'), donde se encuentran las veredas de la violeta, Capacho, Gramalotico y Mohan con un rango que osciló entre 0.8-1.2 mm/mes. Las zonas de estabilidad hídrica para todos los meses se concentraron alrededor de las zonas de déficits y comienzos de las zonas de excesos, esto se debe a que la precipitación y evapotranspiración en estas áreas tuvieron rangos iguales que garantizan la disponibilidad de agua sobre la superficie del suelo (Figura 10).

En la Figura 10, se puede denotar que el mes de octubre fue el que presentó mayor cantidad de exceso de agua (237.4 mm/mes) sobre la superficie del suelo en toda la Subcuenca. También fue el mes con mayores registros de precipitación con valores máximos de 332.64 mm/mes. En los meses de marzo, abril, mayo, septiembre y octubre fue notoria la presencia de excesos máximos en toda la Subcuenca. Los valores para cada mes fueron: marzo (103.64 mm/mes), abril (187.04 mm/mes), mayo (168.48 mm/mes), septiembre (119.88 mm/mes), y octubre (237.4 mm/mes). Por otra parte, en el mes de junio el resto de la Subcuenca tuvo excesos hídricos (1.2 -69.98 mm/mes).

Figura 10. Mapas del balance hidrológico superficial de la Subcuenca Cachira Sur.



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

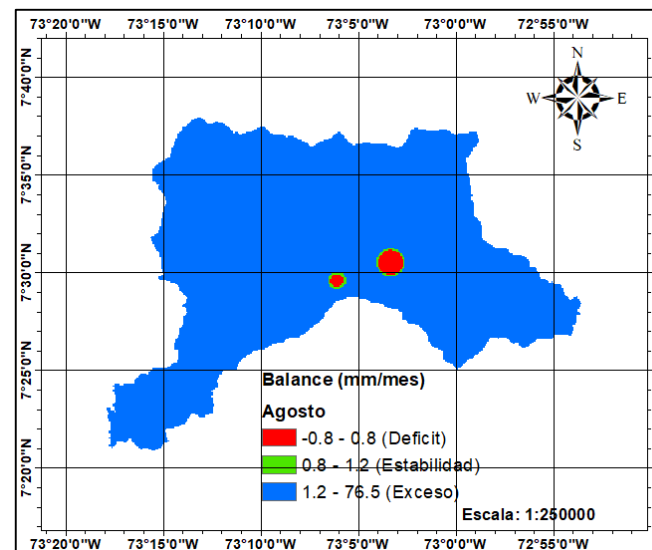
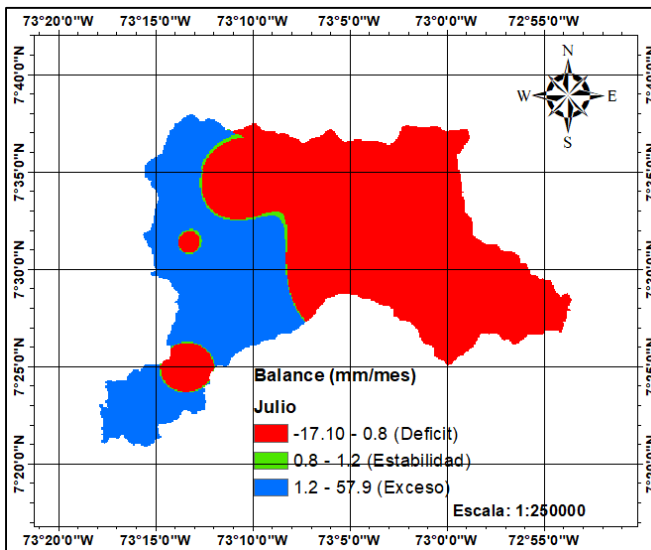
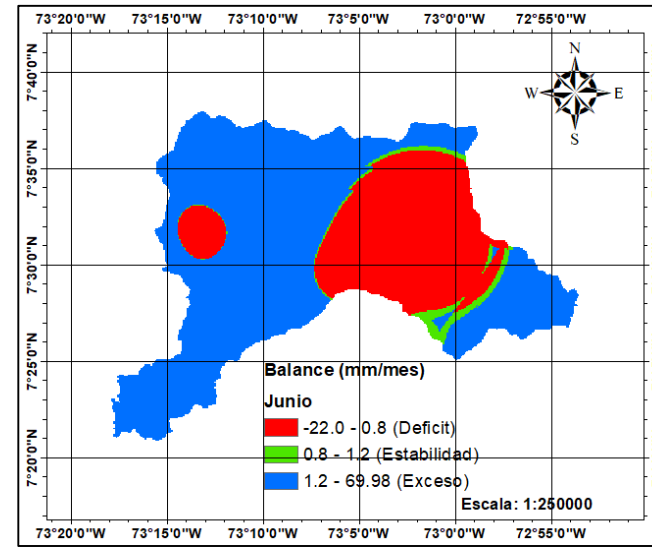
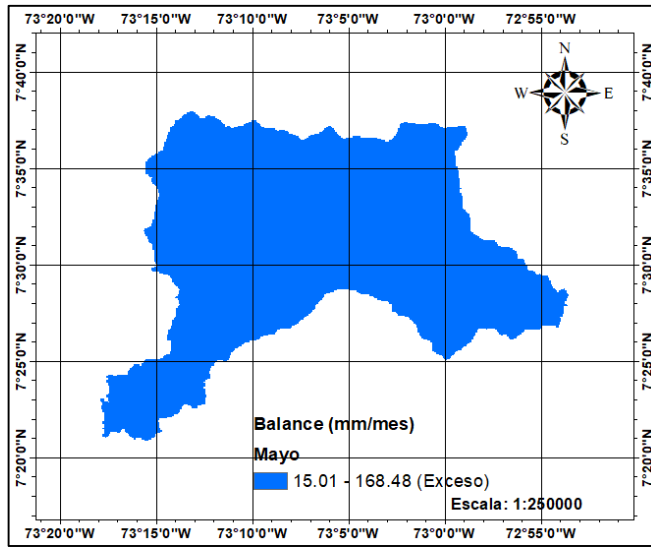
REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
 PRÁCTICA

VERSIÓN: 01



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

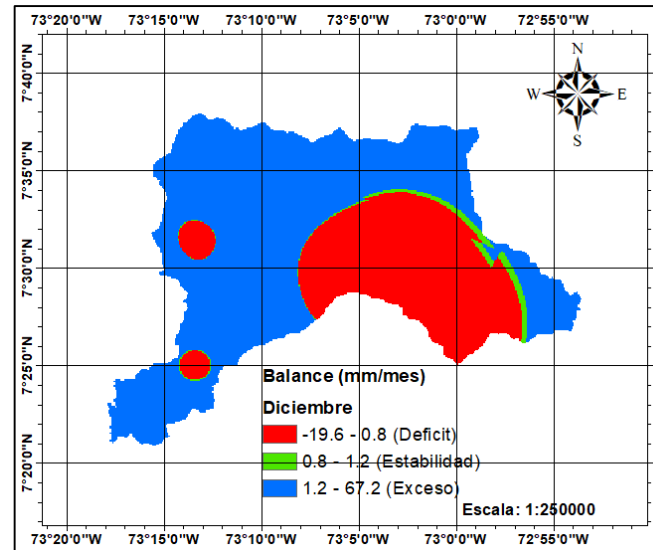
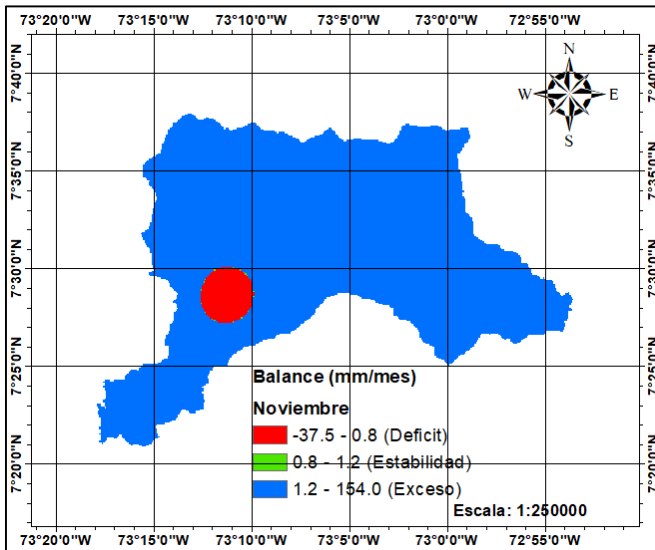
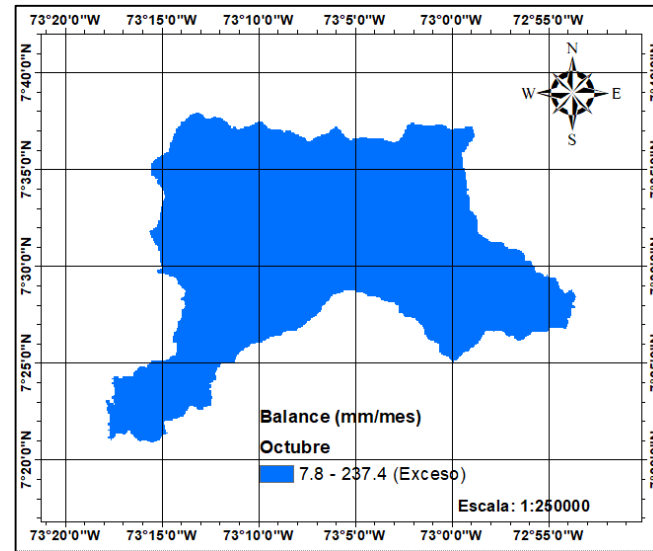
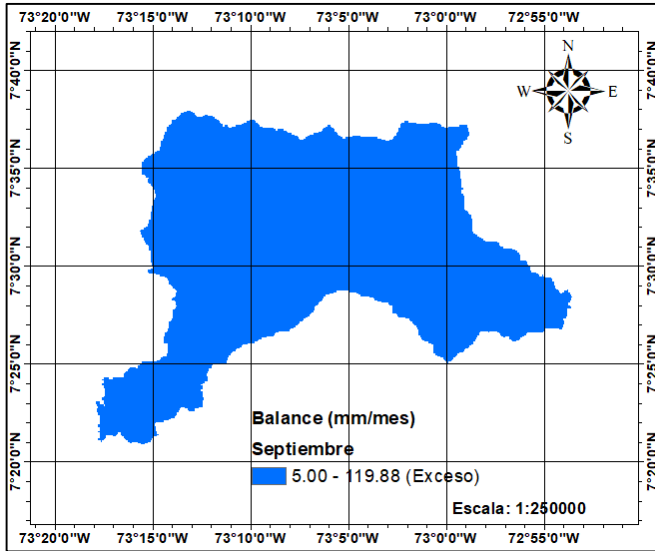
REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
 PRÁCTICA

VERSIÓN: 01



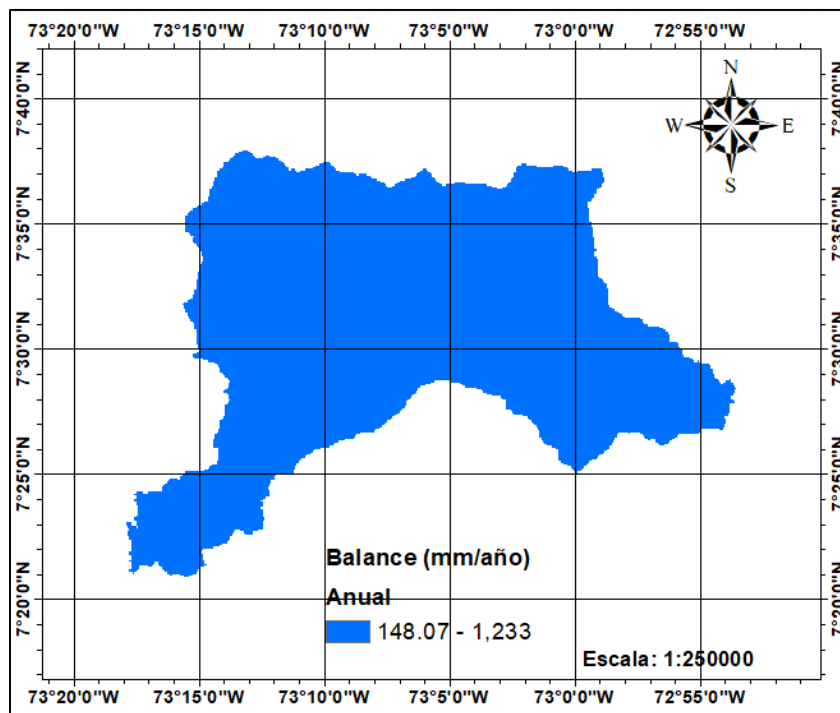
ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

La Figura 11, hace referencia al balance hidrológico superficial anual (1976 -2016) donde se hace notorio que toda la Subcuenca Cachira Sur tiene excesos de agua con valores que van desde 48.07 hasta 1,233 mm/año. De este modo, la Subcuenca recibe 1,282 mm/año de precipitación así como presenta déficits en enero de toda la serie de años analizados, información de suma importancia para el abastecimiento del recurso agua a los acueductos municipales. Se puede deducir que la disponibilidad neta anual de agua para la Subcuenca Cachira sur en el periodo de estudio analizado se encuentra entre rangos que van desde 148.07 hasta 1,233 mm/año.

Figura 11. Mapa del balance hidrológico superficial anual de la Subcuenca Cachira Sur.



Fuente: Autores

4.4. COMPARACION INVESTIGACION CON ESTUDIOS REALIZADOS ANTERIORMENTE

En las Figuras 10 y 11, correspondientes al numeral 4.3 se muestran los mapas del balance hidrológico con los resultados obtenidos en esta investigación a nivel mensual y anual, respectivamente. Del mismo modo, en las Figuras 12 y 13, se presentan los mapas del balance hidrológico correspondientes a la consultoría CE&A creados por los autores de la presente investigación.

Basados en la Figura 10, se analizó que en el mes de enero hubo déficits en toda la Subcuenca en comparación con los resultados del mismo mes presentados en la Figura 12. En el mes de febrero hubo una gran diferencia en las zonas donde se presenta el déficit. En la Figura 12, se evidenció que este se localiza en la zona Este y Sureste correspondientes al municipio de Suratá, con valor de 22 mm/mes, en comparación con la Figura 10, donde el déficit se localizó en la zona Suroeste que corresponde al municipio de Rionegro, con 13.07 mm/mes.

Según los resultados obtenidos en el mes de marzo hubo déficit de 57.04 mm/mes en el estudio presentado en la Figura 12, en zonas muy puntuales localizadas en el municipio de El Playón, más específicamente en la vereda Límites en la parte Noroeste de la Subcuenca en comparación con el mismo mes de la presente investigación (Figura 10), donde no se registran déficits.

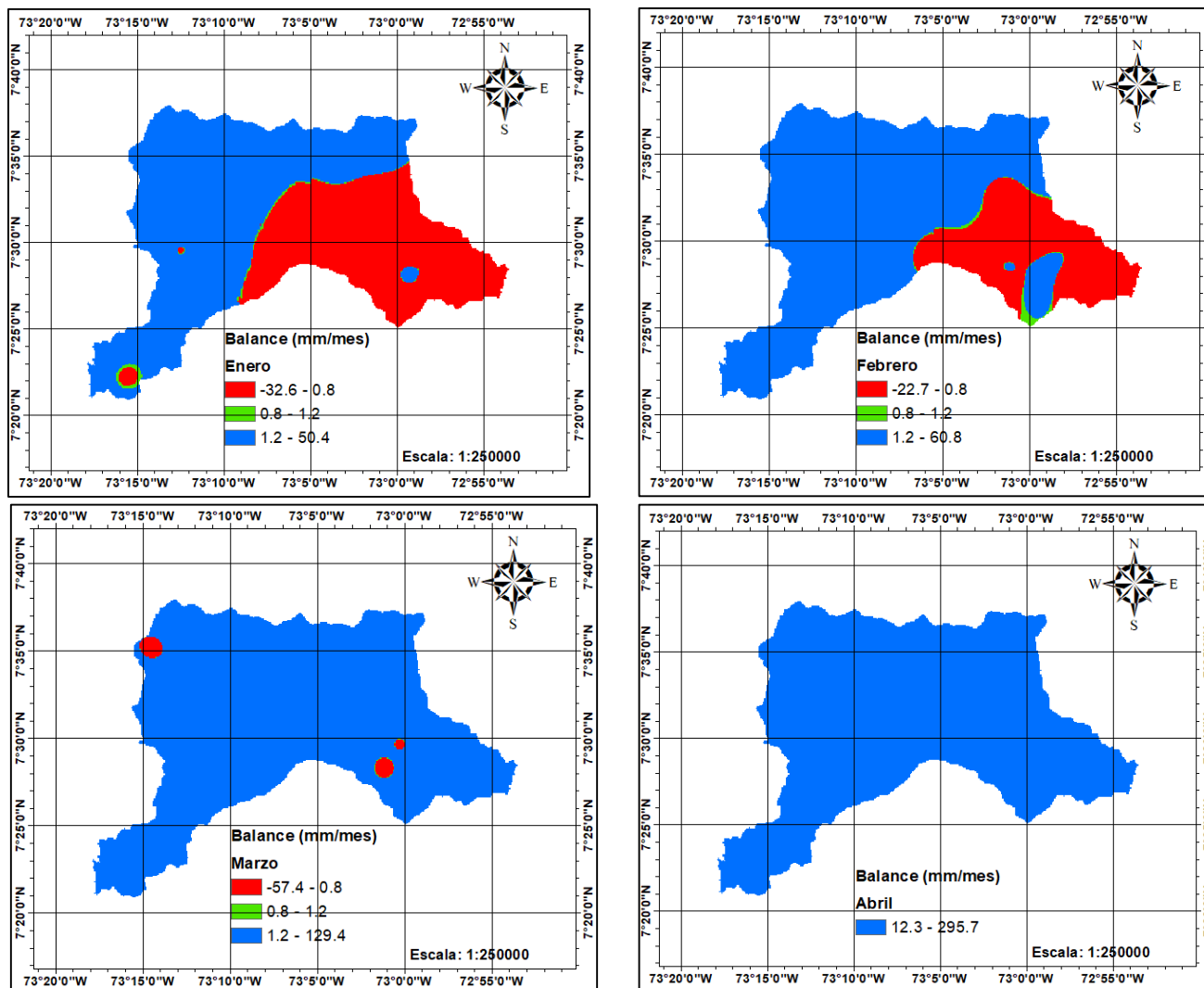
En el estudio presentado en la Figura 12, se evidenciaron déficits máximos en zonas puntuales correspondientes al segundo semestre del año, en el mes de julio, localizados en el Sureste de la Subcuenca en el municipio de Suratá en 2 veredas: Filo y Santa Rosa, con un valor de 7.9 mm/mes en comparación con la Figura 10 de la presente investigación, donde se analizan grandes déficits de 22 mm/mes en los meses de junio en la zona central y Noreste; julio con déficit en más del 50% del territorio localizado en toda la parte central y este de la Subcuenca (abarcando todo el municipio El Playón) con registros de 17.10 mm/mes; agosto en las veredas Santa Bárbara y Mesallana (municipio de Suratá) con un valor de 0.8 mm/mes; noviembre en el municipio El Playón ubicado al Suroeste de la Subcuenca en la zona puntual donde se ubica la vereda Playón con déficit de 37.5 mm/mes y diciembre, principalmente en la zona Sureste del municipio de Suratá, con registros de 19.6 mm/mes.

En el segundo semestre del año 2015 (incluido en el rango de años analizados en la presente investigación), se presentaron sequías ocasionadas por el fenómeno El Niño; esto influyó en que se generaran los déficits que se muestran en la Figura 10 en zonas puntuales, lo cual no es normal, ya que por lo general en meses como septiembre, octubre y noviembre se presentan excesos de agua ocasionados por altos valores de precipitación correspondientes a la lluviosa mayor.

En el mes de enero se presentan excesos en la parte oeste de la Subcuenca con valores que van desde 1.2 hasta 50.4 mm/mes (Figura 12). Para el mes de febrero se dieron excesos en los dos estudios en la zona central y norte de la Subcuenca que corresponden

al municipio de El Playón. Sin embargo, los valores máximos obtenidos fueron de 60.8 mm/mes (Figura 12) y 49.07 mm/mes (Figura 10). En el mes de marzo, en los dos estudios se presentaron excesos en la mayor parte de la Subcuenca, con valores máximos de 103.64 mm/mes (Figura 10) y 129.4 mm/mes (Figura 12).

Figura 12. . Mapas del balance hidrológico consultoría CE&A (2009).



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

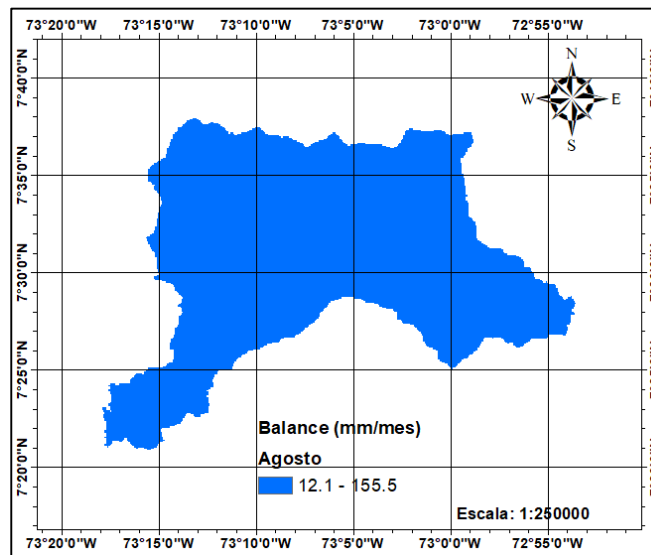
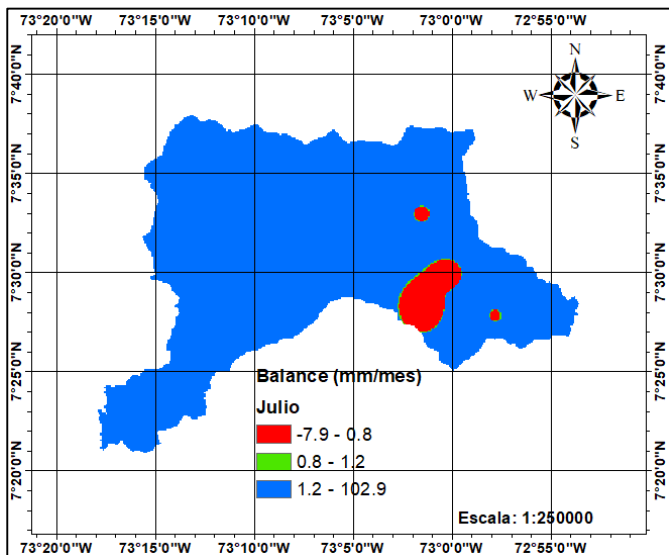
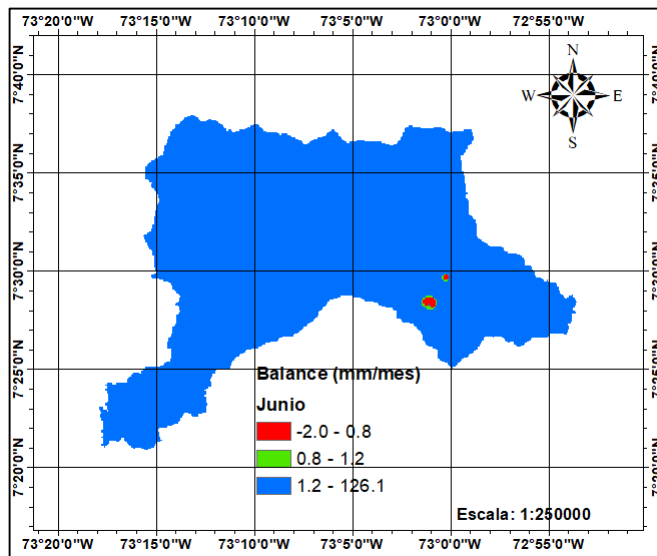
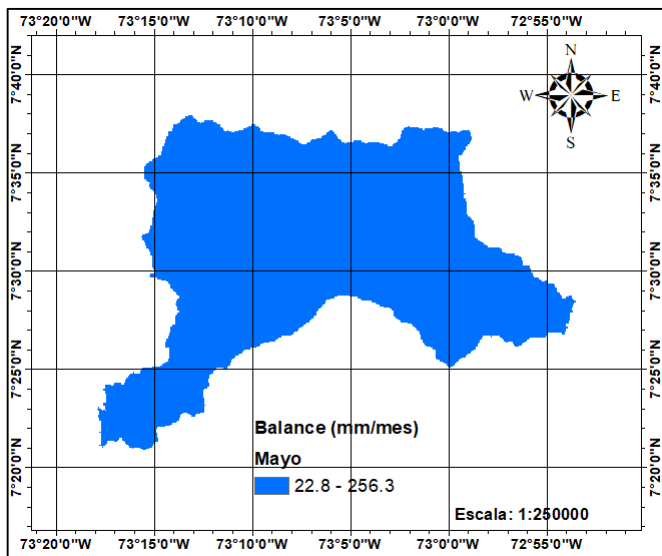
REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
 PRÁCTICA

VERSIÓN: 01



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

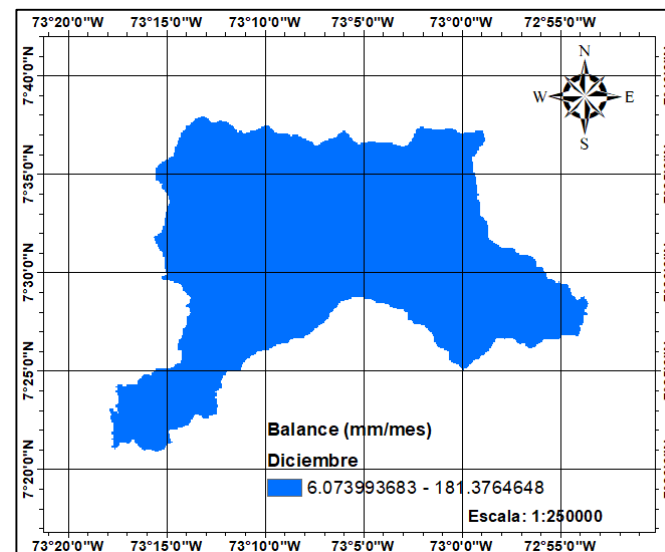
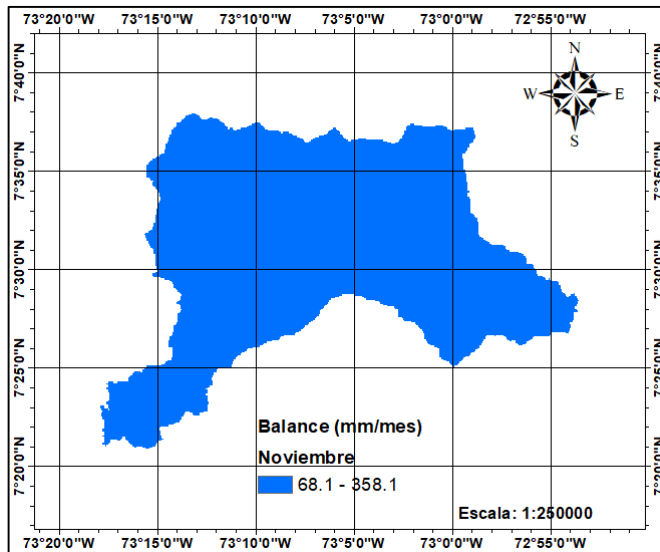
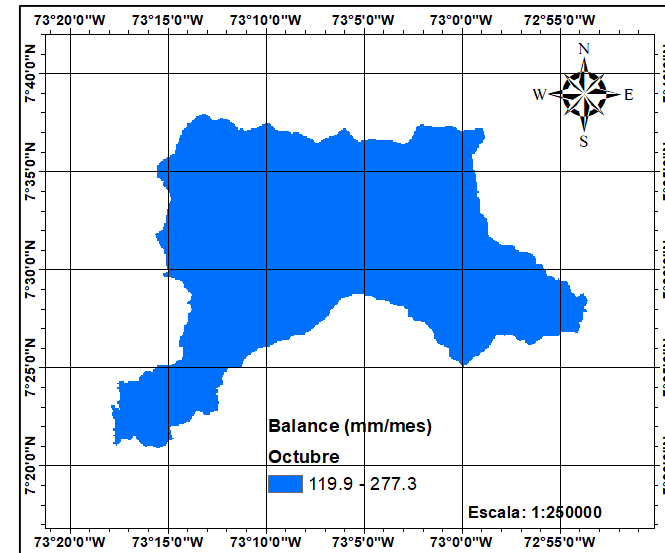
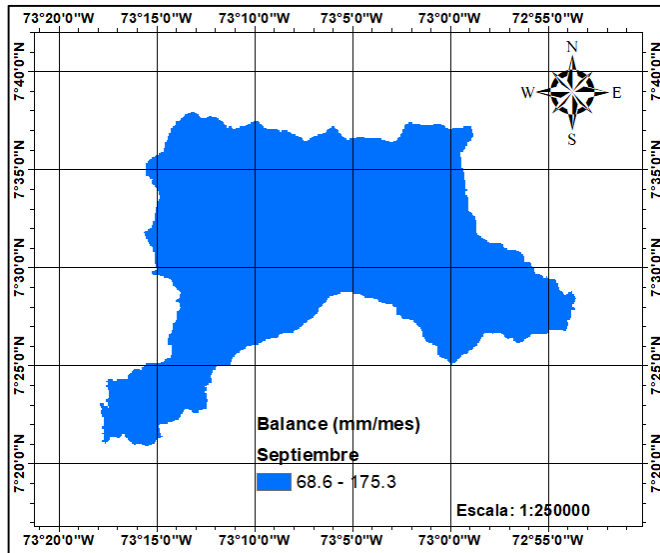
REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
 PRÁCTICA

VERSIÓN: 01



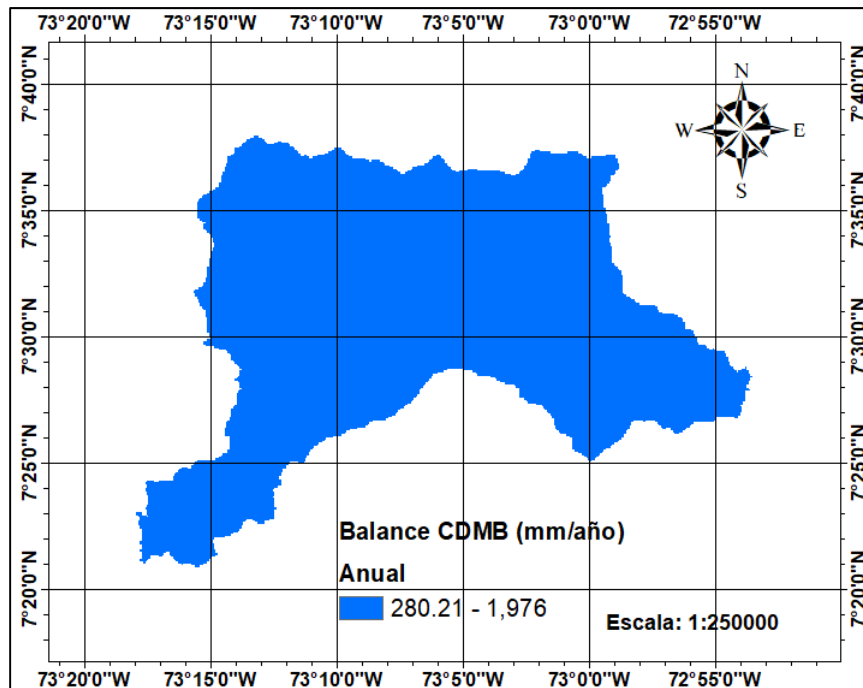
ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

Según el estudio presentado en la Figura 13 correspondiente al balance anual, en comparación con la presente investigación (Figura 11), los dos mapas presentaron excesos hídricos en toda la Subcuenca con valores máximos de 1,976 mm/año y 1,233 mm/año respectivamente.

Figura 13. Mapa del balance hidrológico anual obtenido del estudio realizado por la consultoría CE&A.



Fuente: Autores.

Se pudo determinar que efectivamente, el uso de SIG para la solución de problemas es de gran aplicabilidad no solo en el campo de la hidrología, sino también en otras áreas de la ingeniería, ya que aporta ventajas notorias en comparación con el uso de métodos manuales, como por ejemplo:

En los métodos manuales, el uso y el manejo de la información son más lento, y por ende, demorado, mientras que en los SIG igual de rápido que es el procesamiento de la información, lo es la obtención de productos, por lo que permite realizar análisis complejos de la realidad espacial rápidamente.

Los productos o resultados que se obtienen tras el análisis de los datos espaciales con un SIG se caracterizan principalmente por su calidad y su variedad. Además, si se elige el software adecuado, son resultados obtenidos con una inversión mínima de tiempo y de dinero. Por otro lado, los métodos manuales implican una inversión alta de tiempo para poder obtener los resultados.

Los SIG permiten el almacenamiento y visualización de la realidad geográfica de forma eficiente e interactiva; trabaja con información exacta, centralizada y, sobre todo, actualizada ya que permite la posterior incorporación de información complementaria que enriquece constantemente la base de datos original. Mientras que en los métodos manuales, la actualización de la información se hace un proceso un poco más tedioso, lo cual implica que no se pueda realizar constantemente.

El formato digital de los datos permite trabajar con formas compactas que nada tienen que ver con los mapas de papel o las tradicionales tablas de información usadas principalmente en los métodos manuales.

El tratamiento y el análisis de la información se realizan en grandes cantidades. Estas herramientas permiten no sólo trabajar con grandes volúmenes de datos, sino que además permiten almacenarlos física y completamente, y en varios niveles, por ejemplo, público e institucional, cosa que no ocurre con el uso de métodos manuales, en donde los procesos, actividades y reportes se realizan manualmente.

También permiten trabajar e integrar información de distintas fuentes y escalas, y datos tanto espaciales como no-espaciales. Además, todos estos datos pueden ser analizados a la vez, incluso repetidamente, y de una forma rápida, racional y fácilmente inteligible para las personas y entidades, permitiendo así una evaluación ágil y sencilla así como apoyar la toma de decisiones.

En los SIG, no sólo pueden integrarse conjuntos de datos diferentes, sino que también pueden ser integrados varios procedimientos distintos. Esto no sería posible mediante ningún método manual. Además, evita actividades redundantes.

5. CONCLUSIONES

Según los resultados de la cantidad de agua que ingresa a la Subcuenca Cachira Sur para la serie de años (49 años), se concluye que la vereda Playón del municipio El Playón es la que presenta mayores valores de precipitación, información de vital importancia para la creación de captaciones de agua para el abastecimiento de acueductos urbanos y veredales.

De acuerdo al análisis espacial de la cantidad de agua que ingresa a la Subcuenca por precipitación se determinó que el municipio de Suratá no se considera apto para la creación de acueductos veredales o municipales por los déficits presentados durante la serie de años estudiadas, información que concuerda con la realidad actual del municipio que no cuenta con acueductos veredales para el abastecimiento de la zona por bajos caudales en la red hídrica y por la falta de intervención del estado en el territorio.

En general la cantidad máxima promedio mensual de agua que ingresa a la Subcuenca se considera baja en comparación con otras Subcuencas jurisdicción de la CDMB donde se realizan captaciones de agua importantes como es el caso de la Subcuenca del Rio Oro y la parte alta del Rio Lebrija, las cuales abastecen al Área Metropolitana de Bucaramanga.

Según la disponibilidad neta mensual del recurso agua, la vereda Filo del municipio de Suratá, ubicado en la parte Sureste de la Subcuenca, registra déficits en todos los meses; por lo tanto, en esta zona se deben crear planes de manejo adecuado del recurso hídrico para el sustento de la población.

La vereda Miralindo, jurisdicción de Rionegro (ubicado en la parte Sur de la Subcuenca), presenta excesos en todos los meses durante la serie de años estudiada. Además de esto, en este municipio específicamente no se cuenta con estaciones hidrológicas de monitoreo, ya que las estaciones se localizan por lo regular en el río Lebrija. Por lo tanto, se deben crear planes de gestión del riesgo por la posible creación de avalanchas o inundaciones por aumentos en los caudales originados por los excesos hídricos provenientes de la vereda Miralindo y el río Rionegro, el cual atraviesa este municipio.

El uso de SIG está siendo pieza clave dentro de una sociedad que cada día se está valiendo más del uso de herramientas tecnológicas para mejorar la eficacia, presentación, manejo y obtención de resultados de las investigaciones o proyectos que se están llevando a cabo. De esta manera, el uso de métodos manuales está pasando a un segundo plano, lo cual no significa que estén dejando de usarse, porque no se puede negar que siempre serán fundamentales cuando no se cuente con los recursos tecnológicos necesarios, pero sí que su uso no es tan primordial como antes.

6. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda que en futuros proyectos de investigación sobre balances hidrológicos se tengan en cuenta más métodos de cálculo para la evapotranspiración potencial y real, aparte de los utilizados frecuentemente, pues de esta manera se podrá tener más opciones para comparar las semejanzas y diferencias entre los resultados obtenidos en cada método. Para esto se hace necesario que las entidades ambientales tengan registro y suministren información sobre otras variables climatológicas tales como velocidad del viento, brillo solar, altura sobre el nivel del mar, entre otras.
- ❖ Entre más estaciones meteorológicas sean usadas para el establecimiento del balance hidrológico, habrá mayor exactitud en los resultados obtenidos para determinada zona; sin embargo, es importante que la mayor cantidad de estaciones se encuentren dentro del área de estudio y no en zonas aledañas para que los valores obtenidos de cada cálculo se acerquen a los valores reales y se pueda decir con certeza que pertenecen a esa área de estudio.
- ❖ Este proyecto de investigación se podría mejorar si después de realizado el balance hidrológico, los resultados fueran usados para el cálculo de caudales o para ser comparados con estudios de investigación realizados en otros sistemas hídricos que tengan características meteorológicas, altitudinales, climatológicas e hidrológicas en general, iguales o parecidas y usando las mismas estaciones meteorológicas o por lo menos algunas de ellas.
- ❖ La información suministrada por una de las entidades ambientales contenía registros de mediciones erróneas en los datos de las estaciones meteorológicas así como estaciones que no pertenecían al área de estudio, por ende se hace indispensable revisar y verificar que los datos con los cuales se desea trabajar en el proyecto estén acordes a la realidad y hagan parte de la zona a la cual está dirigida la investigación.
- ❖ Para garantizar que los resultados de este proyecto de investigación son confiables, se propone realizar el balance hidrológico de la Subcuenca Cachira Sur usando otro SIG y teniendo este estudio como base para hacer un análisis de resultados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR Moreno, e GRANELL-Canut, Sistemas de Información Geográfica para Unidades de Información, España. 80-86, 2013. Disponible en la web: <http://www.elprofesionaldelainformacion.com/contenidos/2013/enero/11.pdf>

Biblioteca Universidad Nacional de la Pampa, Análisis de los métodos de estimación de evaporación y evapotranspiración a las condiciones locales de la ciudad de Córdoba, [PDF], [revisado el 01 de noviembre de 2017], Disponible en internet: http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/rdata/tespo/r_lopana441.pdf

CASTELLANOS ORTIZ Sareth Tatiana, Balance hidrológico superficial de la cuenca de Rio Frio, Área Metropolitana de Bucaramanga. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander. Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías. Programa de Ingeniería Ambiental, 2016. 45 p.

Centro de Recursos Hidrisi, México, Métodos de estimación de las Evapotranspiraciones ETP y ETR, [PDF], [revisado el 10 de octubre de 2017], Disponible en internet: idrisi.uaemex.mx/files/29/Sesion-7---Interpolación/.../metodosevapotranspiraciones.pdf

Ciclo hidrológico.com, Hidrología, [en línea], [revisado el 26 de septiembre de 2017], Disponible en internet: <https://www.ciclohidrolologico.com/hidrologia>

CLIMANTICA, El ciclo del agua: Escorrentía, [en línea], [revisado el 01 de Agosto de 2017], Disponible en internet: https://pendientedemigracion.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_infiltracion.html

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 1541. (28, Julio, 1978). Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973. Bogotá D.C, 1978.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 1729. (6, Agosto, 2002). Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5º de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C, 2002. No. 44893.

Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA), Metodología del cálculo de índice de escasez, [PDF], [revisado el 018 de octubre de 2017], Disponible en internet: https://www.cortolima.gov.co/SIGAM/nuevas_resoluciones/Rs_0865_Metodolog%C3%ADa_anexo%20.pdf

CORPORACION AUTONOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB), Consultoría Estructura y Ambiente (CE&A). Estudio Ambiental para el Ordenamiento y manejo de la Subcuenca Cachira Sur. 1 ed. Bucaramanga. 2009. 318p.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), Documento de diagnóstico amenazas de inundación y Erosión en el Río de Oro, [PDF], [revisado el 12 de noviembre de 2017], Disponible en internet: <https://www.erosion.com.co/presentaciones/category/18-deslizamiento-e-inundacion-en-giron-santander.html?download=224:223-tomo2-riodeoro->.

CORTOLIMA, Metodología para la estimación de caudales medios mediante un SIG [en línea], [revisado el 16 de julio de 2017], Disponible en internet: http://www.metropol.gov.co/recursohidrico/Informes/INFORMES/Red%20Rio%20Fase%20I/Hidraulica%20e%20Hidrologia%20-%20Capitulo%204_Q%20medio%20-%20Q%20Alcantarillado.pdf

Encolombia, Balance hídrico nacional [en línea], [revisado 10 de mayo de 2017]. Disponible en Internet: <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/estudio-agua/estudiocolombianoaguas1/>.

Eumed.net (enciclopedia virtual), El método analítico [en línea], [revisado el 12 de junio de 2017]. Disponible en internet: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2007a/257/7.1.htm>

Global Wáter Partnership. Contribuyendo al desarrollo de una cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico [en línea], [revisado 10 de mayo de 2017]. Disponible en internet: http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf

GRIMALDOS MOJICA Manuel Alejandro, Herramienta Computacional para la estimación del balance hidrológico de largo plazo utilizando ArcGIS 10.1. Trabajo de tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Civil. Bogotá: Universidad Santo Tomas. Magister en Ingeniería Civil, 2014. 34 p.

Hypergeo, Balance Hídrico, [en línea], [revisado el 16 de Agosto de 2017], Disponible en internet: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article300>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Hidrología, [en línea], [revisado el 28 de octubre de 2017], Disponible en internet: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/hidrologia>

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Solicitud de información [en línea], actualizado el 16 de febrero de 2017, [revisado 18 de mayo de 2017]. Disponible en internet: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?!Servicio=Usuarios&ITipo=usuarios&IFuncion=loggin&>

Laboratorio Unidad Pacifico Sur, ¿Qué es un SIG?, [en línea], [revisado el 15 de junio de 2017], Disponible en internet: <https://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/>

MESA Oscar, *HIDRO-SIG: Una herramienta para la estimación de balances hidrológicos en Colombia*, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Pregrado de Ingeniería Civil, 2008, revisado el 03 de agosto de 2017, Disponible en internet: https://www.researchgate.net/profile/John_Mejia2/publication/237315938_Hidro-SIG_Una_herramienta_para_la_estimacion_de_balances_hidrologicos_de_Colombia/links/0deec528ce6a3c377d000000/Hidro-SIG-Una-herramienta-para-la-estimacion-de-balances-hidrologicos-de-Colombia.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clink&gl=co

MINISTERIO DE EDUCACION NACIONAL. Sistema de información Geográfico del Sector Educativo (SI-GEO) [en línea], actualizado el 16 de marzo de 2008, [revisado 16 de mayo de 2017]. Disponible en internet: <http://www.mineducacion.gov.co/1621/article-156303.html>

Normas APA, como citar con normas APA, [en línea], [revisado el 12 de noviembre de 2017], Disponible en internet: <http://normasapa.com/normas-apa-2016-cuestiones-mas-frecuentes/>

Nosolig.com, ¿Cuánto cuestan los productos ArcGIS de ESRI? [En línea], actualizado el 20 de marzo de 2014, [revisado 20 de junio de 2017]. Disponible en internet: <http://www.nosolig.com/articulos/286-cuanto-cuestan-los-productos-arcgis-de-esri>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Evaluación de los recursos hídricos, [PDF], [revisado el 10 de octubre de 2017], Disponible en internet: <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002281/228100s.pdf>

Read books, audiobooks, and more, Códigos estaciones meteorológicas del IDEAM, (en línea), [revisado el 16 de octubre de 2017], Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/105711529/ESTACIONES-IDEAM>

RED INTERNACIONAL PRIDERAS, ¿Cómo redactar el estudio del estado del arte?, [PDF], [revisado el 20 de junio de 2017], Disponible en internet: http://redprideras.org/uploads/3/4/6/8/34681709/como_redactar_estudio_arte.pdf

Repositorio Institucional UN- Universidad Nacional de Colombia, med y red de drenaje, [PDF], [revisado el 01 de noviembre de 2017], Disponible en internet: http://www.bdigital.unal.edu.co/3482/2/71363510.2009_2.pdf

Slideshare, Ventajas y desventajas de los métodos de Evapotranspiración potencial, [en línea], [revisado el 16 de octubre de 2017], Disponible en internet: <https://es.slideshare.net/katherinemacedop/evapotranspiracion-35098756>

TAFUR LOZANO Andrés Fidel, Determinación de áreas estratégicas para el abastecimiento hídrico de la zona urbana del municipio de Ortega-Tolima a través de *Arcgis 10.2.2.*, Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar al título de Especialista en Información Geográfica, [PDF], disponible en internet: http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2870/Tafur_Lozano_Andres_Fidel_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER, Grupos de investigación [en línea], actualizado el 25 de octubre de 2016, [revisado el 15 de junio de 2017], Disponible en internet:

<http://www.uts.edu.co/portal/seccion.php?id=826&key=fdf562b01f2a92a183ae175b36ad25c0>

UNIVERSIDAD DE MURCIA, Sistema de Información Geográfica, [PDF], [revisado el 03 de agosto de 2017], Disponible en internet: www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf

Universidad de Sonora, Balance Hidrológico, [en línea], [revisado el 16 de septiembre de 2017], Disponible en internet: <http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/lvega/ARCHIVOS/BALANCE.htm>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del Rio Chinchiná, [PDF], [revisado el 10 de junio de 2017], Disponible en internet: http://www.bdigital.unal.edu.co/6100/6/8109507.2012_Parte2.pdf

Universidad Politécnica de Madrid, Tabla radiación solar extraterrestre, [PDF], [revisado el 03 de noviembre de 2017], Disponible en internet: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/tema-3/TABLA-RADIACION-SOLAR-EXTRATERRESTRE.pdf>

Universidad Tecnológica de la Mixteca, Un modelo de balances hídricos para cuencas hidrográficas: discusión, propuesta y aplicaciones, [PDF], [revisado el 13 de noviembre de 2017], Disponible en internet: <http://www.utm.mx/temas/temas-docs/e0611.pdf>