

**Evaluación del grado de desabastecimiento hídrico en el municipio de San Antonio del
Tequendama**

**Diana Carolina Aragón Torres
Paula Fernanda Pava Guerrero**

**Proyecto de grado para optar al título de:
Ingeniero Ambiental**

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C.
2018**



Evaluación de riesgo por desabastecimiento hídrico en el municipio de San Antonio del Tequendama

Diana Carolina Aragón Torres
Paula Fernanda Pava Guerrero

Miguel Angel Cañon Ramos
Ingeniero ambiental y sanitario
MSc. Hidrosistemas
(Director)

Andrés Felipe Martínez Urrego
Ingeniero químico
Magíster en educación
(Codirector)

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C.
2018

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS	12
1.1. OBJETIVO GENERAL	12
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2. MARCO DE REFERENCIA	13
2.1. MARCO CONTEXTUAL	13
2.1.1. Localización	13
2.1.2. Características generales del municipio	15
2.2. MARCO TEÓRICO	15
2.2.1. Modelos	15
2.2.2. Riesgo	16
2.2.3. Evaluación de riesgo	16
2.2.4. Desabastecimiento	16
2.2.5. Clima	16
2.2.6. Interpolación espacial	17
2.2.7. Isotermas	17
2.2.8. WEAP 21	17
2.2.9. Escenarios de cambio climático	18
3. METODOLOGÍA	20
3.1. FASE 1: RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	21
3.1.1. Datos para la estimación de la oferta hídrica	21
3.1.2. Datos para la estimación de la demanda hídrica	23
3.2. FASE 2: Generación de escenarios	25
3.2.1. Generalidades de WEAP	25
3.2.2. Estimación de la oferta realizada por WEAP	26
3.2.3. Estimación de la demanda realizada por WEAP	27
3.3. FASE 3: GRADO DE DESABASTECIMIENTO	28
3.3.1. Calibración	28
3.3.2. Generación de escenarios	29
3.3.3. Estimación del grado de desabastecimiento	29
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	29
4.1. FASE 1: RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	29
4.1.1. Datos para la estimación de la oferta hídrica	29



4.1.2.	Datos para la estimación de la demanda hídrica	37
4.2.	FASE 2: GENERACIÓN DE ESCENARIOS	42
4.2.1.	Generalidades WEAP	42
4.2.2.	Estimación de la oferta realizada por WEAP	43
4.2.3.	Estimación de la demanda realizada por WEAP	51
4.3.	FASE 3: GRADO DE DESABASTECIMIENTO	55
4.3.1.	Calibración	55
4.3.2.	Generación de escenarios futuros	57
4.3.3.	Evaluación del grado de desabastecimiento	58
5.	ALTERNATIVAS	64
6.	CONCLUSIONES	65
7.	IMPACTO SOCIAL	67
8.	BIBLIOGRAFÍA	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones limnigráficas y sus respectivas coordenadas	23
Tabla 2. Estaciones meteorológicas y sus respectivas coordenadas.....	30
Tabla 3. Resultados de la prueba de Mann Kendall	33
Tabla 4. Áreas usadas para la transposición de caudal.....	34
Tabla 5. Ejemplo de los dos primeros años de la transposición de caudal realizada con todos los años.....	34
Tabla 6. Caracterización de las bocatomas más importantes de San Antonio del Tequendama	37
Tabla 7. Distribución espacial de cada uso del suelo por unidad hidrológica en km ²	41
Tabla 8. Valores de proyección poblacional	41
Tabla 9. Coeficientes de cultivo	41
Tabla 10. Componentes de las herramientas WEAP	42
Tabla 11. Nombres de ríos usados en WEAP	48
Tabla 12. Área de las cuencas en km ²	49
Tabla 13. Latitud de las cuencas	50
Tabla 14. Sitio de demanda.....	54
Tabla 15. Valores de calibración del modelo para el escenario de referencia.....	56



LISTA DE IMAGENES

Imagen 1. Localización de San Antonio del Tequendama	14
Imagen 2. Cambio de temperatura media en la superficie.....	19
Imagen 3. Cambio de precipitación media en la superficie	20
Imagen 4. Metodología.....	21
Imagen 5. Ubicación de las estaciones meteorológicas	32
Imagen 6. Ubicación de las estaciones de caudal usadas.....	36
Imagen 7. Localización de bocatomas en San Antonio del Tequendama	39
Imagen 8. Delimitación de las cuencas de cada bocatoma	40
Imagen 9. Estructura del modelo hídrico en WEAP	42
Imagen 10. Interpolación de la precipitación mensual para el escenario de referencia.....	45
Imagen 11. Interpolación de temperatura mensual para el escenario de referencia	46
Imagen 12. Margen de error de las interpolaciones python	47
Imagen 13. Delimitación de ríos en WEAP.....	48
Imagen 14. Ubicación de entrada y salida de caudales en WEAP.....	49
Imagen 15. Ubicación espacial de las unidades hidrológicas	50
Imagen 16. Ubicación espacial de los sitios de demanda.....	55
Imagen 17. Calibración en WEAP para escenario de referencia	56
Imagen 18. Elaboración de los escenarios.....	58
Imagen 19. Demanda no cubierta para el escenario de referencia.....	59
Imagen 20. Demanda no cubierta para el escenario RCP 2.6	60
Imagen 21. Demanda no cubierta para el escenario RCP 8.5	61
Imagen 22. Porcentaje de cobertura para el escenario de referencia (condiciones actuales).....	62
Imagen 23. Porcentaje de cobertura para el escenario de RCP 2.6	63
Imagen 24. Porcentaje de cobertura para el escenario de RCP 8.5	64



LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultados de la oferta.....	44
Gráfica 2. Demanda de agua del área de estudio	51
Gráfica 3. Distribución porcentual de uso del suelo de Los Cristales	52
Gráfica 4. Distribución porcentual de los usos del suelo de Urbano.....	52
Gráfica 5. Distribución porcentual de los usos del suelo de Asolaguna y Chicaque	53
Gráfica 6. Distribución porcentual de los usos del suelo de Urbano 2.....	53
Gráfica 7. Distribución porcentual de los usos del suelo del Oasis.....	54



LISTA DE ABREVIATURAS

RCP: Trayectorias de Concentración Representativas

WEAP: Water Evaluation And Planning

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Kc: Coeficiente de cultivo

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

SIG: Sistema de información geográfica



RESUMEN

Teniendo en cuenta la importancia del recurso hídrico, el objetivo general de este proyecto fue evaluar el riesgo por desabastecimiento hídrico en el municipio de San Antonio del Tequendama mediante el modelo WEAP 21. Inicialmente se identificaron las fuentes de abastecimiento hídrico del municipio, se generó una base de datos a partir de información obtenida de diferentes fuentes tales como la alcaldía, la empresa prestadora del servicio y el IDEAM, se realizó una filtración de los datos y prueba de homogeneidad Mann Kendall para determinar la tendencia de los datos. Se verificó cuales datos eran requeridos por el modelo WEAP, para poder desarrollar el modelo y se obtuvieron de diferentes fuentes de información según la necesidad. Por medio de WEAP se generó un escenario base y a partir de modelaciones climáticas RCP 2,6 y RCP 8,5 se generaron proyecciones futuras para la zona de estudio, esto con el fin de poder proyectar las posibles condiciones hídricas de la región en diferentes condiciones climáticas y poblacionales (los datos poblacionales se sacaron del DANE), posteriormente se calibró el modelo para validar que los datos simulados sean similares a la realidad logrando finalmente establecer por medio de la demanda no cubierta y el porcentaje de cobertura que el municipio de San Antonio del Tequendama en los tres escenarios realizados (referencia, RCP 2,6 y RCP 8,5) suple las necesidades hídricas mostrando un grado de desabastecimiento nulo.

Palabras clave: WEAP, hídrico, modelo, desabastecimiento.



ABSTRACT

Taking into account the importance of water resources, the general objective of this project was to assess the risk of water shortage in the municipality of San Antonio del Tequendama through the WEAP 21 model. Initially, the water supply sources of the municipality were identified, a database based on information obtained from different sources such as the mayor's office, the company providing the service and the IDEAM, a data filtering and Mann Kendall homogeneity test was carried out to determine the trend of the data. It was verified which data were required by the WEAP model, in order to develop the model and were obtained from different sources of information according to the need. Through WEAP, a baseline scenario was generated and, based on climate modeling, RCP 2.6 and RCP 8.5, future projections were generated for the study area, in order to be able to project the possible water conditions of the region under different conditions. climatic and population (the population data were taken from the DANE), then the model was calibrated to validate that the simulated data are similar to the reality, finally establishing by means of the non-covered demand and the percentage of coverage that the municipality of San Antonio of the Tequendama in the three scenarios (reference, RCP 2.6 and RCP 8.5) supplies the water needs showing a degree of null stocking.

Key words: WEAP, water, model, shortage.



INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra la modelación hídrica desarrollada para el municipio de San Antonio del Tequendama con la finalidad de evaluar el riesgo de desabastecimiento hídrico por medio de la herramienta WEAP.

Para la evaluación de riesgo por desabastecimiento hídrico fue necesario la realización de un modelo hídrico por medio del software WEAP y de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), así mismo, el uso de bases de datos, como información detallada acerca de las bocatomas o sitios de captación pertenecientes al municipio, de los cuales se extrajo la información geográfica, hidrológica y meteorológica más completa para mayor veracidad en los resultados.

La metodología utilizada para realizar el modelo hídrico se llevó a cabo por medio de 3 etapas, 1) recolección y análisis de la información, el cual se realizó teniendo en cuenta las bases de datos mencionados, 2) generación de escenarios y 3) grado de desabastecimiento.

Este proyecto se planteó, dado que, en Colombia se considera la conservación del recurso hídrico como una situación de importancia pues que el agua es considerada un derecho fundamental y uno de los objetivos del milenio, la cual no solo dependerá del manejo antrópico que se tenga sobre la fuente sino también sobre el comportamiento climático, dicho de tal forma el municipio de San Antonio del Tequendama se ve en la necesidad de prepararse ante cualquier acontecimiento de sequía extensa que se pueda presentar a futuro que puedan afectar de manera significativa la disponibilidad del recurso hídrico.

En este caso la modelación se basó en la demanda y oferta hídrica del municipio de San Antonio del Tequendama, discriminando parámetros como la calidad de las fuentes hídricas, la geomorfología y topografía del área, la periodicidad de las precipitaciones y retención hídrica, entre otros. Cabe resaltar que se excluyeron todo tipo de captaciones ilegales.



1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el riesgo por desabastecimiento hídrico en el municipio de San Antonio del Tequendama.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento del municipio para las condiciones climáticas actuales y futuras.
- Evaluar la demanda hídrica en el municipio de San Antonio del Tequendama para los diferentes sectores hidro-dependientes en condiciones actuales y futuras.
- Establecer el grado de desabastecimiento hídrico a partir de la relación oferta-demanda y plantear diferentes alternativas para reducir este.



2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. MARCO CONTEXTUAL

2.1.1. Localización

San Antonio del Tequendama se encuentra ubicado en el departamento de Cundinamarca (ver Imagen 1), específicamente en la cuenca baja del río Bogotá. Su extensión total es de 82 km^2 , en donde 22 km^2 de estos pertenecen al área urbana y los 60 km^2 restantes pertenecen al área rural, este municipio cuenta con 1.006 habitantes y 12.014 habitantes respectivamente [1]. La altitud de la cabecera municipal es aproximadamente 1540 msnm y cuenta con una temperatura promedio de $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Su territorio se divide en 21 veredas en la zona rural y la zona urbana se divide en San Antonio, Santandercito, Pradilla y Pueblo Nuevo [2].

El municipio limita por el norte con los municipios de Tena y Bojacá; por el occidente con los municipios de Bojacá y Soacha; por el oriente con el municipio de Mesitas de El Colegio y por el sur con los municipios de Soacha y Granada [2].



Imagen 1. Localización de San Antonio del Tequendama



Fuente: propia

2.1.2. Características generales del municipio

2.1.2.1. Socioeconomía

San Antonio del Tequendama tiene una población puramente campesina (con orígenes muiscas), del 100% de los habitantes el 70% corresponde a personas nacidas en el municipio y el restante 30% pertenece a población flotante proveniente de diferentes partes del país [3].

Además de ser un municipio con grandes tradiciones en el sector agrícola, teniendo importantes ingresos económicos por sus cultivos de café, mango, cítricos, guayaba, mora, granadilla y tomate [4], también se tiene un ingreso debido a la atracción del pequeño porcentaje de población flotante principalmente por el turismo ecológico teniendo como grandes atracciones al zoológico de Santacruz, el templo de Santandercito (declarado patrimonio cultural), el parque temático de las orquídeas el parque natural montañas de Chicaque, ECOCENTER (centro de deporte extremo), granjas interactivas y caminos tradicionales que sirven de rutas para la realización de senderismo [3].

El sector pecuario es altamente representado por la actividad porcícola, pues es considerado el segundo mayor productor del departamento [4]. La ganadería ocupa la segunda actividad más importante de la provincia del Tequendama, también se desarrolla la avicultura (principalmente granjas dedicadas a la producción de pollos [4].

El municipio cuenta con diferentes eventos culturales representativos que son atracción en diferentes épocas del año, estos eventos involucran aniversarios, festivales, actividades que desarrollan y promocionan la tan variada economía de la región además de su cultura.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Modelos

Un modelo es una aproximación simplificada de lo que ocurre en la realidad; sin embargo esta aproximación hace que los modelos sean útiles para predecir el comportamiento futuro al que podría llegar un sistema dinámico dado [5]. Existen situaciones en las que los modelos ya se encuentran creados como es el caso de los modelos computacionales aunque por otro lado se encuentran situaciones en donde el modelo no existe y por ende hay que crearlo. Todos los modelos se basan en la matemática, ya que esta disciplina es crucial para el control de la calidad de información y son usados para la creación de modelos conceptuales [6], [7], por ejemplo los

sistemas complejos de recursos hídricos pueden ser analizados para un óptimo diseño, asignación y operación de proyectos, mediante técnicas matemáticas adecuadas, conocidas como modelos matemáticos [8].

En general un modelo conceptual es una representación que facilita la comprensión de un sistema y son representaciones de algún conocimiento adquirido [7].

2.2.2. Riesgo

Frecuentemente se define al riesgo como una situación en donde existe una posibilidad de sufrir algún daño o estar en peligro. Por lo general aquel riesgo se encuentra relacionado a efectos negativos en donde una persona, comunidad o población pueda verse afectado [9].

2.2.3. Evaluación de riesgo

Una evaluación del riesgo corresponde al conjunto de acciones y procedimientos para realizar una identificación de peligros que puedan estar afectando a una determinada comunidad. Según la ley 1523 de 2012 en la cual se acoge la política nacional de gestión del riesgo de desastres, se adopta la siguiente definición para la evaluación del riesgo: “Implica la consideración de las causas y fuentes de riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades” [9].

2.2.4. Desabastecimiento

Como su nombre lo indica es aquello que no se logra abastecer, es decir, en donde no se puede suplir toda la capacidad solicitada y por lo general se da cuando la demanda es superada por la oferta [10].

2.2.5. Clima

El clima es el conjunto cambiante de condiciones atmosféricas, en donde se determina la interacción que existe entre los diferentes componentes del llamado sistema climático (atmósfera, hidrosfera, litosfera, criósfera, biosfera y antropósfera). Debido a que el clima se relaciona con las condiciones predominantes de la atmósfera, este se describe a partir de variables tales como la temperatura y la precipitación, entre otros [11]. Como ya se mencionó, la temperatura y la precipitación son dos variables que marcan el cambio climático, las cuales pueden ser inducidas por factores naturales o por las actividades humanas.

Los fenómenos de variabilidad climática en Colombia se encuentran controlados en gran parte por la zona de confluencia inter-tropical así como por la dinámica de los océanos Pacífico y Atlántico [12]. Colombia tiene situaciones de precipitación y

variabilidad climática muy marcados a lo largo del territorio, con un sistema climático que cambia significativamente entre regiones, es decir, que las alteraciones climáticas no se perciben homogéneamente en la totalidad del país [12].

Se ha alcanzado una aceptación mundial, política y científica de que el cambio climático es una realidad, sin embargo este fenómeno ya ha afectado y sigue afectando al planeta hasta el punto de llegar a un nivel considerado irreversible; además de tratar de reducir la producción de gases que incrementan la magnitud de este fenómeno se deben adoptar medidas efectivas para adoptar el problema, creando así acciones para anticipar los impactos que se puedan producir [13].

2.2.6. Interpolación espacial

La interpolación espacial es el proceso de utilizar puntos con valores conocidos para estimar valores desconocidos en otros puntos. Por ejemplo, para realizar un mapa de precipitación (lluvia) para el país no se encontrarán suficientes estaciones meteorológicas distribuidas uniformemente para cubrir toda la región. La interpolación espacial puede estimar las temperaturas en lugares que no tienen ese dato utilizando lecturas de temperatura conocida en estaciones meteorológicas cercanas. A este tipo de superficie interpolada con frecuencia se le llama una superficie estadística. Datos de elevación, precipitación, acumulación de nieve, tabla de agua y densidad de población son otros tipos de datos que pueden ser calculados utilizando la interpolación [14].

2.2.7. Isotermas

Es una curva que une los vértices, en un plano cartográfico, que presentan las mismas temperaturas en la unidad de tiempo considerada. Así, para una misma área, se pueden diseñar un gran número de planos con isotermas, por ejemplo; Isotermas de la temperatura media de largo periodo del mes de enero, de febrero, etc., o las isotermas de las temperaturas medias anuales [15].

2.2.8. WEAP 21

WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos cuyo propósito es proporcionar un marco amplio, flexible y fácil de usar para la planificación y análisis de políticas, WEAP funciona usando el principio básico de balance hídrico, puede ser aplicado en sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o en complejos sistemas de cuencas transfronterizas. Por otra parte, WEAP puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenciones de los sistemas, incluyendo la escorrentía por precipitación, flujos de base, y recarga de aguas subterráneas por precipitación; análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; descargas de hidroelectricidad; seguimiento de la contaminación y calidad de las aguas; evaluaciones de vulnerabilidad; y requisitos de los ecosistemas. Un módulo de análisis financiero también permite que el usuario investigue comparaciones de costo- beneficio para los proyectos [16].

El analista representa el sistema en términos de sus diversas fuentes de suministro (por ejemplo, ríos, arroyos, agua subterránea, embalses y plantas desalinizadoras); extracción, transferencia y plantas de tratamiento de aguas residuales; demandas de agua; generación de contaminación; y requisitos de ecosistemas. La estructura de datos y el nivel de detalle se pueden modificar fácilmente para satisfacer la necesidad y la disponibilidad de datos para un sistema y un análisis particular [16].

WEAP opera en muchas capacidades:

- Base de datos del Balance Hídrico: WEAP proporciona un sistema para mantener información de oferta y demanda de agua [16].
- Herramienta de generación de escenarios: WEAP simula la demanda, suministro, escorrentía, caudales, almacenamiento, generación, tratamiento y descarga de contaminantes y calidad del agua en las corrientes [16].

2.2.9. Escenarios de cambio climático

2.2.9.1. Trayectorias de Concentración Representativas (RCP)

La temperatura y la precipitación son variables que tienden al cambio debido a las actividades antrópicas que se desarrollan en todo el mundo. Las trayectorias de concentración representativas (RCP) son escenarios climáticos generados a partir de estas dos variables, en donde se observa una concentración determinada de gases efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera. Los cuatro escenarios diferentes RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5 [17], representan un forzamiento radiactivo total calculado para el año 2100. Los RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos del ciclo del carbono [18].

El RCP 2,6 se refiere a un escenario de mitigación, es decir, en donde los gases de efecto invernadero son mínimos, mientras que los RCP 4,5 y 6,0 son escenarios de estabilización y finalmente el RCP 8,5 corresponde a un escenario con nivel muy alto de emisiones de gases efecto invernadero [18].



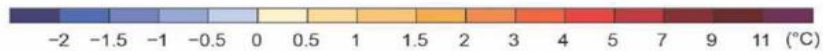
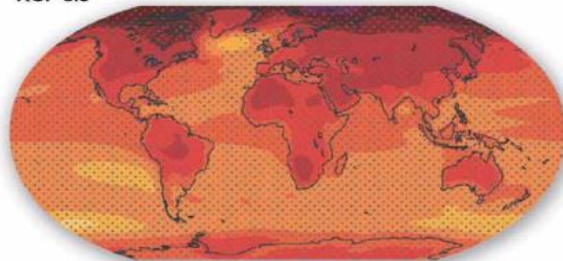
Imagen 2. Cambio de temperatura media en la superficie

Cambio de temperatura media en superficie (entre 1986-2005 y 2081-2100)

RCP 2.6

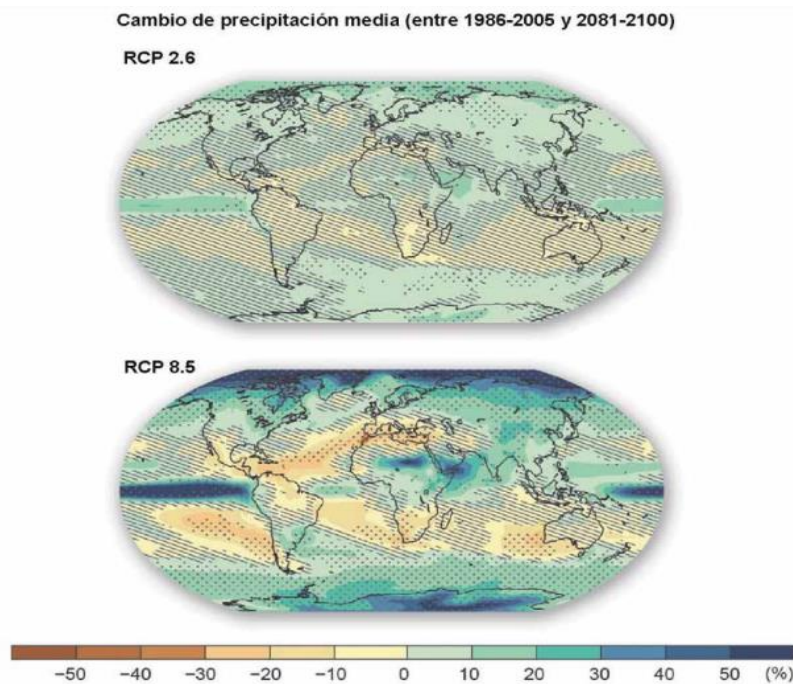


RCP 8.5



Fuente: [18]

Imagen 3. Cambio de precipitación media en la superficie

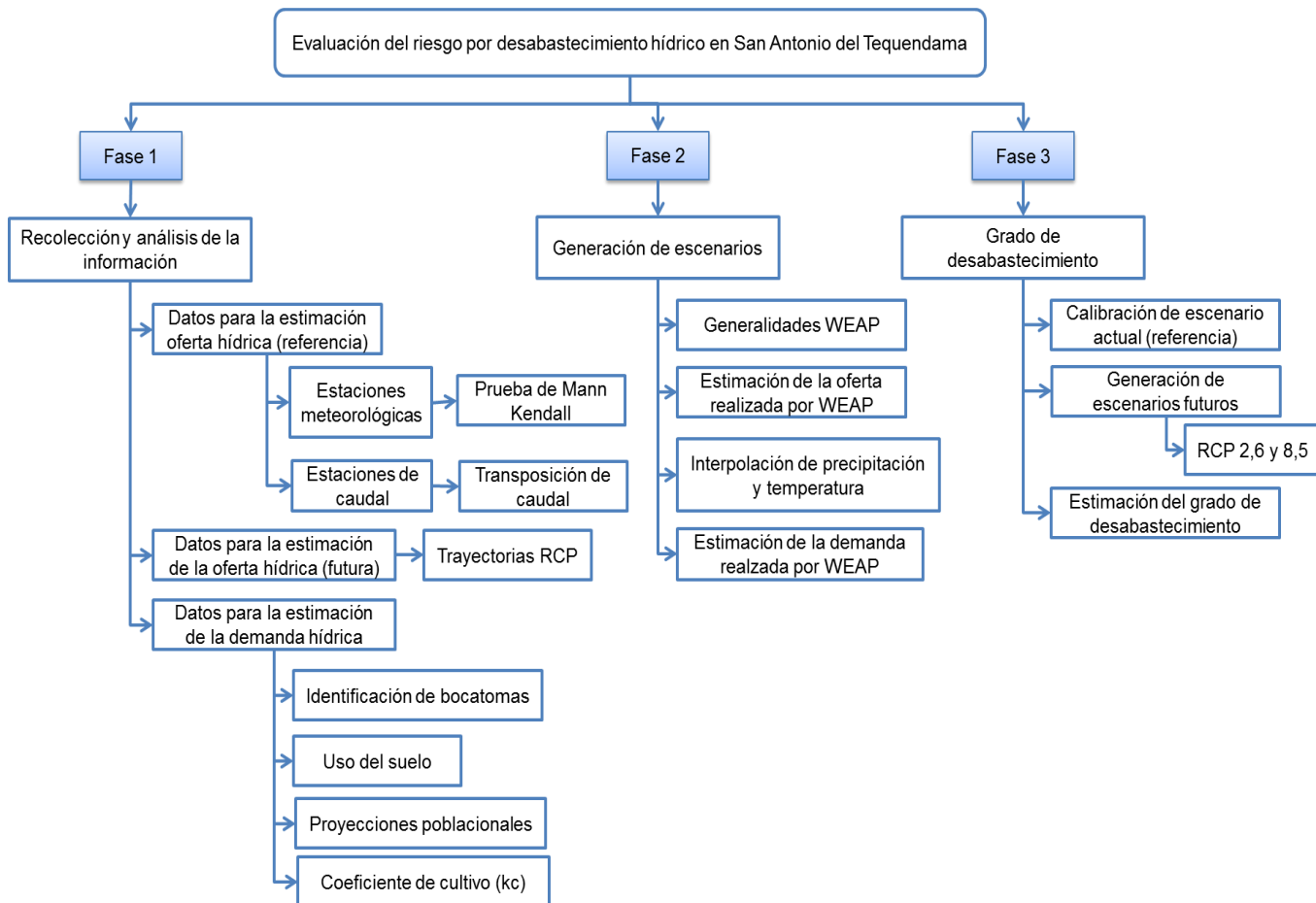


Fuente: [18]

3. METODOLOGÍA

La realización de la evaluación de riesgo por desabastecimiento hídrico en San Antonio del Tequendama, se desarrolló por medio de tres fases: recolección y análisis de la información, generación de escenarios y finalmente grado de desabastecimiento hídrico.

Imagen 4. Metodología



Fuente: propia

3.1. FASE 1: RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

3.1.1. Datos para la estimación de la oferta hídrica

Para determinar la oferta hídrica se realizó un proceso de recolección y análisis de la información para condiciones actuales y futuras; la recopilación de la información se realizó a partir de la base de datos registrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) así como información brindada por la alcaldía de San Antonio del Tequendama y la empresa de servicios públicos PROGRESAR SA EPS.

Posteriormente se determinó que la oferta será evaluada por medio de valores de precipitación y temperatura junto con variables de entrada al modelo weap que se presenta mas adelante, acompañado de estaciones limnigráficas aportando un caudal de

entrada y uno de salida requeridos específicamente por el programa WEAP para la modelación de la oferta.

3.1.1.1. Estaciones meteorológicas y prueba de homogeneidad

Estas estaciones fueron escogidas de la base de datos del IDEAM, teniendo en cuenta parámetros de precipitación y temperatura. Posteriormente se verificó que las estaciones extraídas contaran con la mayor cantidad de datos completos en un rango de 20 a 30 años, teniendo en cuenta que no faltara más del 30% de los datos, los cuales fueron datos mensuales multianuales.

3.1.1.1.1. Prueba de Mann Kendall

A pesar de ya tener seleccionadas las estaciones meteorológicas, se optó por realizar la prueba de Mann Kendall a los datos de precipitación de cada estación, esto con el fin de determinar la homogeneidad de las estaciones ya que este es un test paramétrico que permite detectar la tendencia de los datos. La prueba conduce a elegir alguna de las siguientes respuestas [20]:

- Hipótesis nula: Todos los valores de la serie son datos aleatorios de una sola población (es una serie homogénea).
- Hipótesis alternativa: Es una serie no homogénea con tendencia monótona.

El resultado a las siguientes ecuaciones da lugar a la respuesta de la hipótesis (cabe notar que las respuestas son adimensionales), por consiguiente la ecuación 1 es considerada la ecuación general para el desarrollo de este test y por ende permite determinar la correlación de los datos. Para poder desarrollarla es necesario adquirir las variables contempladas en las ecuaciones 2, 3 y 4 [20].

$$V = \frac{S-1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$S = T - I \quad \text{Ecuación 2}$$

$$T = \sum_1^{n-1} si \quad \text{Ecuación 3}$$

$$I = \sum_1^{n-1} ti \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

N= Número de registros

S= Índice de desviación calculado

si= Número de valores de $x_j > x_i$ para $i < j < n$

t_i = Número de valores de $x_j < x_i$ para $i < j < n$

Al realizar esta prueba se determinó que todas las estaciones usadas son homogéneas.

3.1.1.2. Estaciones limnigráficas y transposición de caudal

Para adquirir los datos de caudal fue necesario identificar dos estaciones por medio de la base de datos del IDEAM que se encontrarán ubicadas sobre el río Bogotá (ver imagen 6), debido a que dentro del área de estudio no se encuentran estaciones limnigráficas, se procedió a tomar estas estaciones identificadas previamente (ver tabla 1) y realizar una transposición de los datos. Este procedimiento se realizó debido a que WEAP requería datos de caudal para darle una condición inicial al modelo.

$$Q_1 * A_1 = Q_2 * A_2 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\frac{A_1}{A_2} * Q_1 = Q_2 \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde:

A_1 : área total de la cuenca del río Bogotá

A_2 : área de la cuenca San Antonio del Tequendama

Q_1 : caudal de la estación limnigráfica

Q_2 : caudal transpuesto

Tabla 1. Estaciones limnigráficas y sus respectivas coordenadas

Código Estación	Norte	Este
21207960	984391,73	941063,68
24017150	1078190,35	1025009,94

Fuente: [19]

3.1.1.3. Trayectorias de Concentración Representativas (RCP)

Los datos de proyecciones climáticas fueron adquiridos de la base de datos del IDEAM, en donde se clasificaron las estaciones de interés tomando datos de los RCP's 2.6 y 8.5. los cuales se tuvieron en cuenta para la modelación de escenarios en WEAP, ya que estos representan el mínimo y el máximo en cuanto a las proyecciones basadas en la concentración de gases de efecto invernadero.

3.1.2. Datos para la estimación de la demanda hídrica

La demanda hídrica se estimó a partir de la recolección y análisis de la información acompañada de la modelación hídrica realizada por WEAP para condiciones actuales y

futuras, posteriormente se adquirieron datos de proyecciones poblacionales siendo estas las condiciones para generación de escenarios futuros, adquiriendo datos de caudal captado por el municipio, usos del suelo siendo estos los principales demandantes hídricos, kc para la determinación de la absorción realizada por los diferentes cultivos de la zona y posteriormente las proyecciones poblacionales como principal dato para determinación de los escenarios futuros expuestos en el numeral 3.1.2.3.

3.1.2.1. Identificación de bocatomas

Las bocatomas fueron seleccionadas de la base de datos de la empresa PROGRESAR SA ESP, la cual es responsable de abastecer hídricamente a la población. La base de datos consta de las coordenadas geográficas de las bocatomas, el número de suscriptores, la cantidad de agua captada, el nombre de cada bocatoma y sitio de captación; la selección de las bocatomas que se usaron en este estudio se realizó según el mayor número de suscriptores (ver imagen 8), esto se usó para la determinación de la demanda hídrica por parte de la empresa prestadora del servicio público, además de aportar información para la delimitación realizada en SIG.

3.1.2.2. Usos del suelo

Para determinar la demanda hídrica según el uso del suelo fue necesario utilizar la herramienta ArcGis para establecer las áreas correspondientes a cada unidad hídrica.

3.1.2.3. Proyecciones poblacionales

Según el DANE uno de los métodos utilizados para realizar proyecciones poblacionales consiste en la desagregación del crecimiento de la población en sus respectivos componentes (fecundidad, mortalidad y migración) según la siguiente ecuación, resaltando que la proyección se realizará para 50 años [21]:

$$N^{t+a} = N^t + B^{t,t} + a - D^{t,t+a} + M^{t,t+a}$$

En donde:

N^t : es la población en el instante t.

a: es el tiempo transcurrido entre dos censos.

$B^{t,t}$: son los nacimientos ocurridos durante el periodo intercensal.

$D^{t,t+a}$: son las defunciones ocurridas durante el periodo intercensal.

$M^{t,t+a}$: son los migrantes durante el periodo intercensal.

3.1.2.4. Coeficiente de cultivo (Kc)

Para la determinación del kc fue necesario buscar los tipos de cultivo presentes en la zona, los cuales ayudan directamente a la determinación de la demanda hídrica en la agricultura.

3.2. FASE 2: Generación de escenarios

3.2.1. Generalidades de WEAP

A continuación se expone de manera general el procedimiento que se llevó a cabo por WEAP para la modelación hídrica, con el fin de generar una idea básica del proyecto que incluye la oferta, demanda y generación de escenarios (grado de desabastecimiento).

Para la implementación del modelo WEAP 21 fue indispensable tener clara la planificación de recursos hídricos, balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). WEAP emplea una paleta de diferentes objetos y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible, sin embargo cabe aclarar que en este proyecto no se usaran los objetivos de conducciones regulatorias y operación e infraestructura [24].

WEAP es un modelo forzado por variables climáticas en el que se incluyeron rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica [24]. Estas características convierten a WEAP en el modelo ideal para realizar estudios de cambio climático, en los que es importante estimar cambios en la oferta de agua.

En general, este modelo hidrológico es espacialmente continuo con un área de estudio configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa) es utilizado en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo. Este modelo físico unidimensional balancea el agua para cada tipo de cobertura/uso de suelo, repartiéndola en escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los valores de cada una de estas áreas se suman para obtener los valores agregados en una subcuenca [24]. En cada tiempo de corrida del modelo, WEAP calcula primero los flujos hidrológicos, que son traspasados a los ríos. La distribución de agua se realiza para el mismo tiempo de corrida, donde las restricciones relacionadas con las características de la red de distribución y a la vez las prioridades y preferencias asignadas a diferentes puntos de demanda que serán usadas como condiciones de operación de un algoritmo de programación lineal que maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible [16].

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

- Definición del estudio: En esta etapa se establece el marco temporal, los límites

espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.

- **Búsqueda de información:** En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales (datos obtenidos en la primera etapa metodológica del proyecto), y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
- **Desarrollo del modelo:** En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
- **Calibración:** Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua.
- **Uso del modelo, generación de escenarios:** Una vez que el modelo está calibrado, se podrán explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre cambios climáticos y aumento de población donde se vea afectada la demanda y oferta del agua.

El método utilizado para la estimación de la oferta y la demanda hídrica en WEAP fue el de humedad del suelo, el cual representa el proceso de lluvia-escorrentía, en donde se calcula la escorrentía como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración de las plantas. El proceso de evapotranspiración se omitió ingresando directamente los datos de caudal al modelo para asegurar el caudal base a través del parámetro precipitación efectiva.

3.2.2. Estimación de la oferta realizada por WEAP

Para generar la modelación de la oferta actual, WEAP requiere diferentes datos los cuales se pueden evidenciar a continuación:

3.2.2.1. Información climatológica

La información meteorológica obtenida en la etapa de recolección de datos se procesó para formar una base de datos que permita el uso de los mismos dentro del modelo [16].

3.2.2.2. Interpolación de temperatura y precipitación

Las interpolaciones se realizaron con base en un código escrito en el lenguaje de programación de Python, este modelo desarrolla las ecuaciones del método Inverse Distance Weighting (IDW) para parámetros mensuales de temperatura y precipitación en cada uno de los escenarios [23].

Python generó interpolaciones de precipitación y temperatura, permitiendo realizar pruebas para estimar el error que se pueda presentar, teniendo en cuenta la

correlación de los datos, es por ello que tiene como propiedad la validación cruzada.

A pesar de su simplicidad, se espera que la programación Python logré un 90% de acierto sobre los datos de entrenamiento. No obstante, se trata de una valoración bastante optimista pues empleamos los propios datos de entrenamiento para evaluar el modelo. Lo que realmente queremos es estimar la habilidad del modelo de generalizar en nuevos casos. Para determinar las capacidades del modelo, u obtener un modelo más robusto, se suele recurrir a la validación cruzada [23].

3.2.2.3. Red hidrológica existente en la cuenca

La información hidrológica hace referencia a la estructura hídrica de la cuenca, la cual se alimentó con datos de series históricas de caudal, las cuales se usaron posteriormente en la generación del modelo [24], teniendo en cuenta que el modelo debe contar con un valor de ingreso de caudal, el cual representa la cantidad hídrica antes de pasar por los sitios de captación y unidades hidrológicas, así como un valor de salida que hace referencia al caudal final después de pasar por todas las condiciones establecidas en el modelo.

3.2.2.4. Información hidrológica

La información hidrológica en WEAP es representada por una unidad hidrológica la cual almacena datos de precipitación y temperatura que proporcionan un caudal supuesto el cual será el principal aportante hídrico por cuenca.

- **Delimitación de unidades hidrológicas en SIG**

Las subcuencas se deben delimitar en ciertos puntos de interés hidrológico donde se desea conocer exactamente el valor del caudal en un momento determinado durante el uso del modelo, ya sea para la calibración o la simulación de escenarios futuros. Adicionalmente se recomienda subdividir las subcuencas de acuerdo con sus capas de elevación para obtener áreas de captación que son espacialmente uniformes respecto a sus características topográficas y climatológicas [24].

Las unidades hidrológicas tienen que ser definidas a través de procedimientos de delimitación de subcuencas. Por medio de este proceso se obtuvo la caracterización de los usos del suelo necesarios de cada zona de captación. Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación incluyen precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante). Adicionalmente, los datos de caudales deben ser ingresados para poder comparar los resultados del modelo y realizar las calibraciones [24].

3.2.3. Estimación de la demanda realizada por WEAP

3.2.3.1. Análisis de la Demanda de Agua

Para complementar el balance hidrológico por el modelo WEAP fue necesario llevar a cabo una serie de sub-etapas que se describen a continuación:

- **Definición de usos de suelo**

Con los datos de SIG se establecieron los usos del suelo de la cuenca de forma que cada unidad hidrológica pudiera tener su distribución los usos del suelo correspondientes. Se buscó utilizar un número de categorías completa sin ser extremadamente detallada [24].

A partir de los usos del suelo de cada unidad hidrológica, el modelo hídrico generado en WEAP estima los valores de evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas y flujo base. Las unidades hidrológicas además se pueden subdividir dependiendo de su uso del suelo para lograr una mejor representación de los procesos hidrológicos en diferentes tipos de cultivo y suelos [24].

- **Demanda urbana**

Para establecer la demanda urbana se tomó la información proveniente de censos disponibles por el DANE, los cuales fueron obtenidos por medio de la alcaldía municipal. A partir de esta información se generaron los sitios de demanda los cuales simularán el consumo de consumo de agua por usuario, así mismo se ingresaran los datos de proyecciones poblaciones como uno de los principales factores para la generación de escenarios.

3.3. FASE 3: GRADO DE DESABASTECIMIENTO

3.3.1. Calibración

El proceso de calibración del modelo desarrollado para la modelación hidrológica de acuerdo al análisis de oferta y demanda de agua descrito con anterioridad se realizó en tres etapas consecutivas, con el fin de establecer una similitud entre lo real y lo simulado. Estas etapas permitieron revisar el comportamiento del modelo, primero en las cuencas altas, luego en las cuencas intermedias y finalmente en las cuencas bajas [24].

- **Calibración de cuencas aportantes**

Una primera etapa consiste en la calibración hidrológica de las subcuencas aportantes. En donde se esperó que la influencia humana en estas subcuencas fuera baja y por lo tanto los caudales no fueran afectados por el uso o manejo del recurso. De suma importancia en esta etapa del proceso de calibración fue el análisis de las características hidrológicas particulares asociadas a los ecosistemas que sean relevantes en la cuenca en estudio, sin embargo en este estudio no se encontraron ecosistemas relevantes [24].

En una primera aproximación es una buena práctica establecer factores de calibración generales para toda el área mencionada, los cuales modifican los parámetros de uso de

suelo incluyendo, principalmente:

- Kc: coeficiente de cultivo
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, Z1
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Z2
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF
- Conductividad de zona de raíces, K1
- Conductividad de zona profunda, K2
- Dirección preferencial de flujo, f

Se resalta que este procedimiento lo realiza automáticamente el programa sin necesidad de realizar cálculos manuales anexos, así mismo, es importante tener en cuenta que desde un punto de vista de programación WEAP no corre el modelo hasta que todos los datos estén debidamente ingresados en el modelo.

3.3.2. Generación de escenarios

Una vez realizado el modelo y completamente calibrado, es decir, con los tres escenarios (de referencia, RCP 2.6 y RCP 8.5), se pudo realizar la evaluación de diferentes escenarios futuros para así evidenciar las condiciones de cada uno de ellos según los parámetros correspondientes los cuales determinarán si existe o no un grado de desabastecimiento. Los escenarios futuros pueden ser de diferentes tipos, en este caso fueron de tipo de crecimiento poblacional y escenarios de clima.

Los escenarios de crecimiento poblacional se diseñaron considerando las tasas de crecimiento de población proyectadas a 50 años, de igual forma los escenarios de clima que constituyen uno de los aspectos de mayor uso en el modelo, en donde se manejan proyecciones futuras climáticas.

3.3.3. Estimación del grado de desabastecimiento

Con el fin de poder determinar el grado de desabastecimiento del municipio, inicialmente se tomó como base la demanda no cubierta para así establecer si el recurso hídrico era suficiente para suplir las necesidades de uso del suelo y poblacionales, la veracidad de los datos obtenidos en cuanto a la demanda no cubierta se generó por medio del porcentaje de cobertura con el cual se evidencio si existía una relación coherente entre los datos obtenidos, es así donde se observa de manera directa la influencia en el modelo de la oferta y la demanda establecidas durante el desarrollo del proyecto.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. FASE 1: RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

4.1.1. Datos para la estimación de la oferta hídrica

A partir de la petición escrita que se realizó tanto al municipio como al instituto de



hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) se logró obtener una base datos completa con información climatológica e hidrológica suficiente para alcanzar los objetivos expresados en este documento.

4.1.1.1. Estaciones meteorológicas y prueba de homogeneidad

Se adquirieron 27 estaciones meteorológicas de la base de datos del IDEAM con sus respectivas coordenadas (ver tabla 2), las cuales fueron utilizadas para captar los datos y realizar una posterior estimación de la oferta en el modelo hídrico con base a la climatología.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas y sus respectivas coordenadas

Código Estación	Norte	Este
24015120	1096337,05	1037977,23
21206280	1006378,23	971645,59
21205670	1019327,8	960048,11
21205660	998433,03	950164,27
21205420	1010530,57	985411,07
23125070	1077827,96	1001201,68
35025060	997702,45	1010662,94
21205740	1057683,24	1041700,76
21195120	977844,61	964633,61
35065010	1025912,13	1047813,86
21195060	955394,94	954490,05
21195070	968367,95	973997,47
23125140	1102249,61	988375,38
24015220	1101269,38	1064461,56
21245040	981719,45	881133,86
21215140	970781,34	888639,98
21245010	980938,87	887898,15
22055020	874336,9	837510,06
21215100	983029,18	850477,91
21185030	935116,22	899627,05
21205720	989998,83	987596

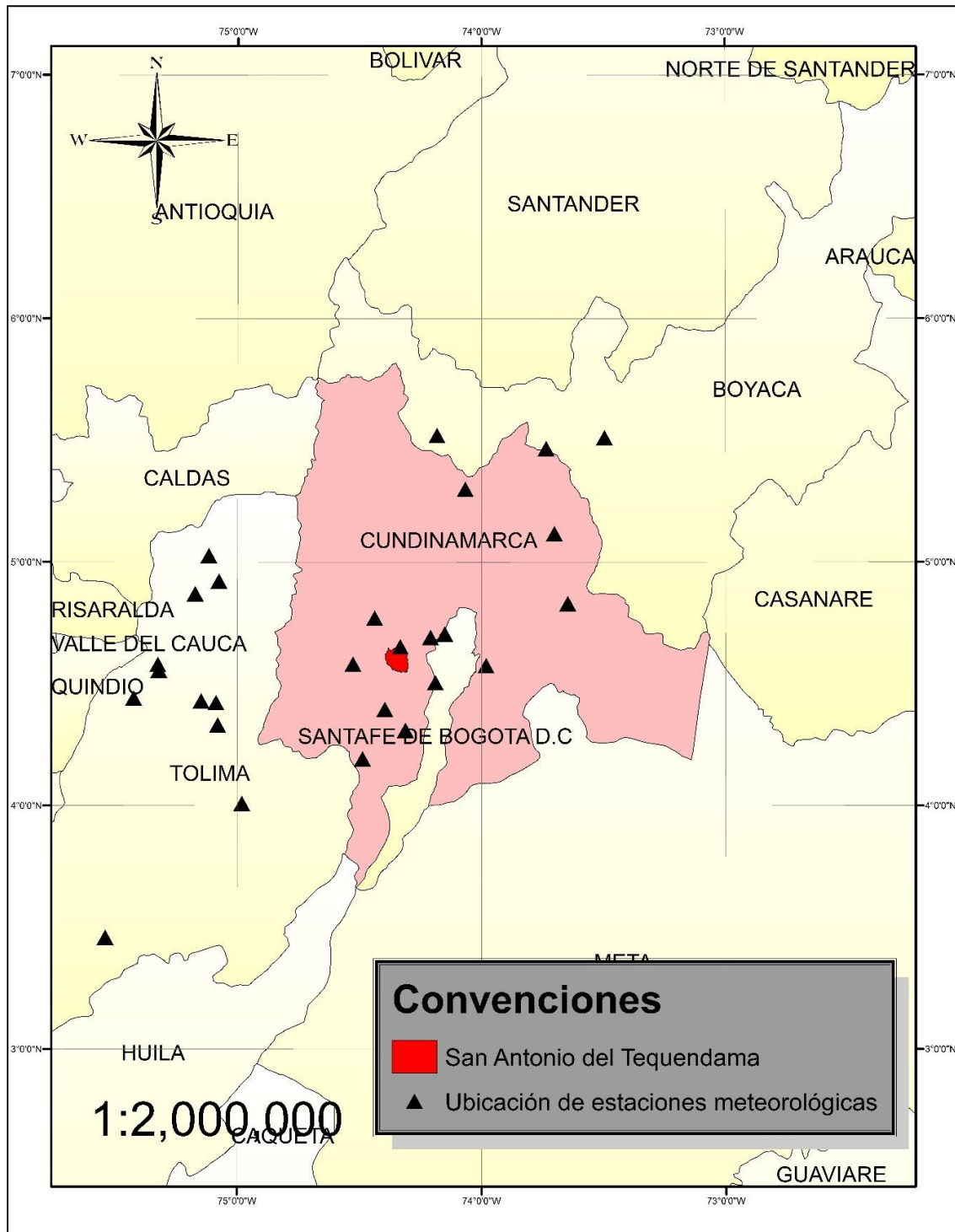


21205790	1012096,12	991883,23
21210020	995707,52	861927,94
21210220	998341,3	861485,42
21250110	1030437,45	878443,51
21250120	1047693,57	884695,46
21250500	1036104,13	889268,48

Fuente: [19]



Imagen 5. Ubicación de las estaciones meteorológicas



Fuente: propia



4.1.1.1.1. Prueba de Mann Kendall

Al realizar esta prueba se determinó que todas las estaciones usadas son homogéneas.

Tabla 3. Resultados de la prueba de Mann Kendall

Código Estación	Resultado de la prueba
24015120	Homogénea
21206280	Homogénea
21205670	Homogénea
21205660	Homogénea
21205420	Homogénea
23125070	Homogénea
35025060	Homogénea
21205740	Homogénea
21195120	Homogénea
35065010	Homogénea
21195060	Homogénea
21195070	Homogénea
23125140	Homogénea
24015220	Homogénea
21245040	Homogénea
21215140	Homogénea
21245010	Homogénea
22055020	Homogénea
21215100	Homogénea
21185030	Homogénea
21205720	Homogénea
21205790	Homogénea
21210020	Homogénea
21210220	Homogénea
21250110	Homogénea
21250120	Homogénea
21250500	Homogénea

Fuente: propia

4.1.1.2. Estaciones limnigráficas y transposición de caudal

La transposición de caudal se realizó con el fin de realizar la calibración del modelo sin embargo el modelo hidrológico WEAP requirió de un caudal inicial y un caudal final, ya que no se contaba con estaciones limnigráficas dentro de la zona de estudio, como se mencionó en el numeral 3.1.1.2. de la metodología, fue necesario transponer caudales de otro lugar y adaptarlos a nuestra zona de estudio. A continuación se muestra a modo de ejemplo los resultados de la transposición de caudales de los últimos 2 años para evidenciar el procedimiento que se realizó para los 30 años correspondientes.

Tabla 4. Áreas usadas para la transposición de caudal

Código Estación	$A_1 (m^2)$	$A_2 (m^2)$
21207960	1112891920.56	97066328.84

Fuente: [19]

Tabla 5. Ejemplo de los dos primeros años de la transposición de caudal realizada con todos los años

Año	Mes	Caudal transpuesto (m^3/s)
1974	1	31.67
1974	2	48.91
1974	3	54.31
1974	4	40.05
1974	5	40.95
1974	6	25.77
1974	7	20.21
1974	8	18.70
1974	9	20.05
1974	10	30.94
1974	11	48.45
1974	12	34.69
1975	1	17.70
1975	2	24.16
1975	3	32.85
1975	4	33.86
1975	5	47.35

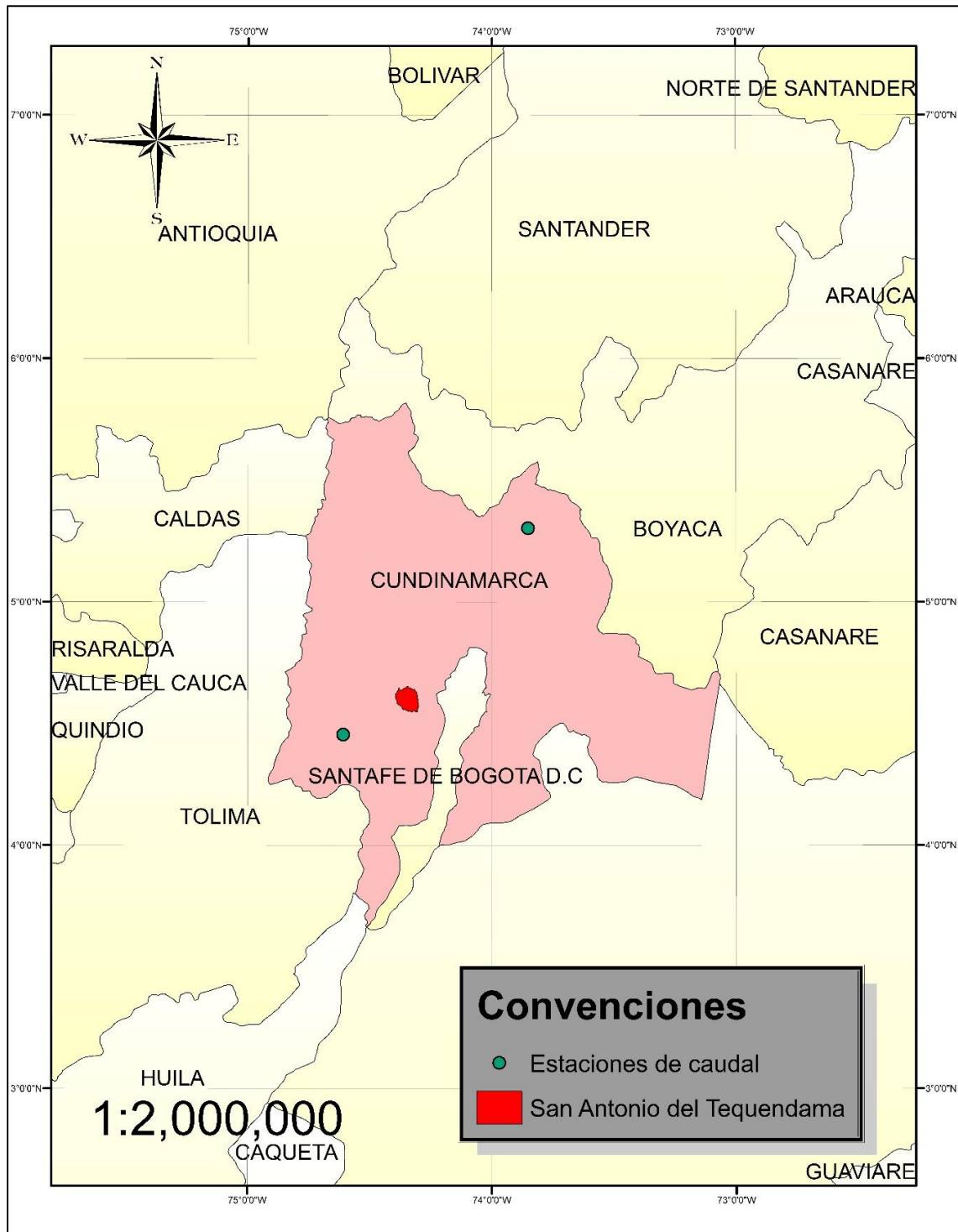


1975	6	30.04
1975	7	47.19
1975	8	24.75
1975	9	28.14
1975	10	45.01
1975	11	63.42
1975	12	70.13

Fuente: [19]



Imagen 6. Ubicación de las estaciones de caudal usadas



Fuete: propia



4.1.1.3. Trayectorias de concentración representativas (RCP)

En el quinto informe de la Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) se definieron 4 escenarios de emisión denominados Trayectorias de Concentración Representativas o RCP por sus siglas en inglés, estas se caracterizan por su forzamiento radiactivo (W/m^2), siendo este forzamiento una medida de radiación electromagnética que llega a la atmósfera. Dichas trayectorias comprenden un escenario con niveles de forzamiento bajo (RCP 2,6), dos escenarios de estabilización (RCP 4,5 y RCP 6,0) y un escenario de nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8,5).

Teniendo como base los RCP se estiman proyecciones climáticas hasta el 2100 en todo el mundo. Para Colombia se espera una temperatura y precipitación diferente en todo el territorio, lo que indica que se deben tomar medidas diferentes para cada una de las regiones para hacer frente a los posibles fenómenos que se puedan presentar [26].

Los RCP fueron usados dentro del proyecto para realizar la estimación de la oferta hídrica en los escenarios futuros y así poder determinar si existe o no algún grado de desabastecimiento hídrico, a partir del cambio de variables de temperatura y precipitación.

4.1.2. Datos para la estimación de la demanda hídrica

4.1.2.1. Identificación de bocatomas

En la tabla 6 se presenta la información referente a las bocatomas utilizadas, en ella se encuentra información básica como coordenadas, número de suscriptores, caudal captado (m^3/s) y el nombre de los acueductos, adicionalmente en la imagen 7 se encuentra la ubicación geográfica de las bocatomas, así como de las cuencas hidrográficas.

Tabla 6. Caracterización de las bocatomas más importantes de San Antonio del Tequendama

Norte	Este	Nombre del acueducto	Caudal captado (l/s)	Número de suscriptores
995644	974024	Acueducto Arracachal Alto	0,42	74
999041	969928	Acueducto Urbano	6,8	438
972742	1002178	Acueducto Urbano	0.85	
996162	973736	Acueducto El Oasis	0,79	119
1001830	973601	Acueducto Asolaguna	2,21	173
998887	969738	Acueducto Cristales Vancouver	0,67	30



998887	969738	Acueducto Los Cristales La Rambla	2,79	109
1001459	973118	Acueducto Chicaque Aguamanantial	1,06	30

Fuente: [22]



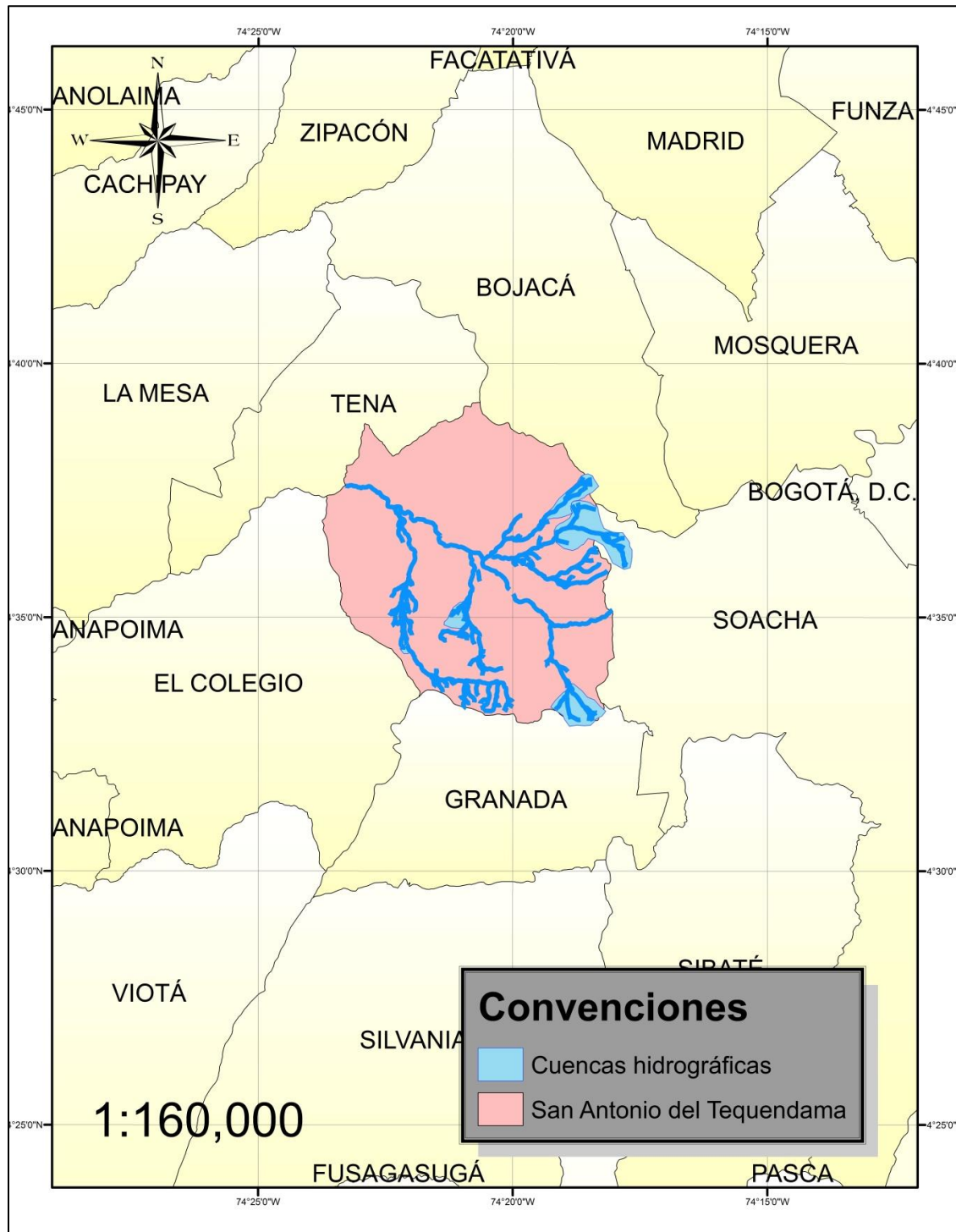
Imagen 7. Localización de bocatomas en San Antonio del Tequendama



Fuente: propia



Imagen 8. Delimitación de las cuencas de cada bocatoma



Fuente: propia



4.1.2.2. Usos del suelo

A partir de la estimación de las áreas pertenecientes a cada unidad hidrológica, se procedió a clasificar los usos del suelo correspondientes a cada una (ver tabla 7).

Tabla 7. Distribución espacial de cada uso del suelo por unidad hidrológica en km²

Unidades hidrológicas	Agroforestal	Agricultura	Ganadería	Conservación	Área total
Urbano_2	0	5.896443	0.299754	6.60996	12.81
Asolaguna_Chicaque	0	0.017934	0.42822	3.212748	3.66
El_Oasis	0	2.68413	0	0.085039	2.77
Urbano	0.05544	0.824384	0	0	0.88
Los_Cristales	0.33957	0.251181	0	0.03906	0.63

Fuente: propia

4.1.2.3. Proyecciones poblacionales

En la siguiente tabla se pueden observar los datos de cada variable, así como el resultado de la proyección realizada para el 2050.

Tabla 8. Valores de proyección poblacional

N^t	$B^{t,t}$	$D^{t,t+a}$	$M^{t,t+a}$	A	Proyección a 2050 (personas)
13209	1163	727	384	13	14042

Fuente: propia

4.1.2.4. Coeficiente de cultivo (kc)

Los valores de kc se seleccionaron de los documentos de la FAO, según el tipo de cultivo que se encuentran en la zona de estudio, estos se encuentran contemplados en la tabla 9, los cuales se usaron para la calibración y el modelo general en WEAP puesto que este es un factor que influye directamente en las necesidades hídricas del suelo.

Tabla 9. Coeficientes de cultivo

Cultivo	Kc (medio)
Café	1,1
Mango	0,82
Cítricos	0,65

Guayaba	0,82
Mora	1,05
Granadilla	0,82
Tomate	1,15

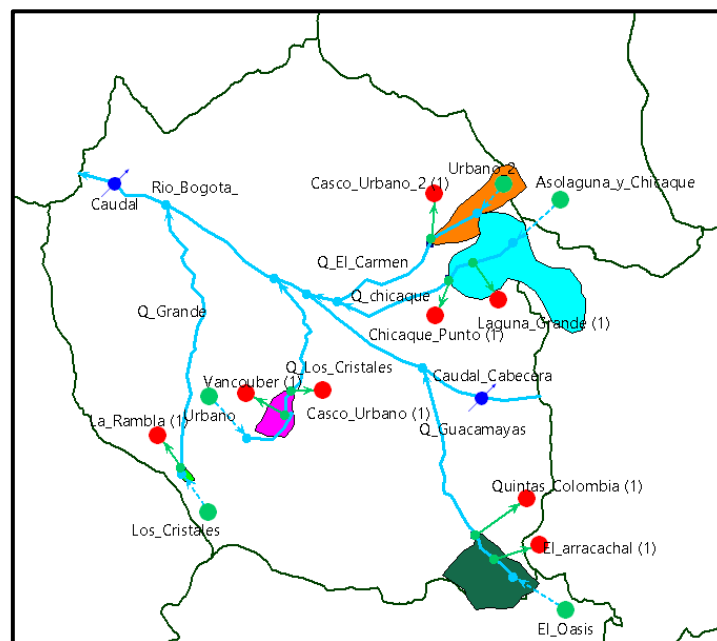
Fuente: [22]

4.2. FASE 2: GENERACIÓN DE ESCENARIOS

4.2.1. Generalidades WEAP

A continuación se expone el resultado de la modelación hídrica realizada en WEAP, con el fin de evidenciar el proyecto estructuralmente terminado.

Imagen 9. Estructura del modelo hídrico en WEAP



Fuente: propia

Tabla 10. Componentes de las herramientas WEAP

Componente WEAP	Descripción	Cantidad
Sitios de demanda	Representa gráficamente las bocatamos situadas en el municipio de San Antonio del Tequendama	8



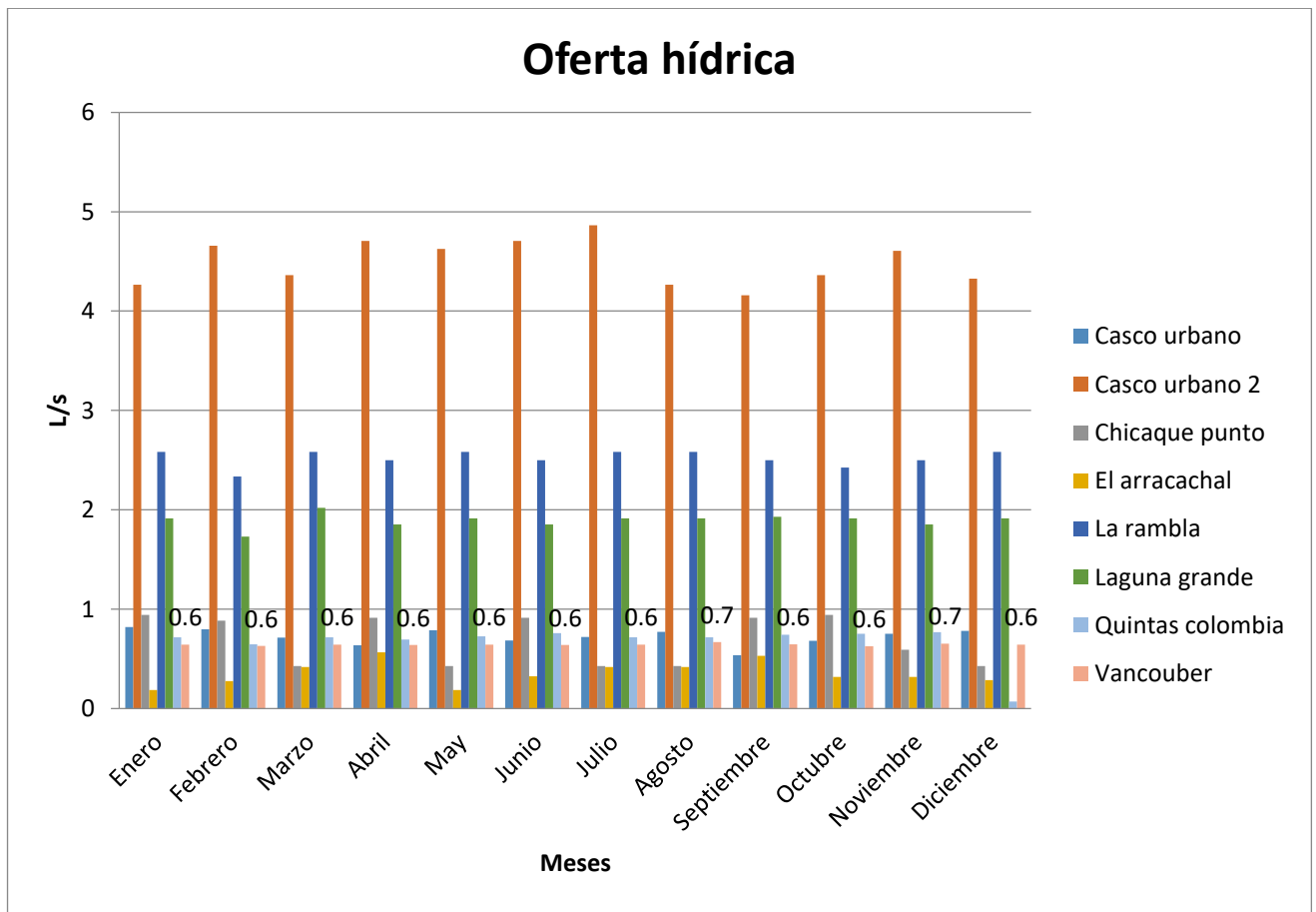
Unidad Hidrología (Catchments)	Es considerada gráficamente como la cuenca	5
Río	Representa las fuentes hídricas presentes en el área de estudio	6
Conducciones	Simboliza las extracciones de cada fuente hídrica dirigida hacia cada sitio de demanda	8

Fuente: propia

4.2.2. Estimación de la oferta realizada por WEAP

La estimación de la oferta se generó a partir de los datos anteriormente mencionados en el numeral 3.1.1 siendo estos procesados por WEAP, arrojando los resultados expuestos en la gráfica 1, donde se observa la oferta hídrica mensual estimada por cada cuenca hidrológica delimitada obtenidos con el modelo WEAP, así mismo se observa que la mayor oferta está generándose en el casco urbano 2, mientras que el arracachal muestra la oferta hídrica más baja.

Gráfica 1. Resultados de la oferta



Fuente: propia

4.2.2.1. Información climatológica

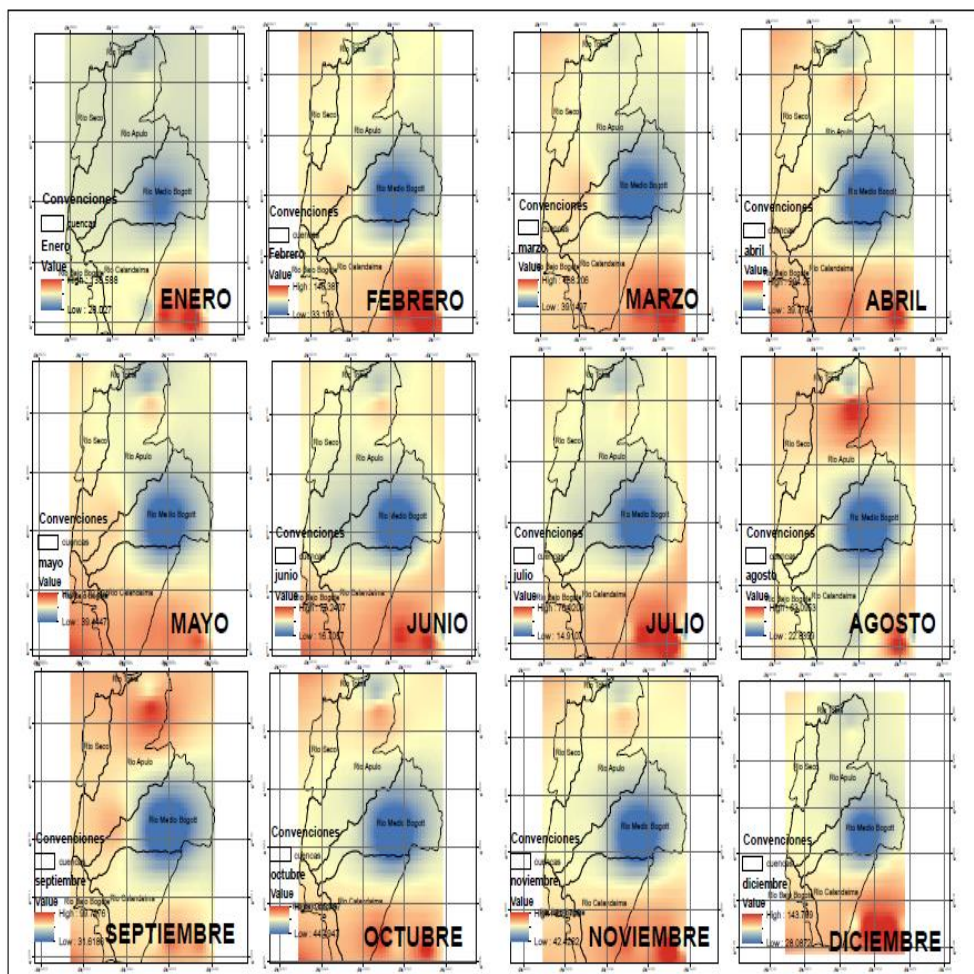
La información climatológica obtenida se organizó en bases de datos separadas, según el parámetro climático, año, mes y el valor correspondiente a cada variable sin título alguno, estas bases de datos fueron clasificadas para cada bocatoma, las cuales se incluyeron directamente en la carpeta de WEAP "areas" con el fin de que el programa pudiera usar los datos para la modelación; de no realizar una buena clasificación de datos WEAP no generará la vinculación de datos.

4.2.2.2. Interpolación de temperatura y precipitación

La interpolación se realizó para datos de precipitación y temperatura. En la imagen 10 se muestran las precipitaciones mensuales multianuales para el escenario de referencia, de acuerdo a los mapas correspondientes a cada mes, se evidencia que

las menores precipitaciones se evidencian alrededor del municipio San Antonio del Tequendama con el color azul lo cual corresponde a la cuenca media del río Bogotá, mientras que las mayores precipitaciones corresponden a los municipios aledaños pertenecientes a la cuenca baja del río Bogotá.

Imagen 10. Interpolación de la precipitación mensual para el escenario de referencia

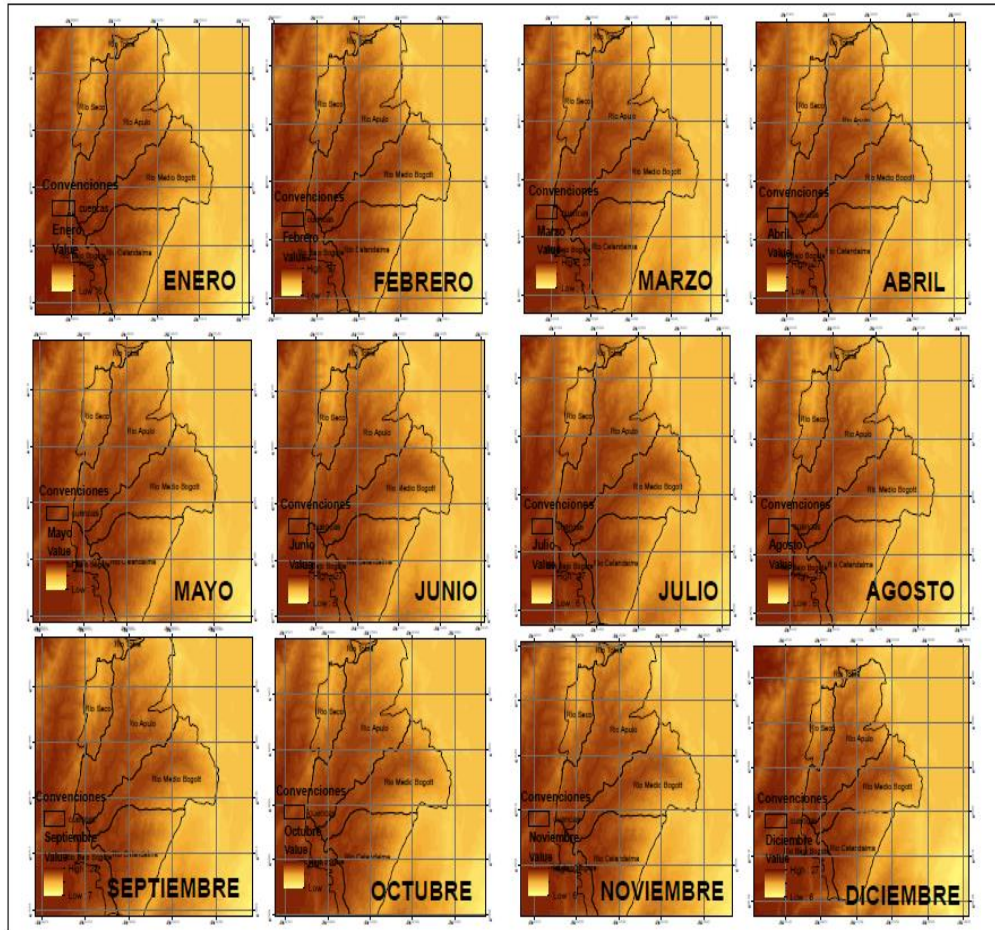


Fuente: propia

En la imagen 11 se evidencia el comportamiento de la temperatura para el escenario de referencia en el cual se observan que las mayores temperaturas están en la parte izquierda, es decir en la cuenca baja del río Bogotá, los valores máximos son de color marrón con temperaturas de 27°C y valores mínimos de 6°C hacia la parte derecha de la provincia del Tequendama, acogiendo de tal manera el Municipio de San Antonio del Tequendama.



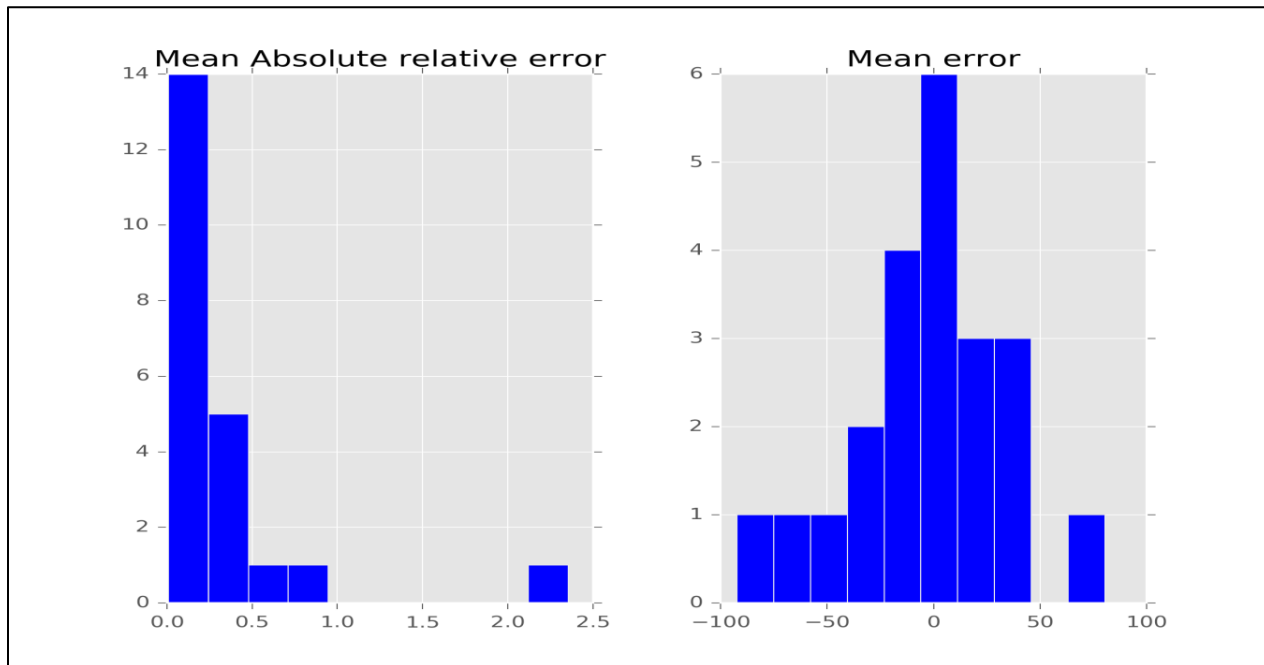
Imagen 11. Interpolación de temperatura mensual para el escenario de referencia



Fuente: propia

En la imagen 12 se muestra a modo de ejemplo el margen de error del mes de Junio, en donde en la parte izquierda el histograma de error relativo absoluto, en donde 14 de los datos ingresados al modelo presentan un porcentaje de error cercano a cero, lo cual se considera como un resultado bueno, debido a que la mayoría de los datos están correlacionados. No obstante el histograma de la derecha corresponde al error medio.

Imagen 12. Margen de error de las interpolaciones python



Fuente: propia

4.2.2.3. Red hidrológica existente en la cuenca

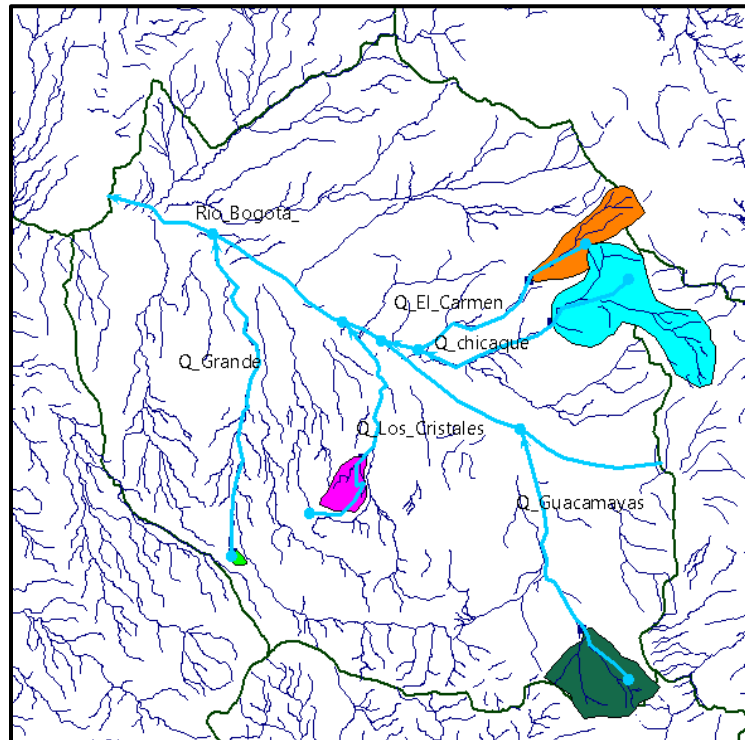
Se estableció la estructura hidrológica de la zona de estudio clasificando las fuentes hídricas (imagen 13), junto con datos de series históricas de caudales, estipulando así el caudal de ingreso al modelo sobre el río Bogotá, el cual representa la cantidad hídrica antes de pasar por los sitios de captación y un valor de salida que hace referencia al caudal final (imagen 13), a partir de esta delimitación se ubicaron las unidades hidrológicas que posteriormente se convertirán gráficamente en la representación hidrológica de la cuenca.

- **Establecer ríos y quebradas correspondientes a la zona de estudio**

En este caso se trazaron los ríos principales y las quebradas correspondientes a las subcuencas utilizadas (ver tabla 11).



Imagen 13. Delimitación de ríos en WEAP



Fuente: propia

Tabla 11. Nombres de ríos usados en WEAP

Ríos
Rio_Bogota_
Q_Grande
Q_El_Carmen
Q_Los_Cristales
Q_Chicaque
Q_Guacamayas

Fuente: propia

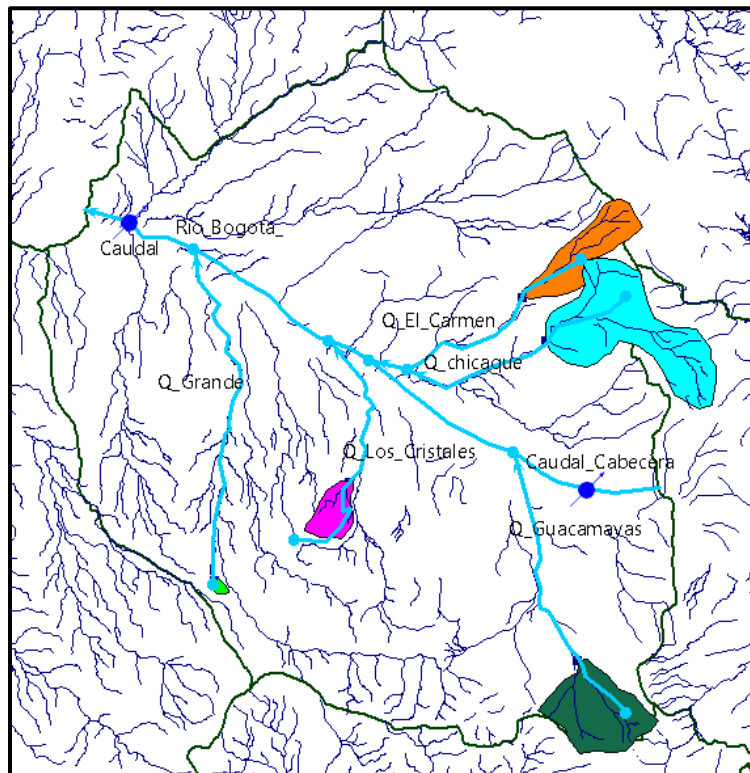
4.2.2.4. Información hidrológica

La información hidrológica en WEAP es representada por una unidad hidrológica, generada a partir de la delimitación de ríos y subcuencas los cuales dan lugar a la ubicación de las unidades hidrológicas que requieren la entrada de los datos climatológicos tales como precipitación, temperatura, humedad, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud, y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante), esto para establecer la demanda.

- **Delimitación de unidades hidrológicas en SIG**

Las subcuencas se deben delimitar en ciertos puntos de interés hidrológico en donde se desea conocer exactamente el valor del caudal en un momento determinado en el modelo (imagen 14), ya sea para la calibración o la simulación de escenarios futuros [24], siendo así se establecieron las siguientes unidades hidrológicas con sus respectivas latitudes y áreas.

Imagen 14. Ubicación de entrada y salida de caudales en WEAP



Fuente: propia

Tabla 12. Área de las cuencas en km^2

Áreas (km^2)	
Urbano_2	12.81
Asolaguna_y_Chicaque	3.66
El oasis	2.77
Urbano	0.88



Los_Cristales	0.63
---------------	------

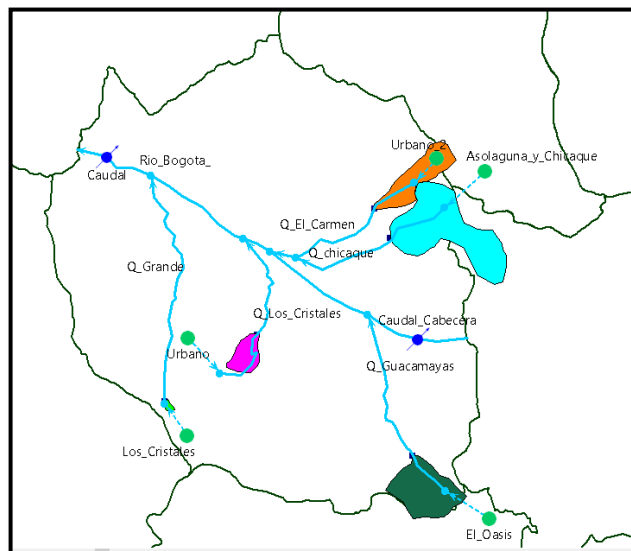
Fuente: propia

Tabla 13. Latitud de las cuencas

Latitud	
Urbano_2	4.3658601
Asolaguna_y_Chicaque	4.3643948
El oasis	4.3341328
Urbano	4.3518593
Los_Cristales	4.342791

Fuente: propia

Imagen 15. Ubicación espacial de las unidades hidrológicas



Fuente: propia

Los datos utilizados para la generación de las unidades hidrológicas además de áreas y latitudes fueron: el clima correspondiente a datos de temperatura, precipitación, humedad, viento, fracciones de nubosidad, punto de congelación, punto de fusión, límite inferior del albedo, límite superior del albedo, datos de albedo, nivel inicial y medidor de acumulación de nieve, cabe aclarar que de los datos climáticos solicitados por el modelo WEAP solo fueron manipulados

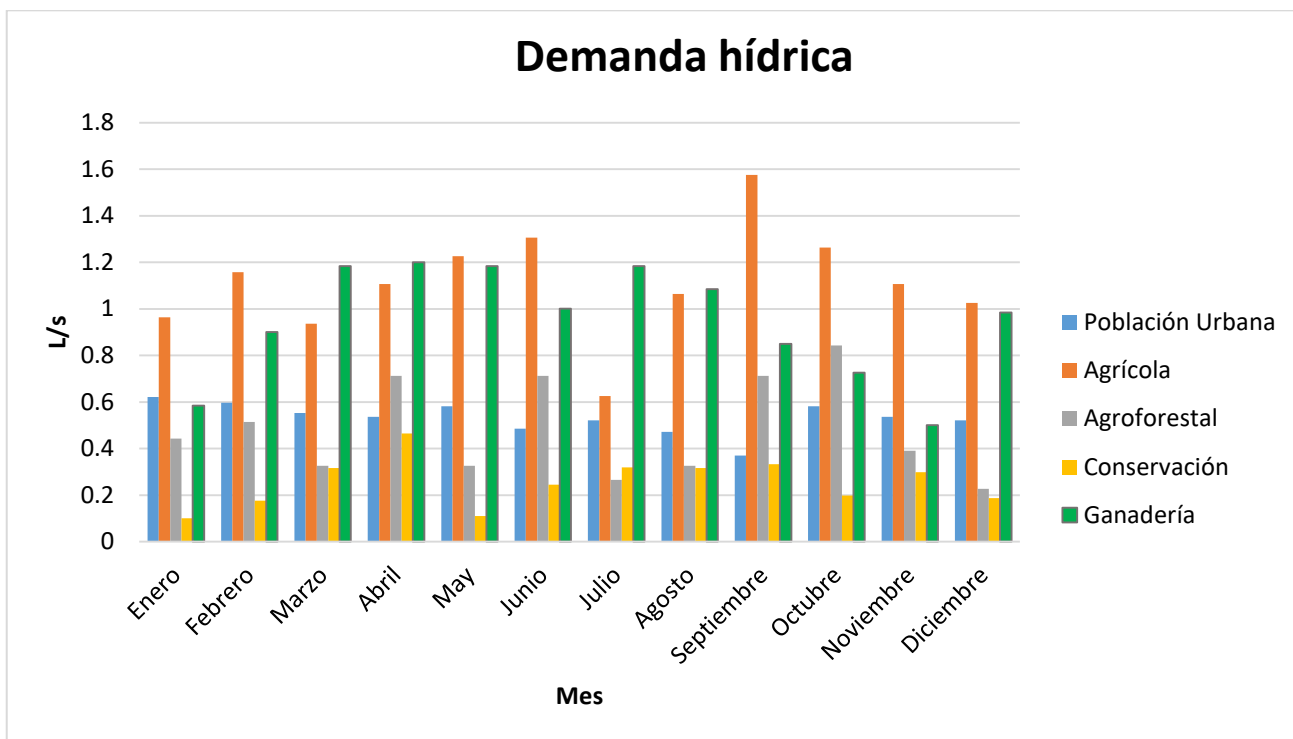
temperatura, precipitación y humedad los demás fueron datos generados automáticamente por el programa.

Para hacer la correcta conexión entre las unidades hidrológicas y los ríos fue necesario usar la herramienta de escorrentía/infiltración.

4.2.3. Estimación de la demanda realizada por WEAP

En la gráfica 2 se observan los resultados de la demanda obtenidos con el modelo, en esta gráfica se pueden observar las cuencas hidrológicas así como la cantidad de agua por mes que se requiere en la zona de estudio según su uso, dichos resultados fueron obtenidos a partir del desarrollo de los pasos contemplados en los ítems que se encuentran a continuación.

Gráfica 2. Demanda de agua del área de estudio



Fuente: propia

4.2.3.1. Análisis de la demanda de agua

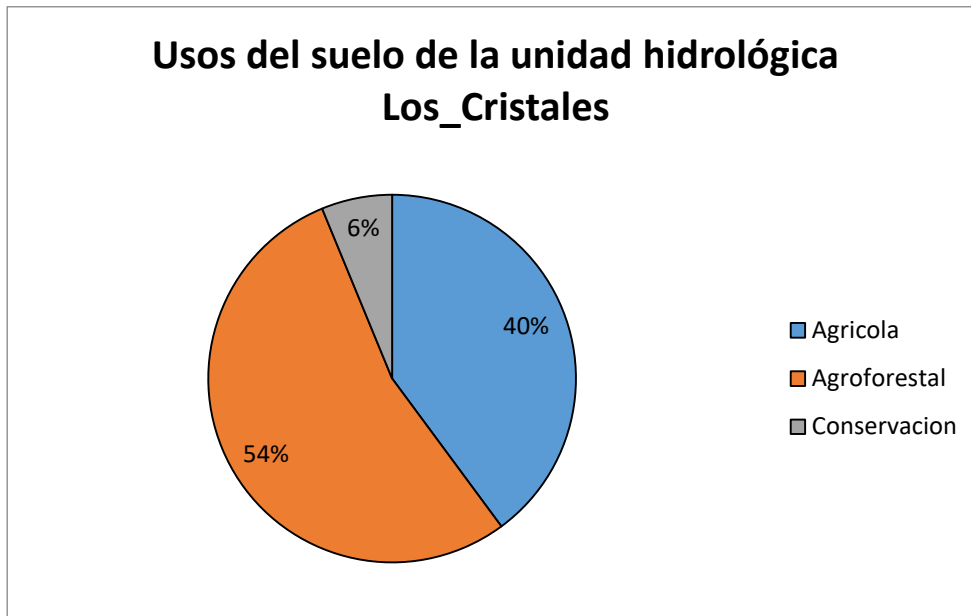
- **Definición de usos de suelo**

La distribución porcentual de los usos del suelo de cada unidad hidrológica se



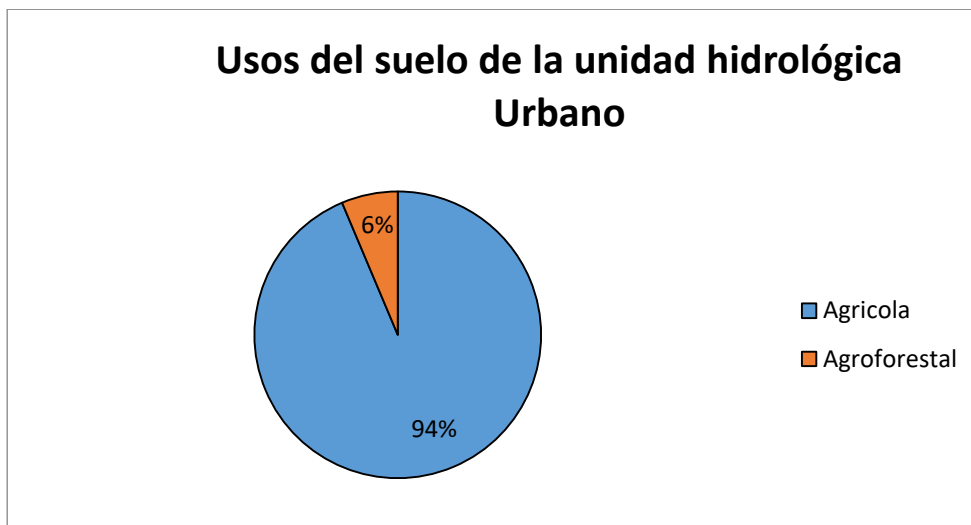
puede observar en las siguientes gráficas cada una perteneciente a una unidad hidrológica diferente. Cabe aclarar que las gráficas fueron exportadas del programa de modelación WEAP a Excel.

Gráfica 3. Distribución porcentual de uso del suelo de Los Cristales



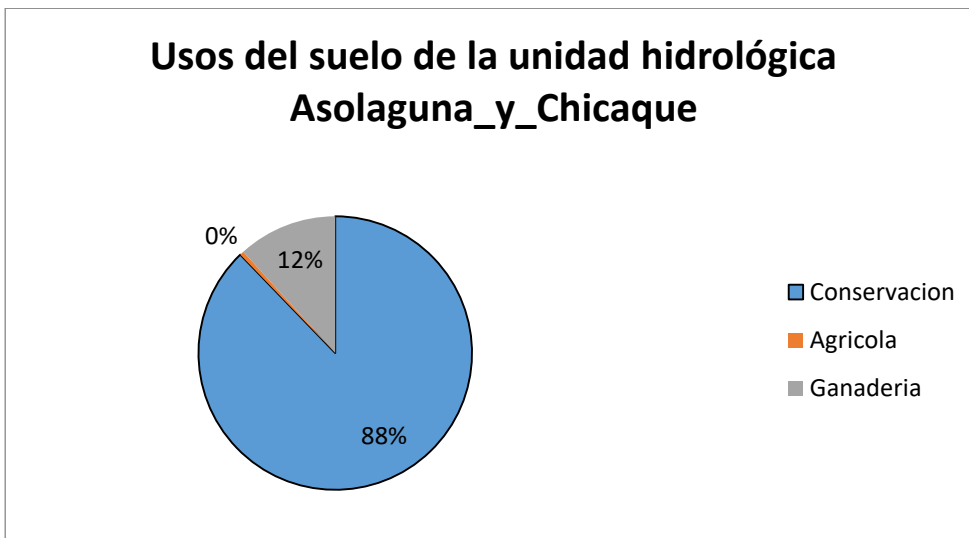
Fuente: propia

Gráfica 4. Distribución porcentual de los usos del suelo de Urbano



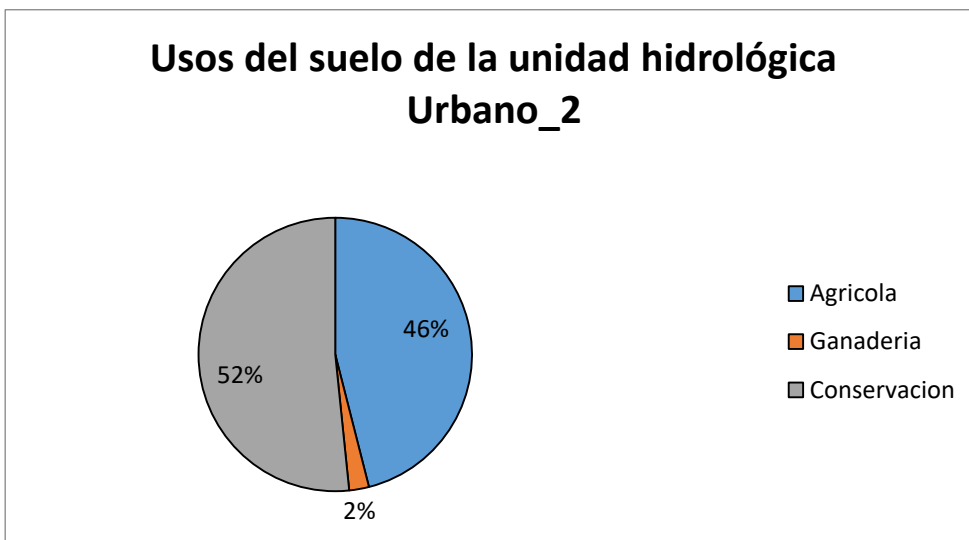
Fuente: propia

Gráfica 5. Distribución porcentual de los usos del suelo de Asolaguna y Chicaque



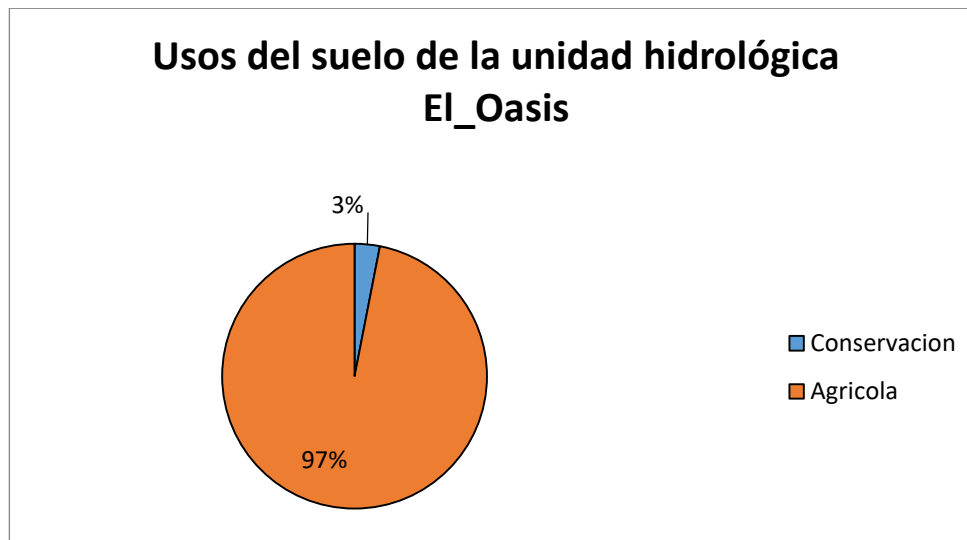
Fuente: propia

Gráfica 6. Distribución porcentual de los usos del suelo de Urbano 2



Fuente: propia

Gráfica 7. Distribución porcentual de los usos del suelo del Oasis



Fuente: propia

A partir de los usos del suelo anteriormente presentados de cada unidad hidrológica WEAP se dispone a generar una estimación de valores de evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas y flujo base.

- **Demanda urbana**

En este caso, se muestran las conducciones de las fuentes hídricas las cuales el modelo pide agregar volumen de caudal que suministra el río al sitio de demanda al cual es conducido, esto se realizó teniendo en cuenta la información de las bocatomas o sitios de captación referentes al municipio de San Antonio del Tequendama, cuyos datos fueron proporcionados por la alcaldía municipal, de allí se obtuvo la ubicación de las bocatomas y el caudal concedido por cada bocatoma (ver tabla 14).

Tabla 14. Sitio de demanda

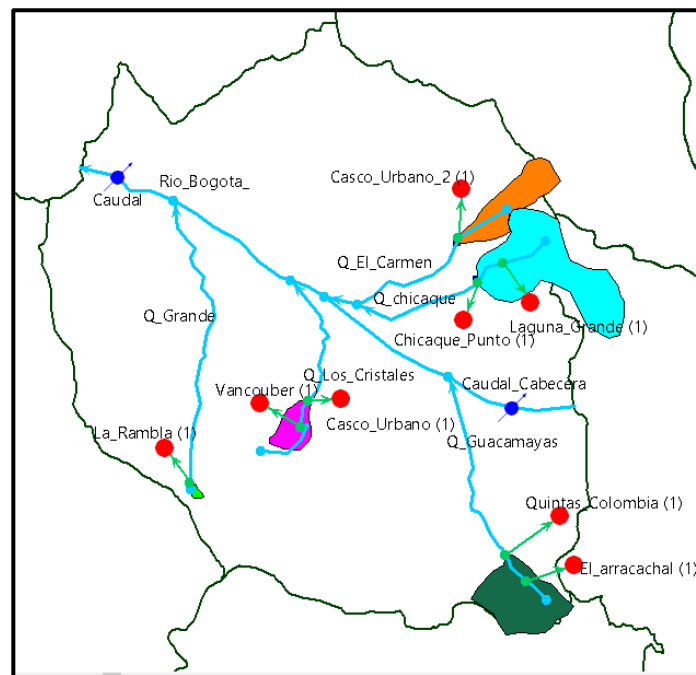
Sitios de demanda
Casco Urbano 2
Casco Urbano
Laguna Grande
Quintas Colombia

El Arracachal
La Rambla
Vancouver
Chicaque

Fuente: propia

En la imagen 16 se observa la creación de los sitios de demanda, de esta forma se generó un resultado equivalente a la cantidad de agua extraída que haría parte del ciclo hidrológico simulado.

Imagen 16. Ubicación espacial de los sitios de demanda



Fuente: propia

4.3. FASE 3: GRADO DE DESABASTECIMIENTO

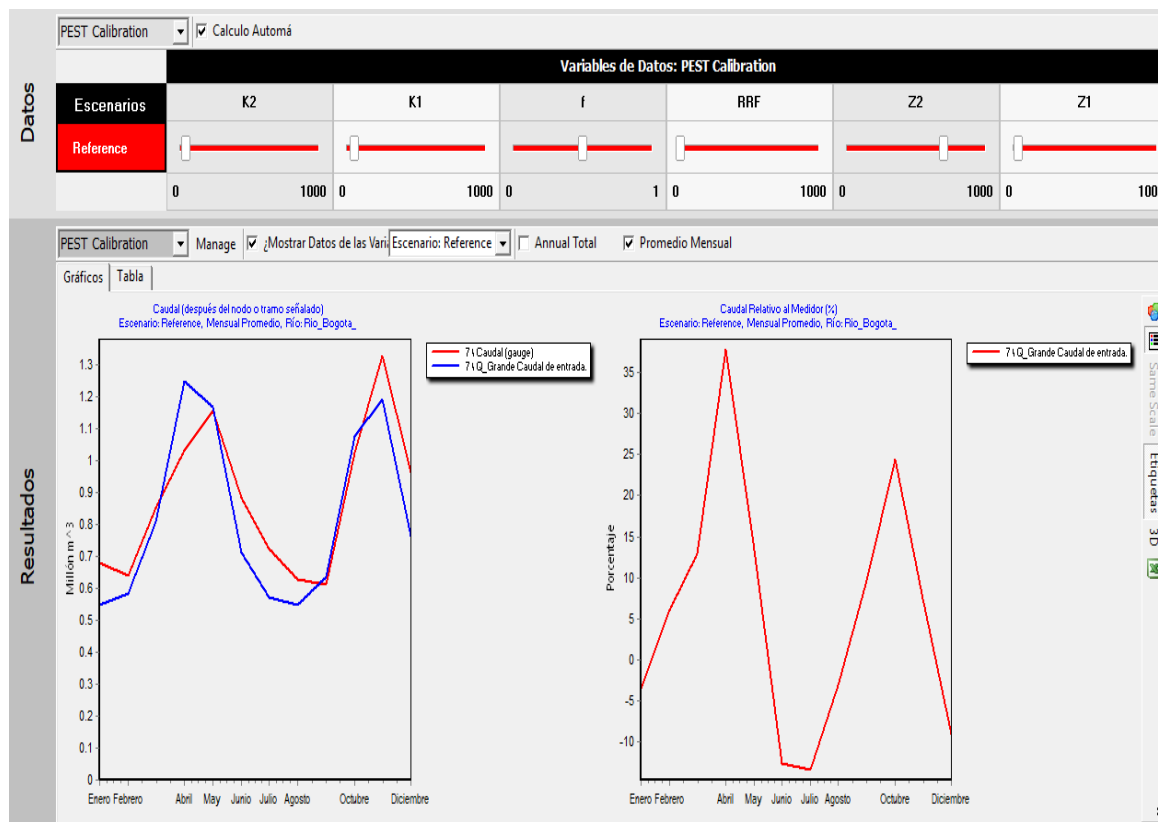
4.3.1. Calibración

Para la calibración del modelo fue necesario tener todos los datos completos de oferta y demanda con los cuales se van a trabajar, y así mismo enlazar cada uno de los supuestos clave con las diferentes cuencas, sin embargo cabe resaltar que la calibración (imagen 17) se hizo solamente para el escenario de referencia.

Es importante tener en cuenta que la calibración sirve para la generación del modelo verificando la calidad de los datos que fueron ingresados durante el desarrollo del modelo en la etapa de establecimiento de la oferta y la demanda.

Adicionalmente, los datos de caudales fueron ingresados para poder ser comparados con los datos generados por el modelo y realizar las calibraciones, obteniendo así que los datos sean semejantes con la realidad logrando una mayor veracidad al proyecto.

Imagen 17. Calibración en WEAP para escenario de referencia



Fuente: propia

Tabla 15. Valores de calibración del modelo para el escenario de referencia

Calibración	
Z1	40
K1	60



K2	50
f	0.5
Z2	700
RRF	10

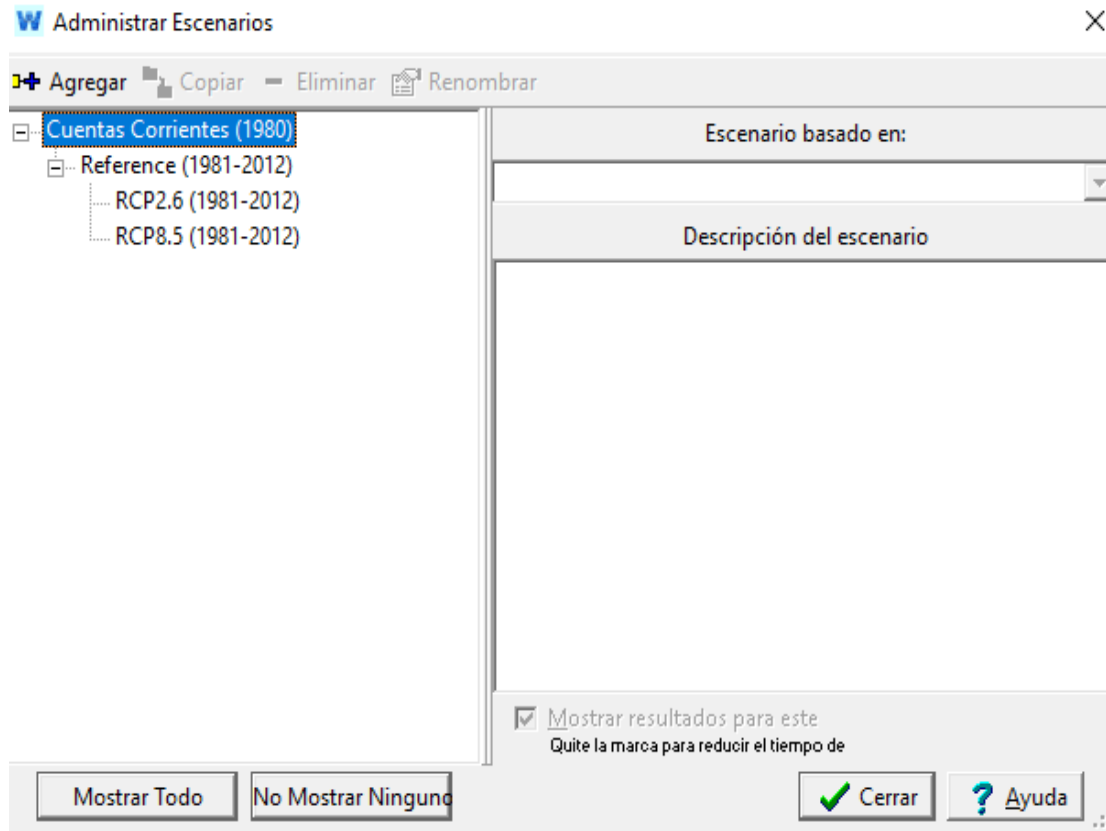
Fuente: propia

Los resultados de esta calibración son aparentemente buenos debido a la semejanza de datos entre lo simulado por el programa de modelación WEAP (representado con la línea de color rojo) y lo real (representado gráficamente con el color azul).

4.3.2. Generación de escenarios futuros

A partir de la información establecida en el marco del presente proyecto, se desarrollaron dos escenarios que corresponden a las dos proyecciones futuras con RCP 2.6 y RPC 8.5, los cuales reemplazan los valores de temperatura y precipitación establecidos desde un principio en el escenario de referencia, creando así los escenarios futuros del modelo; fue necesario realizar las interpolaciones correspondientes para la zona antes de ingresar los datos de las proyecciones de RCP, por otra parte los parámetros de área, coeficiente de cultivo, humedad y consumo se mantuvieron constantes tanto en el modelo de referencia como en los escenarios futuros representando de tal forma la oferta generada por el modelo, así mismo se llevó a cabo el ingreso de datos de proyecciones poblacionales correspondientes a 50 años representando la demanda.

Imagen 18. Elaboración de los escenarios



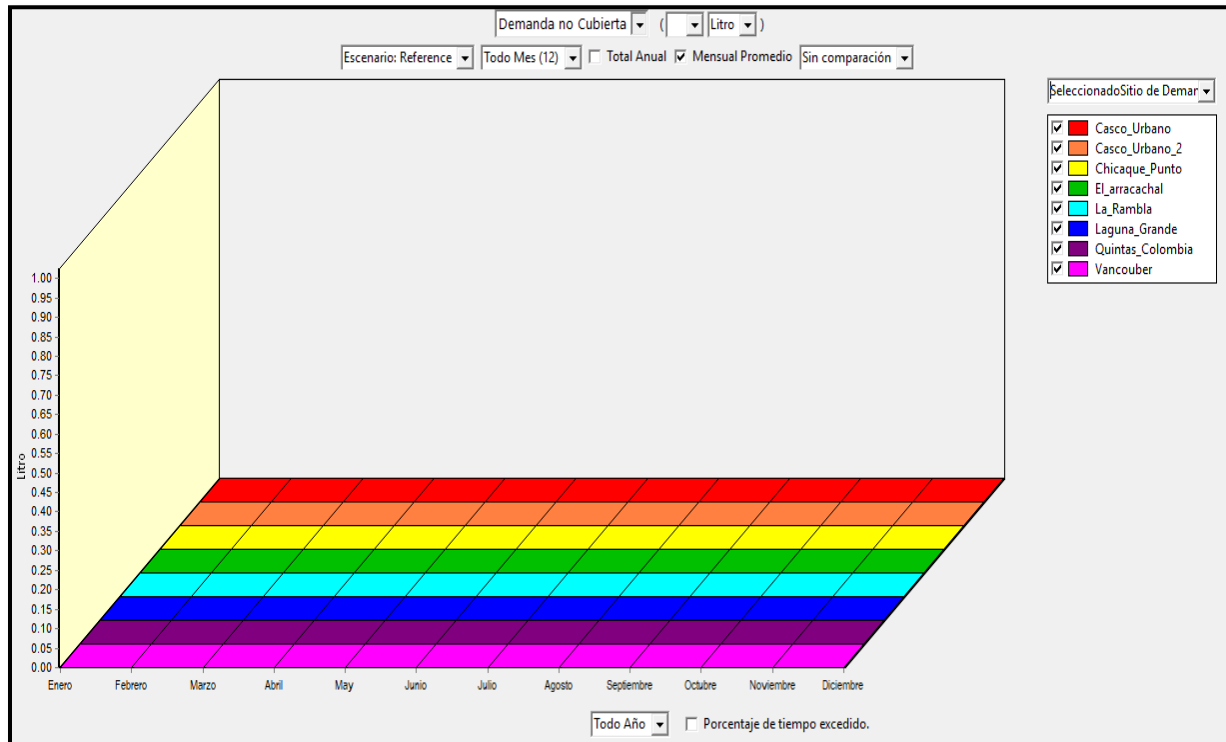
Fuente: propia

4.3.3. Evaluación del grado de desabastecimiento

Para determinar el grado de desabastecimiento fue necesario observar la demanda no cubierta y el porcentaje de cobertura los cuales representan la satisfacción hídrica del municipio en cuanto a uso del suelo y poblacionales.

Como se observa en la imagen 19, la demanda no cubierta es de 0 litros, por lo cual se evidencia que el suministro de agua es suficiente teniendo en cuenta diferentes aspectos como lo son la temperatura, la precipitación, la humedad relativa, las latitudes, los usos del suelo y la población, siendo estos los principales factores que determinan la oferta y demanda hídrica del ciclo hidrológico del escenario de referencia en el modelo WEAP.

Imagen 19. Demanda no cubierta para el escenario de referencia



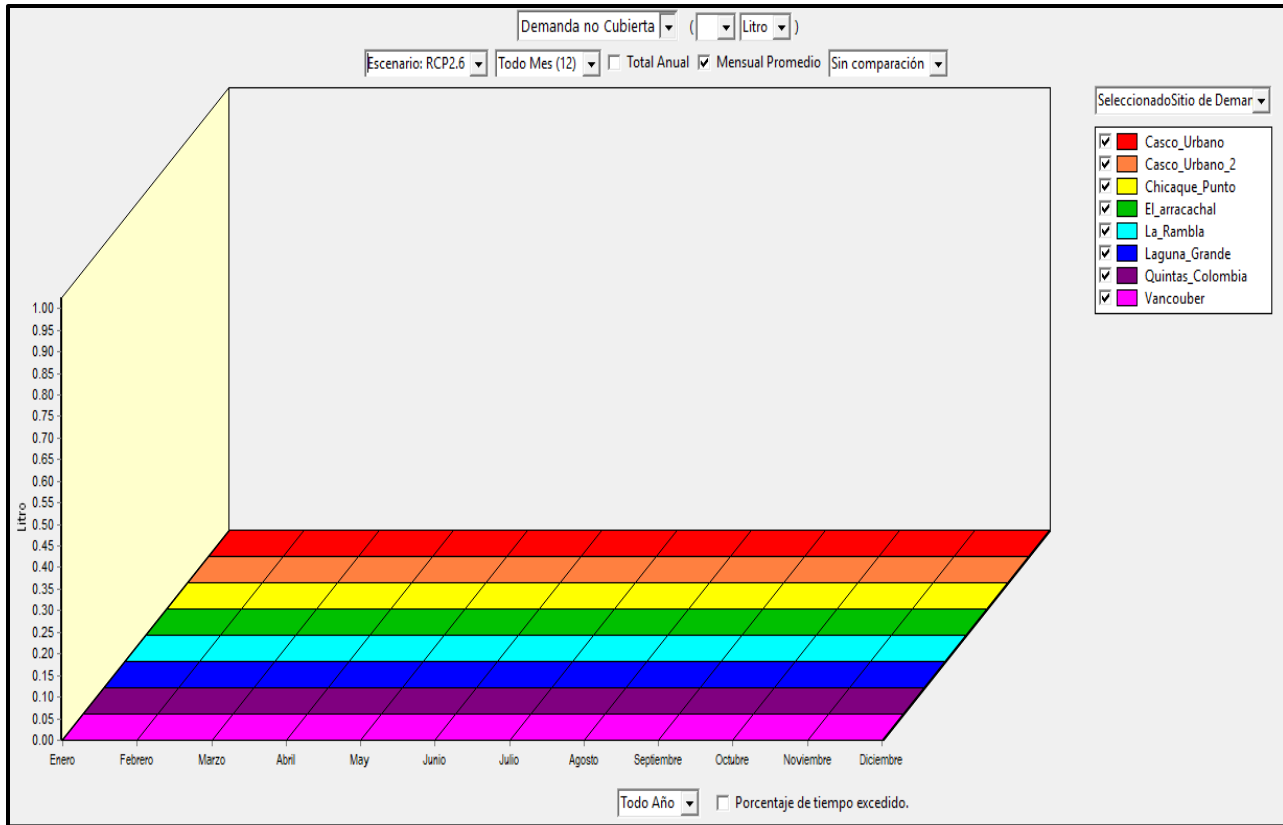
Fuente: propia

En las imágenes 20 y 21, la demanda no cubierta es de 0 litros, por lo cual se evidencia que el suministro de agua es suficiente teniendo en cuenta diferentes aspectos como lo son la temperatura, la precipitación, los usos del suelo, la población, la humedad relativa y las latitudes, siendo estas dos últimas variables las que determinan la cantidad de calor que recibe una superficie variando así la oferta, sin embargo, en comparación del escenario de referencia con los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 se muestra una variabilidad en temperatura, precipitación y proyección poblacional determinando la demanda todo esto para un periodo de 50 años, así mismo se muestra que las variables de humedad relativa, latitudes, entre otras, se mantuvieron constantes.

El escenario RCP 2.6 (imagen 20) observado en la demanda no cubierta da a entender que el suministro hídrico no se verá afectado en este escenario a pesar de tener un cambio en las variables de temperatura y precipitación, igualmente que el escenario RCP 8.5 (imagen 21), el cual representa mayor radiación presente en la atmósfera. De tal manera se evidencia que en ambos extremos la variabilidad en cuanto a temperatura y precipitación para los diferentes escenarios tiende a mantenerse estable en cuanto al recurso hídrico.

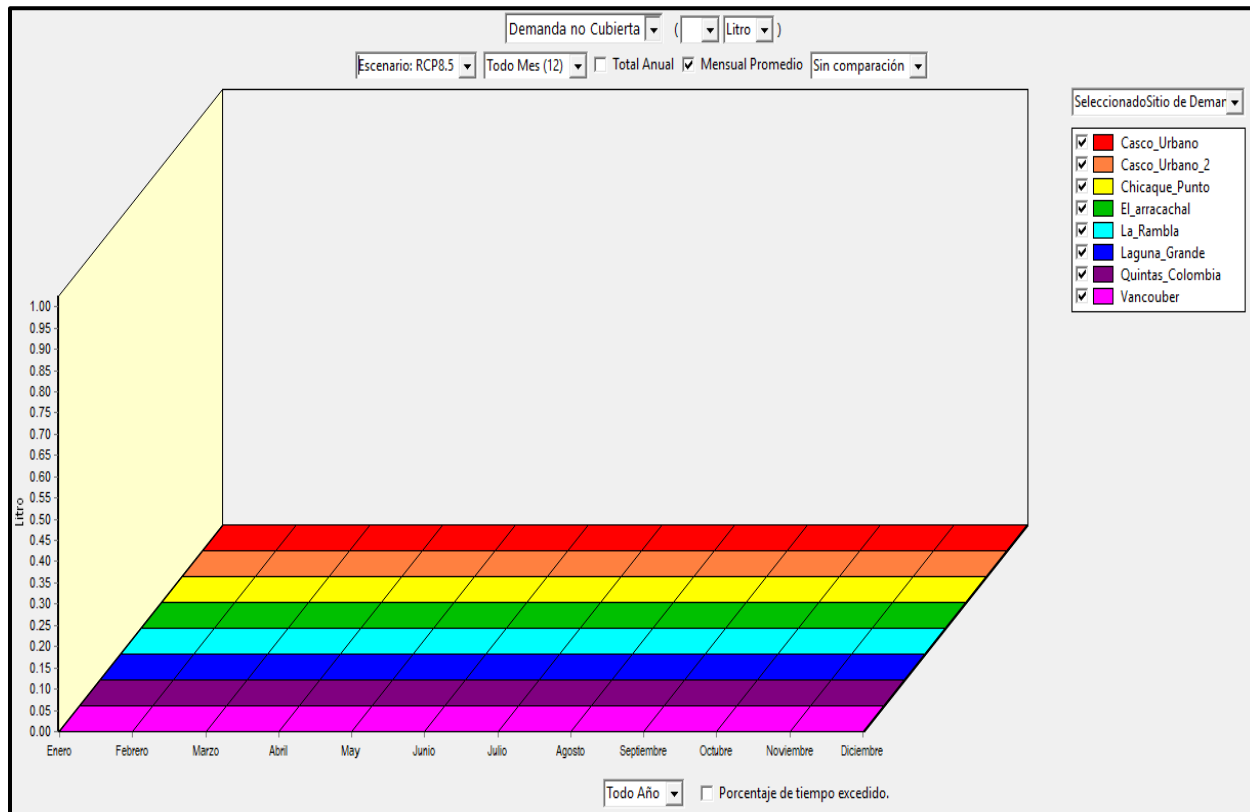


Imagen 20. Demanda no cubierta para el escenario RCP 2.6



Fuente: propia

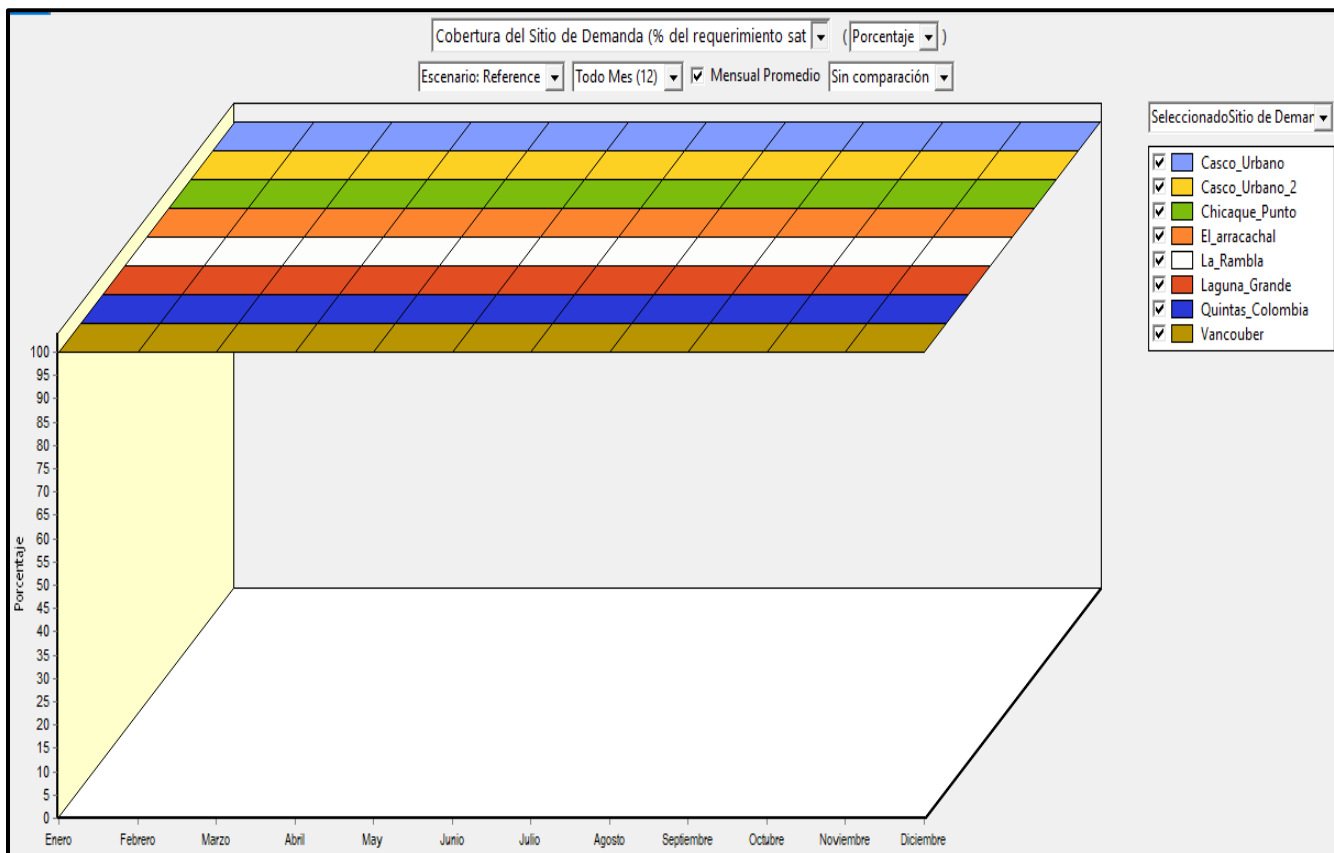
Imagen 21. Demanda no cubierta para el escenario RCP 8.5



Fuente: propia

Para ratificar que la demanda no cubierta es nula, se opta por generar un resultado de cobertura, el cual muestra si efectivamente se está cumpliendo con el requerimiento hídrico solicitado por la demanda. Como se puede observar en las imágenes 22, 23 y 24 para cada uno de los escenarios se alcanza un 100 % de demanda no cubierta, es decir, que independientemente de las condiciones climáticas con las que se encuentre cada escenario, la temperatura, precipitación y población (siendo estas las principales variables de cada uno de los escenarios), no afecta notoriamente el recurso hídrico.

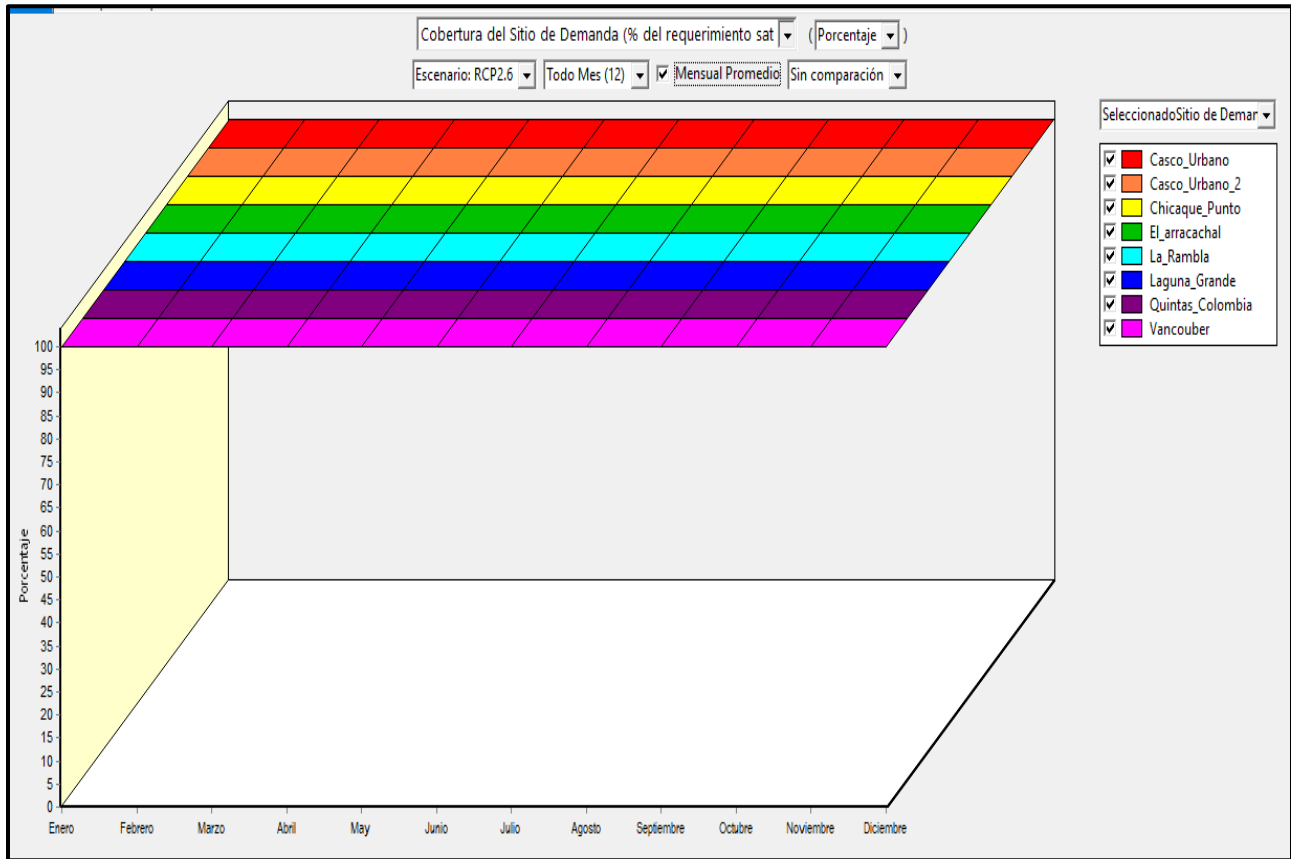
Imagen 22. Porcentaje de cobertura para el escenario de referencia (condiciones actuales)



Fuente: propia

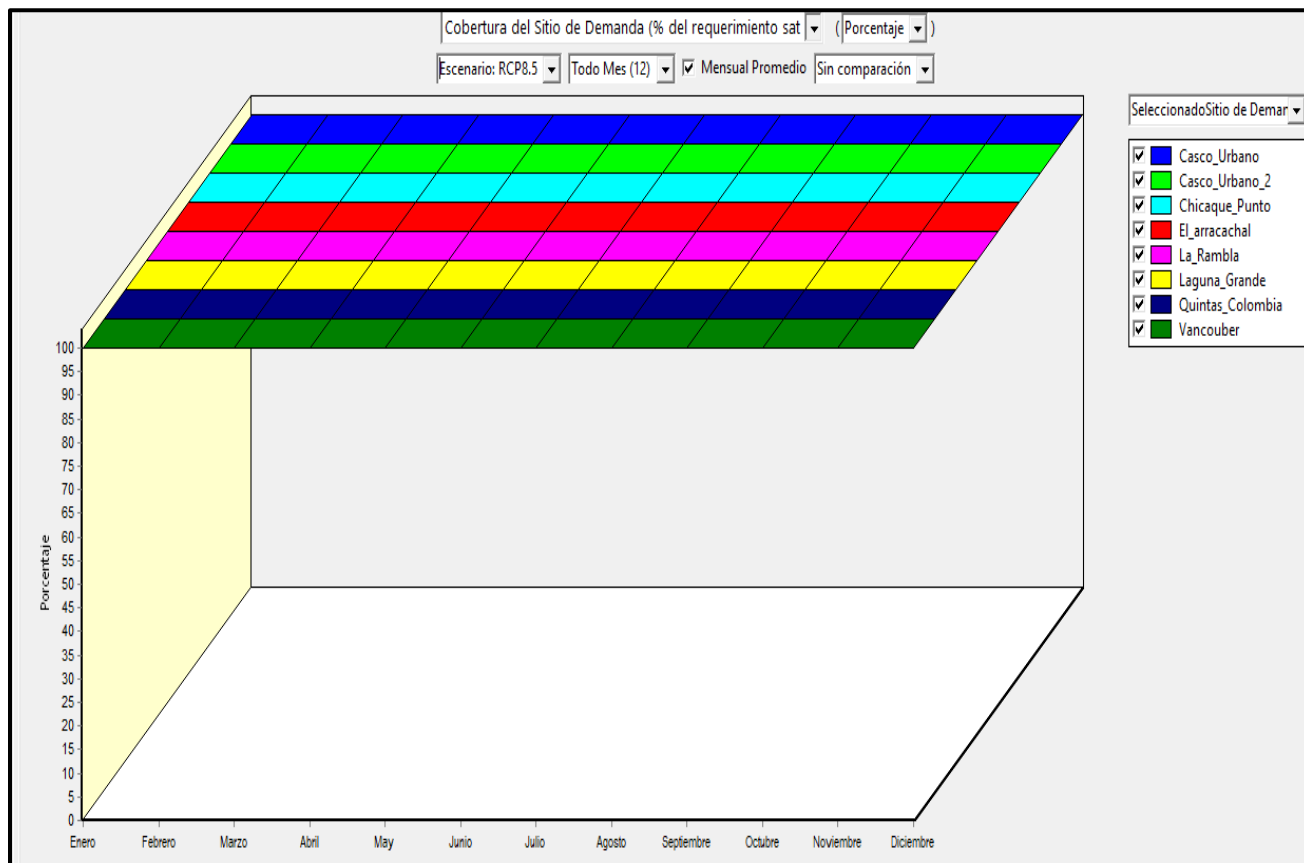


Imagen 23. Porcentaje de cobertura para el escenario de RCP 2.6



Fuente: propia

Imagen 24. Porcentaje de cobertura para el escenario de RCP 8.5



Fuente: propia

5. ALTERNATIVAS

Para culminar con los objetivos planteados se mostrará una alternativa generalizada independientemente de que no se haya evidenciado un grado de desabastecimiento, esta alternativas servirá como apoyo para mantener la conservación del recurso hídrico del municipio.

Es importante que el municipio de San Antonio del Tequendama promocióne campañas de uso racional del agua en cuanto a estilos de vida ya sea en la hora de aseo personal, en el lavado de prendas o aseo domestico entre otros que impliquen el uso del recurso hídrico de manera moderada y suficiente para cumplir con actividad a realizar, de tal forma que se pueda concientizar a la población sobre el problema a afrontar si no se protege el recurso hídrico.

En cuanto a la mejora de riego dentro de las prácticas agrícolas, es recomendable implementar tecnologías que ayuden a evitar el gasto injustificado del recurso hídrico ya

que como se identificó previamente este sector económico abarca un área significativa en el municipio. Posteriormente, se expone como una posible alternativa la mejora de la captación del recurso hídrico, no solo para llevar un control de agua sino también para asegurar la conservación del recurso hídrico.

Sin embargo, las alternativas anteriormente expuestas deben contar con un estudio ambiental y apoyo gubernamental, en donde se deberá tener en cuenta las opiniones y necesidades de los habitantes del municipio, con el fin de garantizar el acceso al agua potable ya que esta representa un derecho fundamental y una necesidad básica.

6. CONCLUSIONES

Se concluye que la oferta hídrica hallada (con promedio anual de 2.41 L/s) a partir de la información recolectada, aparentemente suplente el consumo generado por el municipio de San Antonio del Tequendama demostrándose con el caudal promedio actual del municipio de 2.01 L/s, sin embargo al realizar la prueba de homogeneidad y observar que los datos eran óptimos para ser usados en el presente estudio, se identificó que puede existir un margen de error puesto que las estaciones meteorológicas y limnigráficas utilizadas se encontraban muy distantes a la zona de estudio, lo que indica que los datos de estas estaciones pueden no mostrar con exactitud lo que está ocurriendo en el área de interés, independientemente de la interpolación y transposición de caudal realizados en el estudio habrá una diferencia de datos significativa.

Los datos recolectados del uso del suelo no representan el consumo de agua que adquieren en el área determinada ya que no se contó con datos de demanda hídrica específico por subcuenca, por lo cual se hizo una generalización del consumo basados en la unidad hidrológica y el porcentaje de área propuesto ya sea para ganadería, agricultura, conservación y área agroforestal, por lo cual se puede decir que estos datos no son totalmente exactos ya que no especifican el consumo por uso del suelo en cada unidad hidrológica. Adicionalmente, la población se obtuvo por número de suscriptores la cual se tuvo que realizar un cálculo que llevo a la determinación de un número aproximado de usuarios por vivienda, de tal manera que se generó un sesgo en la información recolectada. Sin embargo, los resultados de la demanda (promedio anual 0.6 L/s) evidencian que esta se encuentra por debajo de la oferta estimada previamente, lo que indica que aparentemente se suplen las necesidades hídricas del municipio.

Los resultados obtenidos a partir de la generación de escenarios RCP 2.6, RCP 8.5 y de referencia, por medio de la demanda no cubierta y el porcentaje de cobertura mostraron que en el municipio de San Antonio del Tequendama no existe un grado de desabastecimiento ya que los valores de demanda no cubierta son de 0 litros, lo cual indica que se está cumpliendo la relación oferta-demanda desarrollada durante el proyecto en un 100%, lo que concluye que el municipio cuenta con el recurso hídrico suficiente para suplir las demandas poblacionales y de uso del suelo.

Cabe resaltar que las captaciones ilegales presentes en el municipio no se tuvieron en



cuenta ya que no se contaba con información suficiente para incluirlo en el modelo, lo cual puede generar un margen de error, por lo tanto se recomienda realizar un estudio posterior que incluya este tipo de captaciones para evidenciar si el municipio sigue cumpliendo con sus necesidades hídricas demandadas.

7. IMPACTO SOCIAL

La importancia de este trabajo a nivel social radica en la problemática actual del uso del recurso hídrico en las diferentes actividades dependientes de este junto con los diferentes cambios climáticos, por lo cual con este documento se impulsa a generar conocimiento e información que ayuden a mejorar las condiciones de manejo hídrico en el municipio de San Antonio del Tequendama, lo cual constituye uno de los principales desafíos a nivel departamental.

La baja disponibilidad de agua genera problemas de abastecimiento y racionamiento del recurso teniendo efectos nocivos sobre la calidad de vida de la población y sus actividades económicas. Por otro lado, el exceso de agua genera inundaciones, deslizamientos y otras problemáticas que afectan la oferta hídrica debido a contaminación con sedimentos de las fuentes de agua o causando destrucción de los sistemas de abastecimiento y distribución, causando afectación directa en la calidad y disponibilidad del mismo para los diferentes usuarios, es por esto que este proyecto busca aportar bases que permitan incorporar el riesgo climático en la planificación del desarrollo sectorial y territorial y que son elementos fundamentales en el planteamiento de las medidas de adaptación y mitigación establecidas en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

Adicionalmente, los resultados obtenidos permiten a la comunidad hacer uso del recurso hídrico conociendo las condiciones de disponibilidad hídrica que influyen en el desarrollo de sus actividades económicas y sociales, por otro lado, los escenarios propuestos en este documento impulsaran a mantener las condiciones actuales de la cuenca aportando la futura realización de proyectos que ayuden a la conservación, reduciendo así el riesgo de afectación por eventos hidrológicos extremos como las sequías.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. d. a. y. m. ambiente, "Agenda ambiental municipal (sigam) san antonio del tequendama 2015", 2015.
- [2] A. S. A. d. Tequendama-Cundinamarca, «Nuestro municipio,» 2014. [En línea]. Available: http://www.sanantoniodeltequendama-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml. [Último acceso: 4 Marzo 2017].
- [3] H. C. M. d. S. A. d. Tequendama, «Acuerdo No. 08 de 2012,» 2012. [En línea]. Available: <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/sanantoniodeltequendamacundinamarcapd2012-2015.pdf>. [Último acceso: 18 01 2018].
- [4] H. C. d. S. A. d. Tequendama, «“POR EL CUAL SE ADOPTA EL PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL 2012 -2015 “CONSTRUYENDO UN FUTURO MEJOR”,» 2012. [En línea]. Available: http://sanantoniodeltequendama-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/37653531356632393136663338336361/PDM_ACUERDO_08_DE_2012.pdf. [Último acceso: 18 01 2018].
- [5] O. Pérez-Maqueo , C. Delfín, A. Fregoso , E. Cotler y M. Equihua, «Modelo de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos,» Gaceta Ecológica, nº 78, pp. 68-54, 2006.
- [6] E. A. D. Calle, «PROTOCOLO PARA LA MODELACIÓN MATEMATICA DE PROCESOS HIDROLOGICOS,» 10 2000. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Efrain_Dominguez_Calle/publication/235983737_PROTOCOLO_PARA_LA_MODELACION_MATEMATICA_DE_PROCESOS_HIDROLOGICOS/links/00b49515300557741f000000/PROTOCOLO-PARA-LA-MODELACION-MATEMATICA-DE-PROCESOS-HIDROLOGICOS.pdf. [Último acceso: 03 2017].
- [7] M. A. Moreira y I. M. Greca, «MODELOS MENTALES Y MODELOS CONCEPTUALES EN LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LAS CIENCIAS,» [En línea]. Available: <https://www.if.ufrgs.br/~moreira/modelosmentalesymodelosconceptuales.pdf>. [Último acceso: 03 2017].
- [8] V. T. CHOW, «Handbook of Applied Hydrology a Compendium of Water-Resources Technology,» McGraw-Hill, 1964.
- [9] C. d. Colombia, «Ley No.1523,» 24 04 2012. [En línea]. Available: <http://www.ifrc.org/docs/idrl/1057ES.pdf>. [Último acceso: 03 2017].
- [10] IDEAM, «Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico,» 2010. [En línea]. Available:

<http://www.ideam.gov.co/web/agua/ivh>. [Último acceso: 03 2017].

- [11] IDEAM, «Tiempo y clima,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>. [Último acceso: 03 2017].
- [12] C. Garcia, «Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia,» Revista de ingeniería, nº 36, pp. 60-64, 2012.
- [13] Posada, «La adaptación al cambio climático en Colombia,» Revista de ingeniería, pp. 74-80, 2007.
- [14] M. Á. Cañon, «Generación de campos hidrometeorológicos coherentes con base en el principio de interpolación óptima de Kolmogorov,» Bogotá, 2015.
- [15] J. Cedrón , V. Landa y J. Robles, «Primera Ley de la Termodinámica: Procesos Isotérmicos y Procesos Isobáricos,» Pontificia universidad católica del Perú, 2011. [En línea]. Available: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/132-primera-ley-de-la-termodinamica-procesos-isotermicos-y-procesos-isobaricos.html>. [Último acceso: 01 2018].
- [16] S. E. Institute, «Water evaluation and planning (WEAP),» 2018. [En línea]. Available: <http://www.weap21.org/index.asp?action=201>. [Último acceso: 03 2017].
- [17] R. Semana, «Escenarios del cambio climatico 2011-2100,» 08 04 2015. [En línea]. Available: <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/escenarios-cambio-climatico-2011-2100-que-para-que-sirven/32812>. [Último acceso: 02 2018].
- [18] B. i. d. Desarrollo, «Trayectorias de concentración representativas (RCP),» 2015. [En línea]. Available: <https://sector.iadb.org/es/adaptacion/pages/trayectorias-de-concentración-representativas-rcp>. [Último acceso: 01 2018].
- [19] IDEAM, «Catalogo de estaciones,» [En línea]. Available: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu/data>. [Último acceso: 13 06 2017].
- [20] U. M. d. S. Simón, Material de apoyo didático para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología, 2009.
- [21] DANE, «Metodología Proyecciones de Población y Estudios Demográficos,» 2005. [En línea]. Available: http://www.banrep.gov.co/economia/pli/Proyecciones_poblacion.pdf. [Último acceso: 10 03 2018].
- [22] O. d. l. n. u. p. l. a. y. l. agricultura, «Evapotranspiración del cultivo,» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>. [Último acceso: 11 2017].
- [23] C. Leguizamon, «EVALUACIÓN DE LAS GARANTÍAS DE SUMINISTRO DEL RECURSO



HÍDRICO EN LA PROVINCIA DEL TEQUENDAMA POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA WEAP,» Bogotá, 2016.

- [24] S. E. Institute, «MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE RECURSOS HÍDRICOS CON EL MODELO WEAP,» 04 2009. [En línea]. Available: http://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf. [Último acceso: 01 2018].
- [25] P. S. E.S.P, Acueductos vinculados a la empresa de servicion públicos de San Antonio del Tequendama, San Antonio del Tequendama.
- [26] IDEAM, «Instituto de Hidrologia, Meteorologia y estudios ambientales,» [En línea]. Available: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departament al.pdf.. [Último acceso: 8 Abril 2018].