

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL RIO  
CHICAMOCHA**

**KRISTY DAYANA SAENZ GALVIS**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS**

**TUNJA**

**2015**

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL RIO  
CHICAMOCHA**

**KRISTY DAYANA SAENZ GALVIS**

**Trabajo de grado para optar el título de:  
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR:  
CARLOS ANDRÉS CARO CAMARGO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
TUNJA  
2015**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma de jurado**

**Tunja,**

## **DEDICATORIA**

El éxito de las metas que nos proponemos en nuestras vidas está ligado al carácter, a la perseverancia y constancia que se tenga en el camino para alcanzar nuestros sueños.

Quiero dedicar este trabajo a la persona más importante en mi vida, a quien admiro y respeto sobre cualquier cosa, quien ha estado conmigo en cada una de las etapas que he podido experimentar, quien a pesar de las adversidades, lleno de paciencia y confianza, ha creído en mí; mi padre Edison Sáenz, quien junto a mi madre y hermanos; quienes a pesar de la distancia, siempre cuentan con mi apoyo.

No puedo dejar a un lado a mis amigas, quienes me han ayudado en estos últimos años, demostrando su apoyo incondicional, compartiendo conmigo todas y cada una de las tristezas y alegrías en el transcurso de mi formación académica.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera medida agradezco a la Universidad Santo Tomas de Tunja por brindarme todo el apoyo para realizar el desarrollo de este proyecto, ya que a través del centro de investigaciones conté con todo el aporte económico para obtener la información hidroclimatológicas del IDEAM.

Además, deseo agradecer al Director del proyecto, el ingeniero Carlos Andrés Caro Camargo quien estuvo comprometido con todo el desarrollo de la investigación, aportando su experiencia profesional en cada uno de los inconvenientes que se presentaron.

Al IDEAM por suministrar la información de todas las cartas hidroclimatológicas de la cuenca y a CORPOBOYACA por aportar los Shape files del POMCA de la cuenca alta y media del río Chicamocha.

Al Ingeniero Nestor Rojas, docente de la facultad de ingeniería Civil, quien sirvió de apoyo en la etapa más importante de la investigación aportando sus conocimientos en georreferenciación.

A cada una de las personas, compañeros o amigos quienes desinteresadamente siempre estuvieron atentos al desarrollo de la investigación.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	15
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA .....	15
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	15
1.2.1 Pregunta general .....	15
1.2.2 Preguntas específicas.....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.4 OBJETIVOS.....	15
2. ANTECEDENTES HISTORICOS Y ESTADO DEL ARTE .....	17
2.1 ESTADO DEL ARTE .....	17
2.1.1 Investigaciones a nivel mundial.....	17
2.1.1 Investigaciones a nivel nacional y regional .....	18
3. MARCO TEÓRICO .....	22
3.1 MODELOS HIDROLÓGICOS .....	22
3.1.1 Tipos de modelos hidrológicos .....	22
3.2 MÉTODO “ABCD” DE THOMAS.....	23
3.2.2 Parámetros de entrada al modelo de Thomas.....	26
3.2.3 Datos de salida del modelo.....	27
3.3 PRECIPITACIÓN AREAL.....	27
3.3.1 Datos Faltantes de precipitación.....	27
3.4 MÉTODOS DE CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	28
4.1 MATERIALES.....	32
4.1.1 Cartas Hidroclimatológicas del IDEAM .....	32
4.1.3 Shapefile del pomca de la cuenca alta y media del río Chicamocha .....	33
4.1.4 Microsoft office Excel .....	34
4.2 MARCO METODOLÓGICO .....	34

4.2.1 Tiempo y Localización .....	34
5. ZONA DE ESTUDIO.....	36
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	37
5.1.1 Geología.....	37
5.1.2 Geomorfología .....	37
5.1.3 Morfodinámica.....	38
5.1.4 Climatología.....	38
5.1.5 Calidad del aire .....	39
5.2 DISTRIBUCIÓN DE SUBCUENCAS .....	47
6. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO.....	49
6.1 DATOS DE ENTRADA AL MODELO .....	49
6.1.1 Precipitación areal.....	49
6.1.2 Evapotranspiración Areal .....	50
6.1.3 Caudales observados .....	50
6.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO .....	51
6.2.2 Calibraciones descartadas.....	53
6.2.3 Parámetros <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> y <i>d</i> de la calibración del modelo de Thomas .....	54
6.3 ANÁLISIS DE LA RECARGA.....	57
6.4 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE RECARGA EN LA CUENCA DEL RIO CHICAMOCHA EN BOYACÁ .....	59
7. CONCLUSIONES .....	61
8. RECOMENDACIONES .....	62

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables necesarias en los métodos de evapotranspiración.....	29
Tabla 2. Cantidad de estaciones climatológicas dentro de la cuenca .....	32
Tabla 3. Cantidad de estaciones climatológicas dentro de la cuenca .....	47
Tabla 4. Relación de áreas de subcuencas .....	48
Tabla 5. Datos de entrada: Precipitación areal (mm) .....	49
Tabla 6. Datos de entrada: Evapotranspiración areal (mm).....	50
Tabla 7. Datos de entrada: Caudales observados.....	51
Tabla 8. Coeficiente de determinación $R^2$ y de correlación de las subcuencas.....	51
Tabla 9. Parámetros $a, b, c$ y $d$ .....	52
Tabla 10. Coeficientes $R^2$ y de correlación: subcuencas con calibración no favorable .....	53
Tabla 11. Parámetros de Calibración $a, b, c$ y $d$ de las subcuencas no favorables .....	54
Tabla 12. Parámetros de calibración $a, b, c$ y $d$ .....	54
Tabla 13. Valores de recarga (mm) utilizada en la elaboración de los mapas .....	59
Tabla 14. Recarga generada anualmente en cada una de las subcuencas.....	59
Tabla 15. Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas del IDEAM .....	73
Tabla 16. Estaciones de Temperatura del IDEAM.....	75

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Q Simulado vs Q de escorrentía de la microcuenca cortadera grande 1 .....	19
Gráfica 2. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 9 .....	52
Gráfica 3. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 3 .....	53
Gráfica 4. Variación del parámetro "a" en cada una de las sub cuencas.....	55
Gráfica 5. Variación del parámetro "b" en cada una de las sub cuencas.....	56
Gráfica 6. Variación del parámetro "c" en cada una de las sub cuencas.....	56
Gráfica 7. Variación del parámetro "d" en cada una de las sub cuencas.....	57
Gráfica 8. Variación de la recarga (mm) según la localización de las estaciones limnigráficas...	58
Gráfica 9. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 1 .....	76
Gráfica 10. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 2 .....	76
Gráfica 11. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 4 .....	77
Gráfica 12. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 3 .....	77
Gráfica 13. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 5 .....	78
Gráfica 14. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 8 .....	78
Gráfica 15. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 9 .....	79
Gráfica 16. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 10 .....	79
Gráfica 17. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 6 .....	80
Gráfica 18. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 7 .....	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las zonas de estudio.....	18
Figura 2. Mapa de distribución de la recarga en la cuenca de la Sabana .....	20
Figura 3. Zonas que considera el método de Thomas.....	24
Figura 4. Localización de la zona de estudio.....	36
Figura 5. Parque central de Tasco .....	40
Figura 6. La laguna los patos .....	41
Figura 7. Parque de Socha.....	42
Figura 8. Parque de Paz del Río.....	43
Figura 9. Iglesia de Jericó .....	44
Figura 10. Iglesia de Chita .....	45
Figura 11. Localización de las estaciones de Precipitación .....	46
Figura 12. Localización de las estaciones de temperatura.....	46
Figura 13. División de la cuenca del río Chicamocha.....	47
Figura 14. Mapa de distribución de la recarga anual.....	60
Figura 15. Mapa de distribución de la recarga en el mes de enero .....	81
Figura 16. Mapa de distribución de la recarga en el mes de febrero.....	82
Figura 17. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Marzo .....	83
Figura 18. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Abril .....	84
Figura 19. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Mayo.....	85
Figura 20. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Junio.....	86
Figura 21. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Julio .....	87
Figura 22. Mapa de distribución de la recarga en el mes de en Agosto .....	88
Figura 23. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Septiembre .....	89
Figura 24. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Octubre .....	90
Figura 25. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Noviembre .....	91
Figura 26. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Diciembre .....	92

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Estaciones de precipitación del IDEAM identificadas en el estudio .....	73
Anexo 2. Estaciones de temperatura del IDEAM .....	75
Anexo 3. Graficas de calibración del modelo en donde está la comparación de caudal observado y simulado en cada una de las sub cuencas.....	76
Anexo 4. Mapas de distribución mensual de la recarga.....	81
Anexo 5. Página principal del ante proyecto presentado en la facultad de ingeniería civil el día 19 de febrero de 2014 .....	93
Anexo 6. Participación en INGENIERIA 2014 – Latinoamérica y Caribe - Congreso y Exposición Realizado en Buenos aires, Argentina en noviembre de 2014 .....	94
Anexo 7. Publicación en el 1er encuentro interno de investigación de la división de arquitectura e ingenierías.....	105
Anexo 8. Participación en la 1ra feria de la ciencia realizada el día 25 de septiembre de 2014 en la sede central de la universidad A Santo Tomas, Tunja.....	110
Anexo 9. Participación en el día del Boyasencismo, evento realizado en el centro comercial Unicentro, el día 02 de Octubre de 2014.....	111

## RESUMEN

El recurso hídrico es esencial para la supervivencia de los seres vivos, por tal razón es indispensable tener un manejo apropiado de este en todo el mundo, para generar calidad de vida a las personas que habitan diferentes regiones y conservar este líquido vital.

Esta investigación pretende plantear una alternativa para identificar el balance hídrico en la región, generando mapas isovalores a niveles de recarga mes a mes del área de estudio, reconociendo la época y las zonas con mayor o igual aportación a los acuíferos dentro la cuenca.

Para la elaboración de los mapas, se pretende hacer la implementación de un modelo hidrológico denominado *método a,b,c,d de Thomas*, para diferentes puntos de la cuenca del río Chicamocha en Boyacá, Colombia, el cual está basado en la ley de conservación de la masa y muestra variables del balance hídrico mes a mes, teniendo en cuenta dos parámetros de entrada como son la precipitación y evapotranspiración areales, los cuales se calculan a partir de datos medidos por estaciones hidroclimatológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

Para una calibración adecuada y confiable, la cuenca del río Chicamocha fue dividida en 10 microcuencas las cuales fueron analizadas según los parámetros característicos de cada una de estas, en donde se comparó los caudales medidos por una estación limnimétrica o limnigráfica con los simulados por el modelo, lo cual dio como resultado el valor de la recarga en diferentes puntos dentro de la cuenca y así generar mapas isovalores mes a mes del área de estudio.

El análisis de los resultados obtenidos en los mapas, permite identificar las épocas y zonas de mayor aportación a los acuíferos y a su vez permite identificar la posible localización de agua subterránea con el fin de plantear la utilización de pozos profundos en tiempos de sequía, debido a que estos proveerían un suministro confiable de agua para el uso doméstico y agrícola en la región.

## ABSTRACT

The water resource is essential for the survival of the living organisms; therefore, an adequate water management is required worldwide to improve the life quality of people in the different regions and to preserve the hydric resource.

This research presents an alternative to identify the hydric balance in the region, building isovalue maps about the recharge of the aquifers per month in the study area, showing the regions with higher or equal contribution to the aquifers in the watershed.

In order to build the maps, a hydrological model was implemented called the Thomas Method a, b, c, d, for different points in the Chicamocha river watershed in Colombia. This method is based on the mass conservation law and shows variables of the hydric balance per month taking into account two parameters of input such as the precipitation and evapotranspiration. These are calculated from the data obtained by the hydrometeorological stations of the Institute for Hydrology, Meteorology and Environmental Studies “Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales” (IDEAM).

For a more reliable and adequate model calibration, the watershed of the Chicamocha River was divided in 10 micro-watersheds which were analysed according to different parameters. The surface water flow measured by a limnometric station was compared with the data estimated by the model, obtaining as a result a recharge value in different points inside the watershed. Based on this information the isovalue maps were generated monthly.

The analysis of the results obtained by the maps allows identifying the time periods and regions with higher contributions to the aquifers. Also, it allows determining possible locations of the groundwater in order to create strategically a plan to use it in drought periods by the households and the agriculture production units in the region.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales temas ambientales de la actualidad es la evaluación de los recursos hídricos de las cuencas hidrológicas de una región, para la gestión y aprovechamiento del agua; el presente proyecto de investigación busca evaluar la recarga de la cuenca del río Chicamocha localizada en el departamento de Boyacá, Colombia, en donde se utilizará un modelo hidrológico agregado (Modelo “*abcd*” de Thomas) para tal fin, de acuerdo a la efectividad que ha tenido en Estados Unidos y en la Sabana de Bogotá, entre otros casos de estudio en Colombia; teniendo como base información secundaria del IDEAM, el cual es el establecimiento público adscrito al Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, encargado de suministrar los datos y la información ambiental del país.

La incertidumbre en la determinación de los índices de recarga en cuencas rurales depende fundamentalmente del tipo y confiabilidad de la calibración del modelo hidrogeológico empleado, donde como resultado se puede identificar las zonas que tienen mayor aportación a los acuíferos para encontrar alternativas de uso y manejo del recurso hídrico en la región; planteando soluciones y alternativas en la utilización de pozos profundos de épocas secas (por ejemplo el fenómeno del niño).

En el desarrollo de la investigación, se realizó el análisis de la recarga por medio del método de Thomas. Este modelo fue calibrado teniendo en cuenta los datos de entrada que para este caso son la precipitación areal y evapotranspiración areal de la zona de estudio (Información tomada de IDEAM).

Se mostrará cómo el modelo de Thomas aporta niveles de confiabilidad en la respuesta hídrica en la cuenca estudio; obteniendo calibraciones adecuadas en 7 de las 10 subcuencas estudiadas.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se pudo elaborar una serie de mapas isovalores a niveles de recarga, muy útiles en la región, ya que permiten identificar las épocas de mayor aportación de recarga a los acuíferos.

## **1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA**

El manejo adecuado y el aprovechamiento del agua es uno de los temas más importantes en la actualidad, ya que es un recurso vital para el ser humano.

Con la validación de un modelo hidrológico que sea capaz de mostrar las zonas y las épocas de mayor o igual a portación mes a mes, en donde se genere información de salida confiable, se aporta información vital al departamento de Boyacá eficientes para la planeación y gestión de los recursos hídricos.

Esta investigación está centrada en realizar la evaluación de la recarga que se da en la cuenca del río Chicamocha en el departamento de Boyacá donde se ha observado un alto grado de incertidumbre de información que muestre la variación de la recarga en los acuíferos mes a mes en donde se identifica la época de mayor aportación a los acuíferos.

### **1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.2.1 Pregunta general**

¿Puede determinarse a través de modelación hidrológica las zonas y épocas de mayor aportación de recarga en zonas no instrumentadas de la cuenca del río Chicamocha en Boyacá para evitar sondeos directos de exploración?

#### **1.2.2 Preguntas específicas**

¿El modelo de Thomas es un método hidrológico adecuado para implementar en el departamento de Boyacá?

¿Cuáles son las zonas y las épocas de mayor o igual aportación de recarga a los acuíferos e la cuenca del río Chicamocha en Boyacá?

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El mundo expone la necesidad cada vez mayor, de utilizar aguas subterráneas como medio de abastecimiento. El alto grado de incertidumbre acerca de información que muestre la variación de la recarga de acuíferos, en este caso, en la cuenca del río Chicamocha, hace necesaria la implementación de un modelo teórico que aproxime de manera confiable los componentes de un ciclo hidrológico completo. Por esta razón y debido a la necesidad de información a nivel mensual o incluso anual se decide implementar un método agregado que permita entregar resultados acerca de la distribución del recurso hídrico a nivel superficial, subsuperficial y subterráneo; con el fin de generar un mapa de isovalores que permitan ver los potenciales niveles de recarga

de acuíferos y así poder tener una herramienta de planificación en la gestión del recurso hídrico subterráneo en Boyacá.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Obtener un mapa de Isovalores con niveles de recarga para la cuenca del río Chicamocha, a partir de modelización hidrológica basada en un método agregado.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Implementar el modelo de Thomas para puntos no instrumentados de la cuenca del río Chicamocha y tomar como base la calibración en puntos con caudal medido.
- Obtener los parámetros óptimos del modelo y calcular los niveles de recarga en los puntos no instrumentados.
- Elaborar un mapa con líneas isovalores de niveles de recarga que permitan identificar claramente zonas con igual aportación a los acuíferos.

## 2. ANTECEDENTES HISTORICOS Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1 ESTADO DEL ARTE

A través de la historia, se han desarrollado métodos hidrológicos que han permitido dar una aproximación teórica a la distribución del recurso hídrico en el planeta, además de las exploraciones de campo y los implementos para medir directamente parámetros hidroclimatológicos como precipitación, temperatura y caudales.

En Colombia se han realizado diferentes investigaciones que han demostrado la importancia de los métodos teóricos ya que se ha podido llegar a una aproximación del recurso hídrico, en esta investigación se intenta implementar el modelo de Thomas, el cual busca de forma teórica dar una aproximación del recurso hídrico a partir de investigaciones realizadas en estados unidos y en la sabana de Bogotá, en donde se han obtenido resultados favorables y económicos en comparación a las exploraciones de campo.

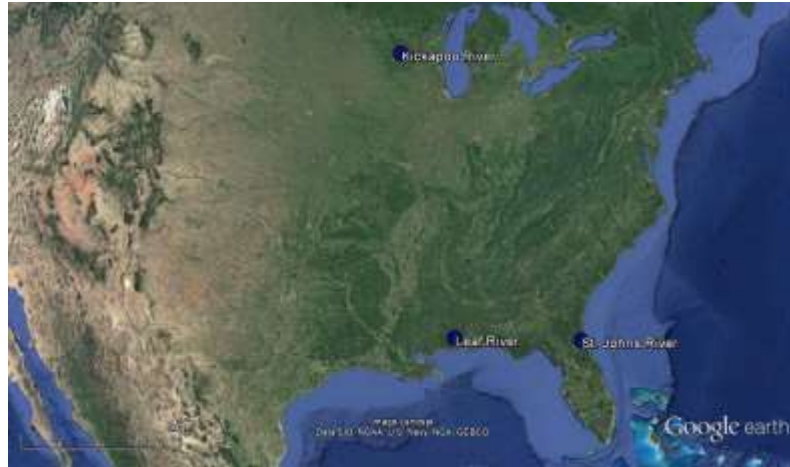
#### 2.1.1 Investigaciones a nivel mundial

**2.1.1.1 Applying the “*abcd*” Monthly wáter balance model for some regions in the united states<sup>1</sup>.** Esta investigación fue realizada en el 2013 en Estados Unidos, en donde se analizó la implementación del modelo *abcd* en tres cuencas de ese país, en donde se buscaba tener una aproximación teórica a la distribución del recurso hídrico para determinar la factibilidad y utilidad del modelo en diferentes partes del país. En esta investigación se llegó a concluir que los parámetros *c* y *d* son más sensibles en comparación a: “*a* y *b*”, que fueron más fáciles de estimar. En esta investigación se pudo llegar a tener un porcentaje alto de efectividad en la calibración del modelo, llegando solo a cuestionar las zonas en donde había influencia de nieve (Al-Lafta, et al. 2013).

---

<sup>1</sup> AL-LAFTA, Hadi. AL-TAWASH, Balsam, AL-BALDAWI, Buraq. Applying the “*abcd*” Monthly Water Balance model for Some Regions in the United States. En: Advances in Physics Theories and Applications. Vol.25, (2013); p. 36-47.

Figura 1. Localización de las zonas de estudio



Fuente: <sup>1</sup> AL-LAFTA, Hadi, Applying the “abcd” Monthly Water Balance model for Some Regions in the United States. En: Advances in Physics Theories and Applications.

### 2.1.1 Investigaciones a nivel nacional y regional

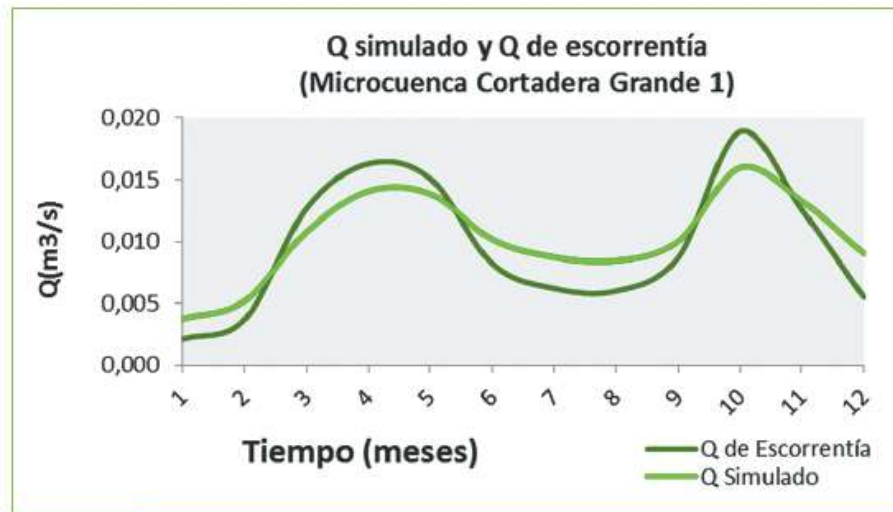
#### Correlación de parámetros geotécnicos con parámetros de un modelo hidrológico superficial<sup>2</sup>

Esta investigación se realizó en la cuenca de Río de piedras en el departamento de Boyacá, la cual fue dividida en 15 microcuencas para tener una caracterización adecuada de la zona; este proyecto pretendía encontrar la relación entre los parámetros geotécnicos característicos del suelo, determinados a partir de 25 puntos de exploración y los parámetros hidrológicos calculados por medio del modelo de Thomas. En la Gráfica 1 se puede observar como la calibración del modelo de Thomas se ajustó adecuadamente en la microcuenca “cortadera grande 1”, llegando a obtener un valor de 0.92 de coeficiente de determinación  $R^2$ .

---

<sup>2</sup> CARO, Carlos, CASTELLET, Ernest. Correlación de parámetros geotécnicos con parámetros de un modelo hidrológico superficial. En: Ingenio Magno. Tunja: Universidad Santo Tomas. 2013. Vol 4, p. 76-86.

Gráfica 1. Q Simulado vs Q de escorrentía de la microcuenca cortadera grande 1



Fuente: CARO, Carlos, CATELLET, Ernest. Correlación de parámetros geotécnicos con parámetros de un modelo hidrológico superficial.

La investigación concluyó con el ajuste adecuado del modelo hidrológico y además se determinó que el parámetro  $b$  de Thomas presenta una de las mayores correlaciones con respecto a la relación de vacíos y a la porosidad del suelo, según las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras de suelo obtenidas en las exploraciones.

### **Calibración de los parámetros del modelo hidrológico de Thomas para el departamento de Boyacá<sup>3</sup>**

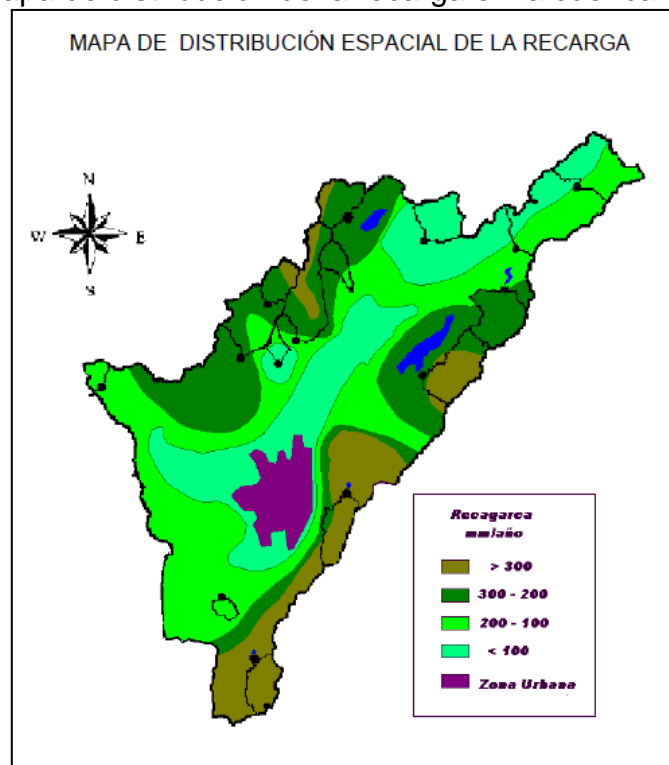
En el departamento de Boyacá en el año 2008 se realizó un estudio en donde a partir del método “abcd” de Thomas y con información climatológica del IDEAM, se logró tener un ajuste hasta del 50% en las subcuencas analizadas, dando como resultado que el método es más eficiente para cuencas rurales, llegando a determinar que el modelo puede funcionar más eficientemente si se tienen parámetros de entrada de alta calidad (Vera, et al. 2008).

<sup>3</sup> VERA, Y. CARO, C. Calibración de los parámetros del modelo hidrológico de Thomas para el departamento de Boyacá. En: XXIII seminario nacional de hidráulica e hidrología. Bogotá. 2008.

## Análisis del balance hídrico de la Sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas<sup>4</sup>

En el año 2002 se realizó el primer estudio que intentó implementar el modelo de Thomas en Colombia, especialmente en la sabana de Bogotá, en donde Caro y Flechas (2002) realizaron un análisis completo de los parámetros hidrológicos característicos de la cuenca, distribuyéndola en subcuencas, logrando implementar el modelo, obteniendo hasta un 70% en el ajuste de la calibración. Además los datos de salida del modelo mostraron que el 20% de la precipitación anual en esta zona representa la recarga que va dirigida a los acuíferos existentes en la sabana de Bogotá. En la Figura 2 se observa el mapa de distribución de la recarga en la cuenca de la sabana.

Figura 2. Mapa de distribución de la recarga en la cuenca de la Sabana



Fuente: CARO, Carlos, FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas.

<sup>4</sup> CARO, Carlos, FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2003, 140p.

## **Aproximación a la estimación de la recarga en los acuíferos mediante optimización matemática multidimensional de un modelo de balance hídrico<sup>5</sup>**

La recarga es uno de los parámetros del ciclo hidrológico más difícil de determinar ya que depende del tipo de suelo, la precipitación y la evapotranspiración, por esta razón esta investigación pretende dar una aproximación a la determinación de la recarga en la sabana de Bogotá, a partir de la implementación del modelo de Thomas que comprende cuatro parámetros (*a, b, c, d*) que están directamente relacionados con el balance hídrico. En este artículo se concluye que la optimización matemática de un modelo de balance hídrico de pocos parámetros y con poco requerimiento de datos de entrada, como el de Thomas, parece una alternativa fiable a las tradicionales herramientas de parametrización física de la cuenca, finalizada a la estimación de la recarga a nivel mensual.

---

<sup>5</sup> FRAGALA, F., OBREGON, N., CARO, C., FLECHAS, F. Y GRACÍA, O. Aproximación a la estimación de la recarga en los acuíferos mediante optimización matemática multidimensional de un modelo de balance hídrico. En: Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. p.201-208 .

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

El recurso hídrico es indispensable para la vida y conservación de todos los seres que habitan la tierra; por esta razón es importante conocer la distribución del agua en el planeta para tener un manejo adecuado de esta. La necesidad de conocer dicha distribución ha llevado a la generación de modelos hidrológicos que han permitido conocer una aproximación del balance hídrico de una región, estos métodos llegan a ser una herramienta útil para predecir eventos o para tener un plan de manejo y aprovechamiento del recurso.

Según Chow (1994), los modelos hidrológicos pretenden dar una aproximación del balance hídrico en una zona determinada, en donde el objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida; haciendo una aproximación al sistema real, simulando las entradas y las salidas, las cuales son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas.

##### 3.1.1 Tipos de modelos hidrológicos<sup>6</sup>

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar principalmente en modelos físicos y modelos abstractos en donde los primeros son experimentos en laboratorios; los modelos abstractos o matemáticos tienen como objetivo simular a través de datos de entrada, como precipitación y evapotranspiración, la salida del recurso hídrico de la cuenca.

Los modelos abstractos están clasificados en modelos distribuidos y agregados, los cuales se explicaran más adelante. Antes de continuar, se debe tener claro que tanto los modelos agregados como los distribuidos, según su naturaleza, tienen la propiedad de poder simular procesos continuos en el tiempo, o procesos aislados y puntuales.

##### Métodos distribuidos

Consideran valores específicos según las características de cada punto en la zona (Olivares. A, 2004), además simulan el funcionamiento del sistema de una cuenca, resolviendo numéricamente las ecuaciones diferenciales de flujo y conservación de la

---

<sup>6</sup> CARO CAMARGO, Carlos. Modelación Hidrológica Distribuida con base en esquemas de volúmenes finitos. En: Ingenio Magno. Tunja: Universidad Santo Tomás. 2011. no2, vol. 1. ISSN: 2145-9282.

masa de los procesos que constituyen el ciclo hidrológico. Precisan una serie de datos difícilmente disponibles en la mayoría de los estudios (Caro, 2010).

Dentro del grupo de modelos distribuido está el método S.H.E. (Abbott et al, 1986), SOGREAH (Chow, 1994), HEC- HMS, SWAT, RAINFLO, MODELO SHALL3, etc.

### **Métodos agregados**

En los modelos agregados se consideran valores medios a nivel global de la zona a estudiar (Olivares. A, 2004); estos métodos consideran una cuenca espacialmente homogénea en sus características físicas, tanto superficiales como subsuperficiales, sin tener en cuenta su distribución dentro de ella (Behnaz Khakbaz, et al, 2009). Los parámetros en este tipo de métodos no varían espacialmente dentro de la cuenca y por ende, sus valores son promedios representativos (Bandaragoda,C, et al, 2004), en donde solo se tiene en cuenta el proceso a la salida de la cuenca, despreciando la información que se pueda generar punto a punto de esta.

Los modelos agregados suelen tener pocos parámetros de entrada, los cuales toman la información característica de la zona para convertirlos en datos promedios areales. Dentro de los modelos agregados más conocidos se encuentran: Modelo THONTHWHITE T (Thornthwaite and Mather, 1955), Modelo PALMER P (Palmer, 1965), Modelo ABCD (Thomas et al, 1962) y Modelo de TEMEZ (Témez, 1977).

### **3.2 MÉTODO “ABCD” DE THOMAS<sup>7</sup>**

Thomas es un método hidrológico agregado el cual está basado en la teoría de la conservación de la masa. Este modelo da parámetros del balance hídrico mes a mes, el cual tiene como datos de entrada dos variables como son precipitación areal y evapotranspiración areal. Además tiene cuatro (4) parámetros “abcd” de calibración los cuales deben tener un proceso de iteración para llegar a simular los caudales observados según los datos tomados de una estación limnigráfica a la salida de la cuenca de estudio.

El uso de este modelo hidrológico tiene grandes ventajas, debido que a partir del análisis de los datos de salida se pueden determinar parámetros teóricamente sin necesidad de medirlos directamente en la zona.

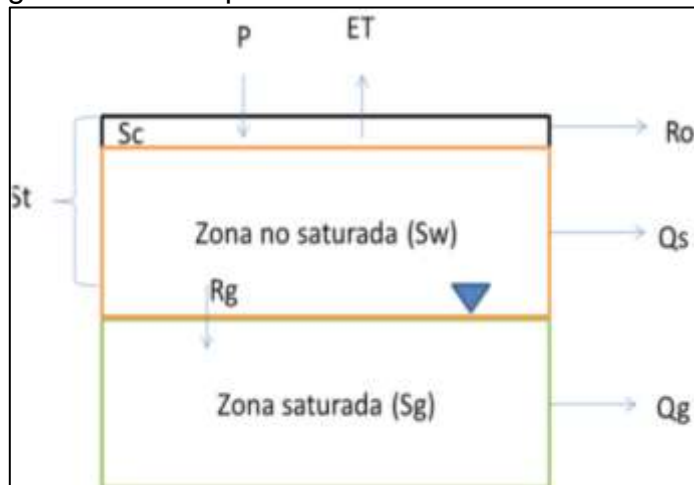
---

<sup>7</sup> CARO CAMARGO, Carlos y FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 2003, p. 140.

### 3.2.1 Descripción del modelo de Thomas

Este método considera tres zonas, las cuales se dividen en zona no saturada, saturada y subterránea.

Figura 3. Zonas que considera el método de Thomas



**Zona 1:** almacenamiento superficial ( $S_c$ ), en esta zona se parte de la ecuación de continuidad:

$$P_i - ET_i - R_{gi} - R_{oi} = \left( \frac{\Delta S_w}{\Delta t} \right) = S_{wi} - S_{wi-1} \quad (1)$$

Dónde:

$P_i$ : es la precipitación de la zona en un tiempo  $i$

$l_i$ : es la infiltración en un tiempo  $i$ .

$$\left( \frac{\Delta S_w}{\Delta t} \right) = S_i - S_{i-1}$$

Es el cambio del contenido de humedad a la zona no saturada en un tiempo  $i$ .

**Zona 2:** Zona no saturada con almacenamiento ( $S_w$ )

$$(l_i = R_g) \quad (2)$$

En donde se considera que lo que se infiltra es lo que entra al acuífero.

**Zona 3:** Zona saturada con almacenamiento (Sg)

$$\left( R_{gi} - Q_{gi} = \frac{\Delta S_{g}}{\Delta t} \right) (3)$$

R<sub>gi</sub>: Recarga del acuífero

Q<sub>gi</sub>: Caudal subterráneo que alimenta el río

$\frac{\Delta S_{g}}{\Delta t}$  : Cambio de almacenamiento en cada zona

Partiendo de la ecuación x se agrupa de la siguiente manera:

$$P_i + S_{w_{i-1}} - (E_{T_i} + S_{w_i}) = R_{o_i} + I_i (4)$$

Igualando:

$$W_t: P_i + S_{w_{i-1}} (5)$$

$$Y_i: E_{T_i} + S_{w_i} (6)$$

Por lo tanto:

$$W_t - Y_i = R_{o_i} + I_i (7)$$

Thomas estableció empíricamente que:

$$S_{w_i} = Y_i * e^{E_{T_i} P_i / b} (8)$$

Mostrando que con el paso del tiempo la humedad del suelo asume un decaimiento exponencial a medida que aumenta la evapotranspiración potencial.

Establece que la variable Y<sub>i</sub> es:

$$Y_i: \frac{w_i + b}{2a} - \left( \left( \frac{w_i + b}{2a} \right)^2 \right) - \left( \frac{w_i + b}{a} \right)^{0.5} (9)$$

Donde *a*, *b*, *c* y *d* son parámetros del modelo los cuales se explicaran detalladamente más adelante.

$$I_i = c * (W_t + Y_i) = R_{gi} (10)$$

$$Q_{gi} = d * R_{gi} (11)$$

Sustituyendo la ecuación 8 en 11

$$S_{gi} = \frac{S_{wi-1} + R_{gi}}{1 + d}$$

Se tiene finalmente:

$$Q_{si} = R_{oi} + Q_{gi} \quad (12)$$

S<sub>gi</sub> almacenamiento en la zona 3

**3.2.1.1 Parámetros de calibración del modelo “abcd”.** El modelo de Thomas tiene 4 parámetros de calibración los cuales son variables características de la zona.

A continuación se describen dichos parámetros:

**Parámetro a:** Varía entre el rango 0 y 1, expresa la tendencia ante la presencia de un suelo que se encuentre completamente saturado antes de que la escorrentía ocurra.

**Parámetro b:** Representa el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y a la humedad.

**Parámetro c:** Hace referencia a esa fracción que se encuentra en el almacenamiento subterráneo que se incluye en la escorrentía, aunque no siempre se relaciona a esta fracción debido a que no siempre toda la carga se convierte en escorrentía superficial durante el intervalo de tiempo que se considere.

**Parámetro d:** Es el recíproco del tiempo de resistencia del agua subterránea, pero teniendo en cuenta que en ese tiempo puede relacionarse con todo el acuífero, con la porción de esto más cercano al río, o simplemente con recorridos superficiales más rápidos.

### **3.2.2 Parámetros de entrada al modelo de Thomas**

El modelo tiene como datos de entrada la precipitación areal, la evapotranspiración areal y tiene en cuenta los caudales observados a la salida de la cuenca, en donde estos parámetros se determinan a partir de estaciones climatológicas ubicadas dentro de la zona de estudio. Según investigaciones realizadas por Obregón (2002) es necesario que los datos de entrada al método sean de buena calidad, ya que influyen en el momento de calibrar el modelo alterando los datos de salida de la cuenca.

### 3.2.3 Datos de salida del modelo

El modelo de Thomas entrega como resultado valores mes a mes del balance hídrico como:

- **Infiltración (Ii):** La cantidad de agua que es capaz de incorporarse al suelo permaneciendo en la zona subsuperficial del mismo.
- **Evapotranspiración real (ETP):** Es la cantidad de agua del balance hídrico que se evapora debido a la temperatura de la zona
- **Flujo subterráneo (QRg):** Es la cantidad de flujo que se infiltra al suelo y es capaz de fluir por la zona subterránea del terreno.
- **Escorrentía superficial (QRoi):** Es considerado como la cantidad de agua que fluye por la zona superficial, la cual no tiene la capacidad de infiltrarse debido a la saturación del terreno o la impermeabilidad del mismo.

### 3.3 PRECIPITACIÓN AREAL<sup>8</sup>

La precipitación areal parte de datos obtenidos con la medición de pluviómetros y pluviógrafos, en donde dicho parámetro esta expresado como la altura caída y acumulada sobre una superficie plana e impermeable. Esta información puede ser diaria, mensual o anual y se expresa en mm (Caro, 2010).

Se entiende como precipitación areal, la media que se puede presentar en una zona específica, en donde se tienen en cuenta las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca (Monsalve, 2009). La precipitación areal se puede calcular por medio de diferentes métodos como polígonos de Thissen e isoyetas en donde las áreas formadas según la precipitación permiten calcular la precipitación como se observa en la siguiente ecuación:

$$\text{Precipitación Areal (mm)} = \frac{\sum \text{Precipitación} * \text{Area}}{\text{Area total}}$$

#### 3.3.1 Datos Faltantes de precipitación

Se presentan estaciones con datos faltantes en donde se hace necesario completar los datos con estaciones de apoyo para tener mayor confiabilidad en las variables de

---

<sup>8</sup> MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la Ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. 2009. ISBN: 958-95742-1-1

entrada al modelo. Se puede realizar localizando estaciones vecinas con datos de altitud homogéneos a la estación con datos faltantes.

$$P_x = \frac{N_x}{n} \times \left( \frac{P_A}{N_A} + \frac{P_B}{N_B} + \frac{P_C}{N_C} \right)$$

Dónde:

**N:** Precipitación media anual calculada en las estaciones para el mismo periodo

**X:** Estación con datos faltantes

**A, B, C:** Estaciones vecinas

**P:** Precipitación del mes de falla.

### 3.4 MÉTODOS DE CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN<sup>9</sup>

A través de los años se han desarrollado modelos de cálculo de la evapotranspiración de forma matemática, porque aún existe dificultad técnica de instrumentación que mida este parámetro de forma directa (Caro, 2010).

En el cálculo de la evapotranspiración se deben considerar datos de entrada, los cuales dependen de la información climatológica instrumentada disponible en la región. A continuación se muestra una recopilación de los métodos de evapotranspiración disponibles y a su vez se describen los métodos encontrados en la literatura:

---

<sup>9</sup> CARO CAMARGO, Carlos y FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 2003, p. 140.

Tabla 1. Variables necesarias en los métodos de evapotranspiración

MÉTODO	VARIABLES DE ENTRADA
Thornthwaite	Temperatura diaria o media mensual
Hargreaves	Temperatura media mensual o diaria Radiación Solar
Christiansen	Temperatura media mensual o diaria del aire Humedad relativa media mensual Velocidad del viento promedio mensual Brillo solar actual mensual Brillo solar teórico mensual Radiación extraterrestre en la atmósfera Elevación promedio de la zona
Penman	Temperatura del aire Velocidad media del viento Presión atmosférica media en función de la elevación La presión de vapor de saturación Radiación extraterrestre
Blaney Criddle	Temperatura Porcentaje Horas Luz diaria.
Jensen	Radiación solar Temperatura media mensual o diaria
Balance de energía	Radiación Neta Temperatura media diaria Densidad del agua.

Fuente: CARO CAMARGO, Carlos y FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas.

A continuación se hace una breve descripción de algunos de los métodos que existen para el cálculo de la evapotranspiración:

**Método de Cálculo de Evaporación por Balance Energético:** Determina la evaporación por unidad de superficie y segundo, en función de la radiación neta que entra, de la densidad del agua, y del calor latente de evaporación (calor necesario para que una sustancia cambie de estado).

**Método de Jensen-Haise (1990):** Basado en Radiación solar y corregido por temperatura, pero hace énfasis y mayor importancia en el primero, sin embargo se recomienda su uso en zonas no tropicales, ya que en estas zonas se equipara el peso de la radiación y la temperatura.

**Método de Blaney Criddle (1950):** El método original de Blaney-Criddle (Blaney y Criddle, 1950) se basó en estudios de correlación entre la temperatura y el uso del agua en el oeste de EE.UU. Con el fin de definir mejor los efectos de clima sobre la evapotranspiración.

**Método de Hargreaves Modificado:** El método original de Blaney-Criddle (Blaney y Criddle, 1950) se basó en estudios de correlación entre la temperatura y el uso del agua en el oeste de EE.UU. Con el fin de definir mejor los efectos de clima sobre la evapotranspiración.

**Método de Christiansen:** En 1966, Christiansen derivó una fórmula empírica para el cálculo de la evapotranspiración potencial con base en datos climáticos.

**Método de Thornthwaite (1948):** Debido a la falta de instrumentación dentro de la cuenca del río Chicamocha, se ha decidido tomar el modelo de Thornthwaite para determinar la evapotranspiración areal, ya que se cuenta solo con datos de temperatura.

En 1948 Thornthwaite derivó una fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial.

Este método se desarrolló correlacionando datos de evapotranspiración potencial con datos de temperatura media mensual y longitud del día:

$$ETP = \left(\frac{L}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(\frac{10 * T_a}{I}\right)^a * 16$$

En donde:

**ETP:** La evapotranspiración potencial mensual del mes *i*, mm/mes.

**T<sub>a</sub>:** La temperatura media del mes *i*, °C.

**L:** Duración del día (Hs)

**N:** Número de días en un mes.

**I:** El índice de calor, igual a la sumatoria de los índices mensuales *J<sub>i</sub>*.

$$I = \sum_{j=1}^{12} J_j$$

Donde el índice térmico mensual está dado por:

$$J_i = \left( \frac{t_i}{5} \right)^{1.514}$$

**a** es una ecuación cúbica de la forma

$$a = 0.675 \times 10^{-6} * I^{-3} - 0.771 \times 10^{-4} * I^2 + 1.792 \times 10^{-2} * I + 0.49239$$

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 MATERIALES

Para el desarrollo del proyecto se usaron principalmente herramientas tecnológicas como:

#### 4.1.1 Cartas Hidroclimatológicas del IDEAM

El proyecto de investigación hace necesario el uso de cartas hidroclimatológicas del IDEAM, que muestren datos medidos de parámetros principalmente como: temperatura, caudales y precipitación.

Estas cartas son suministradas por el IDEAM por medio de una solicitud formal y una consignación a través de la página oficial del IDEAM, en donde el proyecto contó con el apoyo económico de la unidad de investigaciones de la Universidad Santo Tomás de Tunja.

Se encontraron en total 88 estaciones dentro de la cuenca, las cuales miden diferentes parámetros como:

Tabla 2. Cantidad de estaciones climatológicas dentro de la cuenca

Parámetro climatológico	N° de estaciones
Caudal	31
Precipitación	38
Temperatura	15

Según la información descrita anteriormente, hay que aclarar que no todas las estaciones que se identificaron siguen en funcionamiento en la actualidad.

#### 4.1.2 ArcGIS<sup>10</sup>

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Es la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG).

---

<sup>10</sup>ArcGIS Resource. Introducción a ArcGIS [en línea]. <<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>>

Este software es utilizado por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios de comunicación.

ArcGIS permite:

- Crear, compartir y utilizar mapas inteligentes.
- Compilar información geográfica
- Crear y administrar bases de datos geográficas
- Resolver problemas con el análisis espacial
- Crear aplicaciones basadas en mapas
- Dar a conocer y compartir información mediante la geografía y la visualización

En el desarrollo del proyecto se usó ArcGis 10.1. Este software da múltiples herramientas y permite determinar diferentes parámetros como:

*Localización geográfica:* en donde se ubicaron según coordenadas planas todas las estaciones hidroclimatológicas del IDEAM localizadas dentro de la cuenca.

*Dimensiones de la cuenca:* en donde se determinaron áreas de las subcuencas y longitudes de las corrientes principales.

*Líneas isovalores:* con el uso Arc toolbox, se determinó la precipitación areal, temperatura areal e isovalores a niveles de recarga.

*Mapas:* en donde se organizó la información determinada por la calibración del modelo hidrológico, para generar mapas de recarga mes a mes.

#### **4.1.3 Shapefile del pomca de la cuenca alta y media del río Chicamocha <sup>11</sup>**

Un shapefile es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). El espacio de trabajo que contiene shapefiles también puede incluir tablas del dBASE, que pueden almacenar atributos adicionales que se pueden vincular a las entidades de un shapefile.

---

<sup>11</sup>ArcGIS Resource Center. ¿qué es un shapefile? [en línea].  
<<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//00560000002000000>>

Esta herramienta tecnológica fue suministrada por CORPOBOYACA para el desarrollo adecuado de la investigación.

#### **4.1.4 Microsoft office Excel<sup>12</sup>**

Excel es un software que permite crear tablas, y calcular y analizar datos. Este tipo de software se denomina software de hoja de cálculo. Excel permite crear tablas que calculan de forma automática los totales de los valores numéricos que especifica, imprimir tablas con diseños cuidados, y crear gráficos simples.

Este software permite programar el funcionamiento aritmético del modelo de Thomas, y así realizar la iteración de los parámetros de calibración del modelo, generación de graficas que permiten visualizar la comparación del caudal observado y el simulado; adicional a esto se realizaron cálculos de precipitación areal, evapotranspiración areal, determinación de la recarga y tabulación de datos en general.

## **4.2 MARCO METODOLÓGICO**

### **4.2.1 Tiempo y Localización**

Este proyecto se desarrolló en un tiempo de 12 meses, con el apoyo del centro de investigaciones de la Universidad Santo Tomas seccional Tunja, en donde la solicitud para la realización de proyecto de grado fue presentada al comité de la facultad de ingeniería civil el 10 de febrero del 2014, en donde se asignó como director al ingeniero Carlos Andrés Caro Camargo; en el

**Anexo 5 se observa la aceptación del ante proyecto a la facultad fue el 19 de febrero de 2014.**

### **4.2.2 Método**

---

<sup>12</sup> Soporte Office. ¿qué es Excel? [en línea].<<https://support.office.com/es-hn/article/%C2%BFQu%C3%A9-es-Excel-8373c3d7-bd64-4b7f-bdbd-1fa4b2007b09> >

**4.2.2.1 Investigación cuantitativa.** Este proyecto plantea una investigación con enfoque cuantitativo puesto que sigue una secuencia en cada uno de los pasos que se realizan para llegar al objetivo general del proyecto, partiendo de la revisión bibliográfica, el planteamiento del problema y la recolección de datos para así proceder a desarrollar el diseño según la metodología planteada inicialmente. Finalmente se debe hacer un análisis completo de los resultados obtenidos. En este caso se va a valorar la implementación de un modelo hidrológico teórico que da resultados del balance hídrico mes a mes teniendo en cuenta principalmente dos variables de entrada como son la precipitación y la evapotranspiración; para finalmente concluir la favorabilidad del uso de este tipo de métodos en la región y evaluar la recarga de la cuenca del río Chicamocha identificando las épocas y zonas de mayor o igual aportación a los acuíferos de la cuenca, partiendo de información hidroclimatológica del IDEAM.

#### **4.2.3 Metodología**

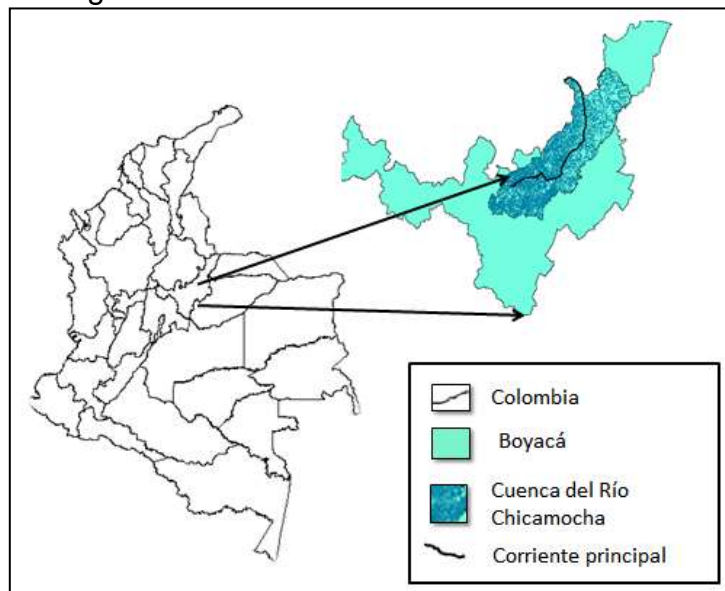
La metodología del proyecto está enmarcada en una serie de actividades que respaldarán la correcta implementación de un modelo agregado (Modelo de Thomas) que evaluará la recarga de toda la zona de estudio.

- 1) En primera instancia la selección de la cuenca de estudio implica una ubicación inicial de las estaciones de caudal instrumentadas para poder determinar las primeras condiciones morfométricas de entrada en el modelo.
- 2) Posteriormente se realizará una inspección de la información hidroclimatológica disponible en la zona de estudio. Allí se estudiarán y analizarán los datos de precipitación y temperatura fundamentalmente.
- 3) La información hidroclimatológica obtenida se analizará desde el punto de vista de completado de información, para ganar lo óptimo en parámetros de entrada al modelo. Luego, se evaluará la evapotranspiración potencial teniendo como base la información climatológica disponible.
- 4) Teniendo como base la información de precipitación y evapotranspiración puntual en diferentes zonas dependiendo de la ubicación de las estaciones, se realiza un procedimiento de cálculo de las precipitaciones y evapotranspiraciones areales.
- 5) Posteriormente se implementará el modelo de Thomas en puntos instrumentados de caudal, y se analiza la curva y los valores de caudal observado y los simulados por el modelo. Lo anterior para realizar un proceso de calibración de los parámetros del modelo que iguale los caudales observados y calculados.
- 6) Con los parámetros óptimos se evalúa el caudal en puntos equidistantes aleatorios dentro de la cuenca de estudio. Y con el valor de la recarga calculada se trazan líneas isovalores dentro de la zona de estudio, para generar finalmente los mapas de niveles de recarga de la cuenca del río Chicamocha en Boyacá, e identificar las épocas y zonas de mayor a portación a los acuíferos.

## 5. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está localizada en el departamento de Boyacá, en el cual se encuentra la cuenca del Chicamocha; en donde la corriente principal del río tiene una longitud de 100 *km* y un área aproximada de 6107 *km*<sup>2</sup>. En la Figura 4, se observa la localización geográfica de la cuenca dentro del departamento de Boyacá y en Colombia.

Figura 4. Localización de la zona de estudio



La zona de estudio está dividida en la cuenca alta y media del Río Chicamocha en donde la corriente principal pasa por 53 municipios:

**Cuenca media del Chicamocha:** Esta cuenca está comprendida por los municipios: Tasco, Socotá, Socha, Paz del rio, Jericó, Chita, Beteitiva, Belén, Tutaza, Floresta, Corrales, Cerinza, Busbanza, Topaga, Monguí, Mongua, Gameza, Panqueba, Güican, Guacamayas, El espino, El cocuy, Chiscas, Tipacoque, Susacon, Soata, Sativa sur, Sativa norte, San mateo, La uvita, Covarachia y Boavita.

**Cuenca alta del Chicamocha:** Esta cuenca comprende los siguientes municipios: Combita, Cucaita, Cuitiva, Chivata, Duitama, Firavitoba, Iza, Nobsa, Oicata, Paipa,

Pesca, Santa Rosa de Viterbo, Siachoque, Sogamoso, Sora, Soracá, Sotaquira, Tibasosa, Toca, Tuta y Tunja.

## **5.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **5.1.1 Geología<sup>13</sup>**

La Cuenca del río Chicamocha se caracteriza por la presencia de rocas cuyos sedimentos se depositaron en diferentes tipos de ambientes desde marino a continental, producto de los diferentes eventos geológicos a los que se ha visto sometida el área de la cuenca a través de la historia del Planeta Tierra.

La Geología de la cuenca alta del Río Chicamocha está compuesta por rocas sedimentarias con algunos afloramientos de rocas ígneas volcánicas en los alrededores de Paipa e Iza. La sucesión estratigráfica comprende rocas de diferentes edades, iniciando en el Paleozoico con la Formación Cucho al norte de la cuenca; Rocas Jurásicas de las formaciones Girón, Montebel, Rusia y Arcabuco, especialmente hacia la parte norte y occidental; Una amplia y espesa sucesión de secuencias sedimentarias del Cretácico Inferior diferenciables en dos subregiones (Duitama y alrededores de Tunja), con algunas variaciones en la nomenclatura de las unidades litológicas, por la presencia de las dos grandes estructuras tectónicas como son las Fallas de Soapaga y Boyacá. El Cretácico Superior con un espesor importante de secuencias sedimentarias diferenciables; y rocas sedimentarias Terciarias diferenciadas en dos subregiones (Duitama-Pesca y alrededores de Tunja), Por último se diferencian rocas ígneas volcánicas de edad Terciario - Cuaternario y, un amplio registro del Cuaternario compuesto por depósitos glaciales, aluviales y de talud principalmente.

En el área de la Cuenca Alta del río Chicamocha, se formaron pliegues y fallas que hacen de la cuenca un área de una gran complejidad estructural relacionada con dos grandes fallas de carácter regional como son las Fallas de Boyacá y de Soapaga; asociadas a éstas, se encuentran otras fallas de carácter más localizado y estructuras de plegamiento tipo sinclinal y anticlinal. La dirección general de las estructuras (fallas y plegamientos) es N20-30E, coincidiendo con el rumbo de las unidades estratigráficas

### **5.1.2 Geomorfología**

En general en el área se presentan dos zonas fisiográficas: una zona de topografía ondulada en la parte central, al norte de Tunja hasta el sector de Paipa, localizada en las áreas donde afloran rocas de poca consistencia y cuyas alturas oscilan entre 1600 y 2400 m.s.n.m. La zona de grandes escarpes con alturas hasta de 3800 m.s.n.m., formadas por las rocas resistentes que afloran en la margen izquierda, en parte del

---

<sup>13</sup> Tomado de: Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca del río Chicamocha. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

anticlinorio de Arcabuco, y hacia la margen derecha limitando el valle del río Pesca, en la serranía formada por rocas cretácicas duras como la Formación Une, áreas en donde los ríos forman valles intramontanos, estrechos y profundos cañones en forma de V; por el contrario, cuando atraviesan las rocas de poca resistencia, los valles son amplios como el río Chulo, y con formas redondeadas y suaves como el Valle de Tunja, el Valle del embalse de la Copa y alrededores.

### **5.1.3 Morfodinámica**

La zona de estudio es una de las más estables de la Cordillera Oriental, la cual se ve afectada por poca actividad sísmica, leve tectonismo reciente y principalmente está afectada por fenómenos naturales acelerados por procesos antrópicos asociados a la actividad minera, muy intensificada en la región. Los movimientos en masa no son muy numerosos ni de grandes dimensiones, y se concentran principalmente al oriente de la cuenca, en las unidades de Trabajo del río Pesca, río tota y río chiquito. En cambio, los procesos de carcavamiento son muy intensos y afectan importantes extensiones de la cuenca, especialmente en las Unidades de Trabajo del río Chulo, embalse de la Copa, Río Tota, Río tuta y Río Salitre.

En materia de dinámica fluvial, el principal problema detectado en la cuenca del río Chicamocha lo constituye la socavación lateral y migración el cauce en los alrededores de Paipa, Duitama y Sogamoso, y en el lecho de los principales ríos afluentes como el río Tuta, luego de la salida del embalse de la Copa, lo cual ha redundado en cambios de la dirección del flujo produciéndose erosión de orillas, migración lateral del cauce, cambios morfológicos en los niveles de terrazas y la producción de sedimentos finos que son transportados por el flujo con la correspondiente sedimentación.

### **5.1.4 Climatología**

La principales características climáticas de la cuenca alta del río Chicamocha son las bajas temperaturas medias del aire, resultantes de la altitud, y niveles también moderados de precipitación con un régimen bimodal, excepto en el extremo nororiental de la cuenca, en la Unidad de Trabajo (UT) del río Chiquito donde el régimen es monomodal, debido al estancamiento del ramal oriental de la Zona de Confluencia Intertropical.

La temperatura media anual aire ambiente en superficie presenta variaciones entre 9°C, en los puntos más fríos (páramos) hasta 15°C, en las regiones menos frías, con un rango de variación de 6°C. Los menores valores de temperatura se registran en las regiones ubicadas en las partes altas de las UT de los ríos Chiticuy, Surba, Sotaquirá, Chiquito, Tota, Pesca y Embalse de la Copa. Por el contrario las UT que presentan mayores valores de temperatura del aire comprenden: la UT de los Ríos Chulo, Tuta, Chicamocha, Salitre y partes bajas de las UT de los ríos Chiquito y Pesca y Embalse de

la Copa. Las heladas son frecuentes en las estaciones secas, especialmente en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo; afectan principalmente las partes más bajas de las planicies, donde se acumula el aire frío en las madrugadas.

La temperatura media en la cuenca es de unos 13.1°C, mientras que la máxima media es de 20.7°C y la mínima media es de 4.8°C. La temperatura mínima registrada, en el aeropuerto de Sogamoso es de -8.8 °C, mientras que las máximas absolutas alcanzan los 28 °C. Febrero y marzo son los meses cálidos.

### 5.1.5 Calidad del aire

Debido a su importancia y a los esfuerzos de la autoridad ambiental y administraciones del municipio de Sogamoso en cooperación con la academia, recientemente se han llevado a cabo estudios de contaminación atmosféricas tendientes a valorar el impacto ambiental de otros contaminantes de referencia y la gestión que se ha llevado a cabo en la zona en procura del mejoramiento de la calidad del aire de esta importante región de la cuenca.

Según el informe sobre al red de monitoreo de la calidad del aire Sogamoso, en el período de 1991 a 1994, los muestreadores de partículas fueron dispuestos en estaciones móviles que realizaron muestreos en los municipios de Tibasosa, Duitama, Paipa, Nobsa, y Sogamoso, encontrando en los tres últimos, una excedencia de la norma local para TSP del 37%, con una concentración de 104mg/m<sup>3</sup>.

Los monitoreos realizados en el año 2004 muestran que ha habido mejores sustanciales en la calidad del aire en el valle de Sogamoso. Con excepción de algunos pocos días del mes de marzo la concentración de PM- 10 ha estado siempre por debajo del límite permisible de 160g/m<sup>3</sup>. Este buen síntoma no debe hacer olvidar que sólo existe un punto de muestreo para el material particulado y que algunas zonas críticas como las caleras situadas sobre la vía principal, en jurisdicción del municipio de Nobsa no cuentan con monitoreos.

A continuación se hace una breve descripción de algunos de los municipios por los cuales cruza la corriente principal del río Chicamocha.

**TASCO**<sup>14</sup>: En la economía se destaca la agricultura representada en la papa, el haba, las ibias, los nabos y rubas. La ganadería se centra principalmente en el sector vacuno. La industria minera está enfocada en la explotación arenosa y del carbón.

Debido a su extensa zona montañosa y de páramos, el municipio de Tasco cuenta con buenas y variadas fuentes de agua hacia la zona Oriente del territorio.

---

<sup>14</sup> Alcaldía de Tasco – Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < < [http://www.tasco-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.tasco-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml) >

- Población de 6.707 habitantes.
- Temperatura media: 15° C.

Figura 5. Parque central de Tasco



Fuente: Sitio web: <http://www.tasco-boyaca.gov.co/index.shtml>

**SOCOTÁ<sup>15</sup>**: Tradicionalmente la agricultura y la minería han sido las actividades económicas de los habitantes del municipio, en especial por la extracción del carbón. Por otra parte, algunas familias también se benefician de la cría de animales como cabras, conejos y aves de corral.

El Municipio de Socotá aloja cerca del 64.44% de las 45.000 hectáreas de extensión del parque natural nacional del páramo de Pisba, y el 48.32% de la extensión del Municipio hacen parte de esta zona de reserva, en donde se localiza una invaluable riqueza ecológica nacional y nacen entre otros los ríos Arzobispo, Payero o Pisba, Pauto y Cravo Sur.

Se caracteriza por una compleja topografía definiendo diversos tipos climáticos: medio a los 1800 metros sobre el nivel del mar en las veredas de Guáquira y Chusvita, en la vega del río Chicamocha y de páramo cerca de 4000 m.s.n.m. parte alta de la vereda el

<sup>15</sup> Alcaldía de Socotá–Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.socota-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.socota-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml) >

Verde, alto de Caracol, en la cuchilla la Reforma o El Santuario en el Parque Nacional Natural Páramo de Pisba.

- Población de 9.812 habitantes.
- Temperatura media: 17° C.

Figura 6. La laguna los patos



Fuente: Sitio web: <http://www.socota-boyaca.gov.co/index.shtml#3>

**SOCHA**<sup>16</sup>: La actividad principal es la minería de la cual se derivan otras actividades como el transporte y el comercio, también se desarrolla la agricultura y la ganadería pero en menor escala.

- Población: 7.364 habitantes.
- Temperatura media: 14° C.

---

<sup>16</sup> Alcaldía de Socha-Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.socha-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.socha-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)>

Figura 7. Parque de Socha.



Fuente: Sitio web: <http://boyacaen.blogspot.com/>

**PAZ DEL RIO<sup>17</sup>**: La agricultura y la ganadería le han cedido primacía económica a la producción mineral de hierro, carbón y comercio en general. Sus diferentes pisos térmicos le permiten la producción de diferentes productos.

En un piso ya más elevado, su suelo produce trigo, papa, maíz, cebada, habas, hortalizas. Pero en las riberas de los ríos Chicamocha y Soapaga se producen todos los vegetales del clima templado. La ganadería no se explota a gran escala.

Anualmente es escenario del Reinado Nacional de la Minería, certamen que cuenta con el apoyo de la empresa Acerías Paz del Río, que cuenta con sus minas de hierro en jurisdicción del municipio.

Es la unidad básica del sistema de clasificación de Holdridge; consiste en un sistema de clasificación ecológica basado en la biotemperatura anual, la precipitación total anual y la relación de evapotranspiración potencial.

- Población: 5.258 habitación.
- Temperatura media: 15° C.

---

<sup>17</sup> Alcaldía de Paz de Río-Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.pazderio-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.pazderio-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)>

Figura 8. Parque de Paz del Rio



Fuente: Sitio web: <http://www.pazderio-boyaca.gov.co/turismo.shtml>

**JERICÓ<sup>18</sup>**: Existen tres actividades económicas importantes en el municipio: la agricultura, ganadería y minería. Los productos agrícolas destacados son: alfalfa, breva, papa, trigo, maíz, haba, cebada, arvejas, hortalizas. En la rivera del río Chicamocha y en Cheva se cultiva yuca, ñame, caña de azúcar, café, chirimoyas, naranjas, plátanos y anís. En ganadería ostenta alrededor de 3000 cabezas de bovinos, que producen al menos 1500 litros al día de leche. Existe también ganado caballar, mular, asnar, porcino y aves de corral. En minería existe explotación a baja escala de carbón y yeso, y yacimientos no explotados de cuarzo, azufre, hierro, asfalto, mármol y alumbre.

El municipio de Jericó cuenta con un estudio de clasificación agroecológica de suelos de la subdirección agrológica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

El municipio por hallarse ubicado en la cordillera oriental forma parte de una región altamente montañosa, con pisos térmicos. Las precipitaciones pluviales normalmente son bajas, pero con el fenómeno de la niña se incrementaron demasiado provocando la desestabilización de las zonas de ladera casi en todas las veredas.

- Población: 4.538 habitantes
- Temperatura media: 13° C

---

<sup>18</sup> Alcaldía de Jericó – Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.jerico-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.jerico-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml) >

Figura 9. Iglesia de Jericó



Fuente: sitio web: <http://www.jerico-boyaca.gov.co/turismo.shtml>

**CHITA**<sup>19</sup>: Prevalece como actividad económica fundamental la desarrollada en el sector primario de la economía, es decir la agricultura, la fruticultura, ganadería y explotación maderera.

De manera global el sector primario de la economía de Chita distribuye su actividad en la parte ganadera o de pasturas (40%), en agricultura (42%) y otras actividades (18%).

En el municipio de Chita confluye una transición del piedemonte cordillerano pluvial del llano hacia el húmedo y el semihúmedo y seco de la gran zona andina central, lo que contribuye a la gran riqueza en biodiversidad que existe en el territorio.

- Población: 10.425 habitantes.
- Temperatura media: 11°

---

<sup>19</sup> Alcaldía de Chita-Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.chita-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.chita-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)>

Figura 10. Iglesia de Chita



Fuente: sitio web: <http://turismo.sysmaya.net/blog/post/36/chita-boyaca.html>

## 5.2 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

En el estudio se identificaron 38 estaciones climatológicas ubicadas dentro de la cuenca, las cuales registran información de precipitación y temperatura, en donde a partir de estos datos se determinó la precipitación areal (Anexo 1) tomando datos históricos en un periodo de 10 años, comprendido de 1994 a 2004; además con la información de estas estaciones se realizó el cálculo de la evapotranspiración potencial areal de la zona por medio del método de Thornthwaite, el cual tiene en cuenta la temperatura areal (Anexo 2) del mismo periodo de años que fue analizado; los parámetros areales nombrados anteriormente son los datos de entrada al modelo. A continuación se muestra la localización de cada una de las estaciones que fueron identificadas dentro de la cuenca del río Chicamocha.

Figura 11. Localización de las estaciones de Precipitación

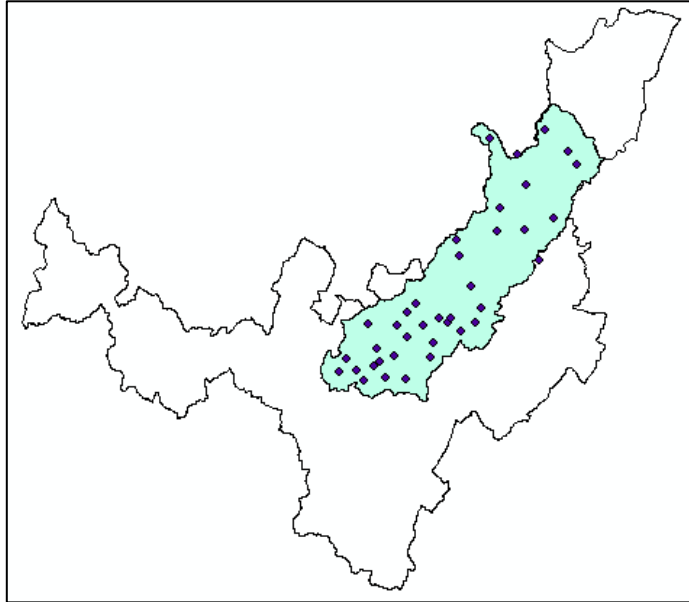
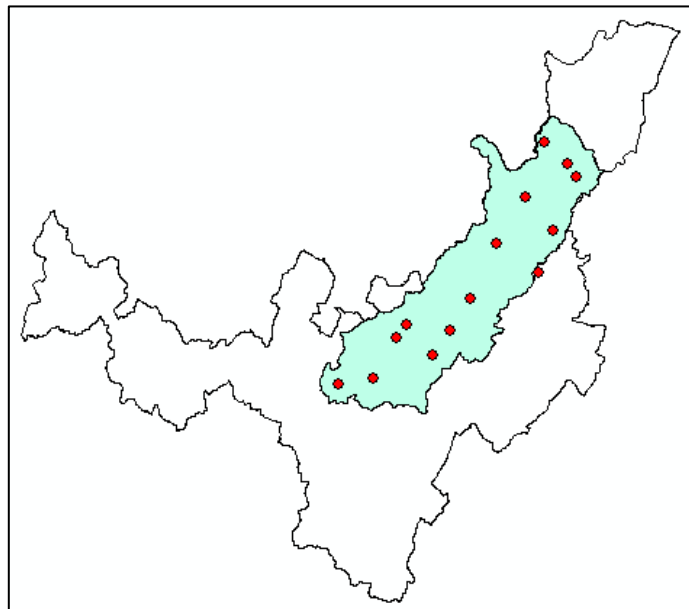


Figura 12. Localización de las estaciones de temperatura



Para realizar la calibración del modelo se identificaron 31 estaciones limnimétricas y limnigráficas, las cuales dan los valores de caudales observados o medidos que se

comparan con los caudales simulados en la calibración del modelo, obteniendo de esta forma los parámetros óptimos y característicos de cada subcuenca, permitiendo conocer y analizar la oferta del recurso hídrico en zonas no instrumentadas de la cuenca del río Chicamocha.

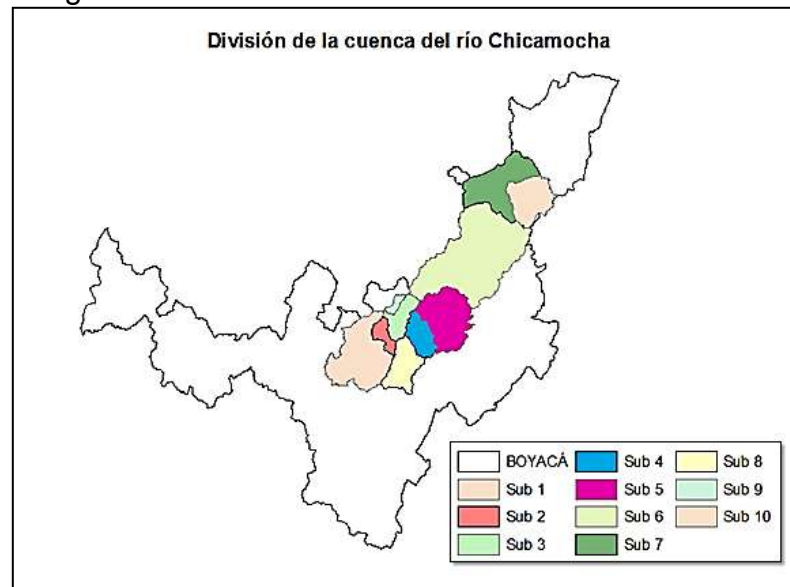
Tabla 3. Cantidad de estaciones climatológicas dentro de la cuenca

<b>Parámetro climatológico</b>	<b>N° de estaciones</b>
<b>Caudal</b>	31
<b>Precipitación</b>	38
<b>Temperatura</b>	15

## 5.2 DISTRIBUCIÓN DE SUBCUENCAS

La cuenca fue dividida en 10 subcuencas como se observa en la Figura 13 para tener una caracterización adecuada de toda la zona; esta división se realizó de acuerdo a la ubicación de las estaciones de caudal observado a la salida de cada subcuenca; en donde finalmente, se obtuvo diferencias en el área de cada una de estas.

Figura 13. División de la cuenca del río Chicamocha



En la Tabla 4 se observa el área, el nombre de la estación de caudal a la salida de cada una de las subcuencas y la corriente sobre la cual está ubicada respectivamente.

Tabla 4. Relación de áreas de subcuencas

<b>Subcuenca</b>	<b>Área Km<sup>2</sup></b>	<b>Estación de caudal</b>	<b>Nombre corriente</b>
1	992	LA REFORMA [24037130]	Chicamocha
2	140	LA SIBERIA [24037320]	Chicamocha
3	308	SAN RAFAEL [24037190]	Chicamocha
4	682	PTE CHAMEZA [24037290]	Chicamocha
5	770	PAZ DE RIO [24037510]	Chicamocha
6	2060	PLAYA LA [24037280]	Chicamocha
7	1270	CAPITANEJO [24037390]	Chicamocha
8	404	LA RESACA[24037110]	Chiquito
9	56	TRINIDAD LA [24037480]	Surba
10	516	TOTUMO [24037400]	Nevado

## 6. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO

En este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos a partir del análisis de los datos de entrada al modelo hidrológico, los parámetros *abcd* de calibración, la comparación entre el caudal observado y simulado, el valor de recarga y los mapas de isovalores a niveles de recarga mes a mes.

### 6.1 DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Dentro del análisis de resultados se tuvo en cuenta el cálculo de los parámetros de entrada al modelo hidrológico, según lo que se observa en la Tabla 5 y Tabla 6, de acuerdo al procedimiento presentado en el marco teórico.

#### 6.1.1 Precipitación areal

En la Tabla 5 se observan los resultados de la precipitación areal calculada a partir de datos de precipitación de cada una de las estaciones del IDEAM, la cual fue determinada tomando la información media de un periodo de 10 años comprendido entre 1994 y 2004.

Tabla 5. Datos de entrada: Precipitación areal (mm)

Precipitación areal (mm)												
Subcuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	24.11	45.10	77.47	87.66	96.85	73.65	63.33	47.43	105.60	105.60	81.10	44.49
2	29.62	57.94	88.75	101.42	104.84	76.94	60.00	59.69	78.88	115.28	81.82	50.00
3	30.00	60.08	80.38	99.10	108.75	64.29	50.20	50.27	79.83	110.04	79.87	49.90
4	30.19	43.31	80.00	80.60	90.23	60.00	55.84	55.56	67.80	93.24	66.02	35.50
5	30.00	53.33	80.00	92.51	99.69	80.82	87.71	75.07	80.00	90.61	70.29	35.79
6	37.28	52.03	103.56	126.51	124.50	63.95	69.89	80.68	100.43	144.19	80.12	50.00
7	30.09	53.77	84.58	130.34	133.45	93.27	78.32	83.62	114.56	148.83	90.00	40.00
8	25.00	45.00	73.60	72.35	90.00	63.39	59.02	50.00	61.03	95.36	65.41	33.51
9	32.50	60.00	90.00	100.00	110.00	70.00	55.00	55.00	80.00	110.00	75.00	50.00
10	30.00	60.00	81.48	118.00	135.00	100.00	82.21	89.24	97.25	129.94	81.06	49.65

### 6.1.2 Evapotranspiración Areal

En la Tabla 6 se observan los resultados de la precipitación areal calculada a partir de datos de temperatura de cada una de las estaciones del IDEAM, la cual fue determinada tomando la información media de un periodo de 10 años y calculada a partir del método de Thornthwaite, con el procedimiento que se presentó anteriormente en el marco teórico.

Tabla 6. Datos de entrada: Evapotranspiración areal (mm)

Evapotranspiración areal (mm)												
Subcuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	60.19	54.82	64.18	60.22	62.74	58.28	52.55	53.86	54.05	55.39	58.74	60.19
2	63.31	57.66	64.38	63.34	65.99	64.38	52.48	53.79	51.21	58.33	61.78	60.30
3	63.31	57.66	64.38	63.34	65.99	64.38	52.48	53.79	51.21	58.33	61.78	60.30
4	57.64	57.92	64.67	63.62	66.28	58.62	52.78	57.06	57.20	58.62	59.71	60.59
5	62.45	56.89	63.51	62.48	65.10	61.67	51.59	58.88	58.98	63.51	59.77	59.44
6	53.99	53.79	61.65	60.27	61.77	56.88	56.15	58.17	56.17	58.85	56.18	57.71
7	33.01	52.28	58.07	47.62	58.38	57.26	57.15	61.23	58.13	60.58	58.18	57.04
8	56.43	53.97	60.26	59.29	58.82	57.38	54.55	55.91	56.00	57.38	55.07	56.43
9	56.13	53.71	59.96	58.99	58.51	57.08	57.08	58.51	55.70	57.08	54.78	56.13
10	54.72	49.05	54.02	52.65	52.22	36.21	51.49	52.93	50.05	52.73	50.80	47.93

### 6.1.3 Caudales observados

Los caudales observados son variables medidas directamente por estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM. En esta investigación se tomaron valores medios de un periodo histórico de 10 años de acuerdo a los datos de precipitación y temperatura de la zona.

Tabla 7. Datos de entrada: Caudales observados

Caudales observados ( $m^3/s$ )												
Sub	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	4.50	4.32	4.97	5.57	5.22	6.54	7.21	7.32	5.72	7.33	7.66	5.65
2	6.49	6.12	7.88	10.18	11.81	11.25	10.93	9.95	13.36	15.75	16.28	9.95
3	11.16	12.18	13.69	15.44	16.31	16.07	15.87	15.79	15.38	18.39	18.82	14.62
4	21.31	21.06	21.71	23.41	25.65	24.24	23.68	22.76	21.78	24.86	25.35	20.28
5	66.34	67.02	70.16	60.19	85.80	64.00	79.45	76.63	67.74	72.31	71.61	56.00
6	87.11	83.73	91.81	102.42	126.34	133.24	149.72	128.86	122.47	132.48	121.11	77.14
7	124.91	117.75	143.69	173.55	208.11	197.26	199.16	197.00	201.38	211.02	174.04	144.08
8	0.35	0.27	0.46	1.08	2.33	2.52	2.87	2.48	1.92	2.30	2.07	0.88
9	0.28	0.37	0.47	0.72	0.91	0.76	0.49	0.50	0.65	1.02	1.00	0.62
10	9.92	9.47	12.76	24.35	29.02	28.72	27.14	24.40	26.80	31.26	27.92	17.90

## 6.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

La calibración del modelo de Thomas se realizó con los datos de entrada, presentados anteriormente, en cada una de las subcuencas la cual permitió identificar las zonas que presentaron calibraciones óptimas en donde se pudo ajustar adecuadamente el caudal medido por la estación hidroclimatológica y el caudal simulado por el modelo.

### 6.2.1 Calibraciones óptimas

Las mejores calibraciones, se obtuvieron en las subcuencas 1, 2, 4, 5, 8, 9 y 10, debido que la calibración en estas fue positiva, mostrando el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación  $R^2$  superiores a 0.60, similitud entre el caudal observado y el caudal simulado.

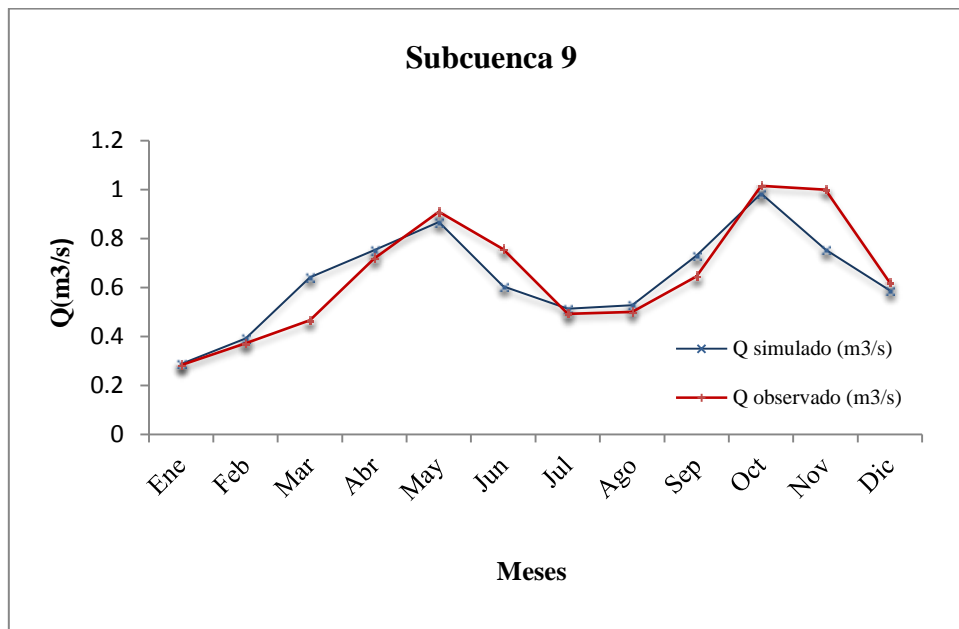
Tabla 8. Coeficiente de determinación  $R^2$  y de correlación de las subcuencas

Sub	ESTACIÓN DE CAUDAL	CORRIENTE	Coeficiente	
			$R^2$	Correlación
1	LA REFORMA [24037130]	CHICAMOCHA	0.28	0.53
2	LA SIBERIA [24037320]	CHICAMOCHA	0.76	0.87
4	PTE CHAMEZA [24037290]	CHICAMOCHA	0.28	0.53
5	PAZ DE RIO [24037510]	CHICAMOCHA	0.67	0.82
8	LA RESACA [24037110]	CHIQUITO	0.68	0.83
9	TRINIDAD LA [24037480]	SURBA	0.81	0.90
10	TOTUMO [24037400]	NEVADO	0.96	0.98

Tabla 9. Parámetros *a, b, c* y *d*

Sub	ESTACIÓN DE CAUDAL	CORRIENTE	Parámetros			
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
1	LA REFORMA [24037130]	CHICAMOCHA	0.71	240	0.71	0.007
2	LA SIBERIA [24037320]	CHICAMOCHA	0.1	680	0.01	0.01
4	PTE CHAMEZA [24037290]	CHICAMOCHA	0.9	1	0.6	0.07
5	PAZ DE RIO [24037510]	CHICAMOCHA	1	10	0.2	0.038
8	LA RESACA[24037110]	CHIQUITO	0.78	505	0.53	0.001
9	TRINIDAD LA [24037480]	SURBA	0.091	15	0.66	0.0356
10	TOTUMO [24037400]	NEVADO	0.9	290	0.1	0.0008

Gráfica 2. Caudal observado vs Caudal simulado subcuena 9



Las calibraciones que más se ajustaron se presentaron en las subcuena 9 y 10 dado que tienen coeficiente de correlación y coeficiente de determinación  $R^2$  superiores a 0.80; en la Gráfica 2 se observa la comparación del caudal simulado por el modelo con el caudal observado por la estación de caudales localizada en la zona de estudio. En el Anexo 3 se encuentran las gráficas de calibración óptimas que se determinaron en la investigación. El coeficiente de correlación y coeficiente de determinación  $R^2$  indican

similitud de la tendencia que tiene en el hidrógrama el caudal medido por la estación y el caudal simulado por el método de Thomas.

### 6.2.2 Calibraciones descartadas

Las calibraciones obtenidas en las subcuencas 3, 6 y 7 fueron descartadas, ya que los datos que se obtuvieron de estas eran poco confiables debido a que la simulación que se realizó en estas zonas no era positiva, debido a que no se logró tener una relación entre el caudal simulado con el caudal observado; además el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación  $R^2$  estaba por debajo de 0.50 como se observa en la Gráfica 3.

Gráfica 3. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 3

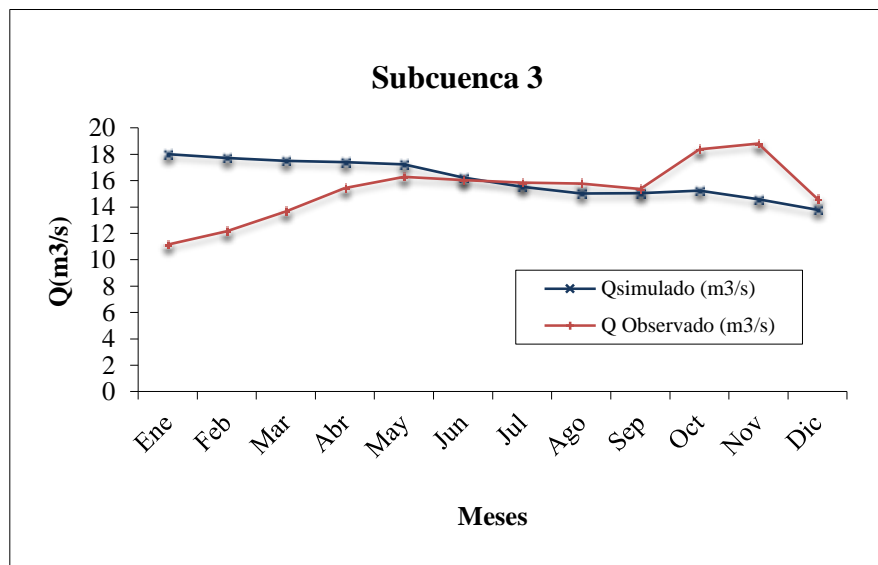


Tabla 10. Coeficientes  $R^2$  y de correlación: subcuencas con calibración no favorable

Sub	ESTACIÓN DE CAUDAL	CORRIENTE	Coeficiente	
			$R^2$	Correlación
3	SAN RAFAEL [24037190]	CHICAMOCHA	0.37	0.61
6	PLAYA LA [24037280]	CHICAMOCHA	0.00	0.03
7	CAPITANEJO [24037390]	CHICAMOCHA	0.01	0.10

Tabla 11. Parámetros de Calibración  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  de las subcuencas no favorables

Sub	ESTACIÓN DE CAUDAL	CORRIENTE	Parámetros			
			$a$	$b$	$c$	$D$
3	SAN RAFAEL [24037190]	CHICAMOCHA	0.1	10	0.9	0.05
6	PLAYA LA [24037280]	CHICAMOCHA	1	50	0.7	0.01
7	CAPITANEJO [24037390]	CHICAMOCHA	0.5	10	0.02	0.05

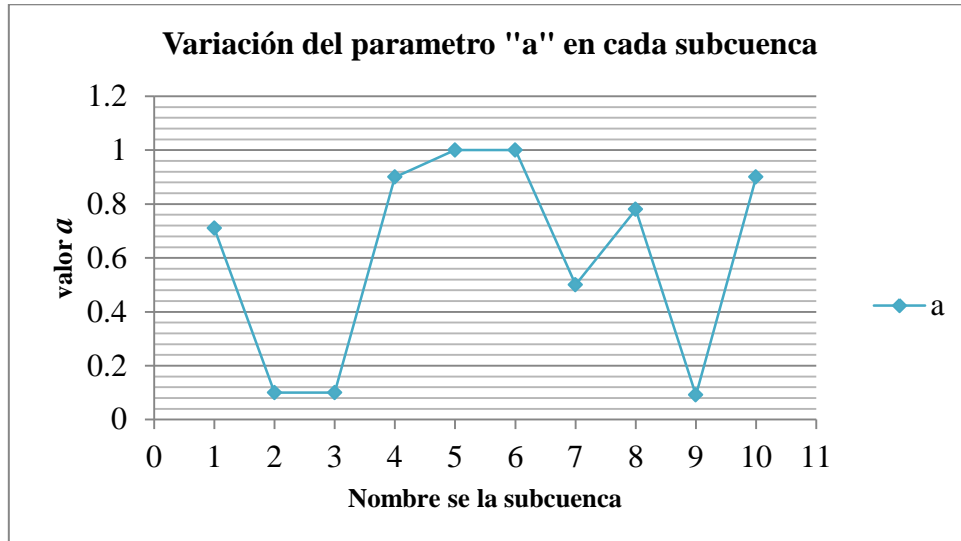
### 6.2.3 Parámetros $a$ , $b$ , $c$ y $d$ de la calibración del modelo de Thomas

A continuación se hace una descripción de los resultados obtenidos en la calibración según los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ , durante la modelación hidrológica del método de Thomas los cuales se observan en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros de calibración  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$

Subcuenca	Parámetros			
	$a$	$B$	$c$	$D$
1	0.71	240	0.71	0.007
2	0.1	680	0.01	0.01
3	0.1	10	0.9	0.05
4	0.9	1	0.6	0.07
5	1	10	0.2	0.038
6	1	50	0.7	0.01
7	0.5	10	0.02	0.05
8	0.78	505	0.53	0.001
9	0.091	15	0.66	0.0356
10	0.9	290	0.1	0.0008

Gráfica 4. Variación del parámetro "a" en cada una de las sub cuencas

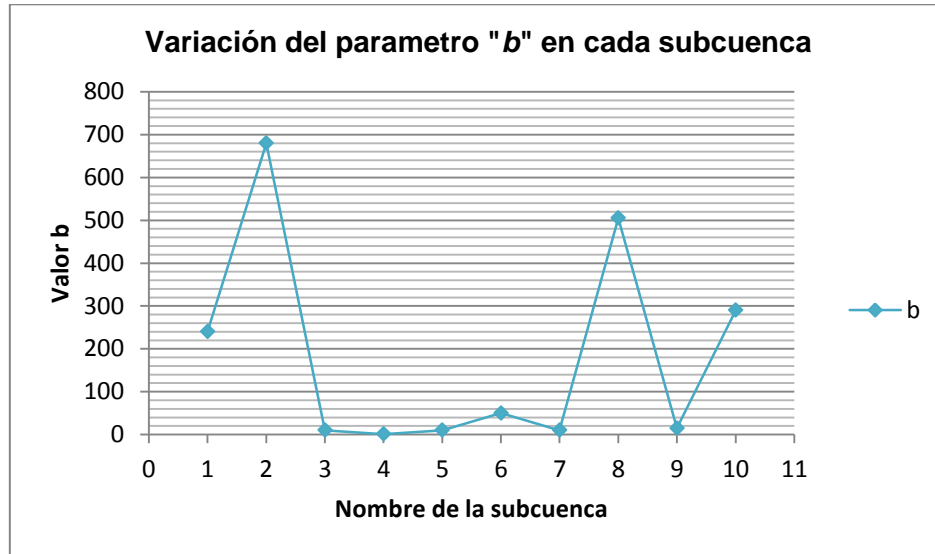


En la Gráfica 4 se observa la variación del parámetro "a" de la calibración final del modelo. Se puede concluir que según el método de Thomas, en toda la cuenca no existe una uniformidad del suelo a causa de que en las subcuencas 1, 4, 5, 6 y 10 tienen una probabilidad mayor a que se produzca escorrentía debido a la saturación del suelo, en donde se presentan valores entre 0.60 y 0.90 en comparación a las subcuencas 2,3 y 9 las cuales presentaron valores entre 0.01 y 0.1, teniendo de esta forma menos probabilidad de que se produzca escorrentía.

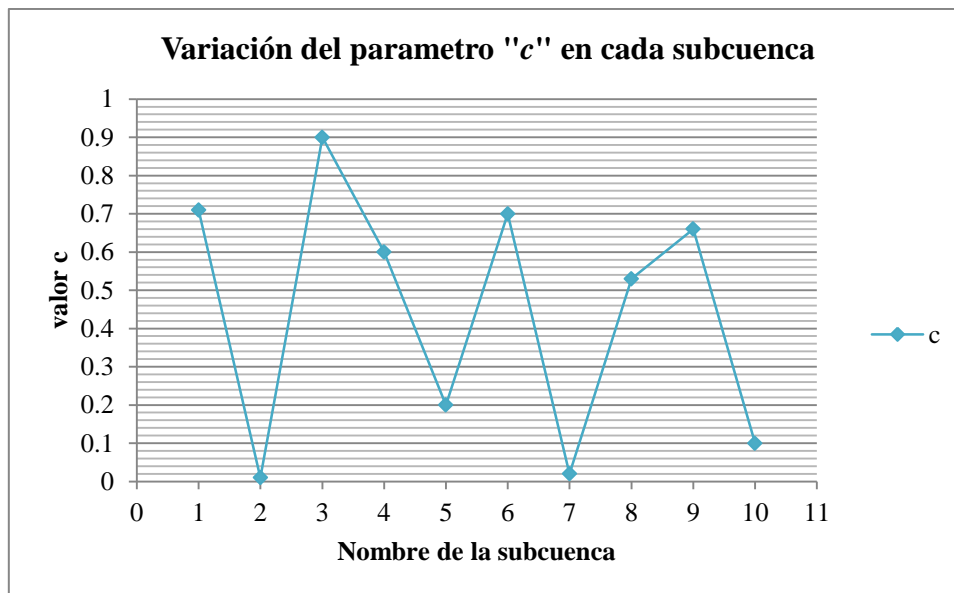
A continuación en la Gráfica 5, se observa la variación del parámetro "b" en donde se observa que en las subcuencas 2, 8 y 10 existe una tendencia alta de que el agua continúe con el proceso hidrológico a partir de evapotranspiración y humedad; en las subcuencas 3, 4, 5, 7 y 9 no presenta la misma tendencia.

En la Gráfica 6 se observa la variación del parámetro "c", en donde en las subcuencas 1, 3, 4, 6, 8 y 9 tienen los mayores valores que van entre 0.6 y 0.7, mostrando que en estas zonas hay una alta probabilidad de que exista almacenamiento subterráneo.

Gráfica 5. Variación del parámetro "b" en cada una de las sub cuencas

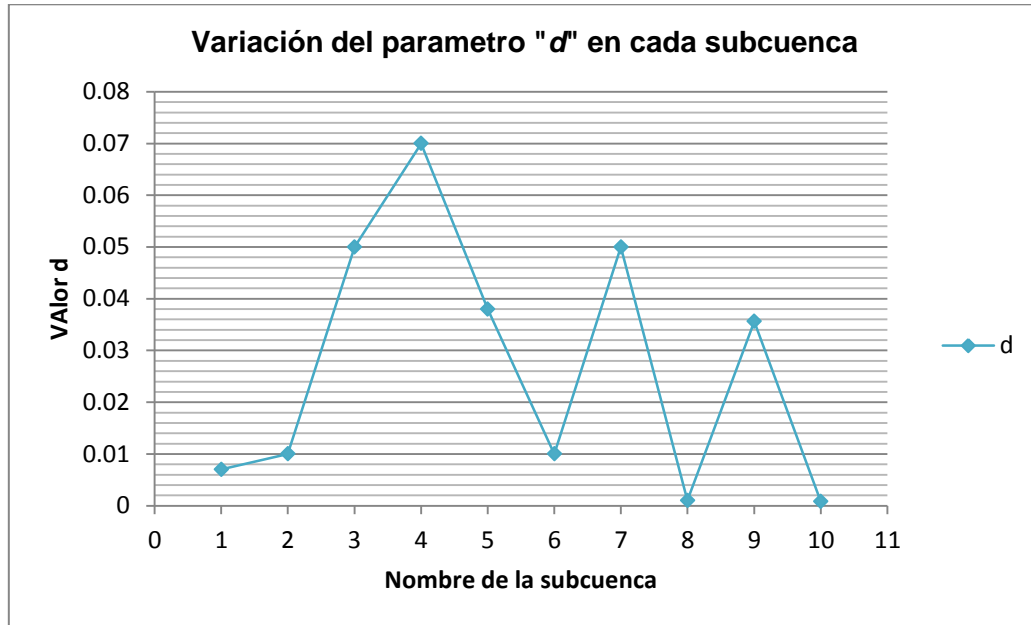


Gráfica 6. Variación del parámetro "c" en cada una de las sub cuencas



Finalmente en la Gráfica 7 se observa la variación del parámetro "d" de cada una de las subcuencas, en donde se puede concluir que en las subcuencas 4, 7 y 9 se presenta un mayor tiempo en el que el agua permanece en el acuífero.

Gráfica 7. Variación del parámetro "d" en cada una de las sub cuencas



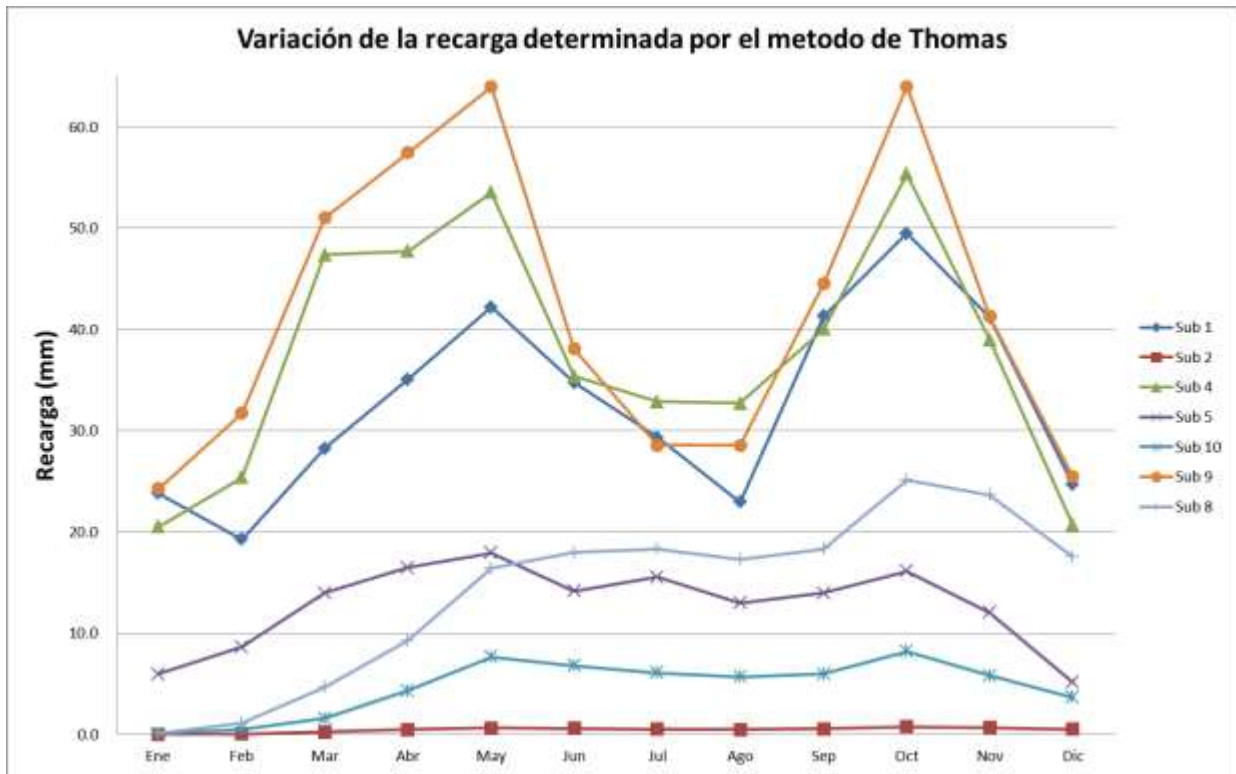
### 6.3 ANÁLISIS DE LA RECARGA

De las calibraciones positivas de las subcuencas 1, 2, 4, 5, 8, 9 y 10, se tomó el valor de recarga calculado a partir del modelo de Thomas, determinando mes a mes la generación de infiltración de agua que probablemente llega a los acuíferos, elaborando a partir de esta información, mapas isovalores que muestran las épocas y las zonas de mayor o igual aportación a los acuíferos existentes en la cuenca del río Chicamocha.

En la

**Tabla 13** se muestran los valores probables de recarga calculados en las subcuencas que presentaron un mayor ajuste en la calibración.

Gráfica 8. Variación de la recarga (mm) según la localización de las estaciones limnigráficas



En la Gráfica 8 se observa la variación de la recarga mensualmente en cada una de las subcuencas según los datos obtenidos en la calibración; se ve claramente que en la subcuenca 2 la recarga anualmente es constante y mucho menor que en las subcuencas 9, 4 y 1, debido a que este parámetro va variando en cada mes según la intensidad de precipitación que se presente, observando de esta forma que en los meses de abril y octubre hay una mayor aportación de recarga a los acuíferos.

Tabla 13. Valores de recarga (mm) utilizada en la elaboración de los mapas

Sub	Recarga (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	23.8	19.3	28.2	35.1	42.2	34.8	29.4	23.0	41.3	49.5	41.2	24.7
2	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.8	0.7	0.5
4	20.5	25.4	47.4	47.8	53.5	35.4	32.9	32.7	40.1	55.3	39.0	20.7
5	6.0	8.7	14.0	16.5	17.9	14.2	15.5	13.0	14.0	16.1	12.1	5.2
10	0.1	0.5	1.6	4.3	7.7	6.8	6.1	5.7	6.0	8.2	5.8	3.7
9	24.3	31.7	51.0	57.5	64.0	38.1	28.6	28.6	44.5	64.0	41.3	25.5
8	0.2	1.1	4.7	9.3	16.4	18.0	18.3	17.3	18.3	25.2	23.7	17.6

En la Tabla 14 se observa la recarga generada anualmente en cada una de las subcuencas tomadas en el análisis, en donde es evidente que la zona de mayor aportación anual está en la zona occidental del departamento.

Tabla 14. Recarga generada anualmente en cada una de las subcuencas

Sub	Nombre de la estación de salida de la subcuenca	corriente	Total (mm/ año)
1	LA REFORMA [24037130]	Chicamocha	392
2	LA SIBERIA [24037320]	Chicamocha	6
4	PTE CHAMEZA [24037290]	Chicamocha	451
5	PAZ DE RIO [24037510]	Chicamocha	153
10	TOTUMO [24037400]	Nevado	57
9	TRINIDAD LA [24037480]	Surba	499
8	LA RESACA[24037110]	Chiquito	170

#### 6.4 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE RECARGA EN LA CUENCA DEL RIO CHICAMOCHA EN BOYACÁ

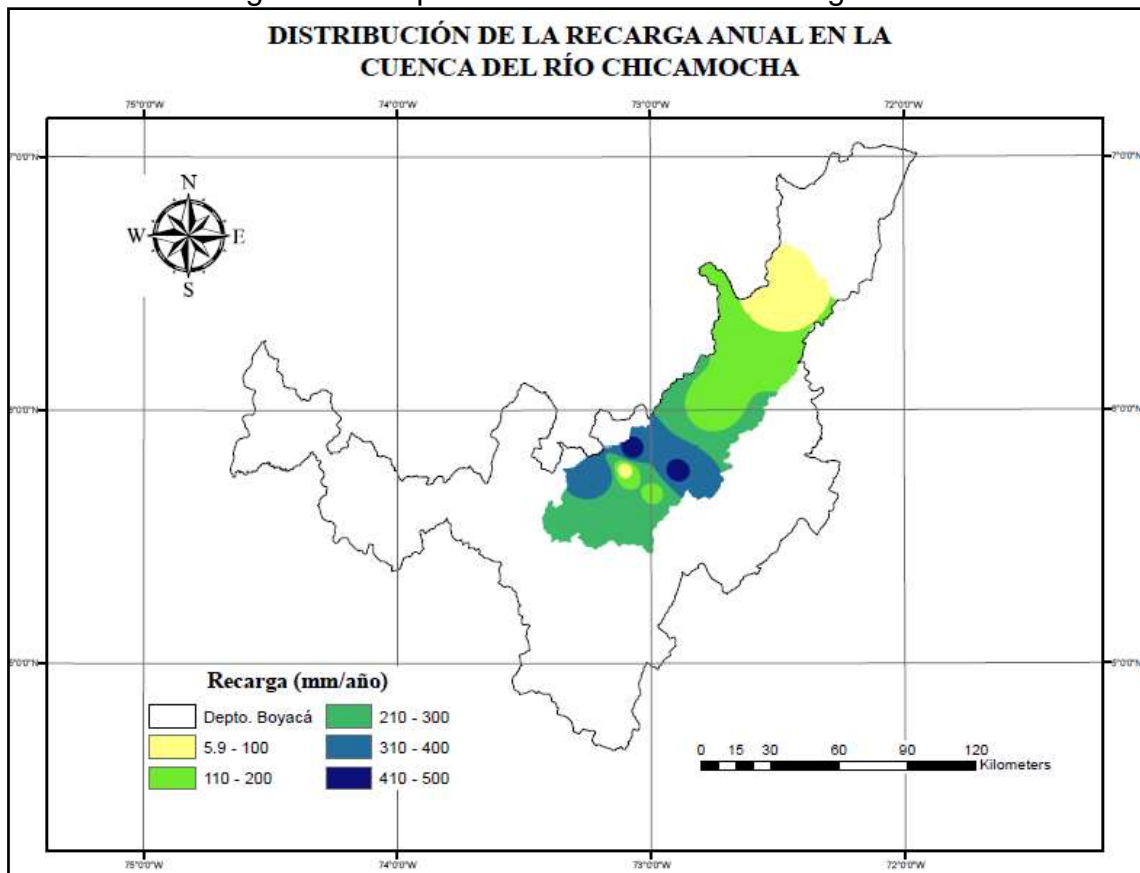
El proyecto cumplió con los objetivos planteados inicialmente, en donde se llegó a la elaboración de los mapas que muestran los niveles de recarga mes a mes dentro de la cuenca del río Chicamocha en Boyacá.

Con los resultados de la calibración mostrada anteriormente, se generaron los mapas a niveles de recarga (mm) mes a mes, como se observa en el Anexo 4.

A continuación en la Figura 14 se ve la distribución de la recarga anual (mm) dentro de la cuenca alta y media del río Chicamocha; en donde se identifica que la zona de mayor aportación de recarga a los acuíferos está localizada en la cuenca alta del Chicamocha en los municipios de Paipa, Tibasosa y Duitama con valores anuales entre 400 mm y 500 mm de recarga. Las zonas donde hay menos distribución de recarga está localizada al norte del departamento en municipios como El cocuy, San mateo, Chita y La uvita; presentando valores de recarga entre 5.9 mm y 100 mm anualmente.

Según la información presentada en los mapas del Anexo 4, se observa que los meses que tienen mayor aportación de recarga a los acuíferos, de la cuenca del río Chicamocha, son los meses que presentan mayores lluvias como son abril, mayo y octubre.

Figura 14. Mapa de distribución de la recarga anual



## 7. CONCLUSIONES

- Se observó que el modelo hidrológico de Thomas puede llegar a ser más eficiente si se cuenta con un nivel alto en calidad y cantidad de la información necesaria para calcular los datos de entrada a este, como son: precipitación, temperatura y caudales observados.
- Se pudo concluir que la calibración del modelo se ajustó mejor en áreas pequeñas, debido a que es más probable tener una mejor caracterización y homogenización de cada zona.
- Las subcuencas con mayor área, no presentaron calibraciones aceptables debido a su gran extensión, porque son las zonas que presentan menor número de estaciones hidroclimatológicas por unidad de área. Adicionalmente la zona por la misma extensión tiende a ser muy heterogénea desde la orografía y morfometría.
- Se realizó la identificación de la zona de mayor aportación de recarga a los acuíferos, la cual está localizada en la cuenca alta del Chicamocha en los municipios de Paipa, Tibasosa y Duitama con valores anuales entre 400 mm y 500 mm de recarga.
- Las zonas donde hay menos distribución de recarga está localizada al norte del departamento en municipios como El cocuy, San mateo, Chita y La uvita; presentando valores de recarga entre 5.9 mm y 100 mm anualmente.
- Se observa que los meses que tienen mayor aportación de recarga a los acuíferos, de la cuenca del río Chicamocha, son los meses que presentan mayores lluvias como son abril, mayo y octubre.

## 8. RECOMENDACIONES

- Es aconsejable hacer el análisis en subcuencas que no tengan caudales controlados (represas) aguas arriba de la salida de esta y grandes asentamientos urbanos aguas arriba de la salida de la cuenca.
- Se recomienda contar con información de buena calidad y verídica para tener variables más confiables en la calibración del modelo hidrológico, realizando un test de bondad.
- La investigación deja como producto información valiosa para el departamento, ya que esta sirve como fuente para identificar la localización de agua subterránea, y proponer a partir de esto un plan de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Chicamocha, para aprovechar mejor el agua subterránea en épocas de sequía.
- Los mapas isovalores aportan gran información a la región, ya que muestran las zonas en las cuales se genera recarga, permitiendo identificar las épocas de mayor aportación a los acuíferos.
- A partir del resultado de la investigación se puede plantear, la utilización de pozos profundos como alternativa en épocas de sequía como por ejemplo durante el fenómeno del niño.

## 9. GLOSARIO

### A

**Acuífero:** Formación geológica subterránea capaz de contener y transmitir agua en grandes cantidades y de forma continua<sup>20</sup>.

**Aguas arriba:** posición superior de una masa de agua con respecto a un punto de una corriente<sup>21</sup>.

**Aforo:** Medición del caudal de un río o corriente<sup>22</sup>.

**Área de Recarga:** Área que alimenta un acuífero, bien por infiltración directa, bien por infiltración de una parte de la escorrentía<sup>23</sup>.

**Aportación:** Volumen del escurrimiento total de una cuenca de drenaje. Volumen total escurrido en un periodo de un día, un mes un año.se expresa en metros cúbicos<sup>24</sup>.

### B

**Balance hídrico:** balance de agua basado en el principio de que durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca, masa de agua o región geográfica debe ser igual a la salida total del agua más la variación neta en el almacenamiento<sup>25</sup>.

---

<sup>20</sup> LANZA ESPINO, Guadalupe. Diccionario de hidrología y ciencias afines. Plaza y Valdés. 1999. 289 p. ISBN: 968-856-711-6.

<sup>21</sup> LANZA ESPINO, Guadalupe. Diccionario de hidrología y ciencias afines. Plaza y Valdés. 1999. 21 p. ISBN: 968-856-711-6.

<sup>22</sup> Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA). Glosario Hidrológico. Página web: [http://www.hidromet.com.pa/educacion\\_hidrologico.php](http://www.hidromet.com.pa/educacion_hidrologico.php)

<sup>23</sup> UNESCO. Glosario Hidrológico Internacional. 2012. ISBN 978-92-63-03385-8

<sup>24</sup> LANZA ESPINO, Guadalupe. Diccionario de hidrología y ciencias afines. Plaza y Valdés. 1999. 30 p. ISBN: 968-856-711-6.

<sup>25</sup> LANZA ESPINO, Guadalupe. Diccionario de hidrología y ciencias afines. Plaza y Valdés. 1999. 289 p. ISBN: 968-856-711-6.

## C

**Calibración:** Determinación experimental de las relaciones entre la cantidad a medir y la indicación del instrumento de medición<sup>26</sup>.

**Caudal medio:** Media aritmética de los caudales medios diarios del mes durante varios años<sup>27</sup>.

**Caudal observado:** o caudal medido por una estación limnométrica o limnigráfica de la corriente de un río.

**Caudal subsuperficial:** Cualquier flujo que se produce por debajo de la superficie del terreno que puede contribuir al interflujo, al caudal de base o a la percolación<sup>28</sup>.

**Caudal superficial:** Parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo<sup>29</sup>.

**Cuenca:** Depresión del fondo del mar de forma más o menos simétrica y de extensión variable<sup>30</sup>.

## E

**Escorrentía:** Movimiento de las aguas en los continentes bajo la acción de la gravedad<sup>31</sup>. Parte de la precipitación que fluye por la superficie del terreno<sup>32</sup>.

---

<sup>26</sup> ORTIZ AGUIRRE, Ramon. Glosario Geohidrológico. Postonia. 33 p. ISBN: 968-7674-00-8 ([https://books.google.com.co/books?id=aaM\\_vpBzDdMC&pg=PA64&dq=escorrentia&hl=es-419&sa=X&ei=AZbBVNLTHKHjsASn04HIDw&ved=0CDIQ6wEwBA#v=onepage&q=escorrentia&f=false](https://books.google.com.co/books?id=aaM_vpBzDdMC&pg=PA64&dq=escorrentia&hl=es-419&sa=X&ei=AZbBVNLTHKHjsASn04HIDw&ved=0CDIQ6wEwBA#v=onepage&q=escorrentia&f=false))

<sup>27</sup> ETESA. [http://www.hidromet.com.pa/educacion\\_hidrologico.php](http://www.hidromet.com.pa/educacion_hidrologico.php)

<sup>28</sup> UNESCO. Glosario Hidrológico Internacional. 2012. ISBN 978-92-63-03385-8

<sup>29</sup> UNESCO. Glosario Hidrológico Internacional. 2012. ISBN 978-92-63-03385-8

<sup>30</sup> LANZA ESPINO, Guadalupe. Diccionario de hidrología y ciencias afines. Plaza y Valdés. 1999. 91 p. ISBN: 968-856-711-6. (<http://www.casadelpdf.com/2011/05/diccionario-de-hidrologia-y-ciencias.html>)

<sup>31</sup> Pierre, George. Diccionario Akal de Geografía. Madrid, España. 1991. 223 p. ISBN: 84-7600-681-0 ([https://books.google.com.co/books?id=GNNyAkhcliwC&pg=PA223&dq=escorrentia&hl=es-419&sa=X&ei=HJTBPvPeTM\\_eZsQTV\\_oFA&ved=0CCEQ6AEwAQ#v=onepage&q=escorrentia&f=false](https://books.google.com.co/books?id=GNNyAkhcliwC&pg=PA223&dq=escorrentia&hl=es-419&sa=X&ei=HJTBPvPeTM_eZsQTV_oFA&ved=0CCEQ6AEwAQ#v=onepage&q=escorrentia&f=false))

**Encharcamiento**<sup>33</sup>: Fenómeno a causa de la saturación del suelo, caracterizado por la presencia de láminas delgadas de agua sobre la superficie del suelo en pequeñas extensiones y por lo general, presente en zonas moderadamente onduladas a planas. El fenómeno puede durar desde pocas horas hasta unos pocos días.

**Estación hidroclimatológica**: elemento mecánico o manual que es capaz de medir diferentes parámetros climatológicos como cauda, temperatura, humedad, velocidad del viento, entre otros.

**Estación Climatológica**<sup>34</sup>: Es aquella en la cual se hacen observaciones de visibilidad, tiempo atmosférico presente, cantidad, tipo y altura de las nubes, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad, viento, radiación, solar, brillo solar, evaporación y fenómenos especiales. Gran parte de estos parámetros se obtienen de instrumentos registradores. Por lo general se efectúan tres observaciones diarias.

**Evapotranspiración**: combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración de la vegetación<sup>35</sup>.

## H

**Hidroclimatología**: es un marco sistemático para analizar cómo la atmósfera ocasiona la variación espacio temporal de los elementos del ciclo hidrológico en

---

<sup>32</sup> Ortiz Aguirre, Ramon. Glosario Geohidrológico. Postonia. 64 p. ISBN: 968-7674-00-8  
([https://books.google.com.co/books?id=aaM\\_vpBzDdMC&pg=PA64&dq=escorrentia&hl=es-419&sa=X&ei=AZbBVNLTHKHjsASn04HIDw&ved=0CDIQ6wEwBA#v=onepage&q=escorrentia&f=false](https://books.google.com.co/books?id=aaM_vpBzDdMC&pg=PA64&dq=escorrentia&hl=es-419&sa=X&ei=AZbBVNLTHKHjsASn04HIDw&ved=0CDIQ6wEwBA#v=onepage&q=escorrentia&f=false))

<sup>33</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Glosario IDEAM. Página web:  
<http://institucional.ideam.gov.co/>

<sup>34</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Glosario IDEAM. Página web:  
<http://institucional.ideam.gov.co/>

<sup>35</sup> ALLEN Richard G., PEREIRA Luis S., RAES Dirk, SMITH Martin. Evapotranspiración del cultivo. Roma. 2006. 1 p. ISBN:92-5-304219-2  
(<http://books.google.com.co/books?hl=en&lr=&id=YJgytETfEnAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=evapotranspiracion&ots=u5pps8JvB4&sig=r9zO7ObFQOJhBymJJMpdKM69qfk#v=onepage&q=evapotranspiracion&f=false>)

escalas globales, regionales y locales. Es el estudio del clima sobre las aguas continentales, esta incluye la hidrometeorología y también los procesos de superficie y cercanos a esta cómo son la evaporación, la escorrentía, la interceptación de agua por la vegetación y la recarga de aguas subterráneas<sup>36</sup>.

**Hidrógrama**<sup>37</sup>: Gráfica que muestra la variación del nivel, caudal, velocidad o de otras características de las corrientes de agua, con respecto al tiempo .

## L

**Líneas isovalores**: líneas formadas por diferentes puntos de igual valor.

## M

**Modelo hidrológico**: Representación simplificada de un sistema hidrológico<sup>38</sup>.

**Morfometria**: es la ciencia que estudia las medidas y parámetros necesarios para describir el paisaje geomorfológico en su variación topográfica<sup>39</sup>.

## O

**Orografía**: se refiere al estudio o descripción de las cordilleras o sistemas montañosos, sinónimo de relieve montañoso<sup>40</sup>.

---

<sup>36</sup> DOMÍNGUEZ CALLE, Efraín. HIDRO-CLIMATOLOGÍA. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de estudios ambientales y rurales, Departamento de ecología y territorio.  
(<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=bWF0aG1vZGVsbGluZy5vcmd8d3d3fGd4Ojc0Yjk0MDU3Y2YwYmVmNjg>)

<sup>37</sup> Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA). Glosario Hidrológico. Página web:  
[http://www.hidromet.com.pa/educacion\\_hidrologico.php](http://www.hidromet.com.pa/educacion_hidrologico.php)

<sup>38</sup> UNESCO. Glosario Hidrológico Internacional. 2012. ISBN 978-92-63-03385-8  
(<http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>)

<sup>39</sup> CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfología. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.  
(<http://www.pgss.com.br/revistacientifica/index.php/exatas/article/view/1144/1052>)

## P

**Parámetro:** valor que sirve como dato de entrada a un análisis numérico.

**Precipitación:** caída de partículas líquidas o sólidas de agua. La precipitación es la fase del ciclo hidrológico que da origen a todas las corrientes superficiales y profundas<sup>41</sup>.

**Pozo profundo**<sup>42</sup>: Excavación o perforación en el terreno que alcanza a las aguas subterráneas.

## R

**Recurso hídrico:** Actividades científicas y tecnológicas para identificar los efectos posibles de la intervención humana en el ciclo hidrológico y evaluar dicha intervención en términos de costo y beneficio<sup>43</sup>.

## S

**Subcuenca:** es toda área en la que su drenaje va a directamente al río principal de la cuenca. También se puede definir como una subdivisión de la cuenca. Es decir que en una cuenca puede haber varias subcuencas<sup>44</sup>.

---

<sup>40</sup> TEJADA ÁLAMO, Guillermo. Vocabulario Geomorfológico. AKAL Diccionarios. Madrid España. 1994. 106 p. ISBN:84-460-0285 ([https://books.google.com.co/books?id=TQ7xkErT4zcC&pg=PA106&dq=orografia&hl=es-419&sa=X&ei=M7\\_LVK75NYSWgwSmvIDADQ&ved=0CDwQ6wEwBw#v=onepage&q=orografia&f=false](https://books.google.com.co/books?id=TQ7xkErT4zcC&pg=PA106&dq=orografia&hl=es-419&sa=X&ei=M7_LVK75NYSWgwSmvIDADQ&ved=0CDwQ6wEwBw#v=onepage&q=orografia&f=false))

<sup>41</sup> MADEREY RASCÓN, Laura. Principios de Hidrogeografía Estudio del Ciclo Hidrológico. México. 2005. 15 p. ISBN:970-32-2812-7 (<https://books.google.com.co/books?id=0S3XDWsDzSAC&printsec=frontcover&dq=precipitacion+diccionario+de+hidrologia+y+ciencia+afines&hl=es-419&sa=X&ei=emHAVMnqPKvLsATutYCAAQ&ved=0CCYQ6wEwAg#v=onepage&q&f=false>)

<sup>42</sup> Glosario Hidrogeológico. Página web: <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO%20IS%C3%93TOPOS/Parte%20final/4-Glosario%20hidrogeol%C3%B3gico.pdf>

<sup>43</sup> UNESCO. Glosario Hidrológico Internacional. 2012. ISBN 978-92-63-03385-8

## V

**Validación**<sup>45</sup>: La validación de un método es el proceso para confirmar que el procedimiento analítico utilizado para una prueba en concreto es adecuado para su uso previsto. Los resultados de la validación del método pueden utilizarse para juzgar la calidad, la fiabilidad y la constancia de los resultados analíticos, se trata de una parte integrante de cualquier buena práctica analítica.

**Variable**: dato que tiene un valor cualquiera como resultado de un análisis numérico.

---

<sup>44</sup> UMAÑA GÓMEZ, Edmundo. MANEJO DE CUENCAS HIDROGRAFICAS Y PROTECCIÓN DE FUENTES DE AGUA. San Nicolas, ESTELI. Noviembre 2002, p.6. (<http://www.bvsde.paho.org/bvsade/fulltext/cuencas.pdf>)

<sup>45</sup> HUBER, Ludwing. Validation and Quialification in Analytical Laboratories. Octubre 1998. (<http://www.greenfacts.org/es/glosario/tuv/validacion.htm>)

## REFERENCIAS

AL-LAFTA, Hadi; AL-TAWASH, Balsam y AL-BALDAWI, Buraq. Applying the “abcd” Monthly Water Balance model for Some Regions in the United States. En: Advances in Physics Theories and Applications. 2013. vol. 25, p. 36-47.

Alcaldía de Chita-Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.chita-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.chita-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)>.

Alcaldía de Jericó – Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.jerico-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.jerico-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)>.

Alcaldía de Paz de Río-Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.pazderio-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.pazderio-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)>.

Alcaldía de Socha-Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.socha-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.socha-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)>.

Alcaldía de Socotá–Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < [http://www.socota-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtm](http://www.socota-boyaca.gov.co/informacion_general.shtm)>.

Alcaldía de Tasco – Boyacá. Nuestro municipio [en línea]. < < [http://www.tasco-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.tasco-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)>.

ArcGIS Resource. Introducción a ArcGIS [en línea]. <<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>>.

ArcGIS Resource Center. ¿Qué es un shapefile? [en línea]. <<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//005600000002000000>>.

CARO CAMARGO, Carlos. Modelación Hidrológica Distribuida con base en esquemas de volúmenes finitos. En: Ingenio Magno. Tunja: Universidad Santo Tomás. 2011. no2, vol. 1. ISSN: 2145-9282.

CARO CAMARGO, Carlos y BLADÉ CATELLET, Ernest. Aplicación de un sub modelo de transferencia vertical dentro de un modelo hidrológico continuo en un esquema de volúmenes finitos. En: Jornadas De ingeniería Del Agua. Barcelona. 2011. ISBN: 978-84-615-4023-5.

CARO CAMARGO, Carlos y BLADÉ CATELLET, Ernest. Correlación de parámetros geotécnicos con parámetros de un modelo hidrológico superficial. En: Ingenio Magno. Tunja: Universidad Santo Tomás. 2013. vol. 4, p. 76-86.

CARO CAMARGO, Carlos; BLADÉ CASTELLET, Ernest y ACOSTA Pedro. Modelo de Transferencia Vertical dentro de un modelo hidrológico continuo en un esquema de volúmenes finitos. En: Revista L'espirit Ingénieur. Mayo 2012, p.145. ISSN: 2145 9214.

CARO CAMARGO, Carlos y FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 2003, p. 140.

CHOW Ven; MAIDMENT David y MAYS Larry. Hidrología Aplicada. 1994. ISBN: 958-600-171-7

FERNANDEZ, W; VOGUEL, R.M y SANKARASUBRAMANIAN A. Regional calibration of a watershed model. En: Hydrological Sciences Journal. Medford, Massachusetts, USA. 2000.

FRAGALA, F; OBREGON, N; CARO, C; FLECHAS, F y GARCÍA, O. Aproximación a la estimación de la recarga en los acuíferos mediante optimización matemática multidimensional de un modelo de balance hídrico. En: Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. 2003, p.201-208.

KHAKBAZ, Behnaz; IMAM Bisher; HSU, Kuolin y SOROOSHIAN, Soroosh. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. En: Science Direct: Journal of Hydrology. 2009.

MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la Ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. 2009. ISBN: 958-95742-1-1

OBREGÓN, N; FRAGALÁ, F; BLANCO, A y GÓMEZ, L. Implementación del modelo de Thomas en la cuenca alta del río Checua para la estimación de la recarga (Sabana de Bogotá, Cundinamarca, Colombia). En: XV Seminario nacional de Hidráulica e Hidrología. Medellín. 2002.

Soporte Office. ¿Qué es Excel? [en línea].<<https://support.office.com/es-hn/article/%C2%BFQu%C3%A9-es-Excel-8373c3d7-bd64-4b7f-bdbd-1fa4b2007b09>>.

Thomas, Harold A. Improved methods for National Water Assessment, report, contract WR 15249270. En: U.S. Harvard Water Resources Group. Washington, D.C. 1981.

VERA, Y. CARO, C. Calibración de los parámetros del modelo hidrológico de Thomas para el departamento de Boyacá. En: XXIII seminario nacional de hidráulica e hidrología. Bogotá. 2008.

## **ANEXOS**

## Anexo 1. Estaciones de precipitación del IDEAM identificadas en el estudio

Tabla 15. Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas del IDEAM

<b>CODIGO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>CORRIENTE</b>	<b>MUNICIPIO</b>	<b>TIPO</b>
2311	DUITAMA [24030350]	CHITICUY	DUITAMA	Pluviografica
2288	PESCA [24030120]	PESCA	PESCA	Pluviografica
2346	SENA [24030940]	CHICAMOCHA	SOGAMOSO	Pluviografica
3626	AZULEJOS LOS [24030820]	TUTA	TUTA	Pluviografica
2324	COL DPTAL AGROP [24030500]	QDA EL RAQUE	CHIVATA	Pluviometrica
2299	IZA [24030230]	PESCA	IZA	Pluviometrica
3625	NOBSA [24030790]	CHICAMOCHA	NOBSA	Pluviometrica
2321	ENCANTO EL [24030450]	CHULO	OICATA	Pluviometrica
3614	CEREZO EL [24030510]	SALITRE	PAIPA	Pluviometrica
2290	SIACHOQUE [24030140]	FIRAYA	SIACHOQUE	Pluviometrica
2314	SOTAQUIRA [24030380]	SOTAQUIRA	SOTAQUIRA	Pluviometrica
2317	TIBASOSA [24030410]	CHICAMOCHA	TIBASOSA	Pluviometrica
2339	CASA AMARILLA [24030800]	TOCA	TOCA	Pluviometrica
2337	GARROCHO EL [24030770]	QDA ALIZAL	TOCA	Pluviometrica
2365	SAN CRISTOBAL [24035300]	QDA RAIBA	TOCA	Meteorologica Especial
3639	SURBATA BONZA [24035120]	SURBA	DUITAMA	Agrometeorologica
2358	TUNGUAVITA [24035170]	SALITRE	PAIPA	Agrometeorologica
2351	COPA LA [24035040]	TUTA	TOCA	Climatologica Ordinaria
2357	BELENCITO [24035150]	CHICAMOCHA	NOBSA	Climatologica Principal
3649	APTO A LLERAS C [24035340]	CHICAMOCHA	SOGAMOSO	Climatologica Principal
2356	U P T C [24035130]	CHULO	TUNJA	Climatologica Principal
2333	COVARACHIA [24030700]	CHICAMOCHA	COVARACHIA	Pluviometrica
3619	NIMICIA ESC RURAL [24030640]	SASA	GAMEZA	Pluviometrica
3617	JERICO [24030580]	QDA ALTAMIZAL	JERICO	Pluviometrica
3616	MONGUA [24030560]	SASA	MONGUA	Pluviometrica
2295	MONGUI [24030190]	MONGUI	MONGUI	Pluviometrica
2340	CHAPETON EL [24030830]	NEVADO	SAN MATEO	Pluviometrica
2300	SUSACON [24030240]	SUSACON	SUSACON	Pluviometrica
2342	CAPILLA LA [24030860]	PARGUA	TUTASA	Pluviometrica
2330	TUTASA [24030650]	SOPAGA	TUTASA	Pluviometrica
2350	BETEITIVA [24035020]	CHICAMOCHA	BETEITIVA	Climatologica Ordinaria
2366	CHISCAS [24035310]	CHISCANO	CHISCAS	Climatologica Ordinaria

3645	CHITA [24035250]	QDA PENA BLANCA	CHITA	Climatologica Ordinaria
3637	GUICAN [24035070]	NEVADO	GUICAN	Climatologica Ordinaria
2362	SIERRA NEVAD COCUY [24035240]	QDA LAGUNILLAS	GUICAN	Climatologica Ordinaria
3648	SATIVANORTE [24035320]	QDA LAS LEONAS	SATIVANORTE	Climatologica Ordinaria
6039	CARDON EL [35235010]	QDA GAVILAN	SOCOTA	Climatologica Ordinaria
2367	BOAVITA [24035330]	QDA OCALAYA	BOAVITA	Agrometeorologica

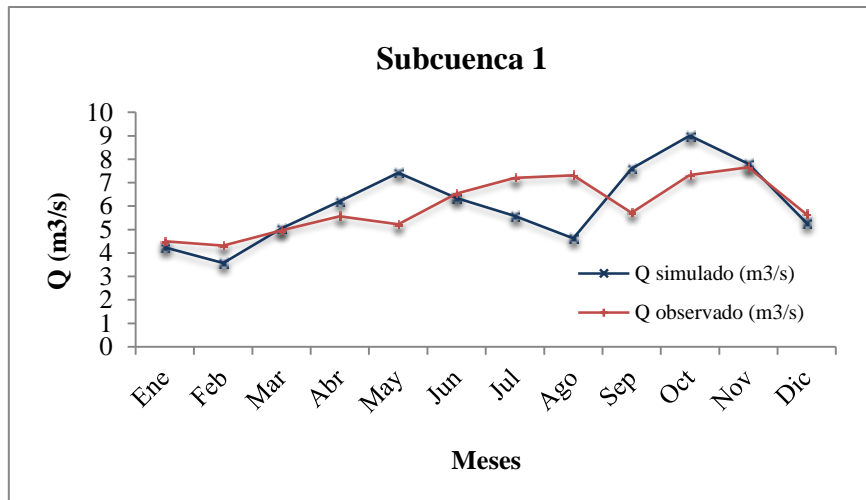
## Anexo 2. Estaciones de temperatura del IDEAM

Tabla 16. Estaciones de Temperatura del IDEAM

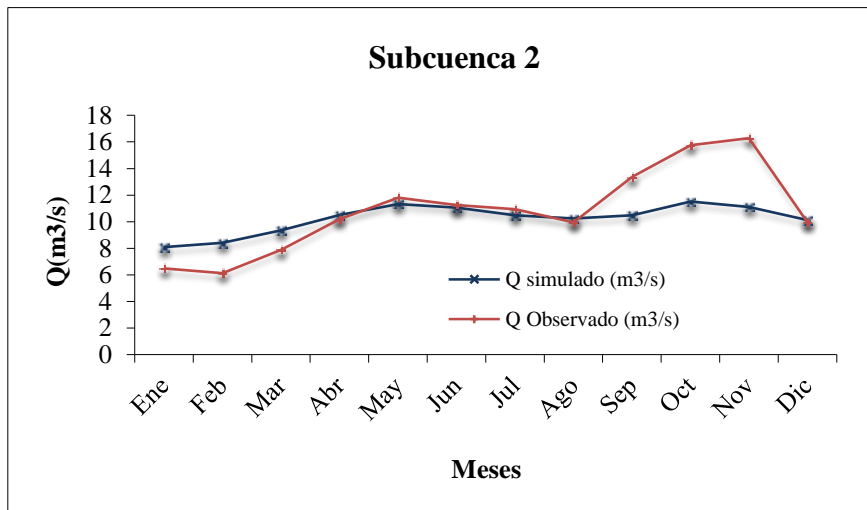
<b>CODIGO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>CORRIENTE</b>	<b>MUNICIPIO</b>	<b>TIPO</b>
2367	BOAVITA [24035330]	QDA OCALAYA	BOAVITA	Agrometeorologica
2366	CHISCAS [24035310]	CHISCANO	CHISCAS	Climatologica Ordinaria
3637	GUICAN [24035070]	NEVADO	GUICAN	Climatologica Ordinaria
2362	SIERRA NEVAD COCUY [24035240]	QDA LAGUNILLAS	GUICAN	Climatologica Ordinaria
6039	CARDON EL [35235010]	QDA GAVILAN	SOCOTA	Climatologica Ordinaria
3648	SATIVANORTE [24035320]	QDA LAS LEONAS	SATIVANORTE	Climatologica Ordinaria
2357	BELENCITO [24035150]	CHICAMOCHA	NOBSA	Climatologica Principal
3649	APTO A LLERAS C [24035340]	CHICAMOCHA	SOGAMOSO	Climatologica Principal
2356	U P T C [24035130]	CHULO	TUNJA	Climatologica Principal
3639	SURBATA BONZA [24035120]	SURBA	DUITAMA	Agrometeorologica
2358	TUNGUAVITA [24035170]	SALITRE	PAIPA	Agrometeorologica
2365	SAN CRISTOBAL [24035300]	QDA RAIBA	TOCA	Meteorologica Especial
2351	COPA LA [24035040]	TUTA	TOCA	Climatologica Ordinaria
2350	BETEITIVA [24035020]	CHICAMOCHA	BETEITIVA	Climatologica Ordinaria
3645	CHITA [24035250]	QDA PENA BLANCA	CHITA	Climatologica Ordinaria
2362	SIERRA NEVAD COCUY [24035240]	QDA LAGUNILLAS	GUICAN	Climatologica Ordinaria

**Anexo 3. Graficas de calibración del modelo en donde está la comparación de caudal observado y simulado en cada una de las subcuencas**

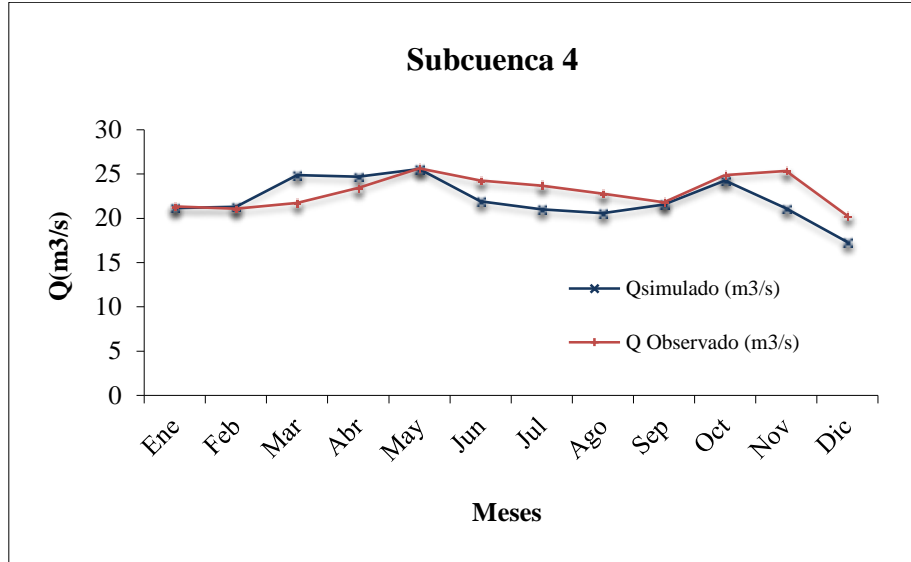
**Gráfica 9. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 1**



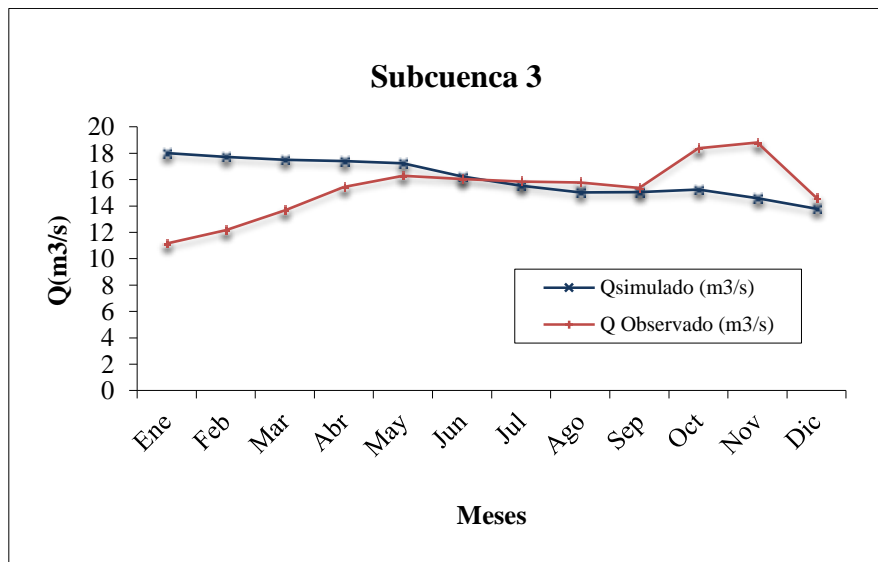
**Gráfica 10. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 2**



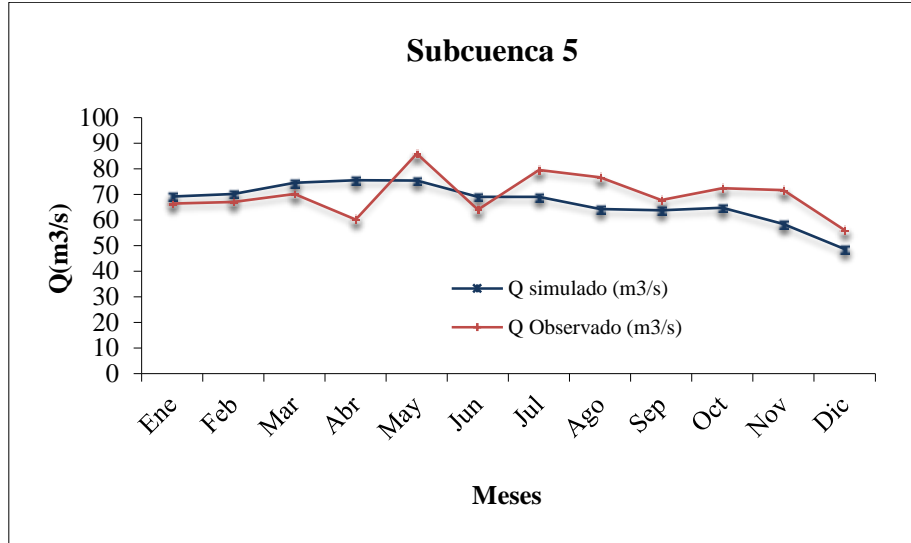
Gráfica 11. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 4



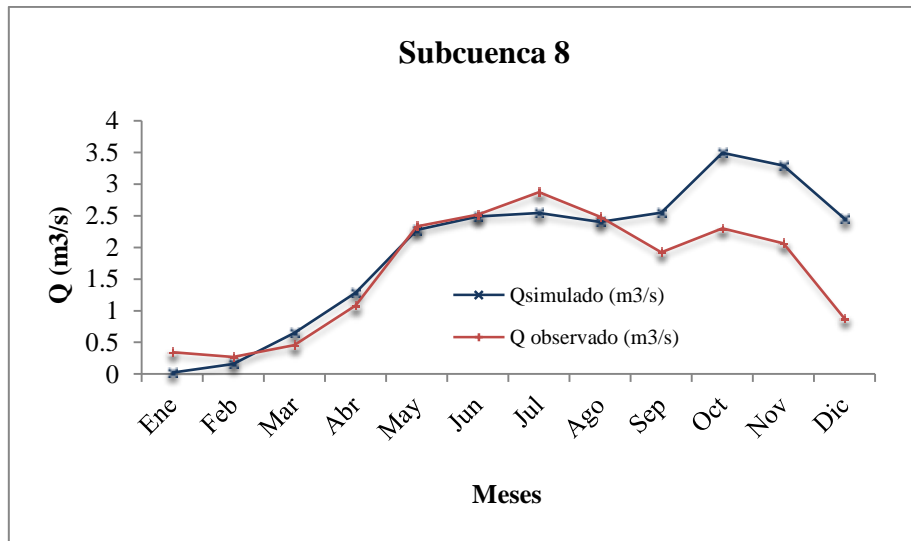
Gráfica 12. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 3



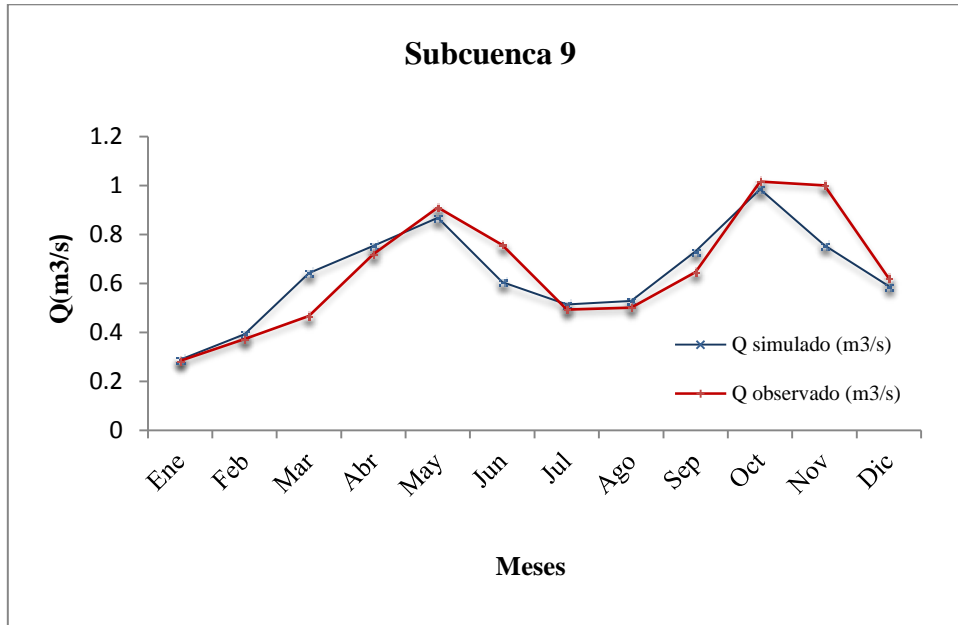
Gráfica 13. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 5



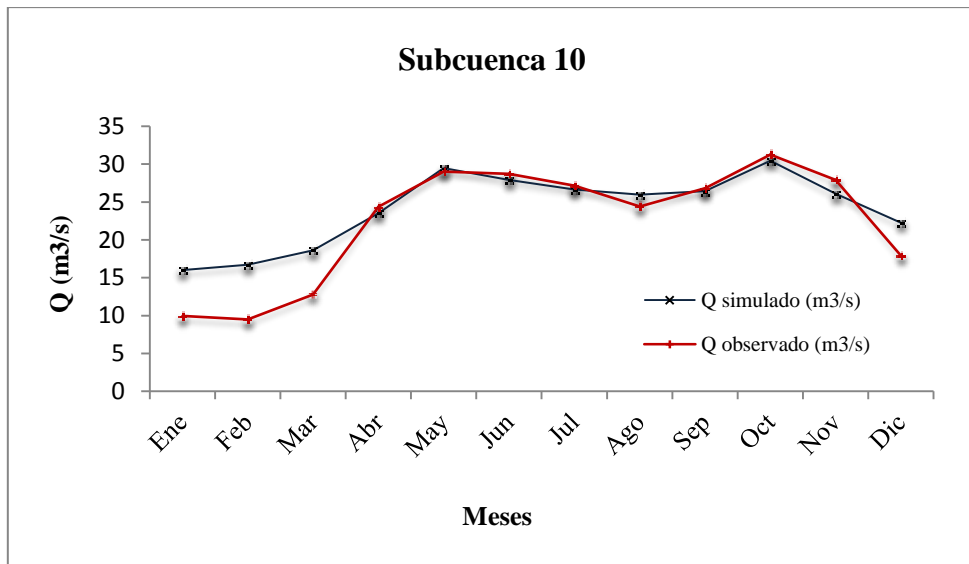
Gráfica 14. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 8



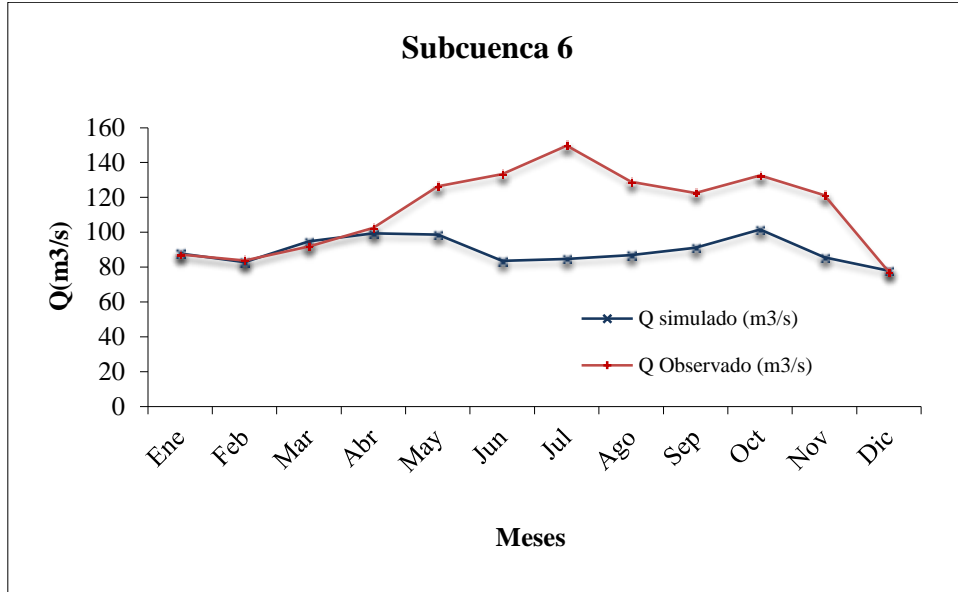
Gráfica 15. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 9



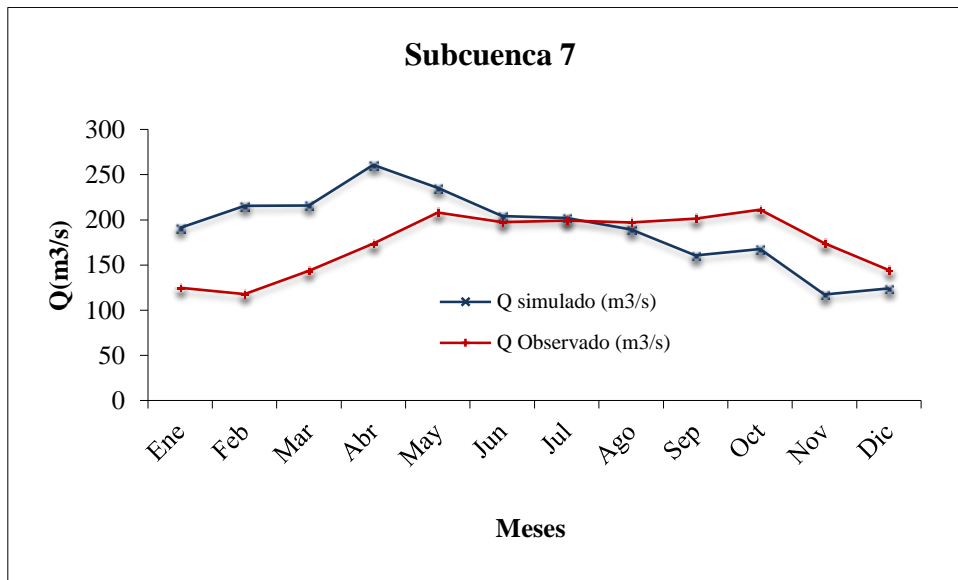
Gráfica 16. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 10



Gráfica 17. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 6



Gráfica 18. Caudal observado vs Caudal simulado subcuenca 7



## Anexo 4. Mapas de distribución mensual de la recarga

Figura 15. Mapa de distribución de la recarga en el mes de enero

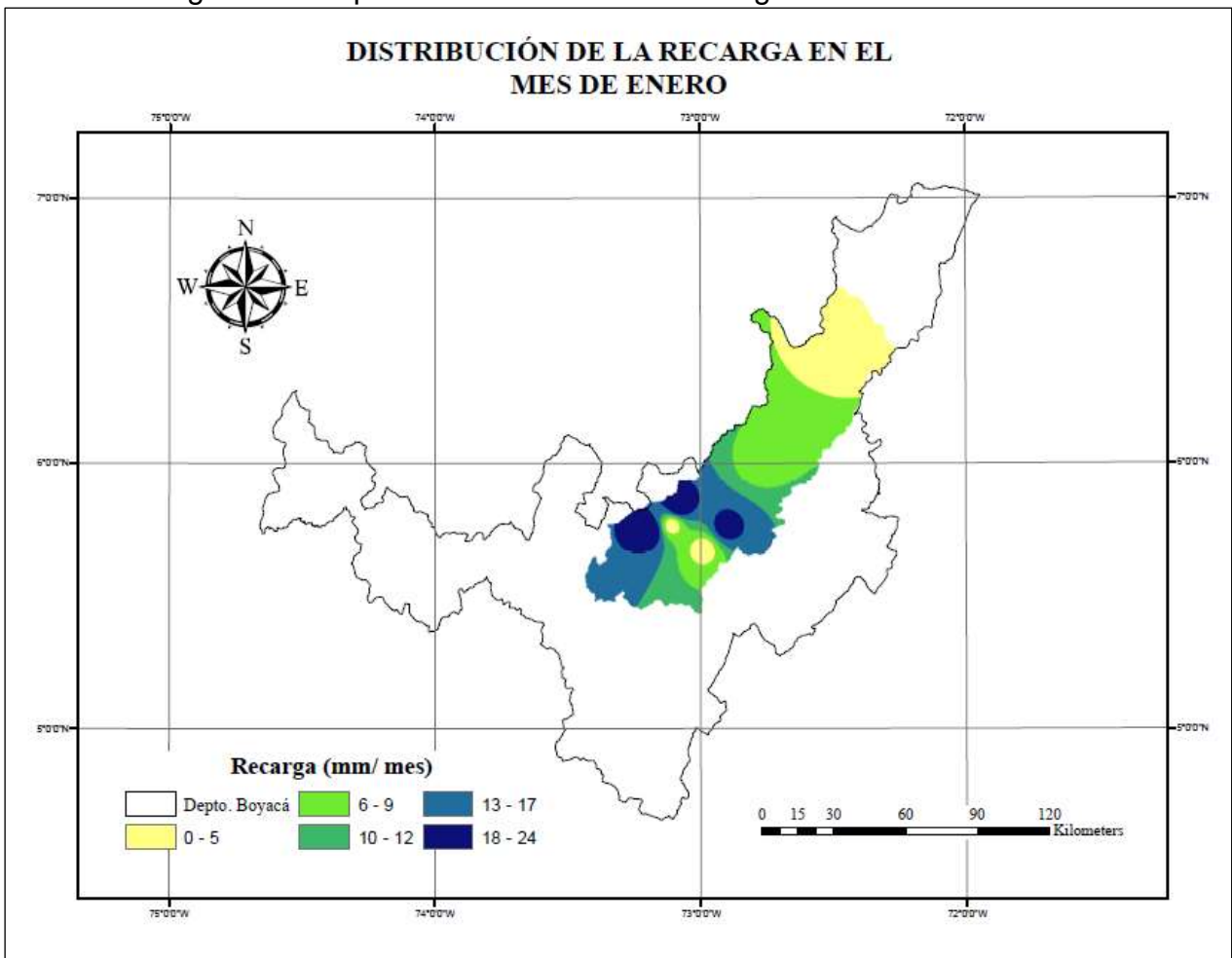


Figura 16. Mapa de distribución de la recarga en el mes de febrero

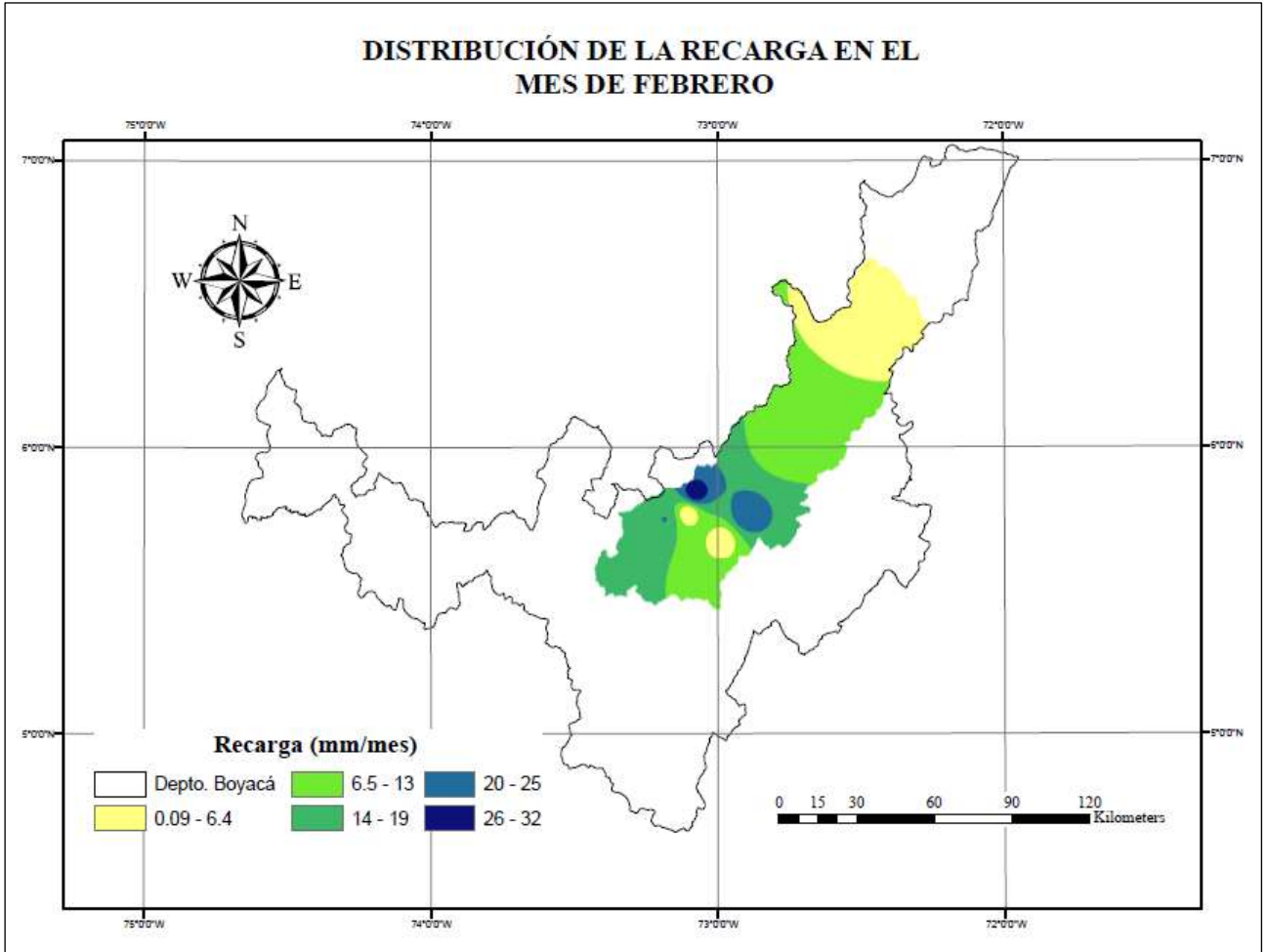


Figura 17. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Marzo

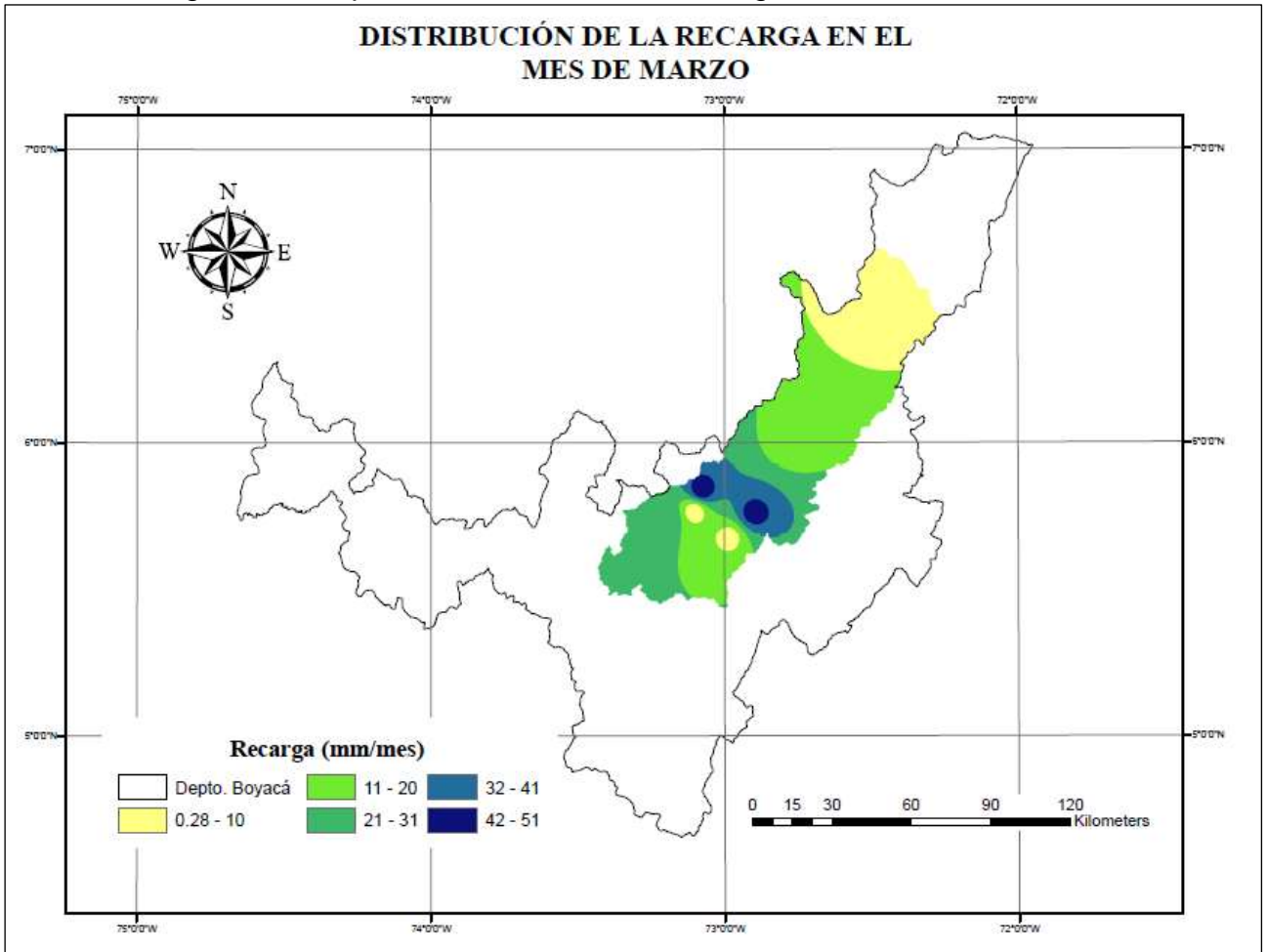


Figura 18. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Abril

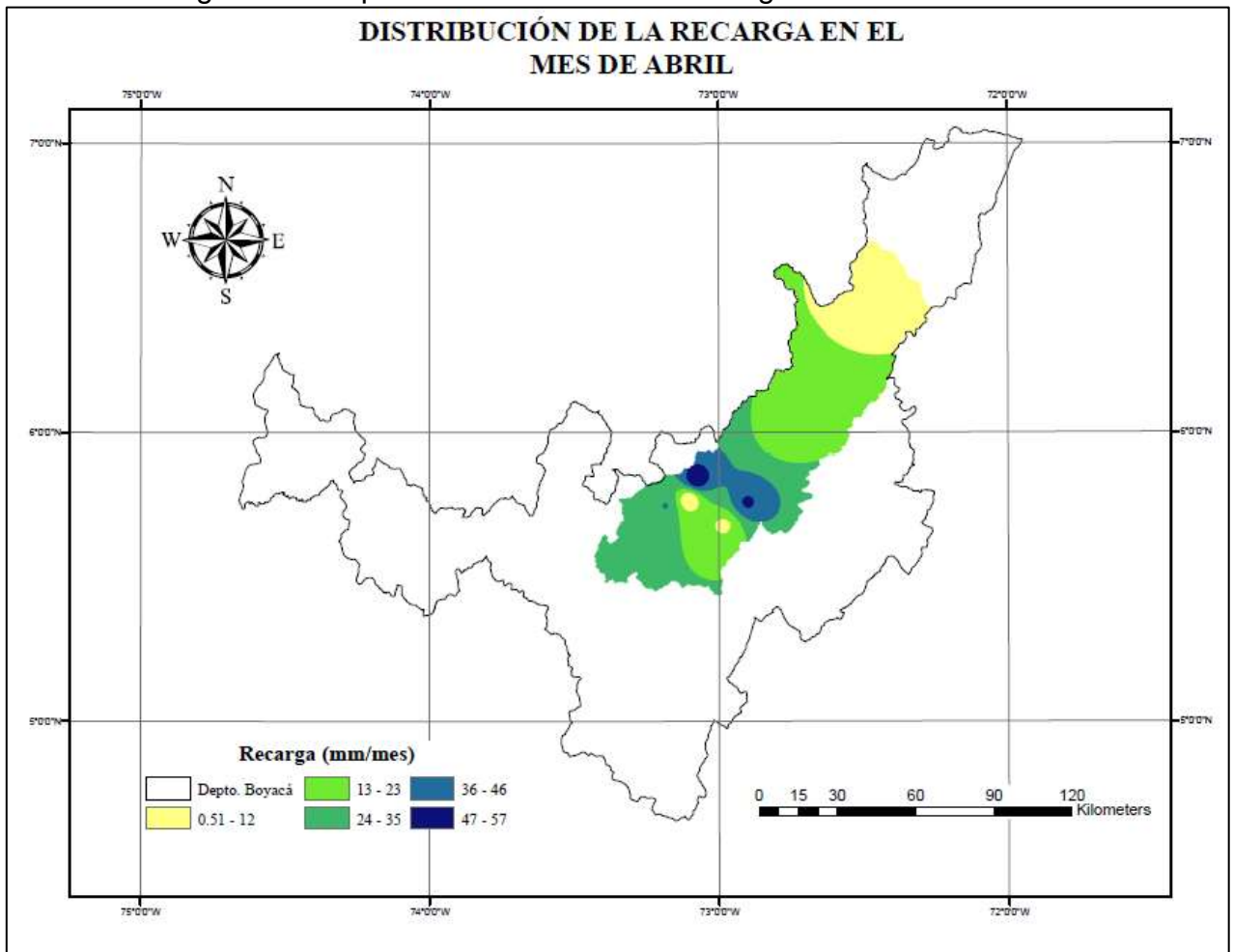


Figura 19. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Mayo

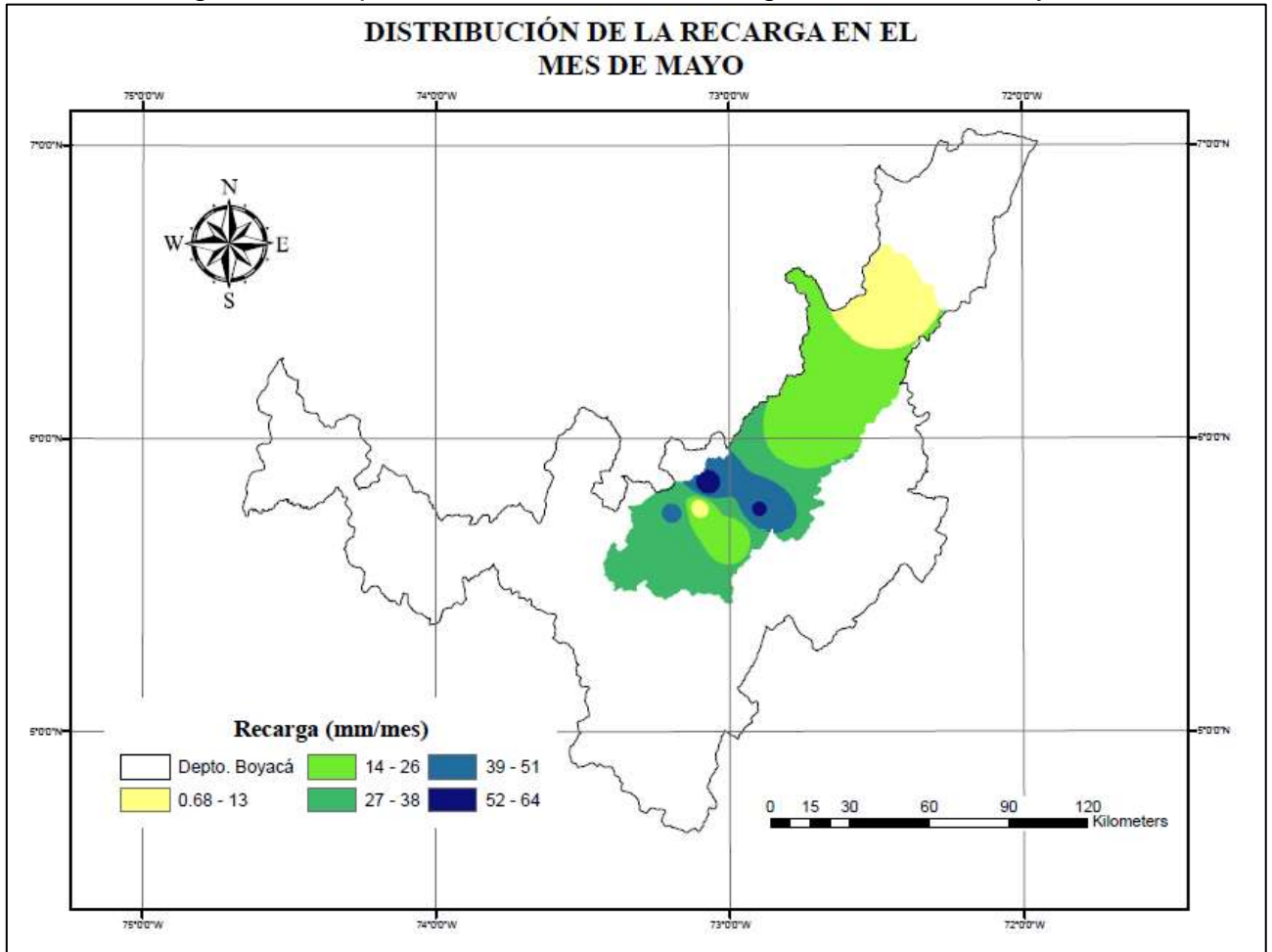


Figura 20. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Junio

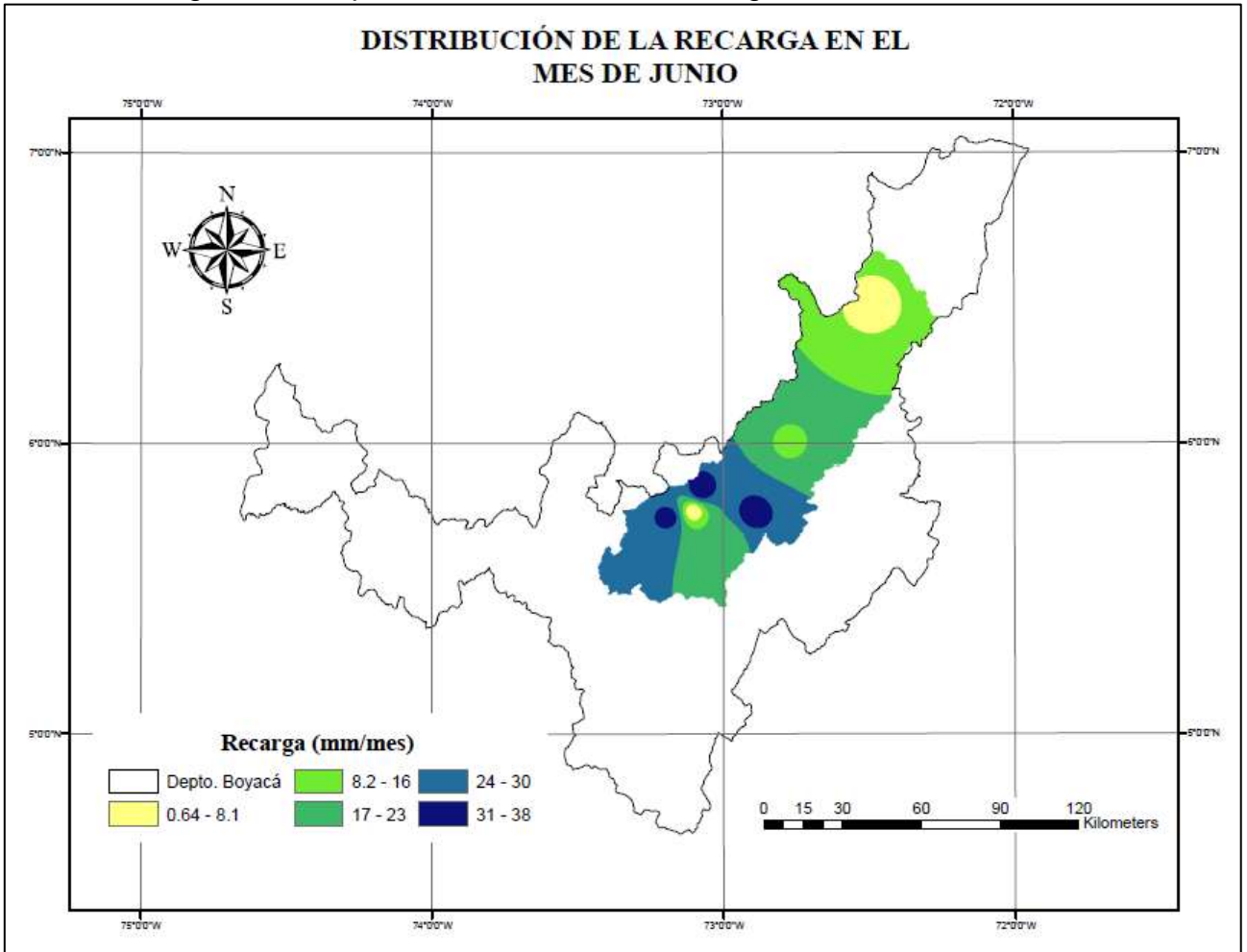


Figura 21. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Julio

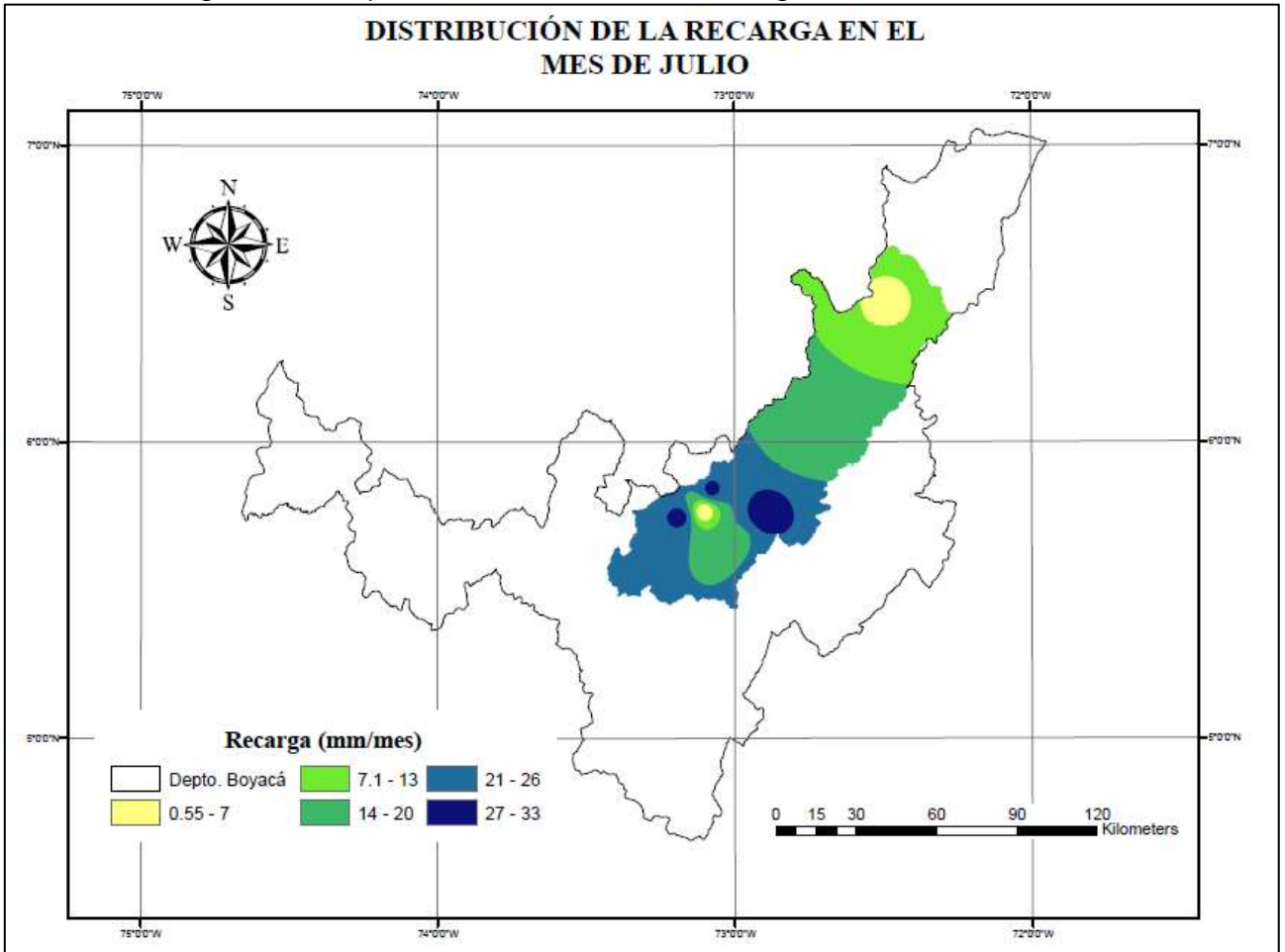


Figura 22. Mapa de distribución de la recarga en el mes de en Agosto

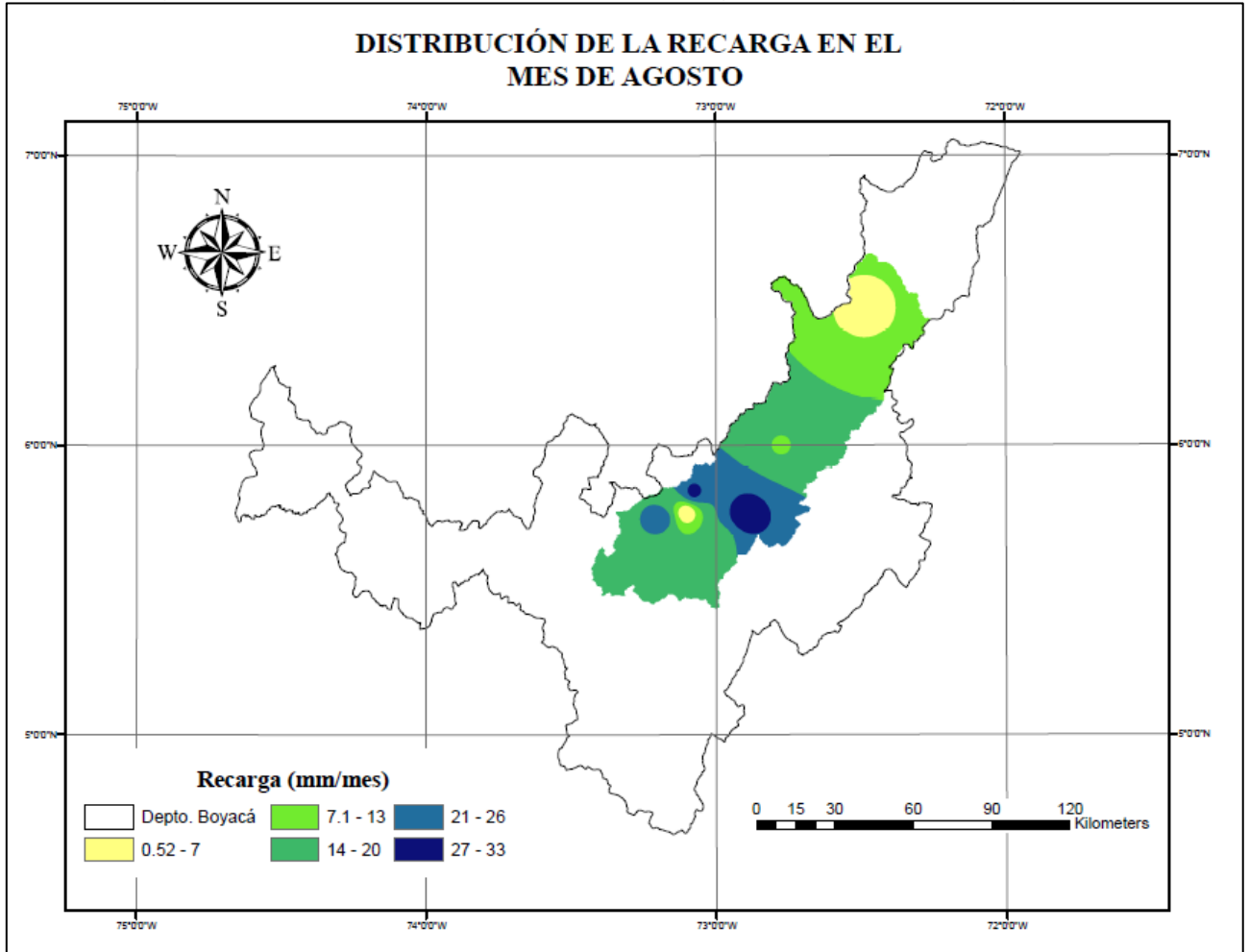


Figura 23. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Septiembre

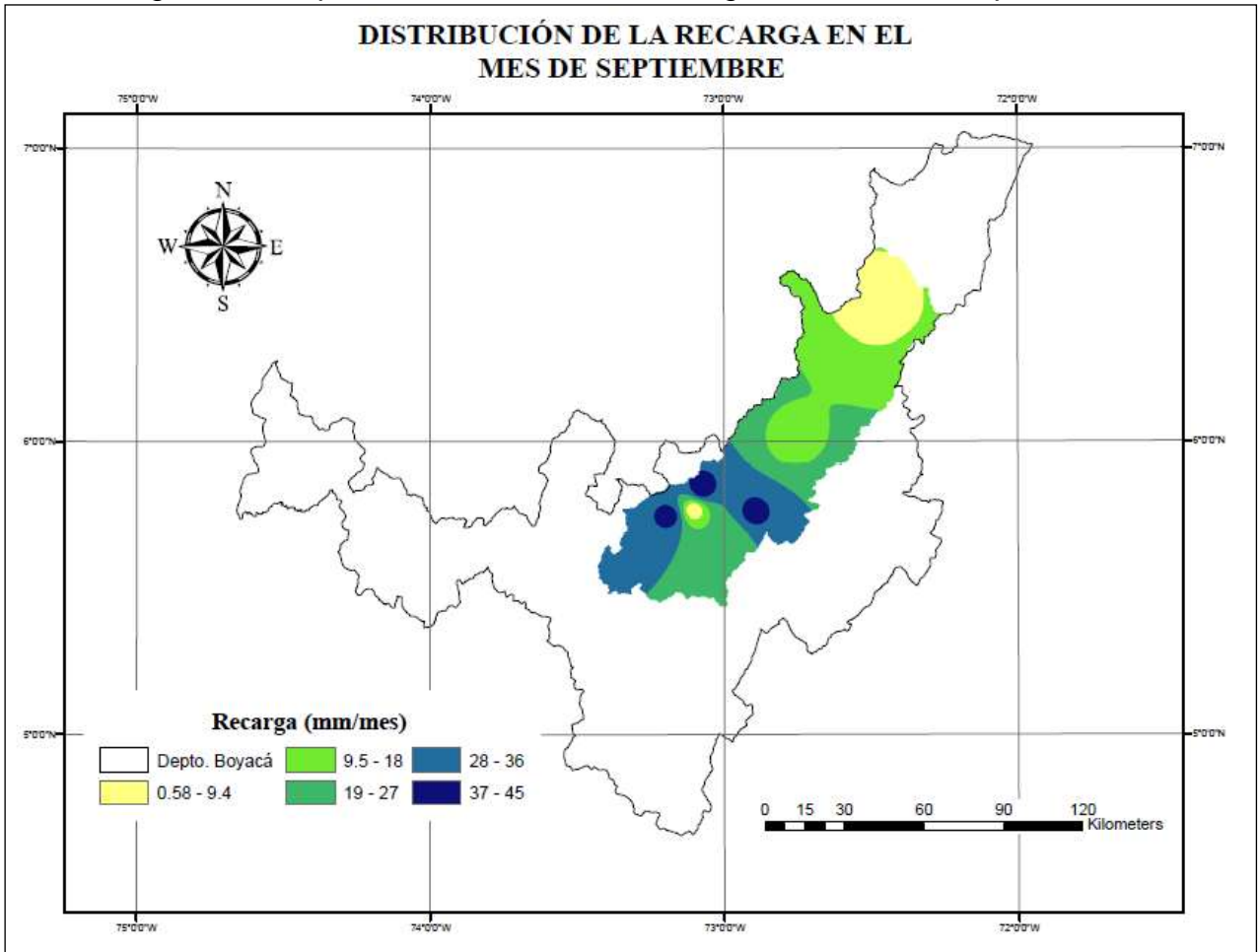


Figura 24. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Octubre

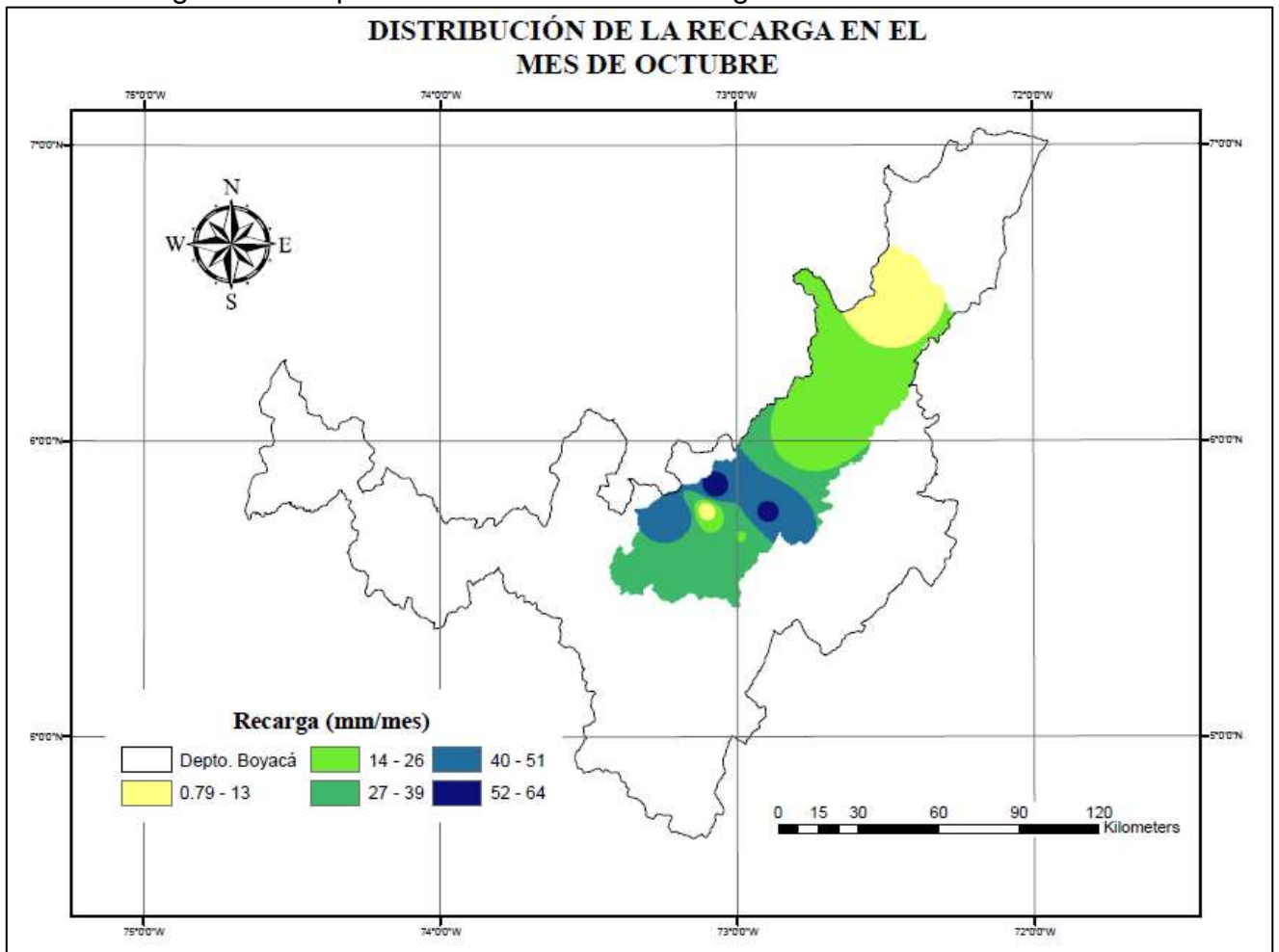


Figura 25. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Noviembre

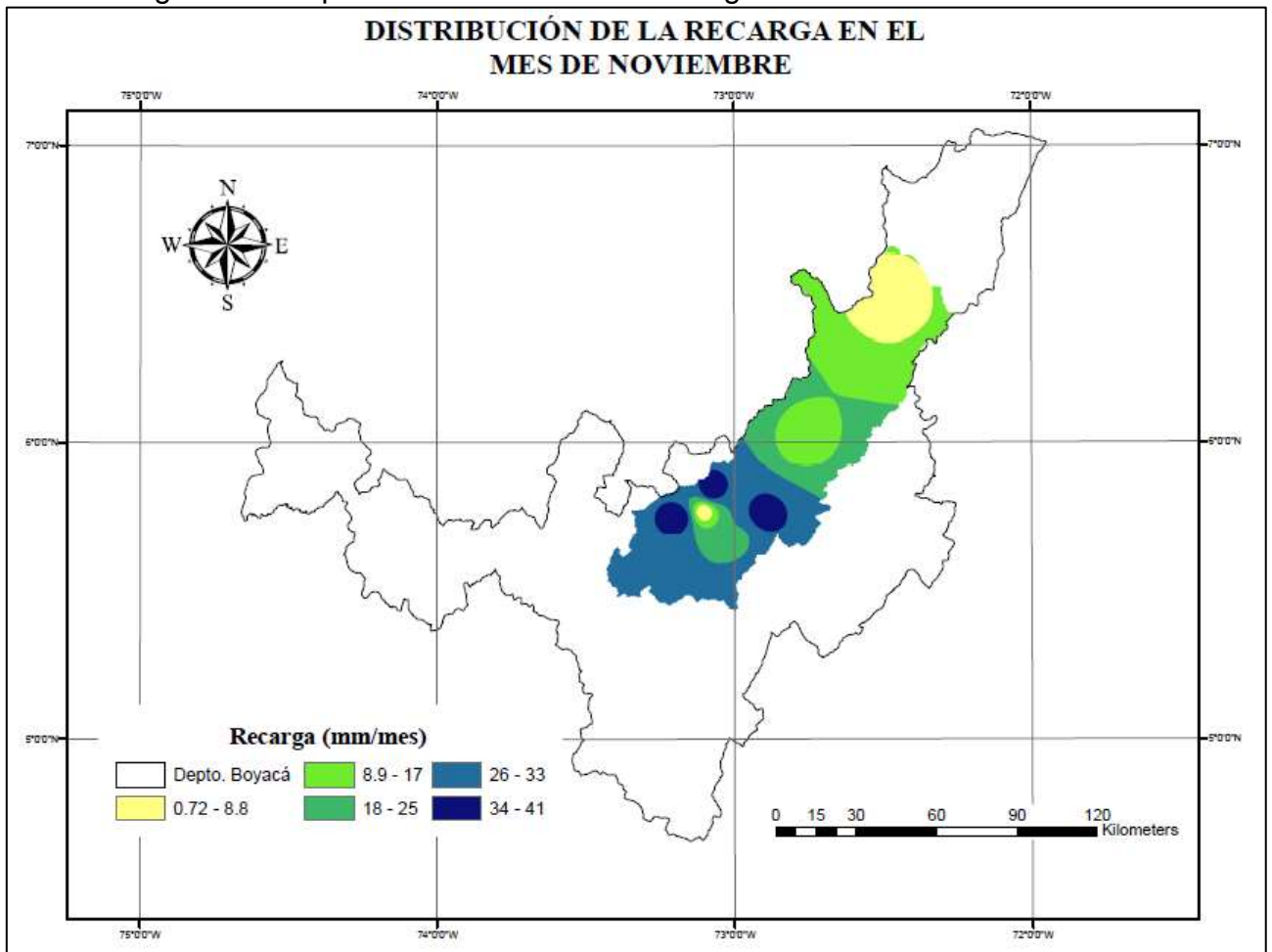
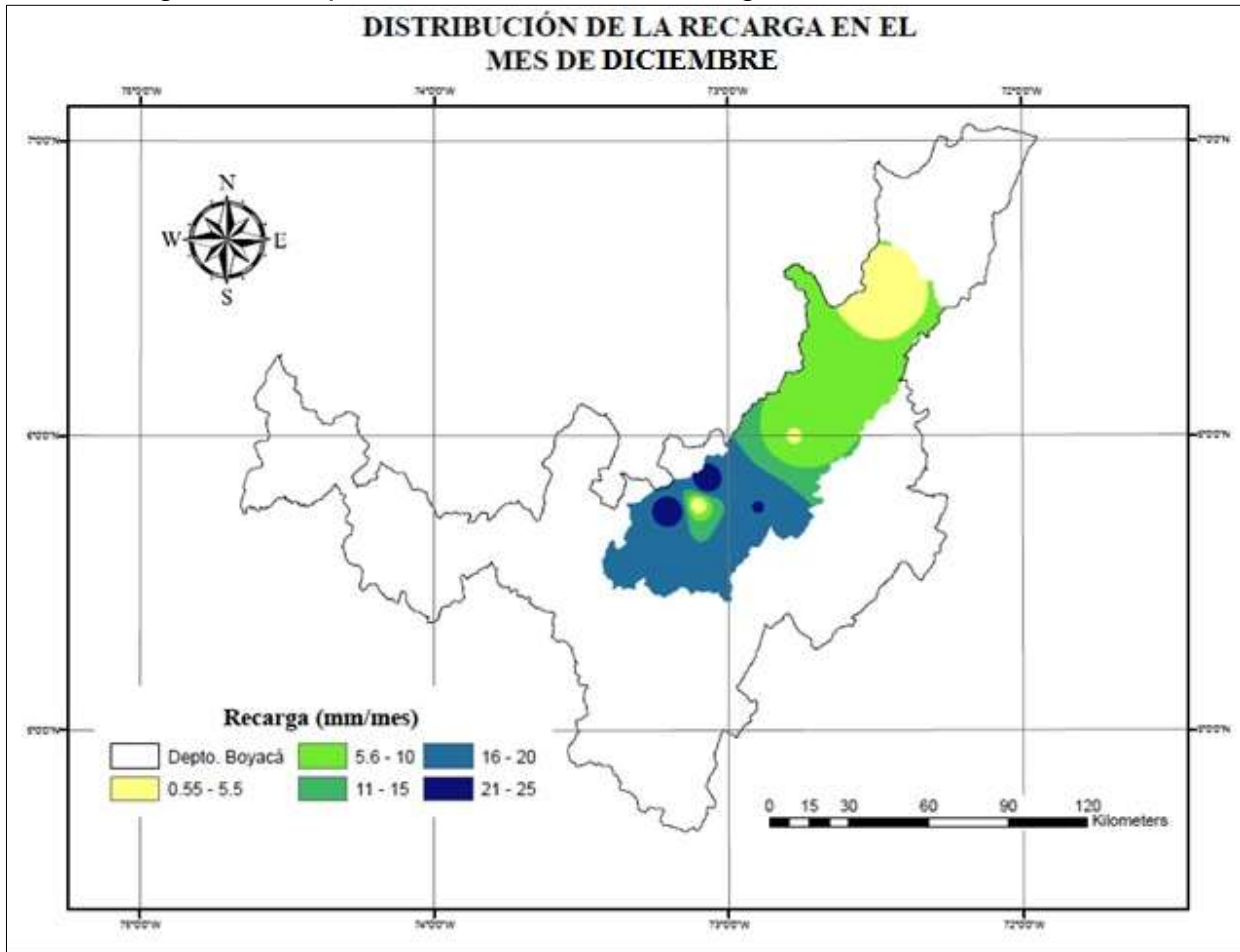


Figura 26. Mapa de distribución de la recarga en el mes de Diciembre



**Anexo 5. Página principal del ante proyecto presentado en la facultad de ingeniería civil el día 19 de febrero de 2014**



**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS**  
PRIMER CLUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA  
Experiencia y Calidad

FORMATO DE PRESENTACION  
DE ANTEPROYECTO DE GRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

<b>1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO</b>			
Facultad o Departamento Académico:		Fecha de presentación:	
<b>Facultad de Ingeniería Civil</b>		DD	MMM
		19	02
AAAA			
2014			
Título del proyecto: Evaluación de la recarga de acuíferos en la cuenca del Chicamocha en Boyacá			
Línea de investigación: Hidráulica e Hidrología			
Lugar de ejecución del proyecto: Universidad Santo Tomas, Tunja			
Duración del proyecto (en meses): 12			
<b>INFORMACIÓN DEL DIRECTOR DEL PROYECTO</b>			
Director del proyecto:	Carlos Andrés Caro Camargo	C.C. N°	7178971
Correo electrónico:	Carlosandrescaro@gmail.com	Teléfono:	3015507738
Formación Académica:	Ingeniero Civil, Magister en Recursos Hídricos, Candidato a Doctor en hidrología.		
<b>INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE</b>			
Nombres y Apellidos:	Facultad o Departamento Académico:	Correo Electrónico:	Teléfono:
Kristy Dayana Sáenz Galvis	Ingeniería Civil	kristysaenz@gmail.com	3214992011
<b>TIPO DE PROYECTO</b>			
Investigación básica:	Investigación aplicada:	<input checked="" type="checkbox"/>	Desarrollo Tecnológico:

Nombre y firma del Director:

CARLOS A CARO C.

Nombre y firma del estudiante:

Kristy Dayana Sáenz Galvis  
  
UNIVERSIDAD SANTO TOMAS  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
No. Matrícula: 91420  
Fecha: 19 de febrero de 2014

Por cada de copia Ing. Pedro Mauricio

**Anexo 6. Participación en INGENIERIA 2014 – Latinoamérica y Caribe - Congreso y Exposición Realizado en Buenos aires, Argentina en noviembre de 2014**



## EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA

*Caro Carlos, Sáenz Kristy*

[carlosandrescaro@gmail.com](mailto:carlosandrescaro@gmail.com), [kristy.saenz@usantoto.edu.co](mailto:kristy.saenz@usantoto.edu.co)

### ABSTRACT

The appropriate management the water resource around the world leads to have an exploitation appropriate of the water, generating quality life to the people that inhabiting different regions; this study shows how the Thomas model was implemented in points not instrumented of the basin Chicamocha river in Boyacá, Colombia, where to starting of measured data of hydroclimatological stations of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies, IDEAM, it is achieved get the value of the recharge, understood how recharge the value of extra storage of water in the aquifer. in the results were generated isovalues maps of recharge levels month to month the study area, and in this way to identify the time and áreas with equal contribution to aquifers in the basin.

**Keywords:** Aquifer recharge, calibration, hydrological model

### RESUMEN

El manejo apropiado del recurso hídrico en todo el mundo conduce a tener un aprovechamiento adecuado del agua, generando calidad de vida a las personas que habitan diferentes regiones; esta investigación muestra cómo se implementó el modelo de Thomas para puntos no instrumentados de la cuenca del río Chicamocha en Boyacá, Colombia, en donde a partir de datos medidos por estaciones hidroclimatológicas del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM, se logra obtener el valor de la recarga, entendido como recarga el valor de almacenamiento extra de agua en el acuífero. A partir de los resultados obtenidos se generaron mapas isovalores a niveles de recarga mes a mes del área de estudio, procediendo de esta forma a identificar la época y las zonas con igual aportación a los acuíferos de la cuenca.

**Palabras claves:** Recarga de acuíferos, calibración, modelo hidrológico.

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RIO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES  
*Kristy Sáenz, Carlos caro*

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales temas ambientales de la actualidad es la evaluación de los recursos hídricos de las cuencas hidrológicas de una región, para la gestión y aprovechamiento del agua; el presente proyecto de investigación busca evaluar la recarga de la cuenca del río Chicamocha localizada en el departamento de Boyacá, Colombia, en donde se pretende utilizar un modelo hidrológico agregado (Modelo "abcd" de Thomas) para tal fin, de acuerdo a la efectividad que ha tenido en Estados Unidos y en la Sabana de Bogotá, Colombia; teniendo como datos de entrada, valores históricos de precipitación y caudales medidos dentro de la cuenca por estaciones hidroclimatológicas del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM, el cual es el establecimiento público adscrito al Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, encargado de suministrar los datos y la información ambiental del país.

La incertidumbre en la determinación de los índices de recarga en cuencas rurales depende fundamentalmente del tipo y confiabilidad de la calibración del modelo hidrogeológico empleado, y como resultado pueden identificarse las zonas que tienen mayor aportación a los acuíferos y de esta forma encontrar alternativas de uso y manejo del recurso hídrico en la región; planteando soluciones y alternativas para la utilización de pozos profundos en épocas de sequía como en el fenómeno del niño.

En el desarrollo de la investigación, se realizó el análisis de la recarga por medio del método de Thomas, este modelo fue calibrado teniendo en cuenta los datos de entrada que para este caso son la precipitación areal y evapotranspiración de la zona de estudio, identificando las estaciones hidroclimatológicas del IDEAM localizadas dentro de la zona, que midan parámetros como: precipitación, temperatura y caudales.

A continuación se muestra cómo el modelo de Thomas aporta niveles de confiabilidad en la respuesta hídrica en la cuenca estudio; obteniendo calibraciones adecuadas en 7 de las 10 subcuencas estudiadas, y de esta manera se pudo elaborar una serie de mapas isovalores a niveles de recarga, muy útiles en la región, ya permiten identificar las épocas de mayor aportación de recarga a los acuíferos.

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RÍO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES  
*Kristy Sáenz, Carlos Caro*

**2. METODOLOGÍA**

**2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE THOMAS**

El modelo "abcd" fue desarrollado en 1981 en Estados Unidos por Thomas, quien se basó en la teoría de la conservación de la masa; en donde este método hidrológico involucra parámetros del balance hídrico, teniendo en cuenta tres zonas: Superficial, subsuperficial y subterránea, como se observa en la figura 1.



*Figura 1. Balance hídrico considerado por Thomas en el modelo "abcd"*

Caro (2002) explica detalladamente el modelo de Thomas, en donde se muestra que para la primera zona Sc, se parte de la ecuación de continuidad:

$$P_t - ET_t - R_{gt} - R_{ot} = \frac{\Delta S_w}{\Delta t} = S_{wt} - S_{wt-1} \quad (1)$$

Dónde:

$P_t$ : Es la precipitación media de la zona en un tiempo  $i$ .

$I_i$ : Es la infiltración en un tiempo  $i$ .

$\Delta S/\Delta t = (S_i - S_{i-1})$ : Es el cambio del contenido de humedad a la zona no saturada  $i$ .

En la segunda zona Sw, se considera que  $I_i = R_{gi}$ , lo cual significa que el agua que se infiltra es conducida hacia el acuífero.

La zona 3 o Zona saturada Sg es:

$$R_{gt} - Q_{gt} = \frac{\Delta S_g}{\Delta t} \quad (2)$$

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RÍO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
**SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES**  
*Kristy Sáenz, Carlos Caro*

$R_{gi}$  : Es la recarga del acuífero.

$Q_{gi}$  : Es el caudal subterráneo que alimenta el río.

$\Delta Sg/\Delta t$  : es el cambio de almacenamiento en esta zona.

Finalmente Thomas considero que el caudal total es la suma de la descarga de escorrentía y de aguas subterráneas (Fernández, W. 2000):

$$Q_t = (1 - c) \cdot (W_t - Y_t) + dG_t + \varepsilon_t \quad (3)$$

Dentro del planteamiento del modelo se tienen cuatro parámetros (a, b, c y d) de calibración que están relacionados con la cantidad de agua que está presente tanto en la zona superficial y la zona subterránea del suelo:

*Parámetro a:* expresa la tendencia ante la presencia de un suelo que se encuentre completamente saturado antes de que la escorrentía ocurra.

*Parámetro b:* Representa el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y a la humedad.

*Parámetro c:* Hace referencia a esa fracción que se encuentra en el almacenamiento subterráneo que se incluye en la escorrentía.

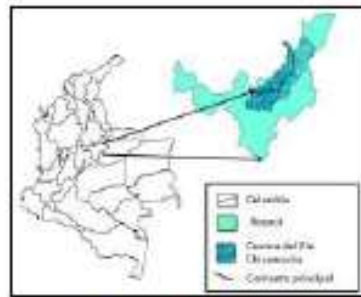
*Parámetro d:* Es el recíproco del tiempo de resistencia del agua subterránea, pero teniendo en cuenta que en ese tiempo puede relacionarse con todo el acuífero.

Este modelo tiene principalmente dos datos de entrada, los cuales son: la precipitación areal y la evapotranspiración areal; estos se determinan a partir de estaciones climatológicas ubicadas dentro de la zona de estudio en donde se debe considerar información sobre el área total de la cuenca y los caudales observados a la salida de esta.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está localizada en el departamento de Boyacá, Colombia, en donde se encuentra la cuenca media y la cuenca alta del río Chicamocha; la corriente principal de la cuenca tiene una longitud de 100 Km y pasa por 53 municipios del departamento, además tiene un área aproximada de 6107 Km<sup>2</sup>.

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RIO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES  
*Kristy Sáenz, Carlos caro*



*Figura 2. Localización de la zona de estudio*

### 3.1 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

En la recolección de datos se identificó la ubicación de las estaciones hidroclimatológicas del IDEAM, localizadas dentro de la cuenca y la cantidad que existe de estas, en donde según como se observa en la tabla 1, dichas estaciones miden principalmente parámetros como: precipitación, temperatura y caudales.

*Tabla 1. Cantidad de estaciones climatológicas dentro de la cuenca*

Parámetro climatológico	Nº de estaciones
Caudal	31
Precipitación	38
Temperatura	15

### 3.2 DISTRIBUCIÓN DE SUBCUENCAS

La cuenca fue dividida en 10 subcuencas (figura 3) para tener una caracterización adecuada de toda la zona; esta división se realizó de acuerdo a la ubicación de las estaciones de caudal observado a la salida de cada subcuenca; en donde finalmente, se obtuvo diferencias en el área de cada una de estas, como se observa en la tabla 2.

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RÍO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES  
*Kristy Sáenz, Carlos caro*



Figura 3. División de la cuenca del río Chicamocha

Tabla 2. Relación de áreas de subcuencas

Subcuenca	Area Km <sup>2</sup>	Estación de caudal	Nombre corriente
1	992	La reforma [24037130]	Chicamocha
2	140	La Siberia [24037320]	Chicamocha
3	308	San Rafael [24037190]	Chicamocha
4	682	Pto chameza [24037290]	Chicamocha
5	770	Paz de río [24037510]	Chicamocha
6	2060	Playa la [24037280]	Chicamocha
7	1270	Capitanejo [24037390]	Chicamocha
8	404	La rasaca[24037110]	Chiquito
9	56	Trinidad la [24037480]	Surba
10	516	Totumo [24037400]	Nevado

## 4. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE THOMAS

### 4.1 DATOS DE ENTRADA

**Precipitación (P):** El cálculo de la precipitación areal se realizó en cada subcuenca a partir de la ubicación de las estaciones de precipitación de la zona, con datos históricos de un periodo de 10 años, y por medio del método de isoyetas.

**Evapotranspiración (ETP):** El cálculo de la ETP se realizó por medio del método de Thornthwaite (Caro, 2010), debido a que se contaba con los datos de entrada de este modelo, ya que en la región la mayor cantidad de estaciones miden temperatura.

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RÍO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES  
*Kristy Sáenz, Carlos caro*

A partir de los datos de entrada se realizó el proceso de iteración de los parámetros a,b,c y d del modelo y obteniendo la calibración hasta encontrar el mejor ajuste del caudal simulado con el caudal medido, teniendo en cuenta el coeficiente de determinación R2 y de correlación.

Tabla 3. *Parámetros a,b,c y d característicos de cada subcuenca*

Subcuenca	Parámetros			
	a	b	c	d
1	0.71	240	0.71	0.007
2	0.1	680	0.01	0.01
3	0.1	10	0.9	0.05
4	0.9	1	0.6	0.07
5	1	10	0.2	0.038
6	1	50	0.7	0.01
7	0.5	10	0.02	0.05
8	0.78	505	0.53	0.001
9	0.091	15	0.66	0.0356
10	0.9	290	0.1	0.0008

#### 4.2 RESULTADOS

Las mejores calibraciones, se obtuvieron en las subcuenca 1, 2, 4, 5, 8, 9 y 10, ya que la calibración en estas fue positiva, mostrando coeficientes de correlación y R2 superiores a 0.60, similitud entre el caudal observado y el caudal simulado.

La mejor calibración se obtuvo en la subcuenca 9 y 10 ya que, tienen coeficientes de correlación y R2 superiores a 0.80 como se observa en la figura 4.

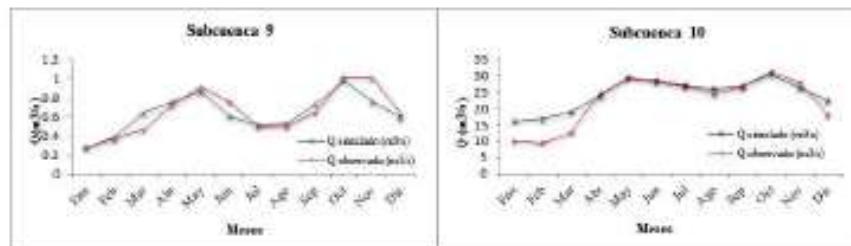
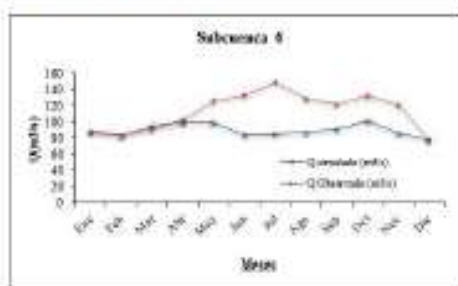


Figura 4. Calibración subcuenca 9 y 10

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RIO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES  
*Kristy Sáenz, Carlos caro*

Las calibraciones obtenidas en las subcuencas 3, 6 (figura 5) y 7 fueron descartadas, ya que los datos que se obtuvieron de estas eran poco confiables debido a que la simulación que se realizó en estas zonas no era positiva, debido a que no se logró tener una relación entre el caudal simulado con el caudal observado; además su coeficiente de correlación y R2 estaba por debajo de 0.50.



*Figura 5. Calibración subcuenca 6*

Finalmente, de las calibraciones positivas de las subcuencas 1, 2, 3, 5, 8, 9 y 10, se tomó el valor de recarga calculado a partir del modelo de Thomas, determinando mes a mes la generación de infiltración de agua que probablemente llega a los acuíferos, elaborando a partir de esta información, mapas isovalores que muestran las épocas y las zonas de mayor aportación a los acuíferos existentes en la cuenca del río Chicamocha.

En la tabla 5 se observa la recarga generada anualmente en cada una de las subcuencas tomadas en el análisis, en donde se observa que la zona de mayor aportación anual está en la zona occidental del departamento.

*Tabla 4. Recarga generada anualmente en cada una de las subcuencas*

Sub	nombre	corriente	Total (mm/ año)
1	La reforma [24037130]	Chicamocha	392
2	La siberia [24037320]	Chicamocha	6
4	Pte chameza [24037290]	Chicamocha	451
5	Paz de río [24037510]	Chicamocha	153
10	Tonumo [24037400]	Nevado	57
9	Trinidad la [24037480]	Surba	499
8	La resaca[24037110]	Chiquito	170

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RÍO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
**SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES**  
*Kristy Sáenz, Carlos caro*

Se obtuvo que los meses que tienen mayor aportación de recarga a los acuíferos, de la cuenca del río Chicamocha, son los meses que presentan mayores lluvias como son abril, mayo y octubre.

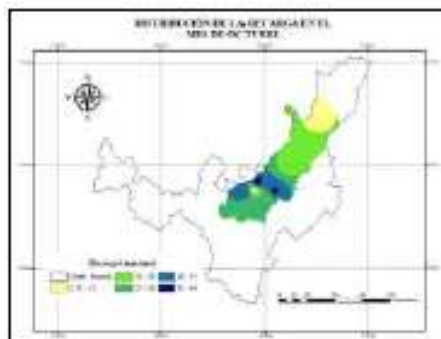


Figura 6. Distribución de la recarga en el mes de octubre

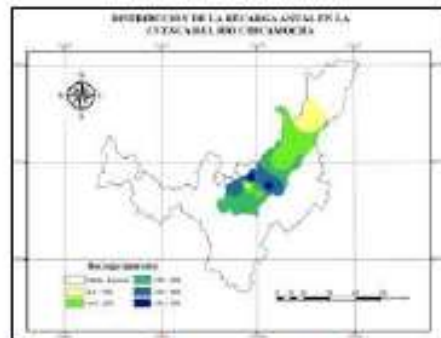


Figura 7. Distribución anual de la recarga (mm)

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se observó que el modelo hidrológico de Thomas puede llegar a ser más eficiente si se cuenta con un nivel alto en calidad y cantidad de la información necesaria para calcular los datos de entrada a este, como son: precipitación, temperatura y caudales observados; además es aconsejable hacer el análisis en subcuencas que no tengan caudales

**EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL  
RIO CHICAMOCHA EN BOYACÁ, COLOMBIA**  
**SOSTENIBILIDAD DE LOS TERRITORIOS URBANOS Y RURALES**  
*Kristy Sáenz, Carlos caro*

controlados (represas) aguas arriba de la salida de esta y grandes asentamientos urbanos aguas arriba de la salida de la cuenca.

Se pudo concluir que la calibración del modelo se ajustó en áreas pequeñas, debido a que se tiene una mejor caracterización y homogenización de cada zona.

Las subcuencas con mayor área, no presentaron calibraciones aceptables debido a su gran extensión, ya que son las zonas que presentan menor número de estaciones hidroclimáticas por unidad de área. Adicionalmente la zona por la misma extensión tiende a ser muy heterogénea desde la orografía y morfometría.

Los mapas isovalores aportan gran información a la región, ya que muestran las zonas en las cuales se genera recarga, permitiendo identificar las épocas de mayor aportación a los acuíferos.

A partir del resultado de la investigación se puede plantear, la utilización de pozos profundos como alternativa en épocas de sequía como por ejemplo durante el fenómeno del niño.

## REFERENCIAS

CARO, C. 2011. Modelación Hidrológica Distribuida con base en esquemas de volúmenes finitos. Ingenio Magno, Volumen 1, Numero 2. Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia ISSN: 2145-9282

MONSALVE, Germán. 2009. Hidrología en la ingeniería. Bogotá.

VERA, Y. CARO, C. 2008. Calibración de los parámetros del modelo hidrológico de Thomas para el departamento de Boyacá, XXIII seminario nacional de hidráulica e hidrología. Bogotá.

CARO, C. FLECHAS, F. 2003. Aproximación a la estimación de la recarga en los acuíferos mediante optimización matemática multidimensional de un modelo de balance hídrico. Seminario Internacional "La Hidroinformática en la gestión Integrada de los Recursos Hídricos". URL: <http://www.bvsde.paho.org/cgi-bin/wxis.exe/iah/?IahScript=iah/iah.xis&base=bvsde.bibliografica&lang=e&nextAction=ink&exprSearch=BVSDE.REP2000.00015697&indexSearch=ID>

## Anexo 7. Publicación en el 1er encuentro interno de investigación de la división de arquitectura e ingenierías

43

### EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL RIO CHICAMOCHA

#### AUTORES

Kristy Dayana Sáenz Galvis  
Carlos Andrés Caro Camargo

#### GRUPO DE INVESTIGACIÓN

Ambiental, Civil y Ciencias Básicas en Investigación (ACIB)

#### LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Hidráulica e Hidrología

#### RESEÑA DEL PROYECTO

Uno de los principales temas ambientales de la actualidad es la evaluación de los recursos hídricos de las diferentes cuencas hidrológicas de una región, para la gestión y aprovechamiento de dichos recursos; el presente proyecto de Investigación busca evaluar la recarga de toda la cuenca del río Chicamocha; en donde se pretende la utilización de un modelo hidrológico agregado para tal fin, a partir de la calibración de sus respectivos parámetros hidroclimatológicos validándolos a través de los registros de caudales medidos dentro de la cuenca.

El alto grado de incertidumbre acerca de información que muestre un valor real de la recarga de acuíferos en la cuenca del río Chicamocha, hace necesario realizar un análisis completo por medio de modelos hidrológicos que den una aproximación detallada del proceso del agua, por esta razón se decide implementar el método "abcd" de Thomas el cual ha sido usado en Estados Unidos y actualmente en Colombia mostrando resultados positivos en regiones como la sabana de Bogotá; este modelo permite entregar resultados mes a mes acerca de la distribución del recurso hídrico a lo largo de la cuenca del río Chicamocha, en donde al calibrar el modelo y validarlo por medio de estaciones de caudal instrumentadas ubicadas aguas arriba de la salida de la cuenca, permitirán obtener los valores de recarga para generar un mapa de isovalores que deje ver los niveles de esta en acuíferos en donde se podrán plantear soluciones acerca del uso de la oferta del recurso hídrico en el departamento de Boyacá.

*Encuentro Interno de Investigación de la División de Arquitectura e Ingenierías* ISSN 2389-9042  
*Universidad Santa Tomas Seccional Tunja*

Este proyecto tiene como objetivo general obtener un mapa de Isovalores de niveles de recarga para la cuenca del río Chicamocha, a partir de modelización hidrológica basada en un método agregado; para llegar a este objetivo se hace necesario Implementar el modelo de Thomas para puntos no instrumentados de la cuenca del Chicamocha y tomar como base la calibración en puntos con caudal medido, también obtener los parámetros óptimos del modelo y calcular los niveles de recarga en los puntos no instrumentados y elaborar un mapa con líneas isovalores que permitan identificar claramente zonas con igual aportación a los acuíferos.

En el estudio se hace necesario identificar las estaciones hidroclimatológicas que estén ubicadas dentro de la cuenca para determinar la precipitación areal y evapotranspiración potencial areal, ya que estos dos parámetros climatológicos son los datos de entrada al modelo; en donde los caudales observados (estaciones limnimétricas o limnigráficas) son indispensables para llegar a ajustar la calibración respecto a caudales simulados; para encontrar parámetros óptimos y característicos físicos de la cuenca, permitiendo de esta manera analizar la oferta del recurso hídrico en zonas no instrumentadas de la cuenca del río Chicamocha y generar alternativas para el aprovechamiento del recurso.

En el desarrollo del proyecto se han reconocido 85 tipos de estaciones, entre las cuales hay estaciones pluviométricas, pluviográficas, meteorológicas especiales, agrometeorológicas, climatológicas ordinarias y principales, limnimétricas y limnigráficas las cuales según el parámetro hidroclimatológico que miden están relacionadas en la *Tabla 1*.

**Tabla 1.** Cantidad de estaciones ubicadas dentro de la cuenca

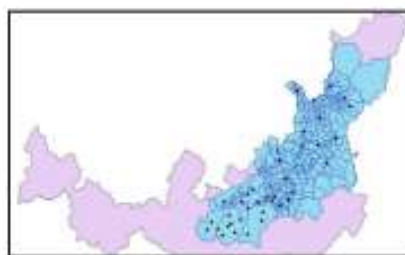
<i>Tipo de estación</i>	<i>Cantidad</i>
Caudales	31
Precipitación	38
Temperatura	16

Según los valores encontrados en cada una de las estaciones se pudo llegar a determinar valores medios de precipitación, caudales y temperatura como se observa en la *Tabla 2*, *Tabla 3* y *Tabla 4*.

**Tabla 2.** Valores medios mensuales de precipitación ( ) de la cuenca del río Chicamocha.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	PMMA
27.7	49.2	80.1	101.3	102.8	73.9	67.7	63.9	81.8	111.7	77.9	43.1	870.5

**Figura 1.** Localización de las estaciones de precipitación dentro de la cuenca del río Chicamocha.

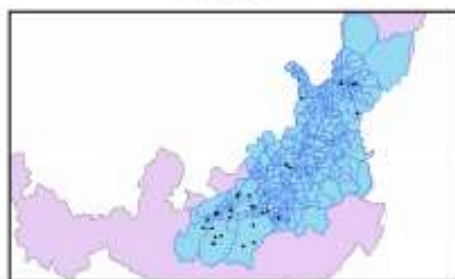


Fuente: Autor

**Tabla 3.** Valores medios mensuales de Caudal ( ) de la cuenca del río Chicamocha.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	PMMA
4.8	4.6	5.6	7.4	10.9	11.1	12.1	10.9	10.1	11.2	10.5	6.8	8.8

**Figura 2.** Localización de las estaciones de caudal dentro de la cuenca del río Chicamocha.

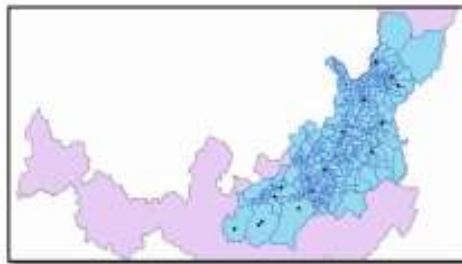


Fuente: Autor

**Tabla 4.** Valores medios mensuales de temperatura (°C) de la cuenca del río Chicamocha.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	PMMA
13.1	14.8	17.1	16.6	17.7	15.7	16.3	14.2	16.5	17.9	17.0	15.1	56.8

**Figura 3.** Localización de las estaciones de temperatura dentro de la cuenca del río Chicamocha.



Fuente: Autor

Se espera que al culminar el proyecto, se tenga como producto principal un mapa de isovalores que proporcionen una idea de los niveles de recarga a lo largo de esta importante cuenca del país, que representa uno de los puntos hídricos más sensibles desde el punto de vista ambiental.

#### ESTUDIOS RELACIONADOS

La revisión de información ha permitido identificar varios estudios que han tenido como fin la implementación del método "abcd" de Thomas los cuales muestran resultados positivos. **Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá** (Obregón, N, et al. 2002) según obregón al realizar la calibración en 10 subcuencas de la sabana de Bogotá se obtuvo una calibración aceptable; en donde el modelo se ajustó correctamente ya que fue su validación se ajustó correctamente; además se llegó a concluir que se puede llegar a presentar algunas deficiencias en el modelo debido a la calidad de los datos de entrada como son la precipitación y evapotranspiración potencial.

**Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas** (Caro, C, et al. 2002) en donde se llegó a tener un ajuste aceptable del 70% en las


subcuencas analizadas; además se determinó que el método de Thomas es viable si se tienen datos confiables de entrada y que las subcuencas que contaban con grupos de asentamientos humanos aguas arriba presentaron malos resultados en la calibración del modelo. Se pudo concluir que en las subcuencas en donde se dio una calibración aceptable la recarga de estas equivale al 28% de la precipitación anual.

***Calibración de los parámetros del modelo hidrológico de Thomas para el departamento de Boyacá*** (Vera, Y, et al. 2008), este estudio fue realizado en el departamento de Boyacá en el año 2008 en donde se llegó a concluir que el método no aplica para zonas urbanas, en donde en las zonas rurales se vio que los resultados presentan más de un 50% de valores aceptables. Se comprobó que las 18 zonas estudiadas en el departamento de Boyacá son anisotrópicas haciendo que se dificulte la validación del modelo en cuencas con grandes áreas de drenaje.

#### REFERENCIAS

- OBREGÓN, N. FRAGALÁ, F. BLANCO, A. GÓMEZ, L. Implementación del modelo de Thomas en la cuenca alta del río Checua para la estimación de la recarga (Sabana de Bogotá, Cundinamarca, Colombia) XV Seminario nacional de Hidráulica e Hidrología. Medellín, Agosto 2002.
- CARO, C. FLECHAS, F. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas. Bogotá, Diciembre 2002.
- VERA, Y. CARO, C. Calibración de los parámetros del modelo hidrológico de Thomas para el departamento de Boyacá, XXIII seminario nacional de hidráulica e hidrología. Bogotá, Mayo 2008.

# Anexo 8. Participación en la 1ra feria de la ciencia realizada el día 25 de septiembre de 2014 en la sede central de la universidad A Santo Tomas, Tunja



## EVALUACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA

CARLOS ANDRÉS CARRI CAMARGO, ERISTEY DÍAZ, JAVIER GALDIZ  
 Alvaro@unata.edu.co - Alvaro@unata.gov.co

---

### INTRODUCCIÓN

Uno de los principales temas ambientales de la actualidad es la evaluación de los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas de una región, para la gestión y aprovechamiento del agua; el presente proyecto de investigación busca evaluar la recarga de la cuenca del río Chicamocha localizada en el departamento de Boyacá, Colombia, en donde se pretende utilizar un modelo hidrológico agregado (Modelo "abcd" de Thomas) para tal fin, a partir de registros de caudales tomados dentro de la cuenca.

### MODELO "ABCD" DE THOMAS

Thomas es un modelo hidrológico agregado el cual está basado en la teoría de la conservación de la masa, este modelo da parámetros del balance hídrico mas a mas, en donde se divide al maso en tres partes (superficial, subsuperficial y subterránea), el cual tiene dos variables como datos de entrada: precipitación anual y evapotranspiración; además tiene cuatro (4) parámetros "abcd" de calibración los cuales deben ser iterados para llegar a simular los caudales observados según los datos tomados de una estación limnográfica a la salida de la cuenca de estudio.

**DATOS DE ENTRADA**  
 - Precipitación anual  
 - Evapotranspiración (ETP)

Medida de precipitación que se pueda presentar en una zona específica.  
 Modelo de Thomas

Información necesaria: temperatura media mensual y longitud del día.

La medida por pluviómetros y pluviómetros


### DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

**CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA**

- Localización: Departamento de Boyacá
- Área geográfica: 4197 Km<sup>2</sup>
- Longitud corriente principal: 180 Km
- Pasa por 53 municipios del departamento.

En esta investigación, la cuenca fue dividida en 10 subcuencas (Figura 1), para tener una mejor caracterización de la zona, de acuerdo a la localización de las estaciones de caudal del IDEAM ubicadas a la salida de cada subcuenca; además se pudo identificar las estaciones climatológicas localizadas dentro de la cuenca, las cuales tienen parámetros como temperatura y precipitación.

**Figura 1. Subcuencas**



**Tabla 1. Caudales principales y áreas de las subcuencas**

Orden	Área (Km <sup>2</sup> )	Estación de Caudal	Área (Km <sup>2</sup> )
1	26	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	26
2	10	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	10
3	8	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	8
4	10	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	10
5	10	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	10
6	10	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	10
7	10	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	10
8	10	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	10
9	10	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	10
10	10	LA VIGUERA (MUNICIPIO DE BOYACÁ)	10

### RESULTADOS

En la tabla 2 se observan los datos de entrada de la subcuenca 9, la cual presenta como resultado una calibración positiva, ya que su coeficiente R2 fue de 0.82 (Figura 3).

**Tabla 2. Datos de entrada sub cuenca 9**

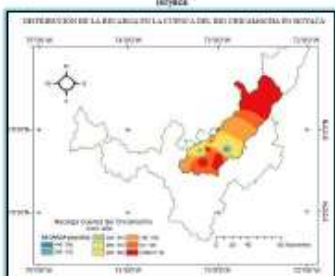
MESES	PRECIPITACION ANUAL	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL	LONGITUD DEL DIA	PRECIPITACION ANUAL	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL	LONGITUD DEL DIA	PRECIPITACION ANUAL	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL	LONGITUD DEL DIA
1	100	15	12	100	15	12	100	15	12
2	100	15	12	100	15	12	100	15	12
3	100	15	12	100	15	12	100	15	12
4	100	15	12	100	15	12	100	15	12
5	100	15	12	100	15	12	100	15	12
6	100	15	12	100	15	12	100	15	12
7	100	15	12	100	15	12	100	15	12
8	100	15	12	100	15	12	100	15	12
9	100	15	12	100	15	12	100	15	12
10	100	15	12	100	15	12	100	15	12
11	100	15	12	100	15	12	100	15	12
12	100	15	12	100	15	12	100	15	12

### CALIBRACIÓN DEL MODELO DE THOMAS

Luego de calcular la precipitación anual y la evapotranspiración anual, se realizó la simulación del modelo, tomando como resultado la calibración positiva de 8 subcuencas, en donde después de realizar varias iteraciones se logró igualar el caudal observado con el caudal simulado generando por el método de Thomas, determinando de esta forma los parámetros "abcd" característicos de cada subcuenca. A partir de las calibraciones se obtuvo el valor de la recarga mas a mas, en donde se generaron las mapas involucrados.


En la figura 2 se presenta el mapa de recarga anual de acuerdo al modelo de Thomas, en donde se observa que la zona norte de la cuenca presenta menos recarga en comparación de la zona central, además se ve que la mayor recarga esta localizada en la zona del municipio de Noboa y Setaquirit.

**Figura 2. Distribución de la recarga en la cuenca del río Chicamocha en Boyacá**



### CONCLUSIONES

- Se observó que el modelo hidrológico de Thomas puede llegar a ser más eficiente si se cuenta con un nivel alto en calidad y cantidad de la información necesaria para calcular los datos de entrada a este, como son: precipitación y ETP; además es aconsejable hacer el análisis en subcuencas que no tengan caudales controlados (represas) aguas arriba de la salida de esta.
- Se pudo concluir que la calibración del modelo se ajusta mejor en áreas pequeñas, en donde no se encuentran grandes asentamientos urbanos aguas arriba de la salida de la cuenca.
- Los mapas involucrados aportan gran información a la región, ya que muestran las zonas en las cuales se genera recarga, permitiendo identificar la posible localización de acuíferos y de esta forma dar como alternativa la utilización de pozos profundos en épocas de sequía como por ejemplo durante el fenómeno del Niño.



**Anexo 9. Participación en el día del Boyasencismo, evento realizado en el centro comercial Unicentro, el día 02 de Octubre de 2014.**



Fuente: Autores



Fuente: Autores