

**IMPORTANCIA DEL MODELO WEAP EN LA EVALUACIÓN DE LA  
DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL  
SAN JUAN DE PASTO  
2019**

**IMPORTANCIA DEL MODELO WEAP EN LA EVALUACIÓN DE LA  
DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO**

**KAREN VANESSA LÓPEZ INSUASTY**

Estudiante

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera  
Agroforestal – Modalidad Monografía**

Asesor de Monografía:

**PAULO CESAR CABRERA MONCAYO I.AF**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL**

**SAN JUAN DE PASTO**

**2019**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. PROBLEMA .....	8
2.1. Planteamiento del problema.....	8
2.2. Descripción del problema.....	8
2.3. Formulación del problema .....	9
3. JUSTIFICACIÓN.....	10
4. OBJETIVOS.....	11
4.1. Objetivo general .....	11
4.2. Objetivos específicos.....	11
5. MARCO TEÓRICO.....	12
5.1. Aumento poblacional, disponibilidad y acceso al agua: situación mundial.....	12
5.2. Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH) .....	12
5.3. Clima .....	13
5.4. Cambio climático y Variabilidad climática.....	14
5.5. Gases de Efecto Invernadero (GEI) .....	14
5.5.1. Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	16
5.5.2. Metano (CH <sub>4</sub> ).....	16
5.5.3. Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O).....	16
5.5.4. Compuestos halogenados.....	16
5.5.5. Monóxido de carbono (CO).....	17
5.6. Forzamiento radiactivo.....	17
5.7. Escenarios de cambio climático .....	17
5.8. Modelo .....	21
5.9. Modelación.....	21
5.10. Modelo Hidrológico .....	22
5.11. Modelo Water Evaluation and Planning System (WEAP).....	22
6. MARCO CONTEXTUAL.....	26
7. MARCO NORMATIVO .....	35
7.1. Cambio climático: Contexto internacional.....	35
7.2. Cambio climático: Contexto nacional .....	35

7.3. Normativa del recurso hídrico.....	37
8. METODOLOGÍA.....	40
8.1. Proceso metodológico (Matriz de Vester).....	41
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
9.1. Identificación de la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la evaluación de escenarios del cambio climático en relación con la disponibilidad del recurso hídrico .....	44
9.1.1. Estudios de caso de aplicación del modelo WEAP .....	44
9.2. Planteamiento de alternativas para la gestión integral del recurso hídrico de un estudio de caso: “Modelación hidrológica de la cuenca del río Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos” .....	75
9.2.1. Estudio de caso: “Modelación hidrológica de la cuenca del río Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos”	75
10. CONCLUSIONES .....	90
11. BIBLIOGRAFÍA .....	91

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Los cuatro escenarios de Cambio Climático (RCP) .....	20
Tabla 2. Matriz de Vester de las problemáticas presentes en la cuenca del Rio Bache.....	80
Tabla 3. Resultados del total de los activos y pasivos .....	81

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Antecedentes internacionales .....	27
Cuadro 2. Antecedentes nacionales .....	30
Cuadro 3. Antecedentes locales .....	33
Cuadro 4. Normativa a nivel internacional sobre el Cambio Climático .....	35
Cuadro 5. Marco Normativo Colombiano enfocado al recurso hídrico 1974- 2007 .....	38
Cuadro 6. Matriz de ponderación Vester .....	41
Cuadro 7. Categoría de la causalidad y valoración .....	42
Cuadro 8. Escenarios definidos en la cuenca del Rio Bache .....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de las emisiones de CO2 por sector para el año 2000 .....	15
Figura 2. Forzamiento radiactivo de las vías representativas de concentración (Escenarios RCP).....	20
Figura 3. Países que han firmado y ratificado el Protocolo de Kioto .....	36
Figura 4. Ubicación de los problemas en los cuadrantes .....	43
Figura 5. Mapa de localización Municipio de Santa María - Huila.....	76
Figura 6. Mapa de localización del Rio Bache .....	76
Figura 7. Almacenamiento del agua .....	86

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Clasificación de las problemáticas encontradas en la cuenca Rio Baché.....	82
---	----

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el agua es un recurso muy esencial en la vida de los seres vivos, pero también es vulnerable ya que es un recurso finito por esta razón surge la necesidad de determinar la disponibilidad del recurso hídrico que habrá en un futuro (Zuleta,2013). Una manera para investigar el estado en el que se encuentra dicho recurso es por medio de la modelación hidrológica porque es una herramienta muy útil con la cual se puede representar y predecir el comportamiento del agua frente algunas condiciones climáticas.

Los modelos hidrológicos ayudan en el análisis de los efectos del cambio climático sobre el balance hídrico, ya que con la información proporcionada se puede determinar las estrategias para la gestión del recurso hídrico tanto en la actualidad como en el futuro. “Los estudios hidrológicos son un requisito primordial para la formulación y desarrollo de proyectos sostenibles para comprender la posible variación del recurso hídrico ante la variabilidad climática, cambios en el uso del suelo, el crecimiento poblacional y económico, etc.” (Zuleta, 2013, p.14). La modelación hidrológica se basa en la aplicación de diversas herramientas, en este trabajo se destaca la importancia del modelo de planificación Water Evaluation and Planning System (WEAP), la mejor aplicación de este modelo se presenta en el análisis de escenarios ya que permite variar las condiciones a futuro respecto a las de un escenario base analizando tanto de la demanda, la distribución, la disponibilidad del recurso hídrico y brinda la posibilidad de simular la respuesta hidrológica frente a los cambios en las condiciones climáticas (Cedillo, 2012).

En este trabajo se realizó una recopilación de los principales estudios en los cuales se ha aplicado el modelo WEAP como una herramienta para la gestión del recurso hídrico. Teniendo como objetivo analizar la importancia de la aplicación de este software ya que su uso ha sido de gran ayuda para la toma de decisiones en la planificación y gestión integrada del recurso hídrico porque permite a los analistas hacer simulaciones de posibles escenarios futuros considerando la viabilidad de los proyectos y las investigaciones que se enfocan en el aprovechamiento del recurso hídrico frente al cambio climático.

## **2. PROBLEMA**

### **2.1.Planteamiento del problema**

Reducción del recurso hídrico como consecuencia del cambio climático

### **2.2.Descripción del problema**

La escasez del recurso hídrico es un problema que tiene gran importancia en este siglo, una de las principales causas es el aumento en su demanda debido al incremento acelerado de la población, por otro lado, se encuentra el calentamiento global que está alterando el ciclo hidrológico a nivel mundial (Flores, 2014).

Para poder comprender los efectos que tiene el cambio climático frente al recurso hídrico se puede empezar manifestando que debido algunas acciones del ser humano que conllevan a la sobreexplotación, la contaminación y el agotamiento de los recursos naturales, se están generando cambios en el clima a nivel mundial (Chávez, 2012), trayendo como consecuencias la disminución del abastecimiento de agua para consumo humano y para riego, aumento de los periodos de sequía, la degradación en la calidad de agua, inundaciones repentinas debido a las lluvias intensas, el derretimiento de los glaciares, entre otros (Flores y Navarro,2016).

La mayoría de los efectos que está generando el cambio climático tiene principalmente repercusiones en la vida del ser humano, pues es posible que en un futuro la calidad de vida de la población humana se vea afectada, pues puede existir una crisis alimentaria debido a la dificultad de cultivar en terrenos áridos, al incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación (Aquino, Artiga y Menjívar, 2010). Se espera que en los próximos 20 años las dos terceras partes de la humanidad se verán afectados por la falta del recurso hídrico, por lo tanto, se podría decir que este recurso se encuentra en crisis tanto en calidad como en cantidad y su escasez no solo perjudicaría el bienestar de las personas, sino que también pondría en peligro los ecosistemas terrestres y acuáticos que se encuentran en el planeta Tierra (CARE, 2012).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se puede decir que el agua es uno de los recursos potencialmente más vulnerables a los efectos del cambio climático, por lo cual en Colombia es necesario tomar conciencia sobre la presión insostenible que se está ejerciendo sobre las fuentes hídricas generada principalmente por el incremento poblacional y el cambio

climático por ello la demanda de agua es mucho mayor. Existen diferentes herramientas que permiten determinar en qué grado el recurso hídrico está siendo afectado por dichos efectos, entre ellas está el modelo WEAP en el cual se pueden simular diferentes escenarios considerando datos históricos de diferentes variables climáticas. Con esta información se puede obtener una proyección sobre la oferta de agua y con base en esos resultados se considerarían estrategias para la gestión integral del recurso hídrico que ayuden en la preservación del agua en las cuencas, logrando también fomentar la participación de las comunidades para que conozcan el estado actual y las posibles variaciones sobre la disponibilidad de dicho recurso (López, Manzano y Ramírez, 2017).

### **2.3. Formulación del problema**

¿Cuál es la importancia de la aplicación del modelo WEAP para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico frente al cambio climático?

### 3. JUSTIFICACIÓN

El agua es fuente de vida debido a su función en los procesos biológicos y a su importancia como elemento fundamental de desarrollo (Monforte y Cantú, 2009), por esta razón se hace mucho hincapié en la protección y preservación de este recurso, sin embargo, el ser humano aún sigue contaminando las fuentes hídricas o atentando en contra de las reservas forestales que ayudan a preservar las corrientes de agua. (Martin, 2015). Por esto se recomienda que las comunidades tanto a nivel global, nacional y local se unan para considerar alternativas para la gestión del recurso hídrico con las cuales se puede evitar los riesgos de la escasez de agua y la degradación del medio ambiente (CARE,2012).

El propósito de este trabajo es dar a conocer la importancia que tiene la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la simulación de los posibles cambios que se pueden presentar en un futuro debido al cambio climático enfocándose principalmente en la disponibilidad del agua para lo cual se hace necesario la predicción mediante escenarios de cambio climático con los cuales se puede analizar la oferta y la demanda tanto en la actualidad como en el transcurso de los años teniendo en cuenta algunos factores que pueden causar la disminución del recurso hídrico.

WEAP, es un software que permite combinar las características que tienen los modelos hidrológicos y los modelos de planificación y así poder representar la escorrentía, las condiciones climáticas y el funcionamiento que se presenta en una cuenca por parte del recurso hídrico (Mena, 2009). Se puede usar en diferentes escalas ya sea desde pequeñas áreas de estudio hasta extensas zonas, y sirve para la modelación tanto de planificación como de distribución del recurso hídrico (Domingo,2013).

El presente estudio nace a raíz de la necesidad de conocer como se ha transformado el ciclo hidrológico de una cuenca debido a las actividades del ser humano y a los efectos del cambio climático los cuales han generado variaciones en algunas variables climáticas. El presente trabajo es importante porque presenta los estudios más relevantes en los cuales se ha utilizado el modelo WEAP el cual es una herramienta muy útil para la planificación y la gestión de una cuenca y la preservación de las fuentes hídricas.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1.Objetivo general**

Analizar la importancia del modelo hidrológico WEAP en la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico frente al cambio climático.

### **4.2.Objetivos específicos**

- Identificar la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la evaluación de escenarios del cambio climático (RCP) en relación con la disponibilidad del recurso hídrico.
- Plantear alternativas para la gestión integral del recurso hídrico de un estudio de caso: “Modelación hidrológica de la cuenca del río Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos”

## **5. MARCO TEÓRICO**

### **5.1. Aumento poblacional, disponibilidad y acceso al agua: situación mundial**

La totalidad del recurso hídrico que se encuentra en el planeta Tierra cubre el 70% de la superficie terrestre, pero esta cantidad se divide en agua salada con un valor de 97,5% mientras que sólo el 2.5% es agua dulce, sin embargo, de dicho volumen de agua dulce aproximadamente el 70% se encuentra en los casquetes polares y el 30% se presenta en la humedad del suelo o en profundos acuíferos subterráneos inaccesibles. Esto quiere decir que menos del 1% de agua dulce del mundo puede ser aprovechada por el ser humano para su consumo. Además, la distribución de agua es desigual porque el 40 % de la proporción continental corresponde a las zonas áridas y semiáridas solo reciben el 2% de la escorrentía, sin embargo, en la mayoría de las regiones el problema no es tanto la falta de agua dulce sino el mal manejo y la mala gestión en la distribución de este recurso (Cedillo, 2012).

El crecimiento de la población a nivel mundial se ha ido incrementando desde 1980 al 2010 el aumento fue de 1.6 millones de habitantes anuales y se proyecta que para el año 2050 la cifra se aproxime a los 9 millones de habitantes, por ello se puede decir que el incremento poblacional es del 400% en los países desarrollados, por esta razón aumento la sobreexplotación de los recursos naturales porque hay mayor demanda de los bienes y servicios degradando constantemente el medio ambiente. Una posible consecuencia que se puede presentar por dicha degradación es la poca disponibilidad del recurso hídrico, por ejemplo a nivel mundial el acceso al agua potable en el año 2010 la cobertura era del 87% de la población pero al no contar con este recurso el cual es vital para los seres vivos se pueden presentar limitaciones por la aparición de enfermedades por lo tanto este un tema muy importante que se debe tratar en las agendas políticas y ambientales porque esta situación que ocurre a nivel global es una problemática que se está presentando a menor escala en los diferentes lugares del mundo (Cedillo, 2012).

### **5.2. Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH)**

La gestión integral del recurso hídrico (GIRH) surgió en respuesta a la “crisis del agua” generada por la presión sobre el recurso hídrico debido principalmente por el aumento de la demanda de agua, la contaminación y el incremento de la población. Sin embargo, la principal causa de este problema es la gestión deficiente e ineficaz que se presenta sobre el recurso hídrico (Ministerio de medio ambiente y desarrollo territorial (MAVDT), 2010).

La gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) cuyo objetivo es impulsar la planificación y el manejo adecuado del agua garantizando la sostenibilidad y la conservación de dicho recurso, además se busca brindar asistencia con las herramientas y recursos necesarios para la toma de decisiones y el desarrollo de políticas públicas que sostengan el uso y manejo adecuado del agua teniendo en cuenta la parte social y económica de cada región (Pimiento y Restrepo,2018).

Con base en lo mencionado anteriormente en Colombia se estableció en el año 2010 la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico con la cual se proponen los objetivos, las metas, las estrategias y algunas líneas de acción para realizar el manejo integral del recurso hídrico, poniendo un antecedente en la legislación ambiental del país. Esta Política va de la mano con el Plan Hídrico Nacional para así garantizar su cumplimiento mediante la realización de los diferentes programas, proyectos y actividades propuestos en este plan (Pimiento y Restrepo,2018).

### **5.3.Clima**

Para abordar el concepto de cambio climático es necesario en primer lugar comprender el concepto de clima. Este es la medida de la media estadística de las variables que componen al sistema climático como son la temperatura, el viento, la precipitación, la radiación solar y la humedad, en un cierto periodo de tiempo superior a 30 años a nivel local y global, dicha medida está relacionada con el tiempo, el cual es el conjunto de los fenómenos atmosféricos en un determinado momento. Por lo tanto, se puede decir que el clima es la estadística del tiempo (Pimiento y Restrepo,2018).

Al respecto el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (1997) afirma que el sistema climático consta principalmente de los siguientes componentes: la atmósfera, los océanos, la biosfera terrestre y marina, la criosfera (hielo marino, cubierta de nieve, glaciares de montaña) y la superficie terrestre, los cuales interactúan entre sí y como resultado se obtiene el clima de la superficie del planeta, dichas interacciones surgen a través de flujos de energía ya sea mediante el intercambio de agua o el flujo de gases como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>). Pero la energía solar es la fuerza conductora más importante de los movimientos de la atmósfera y el océano porque esta influye en el flujo de calor y agua y en la actividad biológica.

#### **5.4.Cambio climático y Variabilidad climática**

La variabilidad climática y el cambio climático cada día afectan el clima actual y futuro. Se define el cambio climático como la variación estadística en el estado medio del clima, dicha variación persiste durante un período prolongado generalmente pueden ser decenios o incluso puede ser por más tiempo. Es decir que el cambio climático es el cambio que se presenta en el clima a través del tiempo, ya sea debido a su variabilidad natural o como resultado de la actividad humana (Pimiento y Restrepo,2018).

Según Depsky et al., 2003 el cambio climático es ocasionado directa o indirectamente por las actividades humanas las cuales afectan la composición de la atmosfera que se encuentra en el planeta Tierra, pero la variabilidad climática es atribuida a causas naturales. Al respecto Martillo (2003) menciona que: “La variabilidad climática, es la variación que presenta el clima en forma aleatoria, que no se produce, por los gases del efecto invernadero antropogénicos. Siempre ha estado presente en la naturaleza, uno de los efectos más conocidos es El Niño” (p.25). Según Vergara (2011) dice que: “La variabilidad climática es intrínseca al clima y comprende variaciones en el estado medio del clima en escalas temporales y espaciales comprendiendo eventos meteorológicos extremos que ocurren con cierta periodicidad como las sequías prolongadas, eventos lluviosos, años extraordinariamente cálidos, inundaciones” (p.30).

En conclusión, se puede decir que la diferencia entre el cambio climático y la variabilidad climática radica en que esta última se trata principalmente de las fluctuaciones que presentan los componentes del sistema climático en periodos relativamente cortos respecto a una media determinada y dicha variabilidad se evidencia principalmente con el Fenómeno de la Oscilación del Sur-el Niño o más conocidos como los fenómenos ENSO (Pimiento y Restrepo, 2018). Mientras que las principales consecuencias del cambio climático se reflejan en el aumento de la temperatura global, el aumento en el nivel del mar, modificaciones en los niveles de precipitación y la generación eventos climáticos extremos como tormentas y huracanes, afectando varios componentes como son la agricultura, los recursos hídricos, los ecosistemas, la salud humana, entre otros (Parra, 2010).

#### **5.5.Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

Los gases de efecto invernadero (GEI) son los elementos gaseosos que se encuentran presentes en la atmósfera, tanto de origen natural como también de origen antropógeno, estos gases son

capaces de absorber y emitir radiación con una longitud de onda igual que la radiación infrarroja que se produce en la atmósfera y en las nubes, por lo cual se genera el efecto invernadero. En el planeta Tierra los principales GEI que se encuentran en la atmósfera son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>). (Parra,2010)

A continuación, en la Figura 1 se muestra la distribución de las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2000 considerando la energía y los cambios en el uso del suelo como principales factores de las emisiones de gases del efecto invernadero.

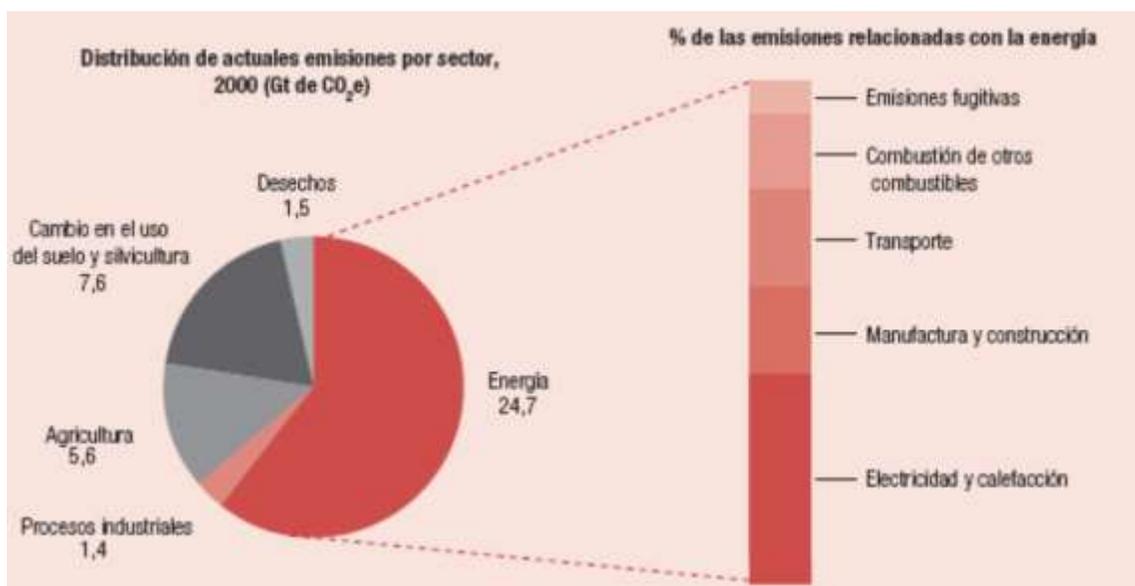


Figura 1. Distribución de las emisiones de CO<sub>2</sub> por sector para el año 2000

Fuente: Aquino et al., 2010

En esta figura se muestra de manera explícita la contribución del sector industrial al cambio climático gracias a las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que confirma que la industrialización contribuye al desequilibrio que causa el cambio climático. Se muestra que el 24,7% de emisión de CO<sub>2</sub> corresponde al sector de energía, a este valor se le suma el porcentaje de los procesos industriales tales como el nuclear, el procesamiento del petróleo en derivados cuyo valor es igual a 1,4% de emisión CO<sub>2</sub>, dando como resultado el 26.1% de emisiones del sector industria en el año 2000. Por lo tanto, se confirma, que el aumento del cambio climático se debe principalmente a la generación masiva e indiscriminada del CO<sub>2</sub> por la misma industrialización (Aquino., et al 2010).

A continuación, se describen las principales características de algunos gases de efecto invernadero que se encuentran presentes en la atmósfera del planeta Tierra:

#### **5.5.1. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

El dióxido de carbono es el gas más importante del efecto invernadero y el segundo gas más importante del calentamiento global, sus fuentes de emisión pueden ser naturales y antropogénicas por ejemplo la tala de árboles, la quema de los bosques y la combustión de fósiles como el carbón, el petróleo, el gas natural y leña con las cuales se emite CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Parra,2010). Según Aquino et al., (2010) afirman que: “Es de suma importancia aclarar que el CO<sub>2</sub> es el más importante de los gases menores y se produce de forma natural por la respiración de los animales y las plantas, la mayor parte del carbono está en los océanos” (p.17).

#### **5.5.2. Metano (CH<sub>4</sub>)**

Cumple un papel muy importante en la oxidación de la tropósfera, el efecto de sus emisiones generado por la fermentación intestinal de los rumiantes es bastante grande a nivel global ya que le corresponde un 37% del metano que se encuentra en la atmósfera. Pero la fuente más importante que produce este gas es la descomposición de materia orgánica en los sistemas biológicos, las actividades agrícolas, el tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas e industriales, al igual que la generación y distribución de gas natural, petróleo y carbón mineral (Parra,2010).

#### **5.5.3. Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)**

Contribuye con aproximadamente el 6% a las emisiones que producen el efecto invernadero. Sus fuentes son de origen natural y antropogénico entre las que se destacan la quema de combustibles fósiles y la agricultura. Pero la fuente más importante es la generada por suelos agrícolas mediante los procesos de nitrificación y también por el uso de fertilizantes y el consumo de combustibles fósiles para la generación de energía (Parra,2010).

#### **5.5.4. Compuestos halogenados**

Los halocarbonos generan efectos tanto directos como indirectos en el forzamiento radiactivo. Los clorofluorocarbonos (CFCs) son un grupo de compuestos que no existen naturalmente en el ambiente. Las moléculas de halocarbonos pueden ser mucho más eficientes absorbiendo la

energía emitida por el planeta Tierra comparado a una molécula de dióxido de carbono (Parra,2010).

#### **5.5.5. Monóxido de carbono (CO)**

Es un gas de efecto invernadero cuyo efecto es indirecto, es generado cuando el carbono contenido en los combustibles es quemado de forma incompleta y posteriormente es oxidado a dióxido de carbono mediante procesos naturales. La mayoría de las emisiones de este gas se producen por la combustión proveniente principalmente de los automotores (Parra,2010).

#### **5.6.Forzamiento radiactivo**

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2015) indica que el forzamiento radiactivo es un proceso que perturba el equilibrio de energía entre la Tierra y la atmósfera, debido a una variación de la concentración de dióxido de carbono. Si el forzamiento radiactivo es positivo, es decir cuando la energía recibida es mayor que la emitida, tiende a calentar el sistema, mientras que un forzamiento radiactivo negativo es causado debido a que es mayor la energía que se pierde que la que se recibe, por ello el sistema se enfría, la unidad de medida es vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ).

El  $CO_2$  es el gas que más contribuye con el forzamiento radiactivo positivo seguido por el  $CH_4$ , el ozono troposférico, el  $N_2O$  y algunos halocarbonos. El forzamiento radiactivo del  $CO_2$  se ha incrementado en un 20% en un periodo comprendido entre 1995 y 2005, cuyo efecto es calentar el clima superficial y se enfría la estratosfera, por el contrario, el efecto radiactivo de los halocarbonos es calentar la troposfera y la estratosfera (Parra,2010).

#### **5.7.Escenarios de cambio climático**

Para poder abordar este tema se puede empezar definiendo que es un escenario, para ello el IDEAM (2015) afirma que: “Es una descripción estimable sobre cómo puede desarrollarse el futuro. Esta descripción está basada en un conjunto de variables y supuestos sobre fuerzas y relaciones de cambio claves, que pueden originar un posible estado futuro del mundo” (p.7). Los escenarios son las perspectivas de un mundo futuro, pero no son un pronóstico o predicción, son una herramienta útil porque permiten transmitir las expectativas que se tiene sobre el futuro. La planificación con escenarios brinda la posibilidad de que las personas desarrollen una visión y con base en eso pueden diseñar planes o posibles soluciones (Celmi, 2014). Bajo este contexto

un escenario de cambio climático de acuerdo con el IDEAM (2015): “Es la representación del clima que se observaría bajo una concentración determinada de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera en las diferentes épocas futuras” (p.8).

La aplicación de los escenarios de cambio climático ayuda a identificar las posibles condiciones futuras y reduce la incertidumbre de la influencia que tiene las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en combinación con otras variables en el clima, y que se utilizan principalmente para el establecimiento de modelos que evalúan impactos y medidas de adaptación y mitigación (Pimiento y Restrepo,2018). Pero el objetivo de trabajar con dichos escenarios no es para predecir el futuro climático, sino que se busca evaluar el comportamiento del clima en el futuro y comprender las posibles incertidumbres que se pueden presentar para anticipar los efectos desfavorables y se puedan orientar y llevar a cabo acciones eficaces (IDEAM,2015).

Entre las diversas clasificaciones de los escenarios de cambio climático es importante destacar lo manifestado por Ramos (2014) el cual destaca 4 escenarios de emisión de Gases de Efecto Invernadero para la evaluación de cambio climático futuro, los escenarios que describen las trayectorias de concentración representativa, por sus siglas en inglés RCP (Representative Concentration Pathway), la palabra “representativo” significa que cada RCP suministra sólo uno de los posibles escenarios que pueden conducir a las características del forzamiento radiactivo. El término de “trayectoria” hace referencia a que no sólo los niveles de concentración a largo plazo sino también la trayectoria que ha tomado en el tiempo para alcanzar ese resultado (IDEAM,2015).

Los escenarios RCP no son ni predicciones ni recomendaciones políticas, solo son escenarios en los que se representa el forzamiento radiactivo, es decir la medida acumulativa de las emisiones antropogénicas de los gases de efecto invernadero. Se establecieron 4 líneas evolutivas diferentes ya que cada una representa la tendencia para ello se consideraron varios aspectos como son el demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental que pueden ser positivos o negativos (Pimiento y Restrepo,2018). Los escenarios de Cambio Climático para Colombia siguen las rutas metodológicas propuestas por el IPCC, en su Quinto Informe de Evaluación del año 2013. Por ello los científicos del IDEAM tomaron los 16 modelos globales que mejor

representan el clima de referencia de Colombia desde 1976 hasta el 2005 y con estos datos se modela la temperatura y la precipitación hasta el año 2100 (IDEAM,2015).

A continuación, en la Tabla 1 y en la Figura 2 se presentan los cuatro escenarios de cambio climático seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el planeta.

Tabla 1. Los cuatro escenarios de Cambio Climático (RCP)

Escenario	Forzamiento Radiactivo (W/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2eq</sub> atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura	Trayectoria
RCP 8.5	8.5	>1370	4.9	2100 en aumento
RCP 6.0	6.0	850	3	Estabilización después del 2100
RCP 4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después del 2100
RCP 2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y luego declina

Fuente: IDEAM ,2015

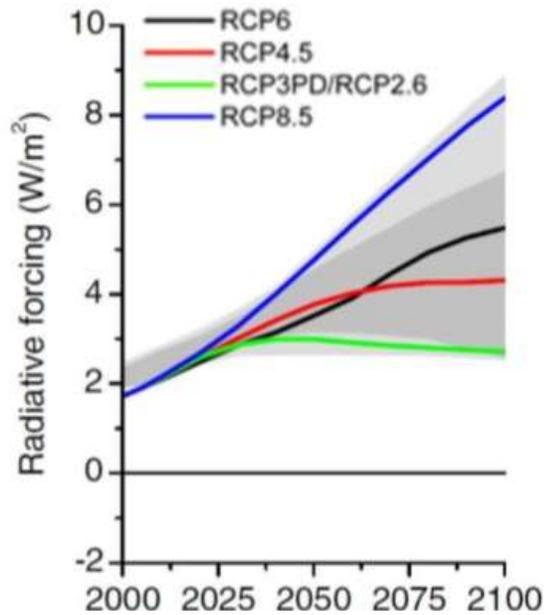


Figura 2. Forzamiento radiactivo de las vías representativas de concentración (Escenarios RCP)

Fuente: Pimiento y Restrepo,2018

El RCP 2.6 lo realizó el equipo de la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos, este escenario indica los niveles más bajos de las concentraciones de GEI, su nivel de forzamiento

radiactivo alcanza a mediados del siglo un valor de 3.1 W/m<sup>2</sup>, pero para el año 2100 tiene un valor de 2.6 W/m<sup>2</sup> (Pimiento y Restrepo,2018).

El RCP 4.5 lo desarrollo el equipo de modelado Mini CAM que pertenece al Instituto de Investigación Global de Cambio del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste (JGCRI), este es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiactivo en su totalidad se nivela antes del año 2100 mediante la utilización de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Pimiento y Restrepo,2018).

El RCP 6.0 lo elaboro el equipo de modelado AIM que corresponde al Instituto Nacional de Estudios Ambientales (NIES) de Japón, es un escenario de estabilización, pero en este el forzamiento radiactivo en su totalidad se nivela después del año 2100 utilizando tecnologías y estrategias que ayuden a disminuir los GEI (Pimiento y Restrepo,2018).

El RCP 8.5 lo desarrollo el equipo de modelado MESSAGE y el Marco de Evaluación Integrado IIASA en el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), que se encuentra en Austria. El escenario RCP 8.5 se caracteriza porque presenta incrementos en las emisiones de los gases de efecto invernadero (Pimiento y Restrepo,2018).

## **5.8.Modelo**

Un modelo es una representación de la realidad de una manera más simplificada de un objeto o una idea, un modelo puede ser físico o matemático y sirve para apoyar la toma de decisiones en diversos contextos (Pimiento y Restrepo,2018). Los modelos son muy útiles porque nos permiten transmitir lo que se observa en la realidad mediante una proyección, además se pueden realizar simulaciones mediante escenarios que ofrecen una visión anticipada de las posibles consecuencias que pueden generar algunas problemáticas ambientales que en la actualidad se están evidenciando (Báez, 2012).

## **5.9.Modelación**

La modelación es el proceso mediante el cual se generan modelos conceptuales, gráficos o matemáticos, los cuales representan la realidad. Mediante la modelación se puede realizar un diagnóstico para poder evaluar el estado actual de los objetos, y además se puede desarrollar un pronóstico con el cual se estudian las posibles problemáticas que se están presentando en el entorno y probando diferentes hipótesis sobre la distribución espacial de los objetos para buscar

soluciones y de esta manera se puede generar un acercamiento hasta lograr simular el modelo más aproximado a la realidad (Báez, 2012).

La modelación hidrológica se define como el uso de los modelos matemáticos para la simulación de los procesos de transporte de agua que se presentan dentro de una cuenca. Estos modelos pueden utilizar ecuaciones físicas que determinan el comportamiento de las variables dentro de una cuenca (Del rio,2015).

#### **5.10. Modelo Hidrológico**

Un modelo hidrológico es la representación del sistema físico y real considerando los diferentes procesos hidrológicos que se pueden presentar en una cuenca, sus datos de entrada y salida dependen principalmente del propósito con el cual se elabora el modelo (Monge, 2007).

Los modelos hidrológicos actualmente se consideran de gran utilidad para realizar el proceso de planificación del recurso hídrico. Gracias a los avances que ha tenido la tecnología se ha logrado el mejoramiento de los programas con lo cual se ha realizado el manejo de bases de datos en menos tiempo en comparación a los años sesenta cuando se empezaron a utilizar los modelos digitales. Cuando se emplea un modelo para realizar una simulación hidrológica se tiene la posibilidad de representar todos los elementos que se encuentran en un sistema hidrológico y se puede utilizar los sistemas de información geográfica, además ofrece la oportunidad de proponer y experimentar con escenarios tanto para condiciones presentes y futuras, esto tiene gran utilidad en el manejo de cuencas ya que se puede predecir la respuesta de la cuenca ante la variación de algunas variables climáticas (Zuleta, 2013).

#### **5.11. Modelo Water Evaluation and Planning System (WEAP)**

El sistema de evaluación y planificación del agua Water Evaluation and Planning System (WEAP), es una herramienta computacional robusta que permite evaluar y llevar a cabo una gestión integral para la planificación del recurso hídrico (Pimiento y Restrepo,2018). Al respecto Leguizamón (2017) menciona que: “WEAP funciona usando el principio básico del balance hídrico, puede ser aplicado en sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o en complejos sistemas de cuencas transfronterizas” (p.15). Su propósito es representar las condiciones actuales del recurso hídrico en una zona de estudio para calcular la oferta y demanda generada a partir de variables climatológicas, por ello lo ideal es usarlo para estudios que

incluyan el cambio climático (Pimiento y Restrepo,2018). Se puede decir que WEAP es un modelo matemático porque para representar el comportamiento del sistema es necesario usar ecuaciones matemáticas (Monge,2007). Este modelo fue desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (Stockholm Environment Institute (SEI)) con apoyo del Centro Hidrológico de Ingeniería del ejército de Estados Unidos (Pimiento y Restrepo,2018).

Este modelo cumple dos principales funciones, la primera es simular los procesos hidrológicos naturales como son la evaporación, la infiltración y la escorrentía, los cuales sirven para calcular la disponibilidad de agua en la zona de estudio y la segunda es simular las actividades humanas que puedan llegar a afectar los ecosistemas naturales con el fin de identificar su influencia en el comportamiento del recurso hídrico (Pimiento y Restrepo,2018).

La principal ventaja que tiene WEAP es la creación de escenarios de análisis basados en varias condiciones que determinan la oferta y la demanda del recurso hídrico de la zona de estudio, dichos escenarios pueden ser:

- Escenarios de incremento poblacional los cuales consideren los cambios en las tasas de crecimiento proyectadas a futuro tanto rural como urbana.
- Escenarios de cambios en el uso del suelo como consecuencia de las tendencias económicas, de conservación o de desarrollo de nuevas infraestructuras como represas.
- Escenarios de variabilidad o cambio climático. Estos escenarios son muy usados en WEAP y permite llevarse a cabo incorporando tasas de variación de temperatura o precipitación, como los escenarios RCP los cuales se basan en proyecciones de modelos climáticos (Pimiento y Restrepo,2018).

El modelo hidrológico WEAP es una herramienta muy útil en la toma de decisiones porque permite analizar diferentes características que se presentan en una cuenca. Además, facilita la visualización de varios escenarios ofreciéndole al planificador una amplia gama de resultados ya que puede ser aplicado en proyectos relacionados con el recurso hídrico. Por ejemplo, en Colombia se han realizado estudios en cuencas de los ríos La Vieja, río Otún y Alto Magdalena, en los cuales se utiliza el modelo WEAP para analizar la relación entre el recurso hídrico y el cambio climático (Cárdenas, Mafla, Paz y Realpe 2016).

Con base en lo anterior, se puede decir que el modelo WEAP principalmente se usa en proyectos asociados con el manejo del agua ya que permite proyectar las limitaciones de la asignación de los recursos hídricos, además con la información que se obtiene se puede realizar la planificación de dicho recurso frente a las variaciones en el clima, para así desarrollar estrategias sostenibles para el uso del agua (Reyes, 2012).

Un ejemplo de la aplicación del modelo WEAP lo realizó Castro en el 2014, en su estudio denominado “Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda la Bella” la cual se encuentra ubicada al suroriente del municipio de Pereira, en este proyecto se modeló el comportamiento hidrológico de las corrientes con las cuales se abastece el sistema de riego y acueducto en dicha vereda aplicando el método de escorrentía de la FAO en el modelo WEAP ,entre los resultados obtenidos se encontró que no se puede cubrir la demanda de agua lo cual se pudo corroborar con las visitas realizadas, además con este estudio se puede demostrar que la aplicación de algunas herramientas de modelación es viable a una escala reducida como lo es la vereda la Bella.

Este modelo WEAP permite manejar niveles de incertidumbre en cuanto a los datos necesarios, a diferencia de otro tipo de modelos en los cuales se necesita una mayor cantidad de información como es el caso del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Además de ser un software de fácil acceso, puede ser desarrollado en cualquier escala, desde pequeños cuerpos de agua hasta grandes cuencas (Cárdenas, Mafla, Paz y Realpe, 2016).

Pero para una mayor comprensión sobre este tema, es necesario considerar los principales efectos que está generando el cambio climático en referencia a la disponibilidad del recurso hídrico y cómo con la ayuda de estos modelos se puede predecir dicho comportamiento en un futuro y permitirnos tomar medidas para reducir estos impactos. En un estudio realizado en Bolivia utilizando el modelo WEAP se obtuvo que en un periodo comprendido entre los años 2010 y 2050 se generará la desaparición total de los glaciares, pudiendo afectar gravemente a la población, por lo cual se contempló como una medida de adaptación al cambio climático el almacenamiento de agua, también se consideraron otras alternativas que ayudan en el abastecimiento de los habitantes como son: acuíferos profundos, acuíferos superficiales, aguas manantiales, aguas lluvias y aguas superficiales (Cárdenas et al., 2016).

Por otro lado, en otros países como México, poblaciones como Jalisco, presenta escasez de agua y no por falta del recurso sino por los existentes desperdicios que superan el 50% en todas las actividades humanas. Lo cual lleva a afirmar que la única alternativa para el abastecimiento hídrico es el uso eficiente de este recurso, tomando diferentes medidas como: reducir las fugas, aumentar las tarifas para evitar desperdicios, implementar una reglamentación sobre el uso eficiente del agua y realizar campañas de concienciación (Cárdenas et al., 2016).

Así mismo en Colombia también se ha optado por la búsqueda de alternativas de abastecimiento, puesto que se conoce que el 4% de la población total sufre de un índice de escasez alto, el 7% medio alto y el 30% medio, y se estima que en el 2025 el porcentaje de la población afectada por la escasez en el país ascenderá al 39%, por lo cual se pretende un fortalecimiento de la gestión integral del recurso, especialmente en las estrategias de protección de oferta y de reducción de la demanda. Algunas investigaciones como la realizada en Cali, una de las ciudades más importantes en el país que ha sufrido problemas por desabastecimiento en algunos periodos de tiempo, y la cual, según estudios técnicos, se podría contar con aproximadamente 35 fuentes alternativas de abastecimiento. En un estudio realizado en la microcuenca alta del río Pasto muestra que, debido a la sobreexplotación de recursos, la deforestación, el sobrepastoreo, los monocultivos, la labranza intensa y el uso de abonos tanto químicos como orgánicos, están deteriorando la calidad de la fuente, además de disminuir su caudal y alterando la biodiversidad del ecosistema, por lo cual se está perjudicando a la población que se abastece de la cuenca. (Cárdenas et al., 2016, p. 225).

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que en algunos países de Latinoamérica el problema de escasez de agua se presenta por desconocimiento, insuficientes recursos económicos e inadecuado manejo, mas no por poca oferta del recurso hídrico. Como lo afirman Cárdenas et al., (2016):

América Latina, a pesar de tener abundantes recursos no ha sido ajena a presentar problemas de escasez, en estos países el mal manejo de los recursos es notable, y varias poblaciones ni siquiera tienen acceso al agua potable, todo esto debido al mal manejo del recurso por falta de políticas de gestión, tecnología insuficiente, conflictos y corrupción. Sin embargo, en algunos países como en Colombia se ha comenzado a realizar estudios e investigaciones con relación al consumo de agua urbano, debido al rápido crecimiento demográfico y la disminución del abastecimiento (p. 225).

## **6. MARCO CONTEXTUAL**

En la actualidad se considera la disminución del recurso hídrico como una gran preocupación en la mayoría de los países, la cual se ve afectada por el incremento de la población y el cambio climático que se ha presentado en las últimas décadas. Por ello, se han desarrollado algunas herramientas como WEAP, el cual es un modelo hidrológico que ha tenido gran aceptación en varios países alrededor del mundo porque permite que se tenga en cuenta la oferta, la demanda del agua y algunas condiciones climáticas y es útil en la toma de decisiones. A continuación, se presentan algunos estudios donde han aplicado este modelo tanto a nivel internacional como nacional y local (Cuadros 1,2 y 3).

Cuadro 1. Antecedentes internacionales

Título	Autor	Objetivo	Resultados
<p>Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia</p>	<p>Escobar, Lima, Purkey, Yates y Forni, 2013</p>	<p>Evaluar cuáles podrían ser las implicaciones del cambio del clima futuro en el abastecimiento de agua en un horizonte de tiempo 2011-2050 bajo un ambiente de incertidumbres.</p>	<p>En este artículo se presenta un enfoque útil para la modelación hidrológica de cuencas incluyendo incertidumbres como el cambio climático. Se utilizó el modelo WEAP ya que es una herramienta útil para la planificación de recursos hídricos, los resultados para los años 2010-2050 muestran que los glaciares podrían desaparecer en los próximos 30 años, y esto podría tener implicaciones en la respuesta hidrológicas de las cuencas con la reducción de la oferta de agua. La ciudad de El Alto sería la más afectada, ya que se advierten serios problemas en el abastecimiento de agua. El autor concluye que debido al crecimiento acelerado de la población existen problemas en el abastecimiento de agua, y esto podría exacerbase por los impactos negativos del cambio climático por ejemplo el retroceso de los glaciares.</p>
<p>Aplicación del Modelo de Planificación Hídrica de Cuencas WEAP al Proyecto: Aducción de Recursos Hídricos Mururata. Bolivia.</p>	<p>Salinas y Paz, 2011</p>	<p>Aplicar el modelo de evaluación y planificación del agua, "WEAP", para fortalecer el análisis de planificación hídrica en el proyecto: "Aducción de Recursos Hídricos Mururata".</p>	<p>Este estudio utilizó WEAP para la planificación del recurso hídrico mediante generación de escenarios que permitieran simular las posibles respuestas del río frente a diferentes variaciones. Se obtuvieron los siguientes resultados: en el escenario 1 la demanda de agua alcanzará su máximo valor en 2034, en el escenario 2 se evaluó el crecimiento poblacional notándose la escasez de agua a partir del año 2016. Para el escenario 3 se contempla la introducción de demandas agrícolas por lo cual se presenta un déficit de agua en el año 2015. En el escenario 4 se clasificaron los usos del agua se obtuvo como resultado que los porcentajes no satisfechos comienzan en 2029. El escenario 5 se</p>

Titulo	Autor	Objetivo	Resultados
			<p>demuestra que el uso de nuevas tecnologías se presenta un déficit menor. Para el escenario 6 se plantea la variación del clima se obtuvo que se afecta la demanda de los cuerpos de agua que servirán de suministro para las poblaciones. El escenario 7 fue creado a partir del tercero se presenta una carencia de agua a partir del año 2024. Para el escenario 8 se tiene en cuenta la calidad del agua, se obtuvo que los sitios más contaminantes son aquellos con mayor población. En el escenario 9 se consideró los costos se obtuvo que en el año 2009 la inversión será mayor a los beneficios, pero en el 2034 el porcentaje de los beneficios se acerca a los costos de inversión. Se concluye que se presenta deficiencia de agua para las comunidades involucradas en el proyecto a partir del año 2024.</p>
<p>Implementación y uso del modelo WEAP en cuencas nivales de la IV región para el análisis del cambio climático</p>	<p>Mardones,2009</p>	<p>Analizar el efecto del cambio climático mediante el modelo WEAP en los recursos hídricos de las cuencas nivales Elqui en Algarrobal y Hurtado en San Agustín, ubicadas en la IV Región de Coquimbo.</p>	<p>En este trabajo se aplicó el modelo WEAP para simular los caudales futuros en los periodos 2036 - 2065 y 2071 - 2100 en las cuencas se logró obtener una buena modelación para los caudales medios mensuales. Para simular las condiciones meteorológicas futuras se han desarrollado posibles escenarios de emisión de gases de efecto invernadero y aerosoles y se utilizaron los resultados del modelo PRECIS para el escenario A2. En la cuenca Elqui en Algarrobal de 140 mm/año entre los años 1979-2005 a 130 mm/año entre los años 2071-2100, y en la cuenca Hurtado en San Agustín de 175 mm/año entre los años 1977-2005 a 125 mm/año entre los años 2071-2100 y un aumento de 6°C en la temperatura media anual para el periodo 2071-2100, lo que se traduce en una disminución de los caudales futuros en ambos periodos analizados</p>

Titulo	Autor	Objetivo	Resultados
			(aproximadamente 30% menos). El autor concluye que los caudales futuros simulados en ambas cuencas, se tendría una clara disminución de la disponibilidad de los recursos hídricos provocando una mayor cantidad de meses con estrés hídrico y un aumento en la frecuencia de ocurrencia de períodos de sequía
Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando el modelo WEAP. Curicó, Chile.	Mena, 2009	Estimar el impacto del cambio climático en la cuenca definida por la estación pluviométrica Río Teno después de Junta con Río Claro, concretamente en la disponibilidad de sus recursos hídricos a base del escenario A2 en los periodos 2036-2065 y 2071-2100.	Este estudio brinda información necesaria para comprender los alcances del cambio climático, en términos de vulnerabilidad del sector de los recursos hídricos en la cuenca. Se usó el modelo de simulación hidrológica WEAP, los resultados muestran que se presentó una disminución de los caudales medios mensuales futuros del rio de un 30% y 40% para los periodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente y un aumento en la prolongación de periodos secos en la cuenca, causados principalmente por la disminución de la precipitación anual y del aumento de la temperatura anual.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2. Antecedentes nacionales

Titulo	Autor	Objetivo	Resultados
<p>Análisis de la relación oferta-demanda hídrica en la cuenca del río Gualí bajo escenarios de cambio climático</p>	<p>Pimiento y Restrepo, 2018</p>	<p>Analizar la relación oferta – demanda de agua en la cuenca del río Gualí bajo escenarios de cambio climático, a partir de indicadores.</p>	<p>En este trabajo se realizó la modelación hidrológica realizada en la cuenca del río Gualí, ubicada en el departamento de Tolima; para determinar los impactos del cambio climático sobre el régimen hidrológico y la demanda de agua no satisfecha de la zona. Se obtuvieron las series de caudales para las condiciones de clima actual y para las proyecciones climáticas futuras bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, se estimó la demanda insatisfecha por medio de la herramienta de modelación WEAP, pero también se empleó el modelo Hydro-BID. Los resultados para los dos escenarios indican una disminución en el caudal con base al estado actual, para el caso del escenario RCP 2.6 la reducción esta entre 5,8% y 9,56%, mientras que en el escenario RCP 8.5 la disminución es de 2,18% y 6,86%. En cuanto a la demanda insatisfecha solo se presenta en los acueductos de Fresno y Mariquita cuyos promedios son de 0.0413 m<sup>3</sup>/s y 0.0386 m<sup>3</sup>/s. Las proyecciones obtenidas indican una disminución en la oferta hídrica de la cuenca, lo que sumado al crecimiento poblacional y a la expansión agrícola e industrial de la zona, puede llegar a ocasionar un estrés hídrico debido al aumento en la presión generada en los ríos de la cuenca.</p>
<p>Modelación hidrológica de la</p>	<p>Cruz, Losada y Moncayo, 2016</p>	<p>Realizar la modelación de la cuenca del Río Baché, para determinar la oferta hídrica superficial con la utilización de</p>	<p>En este trabajo se propone la modelación hidrológica como herramienta en los procesos de planificación de cuencas, mediante la utilización de WEAP y la generación de escenarios para el crecimiento de la población del</p>

Titulo	Autor	Objetivo	Resultados
<p>cuenca del rio Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos</p>		<p>la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos WEAP.</p>	<p>municipio y el cambio en las coberturas, se obtuvo que el comportamiento de la oferta hídrica disminuye tanto para el escenario de crecimiento poblacional como para uso agrícola, en 50.4% y 30.9% respectivamente. Además, la concesión de la captación para el acueducto es de 7.0 lps y proyectado al año 2050 un caudal de 13.04 lps, y de acuerdo con los resultados de la modelación el valor del caudal actual es 8.84 lps y el proyectado promedio de 14.56 lps, lo que indica que la herramienta WEAP reproduce en buena medida las demandas de la cuenca.</p>
<p>Desarrollo de un modelo para planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del rio Aipe, Huila, Colombia</p>	<p>Labrador, Romero y Zúñiga, 2016</p>	<p>Desarrollar un modelo hidrológico para conocer el impacto de los escenarios de cambio climático sobre la oferta hídrica para el período (2011–2050), como herramienta para apoyar la toma de decisiones en la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia.</p>	<p>En este trabajo se desarrolló un modelo hidrológico para conocer el impacto de los escenarios de cambio climático sobre la oferta hídrica para el período (2011-2050). Respecto a la simulación de los escenarios, la línea base (1980-2011) estimó un caudal medio de <math>15.31 \text{ m}^3\text{s}^{-1}</math>, el escenario I estimó un caudal de <math>14.88 \text{ m}^3\text{s}^{-1}</math> (-2.81%), el escenario II de <math>10.87 \text{ m}^3\text{s}^{-1}</math> (-29%), escenario III de <math>18.98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}</math> (+23.97%) y escenario IV de <math>5.24 \text{ m}^3\text{s}^{-1}</math> (-65.77%). Esto podría ocasionar numerosos problemas económicos y conflictos sociales, en términos de desabastecimiento de agua potable y disminución de volúmenes de riego para producción de cultivos agropecuarios.</p>

<b>Título</b>	<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Resultados</b>
Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la Vereda la Bella	Castro, 2014	Implementar el sistema de modelación WEAP como herramienta para el fortalecimiento de la toma de decisiones frente a la planificación del recurso hídrico en la vereda La Bella.	Este trabajo de investigación tiene como objetivo modelar el comportamiento hidrológico de las corrientes de las que se abastece la vereda para el servicio de riego, aplicando el método lluvia-escurrentía de la FAO que ofrece WEAP. Entre los resultados obtenidos se encontró la insuficiencia de las corrientes para cubrir la demanda de los usuarios y éstos fueron contrastados con la realidad percibida en las visitas a la zona de estudio, demostrando la viabilidad de la aplicación de herramientas de modelación a escalas tan reducidas como la de una vereda.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3. Antecedentes locales

Titulo	Autor	Objetivo	Resultados
<p>Aplicación de una herramienta de gestión haciendo uso del modelo WEAP como soporte de decisión en las microcuencas La Tebaida, Las Helechas y Bermúdez del departamento de Nariño</p>	<p>Folleco, 2017</p>	<p>Aplicar una herramienta de gestión, para la planificación del recurso hídrico a través del balance de la oferta hídrica y demanda doméstica de agua en el municipio de Chachagüí, departamento de Nariño.</p>	<p>Se aplicó el modelo de planificación WEAP, el cual se alimentó con diferentes supuestos que dieron pie a escenarios actuales, críticos, factibles e ideales, en un periodo de 25 años (2015 - 2040), permitiendo determinar la vulnerabilidad de la cobertura por abastecimiento para consumo humano, así como la cobertura de los caudales ecológicos. Se encontró que las principales causas que generan presión sobre el recurso hídrico son las altas pérdidas en el sistema de abastecimiento y el excesivo consumo de agua de la población. De este modo, si se toman las medidas respectivas frente a estos dos problemas, se logrará una cobertura de acueducto para el 100% de la población, mínimo hasta el año 2035, sin la necesidad de concesionar agua de una tercera fuente hídrica. Sin embargo, ante fenómenos climáticos extremos ningún escenario cubriría la demanda total, por lo que es necesario que el municipio actualice su plan de contingencia con el fin de minimizar el riesgo por desabastecimiento y afectaciones ambientales severas sobre el recurso</p>
<p>Estrategias de planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento</p>	<p>Cárdenas et al., 2016</p>	<p>Conocer las bondades y desaciertos de las soluciones que se ha planteado a nivel mundial, principalmente en el fenómeno de sequía, para poder contextualizar las herramientas de apoyo enfocadas a la</p>	<p>El artículo fue realizado a partir del proyecto de investigación denominado: Evaluación de fuentes alternativas de agua para el abastecimiento de San Juan de Pasto en Colombia bajo escenarios de sequía. Para su elaboración se realizó una revisión</p>

<b>Título</b>	<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Resultados</b>
para consumo humano		planificación local.	bibliográfica a nivel regional, nacional y mundial relacionada con el recurso hídrico, su distribución, uso, manejo e impacto de los fenómenos de variabilidad y cambio climático. Se concluyó que actualmente la oferta y la demanda hídrica varían alrededor del mundo, razón por la cual, el manejo del recurso hídrico se encuentra ligado a las características específicas y a las diferentes condiciones de cada zona, imposibilitando que se pueda realizar una gestión igual a nivel global.

Fuente: Elaboración propia

## 7. MARCO NORMATIVO

### 7.1. Cambio climático: Contexto internacional

Debido a los impactos del cambio climático en varios países se han propuesto algunos instrumentos que ayuden a reducir los gases de efecto invernadero los cuales se describen en el Cuadro 4 que se realizó con base en la información que tiene el IDEAM, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2010):

Cuadro 4. Normativa a nivel internacional sobre el Cambio Climático

<b>Instrumento jurídico</b>	<b>Descripción</b>
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC)	Es el instrumento jurídico y político más importante en lo que se refiere al cambio climático el cual busca conectar los esfuerzos que permitan solucionar y afrontar los impactos de este fenómeno. La CMNUCC reconoce que los cambios en el sistema climático es un recurso compartido cuya estabilidad puede estar siendo afectada debido a la industrialización y a las emisiones de gases de efecto invernadero los cuales retienen el calor, en este convenio se trasmite la información sobre las emisiones de GEI, y además se ponen en marcha las estrategias nacionales para abordar el problema de dichas emisiones y así poder adaptarse a los efectos del cambio climático.
Protocolo de Kioto	El Protocolo de Kioto de 1997 posee los mismos objetivos, principios e instituciones que se encuentran en la CMNUCC, pero adicionalmente pretende disminuir las emisiones de GEI involucrando solo a los países que son miembros del protocolo es decir que lo ratifiquen, acepten, aprueben o adhieran a él. Por ejemplo, gracias a este protocolo se puede mencionar que en los años del 2008 al 2012 las emisiones de GEI se han reducido en un 5% respecto a los resultados de 1990.

### 7.2. Cambio climático: Contexto nacional

Para el caso de Colombia, en cuanto a la normativa, es importante tener en cuenta algunos tratados internacionales sobre cambio climático que se han ratificado, entre ellos se destacan que por medio de la Ley 164 de 1995 Colombia ratificó su participación en la CMNUCC y el Protocolo de Kioto se ratificó mediante la Ley 629 de 2000. En dichos instrumentos mencionados anteriormente se fijaron unos compromisos que se deben

cumplir porque se promueve la educación y concientización sobre el cambio climático además de incentivar la participación de gran parte de las organizaciones (IDEAM, MAVDT y PNUD,2010).

En la figura 3 se muestran los países en los cuales se ha firmado y ratificado el Protocolo de Kioto.



Figura 3. Países que han firmado y ratificado el Protocolo de Kioto

Fuente: Aquino., et al 2010

En Colombia el IDEAM es el responsable de generar las Comunicaciones nacionales del cambio climático que son entregadas a las Naciones Unidas, en el año 2001 se presentó la Primera Comunicación Nacional (PCN) pero no se trató muy a fondo el tema del cambio climático por lo cual en el 2002 se recomienda unos lineamientos de la política nacional del cambio climático en estos se promueve la divulgación y concientización mediante un programa de comunicación a nivel tanto nacional como regional enfocándose en temas relacionados con el cambio climático el cual esta propuesto para que se implemente dentro y fuera del Sistema Nacional Ambiental (SINA). Además, en el 2002 surgió la Oficina

nacional de cambio climático en el MAVDT que posteriormente en el 2005 se convierte en el Grupo de Mitigación de Cambio Climático (IDEAM, MAVDT y PNUD,2010).

### **7.3. Normativa del recurso hídrico**

En cuanto al recurso hídrico se han presentado diversas normas que fomentan la gestión integral, la conservación, la protección y el manejo de cuencas. En el Cuadro 5 se presenta el Marco Normativo Colombiano enfocado al recurso hídrico escogidos para este trabajo.

Cuadro 5. Marco Normativo Colombiano enfocado al recurso hídrico 1974- 2007

<b>Norma</b>	<b>Número</b>	<b>Año</b>	<b>Epígrafe</b>
Decreto - Ley	2811	1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Su objetivo es fortalecer las políticas y programas que ya se venían desarrollando y para ello se establecieron las bases para los planes de ordenación de cuencas hidrográficas
Decreto	1449	1977	Se establecen unas obligaciones a los propietarios de predios para la conservación, protección y aprovechamiento de las aguas.
Decreto	1875	1979	Por el cual se establecen medidas de prevención para la contaminación del medio marino.
Ley	9	1979	Establece los procedimientos y las medidas para llevar a cabo la regulación y control de los vertimientos.
Decreto	2857	1981	Propone la reglamentación de cuencas hidrográficas.
Constitución Política de 1991	Artículos 8,79 y 80	1991	Se reconoce el derecho al ambiente sano como un derecho colectivo, se dispone que su protección es deber de todos y establece las responsabilidades a cargo del Estado en relación con el medio ambiente y los recursos naturales renovables, entre ellos el recurso hídrico.
Ley	99	1993	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente, hoy Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), además, se establece que las zonas de páramo, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial. En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso. El Estado fomentará la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables. El Estado apoyará e incentivará la conformación de organismos no gubernamentales para la protección ambiental.
Decreto	1603	1994	Por el cual se organizan y establecen los Institutos de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”, el Instituto Amazónico de Investigaciones “SINCHI” y el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico “John von Neumann”.

<b>Norma</b>	<b>Número</b>	<b>Año</b>	<b>Epígrafe</b>
Ley	373	1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
Decreto - Ley	216	2003	Se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).
Decreto	3100	2003	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales.
Resolución	1433	2004	Por la cual se establecen los Planes de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV).
Decreto	1323	2007	Creación del sistema de información del recurso hídrico (SIRH), el cual sirve para orientar y apoyar al IDEAM.
Decreto	1324	2007	Mediante el cual se creó un registro de usuario del recurso hídrico (RURH)
Decreto	1480	2007	Priorización nacional de cuencas hidrográficas.

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010)

## 8. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente monografía se empleó la metodología con un enfoque cualitativo planteada por Sampieri & Quintana (2010), la cual fue adaptada para el análisis de algunas experiencias de la aplicación del modelo WEAP para evaluar los escenarios de cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico. Para ello se llevaron a cabo cuatro etapas metodológicas.

**ETAPA I: Recopilación de información:** En esta etapa se realizará una consulta sobre el tema planteado para obtener la bibliografía y otros materiales que sean útiles de los cuales se extrae la información necesaria tanto de medios físicos como electrónicos que se relacionen con los objetivos.

En este sentido, la metodología se orientó a un proceso de análisis de información secundaria de diversas bases de datos tales como:

- ScienceDirect, Scientific electronic library online (SciELO), Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe (Redalyc), Revista Tecnología, Investigación y Docencia, Revista Hidrolatinoamericana, Revista Ingeniería Agrícola.
- Institutos y entidades: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Ministerios de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe).

**ETAPA II: Delimitación de información:** Para esta etapa se identificaron algunas características que podrían considerarse relevantes y se determinan dos filtros de restricción:

El primero con el propósito de seleccionar estudios de caso representativos que describan el proceso de aplicación del modelo WEAP para la simulación de escenarios de cambio climático, para ello se tuvo en cuenta los objetivos, metodología, calibración, resultados y conclusiones en cada estudio.

El segundo corresponde a la selección de un caso de estudio a nivel nacional que aplicó el modelo WEAP en el cual se priorizan las problemáticas mediante la elaboración de una Matriz Vester y se plantean unas alternativas de gestión integral del recurso hídrico.

**ETAPA III: Análisis de la información:** En esta etapa se relacionan algunos estudios de caso teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático (RCP) que estén asociados con la disponibilidad del recurso hídrico, esto se realizará mediante la lectura minuciosa con el fin de determinar la información más sobresaliente y así propiciar un punto de vista a partir de la bibliografía consultada tras una revisión exhaustiva sobre la importancia que tiene el modelo WEAP en la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico frente al cambio climático.

**ETAPA IV: Elaboración:** En esta etapa se sintetiza la información y se realiza una descripción de los aspectos más relevantes de los estudios consultados y se construye una matriz de Vester para identificar y definir las principales problemáticas. Por último, se plantean alternativas para la gestión del recurso hídrico.

### 8.1. Proceso metodológico (Matriz de Vester)

La matriz de Vester se elabora identificando previamente las problemáticas más importantes y se ubican en filas y columnas, posteriormente se les da una valoración para priorizar el problema más significativo (Porrás,2014) tal como se puede observar en el siguiente cuadro:

Cuadro 6. Matriz de ponderación Vester

PROBLEMAS	P1	P2.....	Pn	TOTAL ACTIVOS
P1				
P2				
Pn				
TOTAL PASIVOS				

Fuente: Pinzón (2012)

Una vez identificadas y ubicadas las problemáticas se realiza la ponderación, para ello se debe hacer la calificación donde se relacionan los problemas que están en las filas con los

problemas que se encuentran en las columnas, contrastándolos y dándoles una valoración considerando la siguiente pregunta: ¿El problema 1 es la causa por la que sucede o se genera el problema 2?, y así sucesivamente hasta completar la totalidad de las casillas (Gómez,2009).

La valoración que determina el grado de causalidad de cada problema se realiza mediante una escala establecida por el evaluador, para este caso se considera la siguiente escala de causalidad con su respectivo valor (Cuadro 7). Es importante mencionar que las celdas que corresponden a la diagonal principal de la matriz son iguales a cero porque no es posible relacionar la causalidad de un problema consigo mismo (Cueto,2015).

Cuadro 7. Categoría de la causalidad y valoración

<b>Categoría de la Causalidad</b>	<b>Valoración</b>
No es causa	Cero (0)
Es una causa débil o causa indirecta	Uno (1)
Es una causa medianamente directa	Dos (2)
Es una causa directa	Tres (3)
Es una causa muy directa	Cuatro (4)

Fuente: Cueto (2015)

Una vez realizada la calificación o el llenado de la matriz se debe sumar los valores de las columnas y las filas, la suma de los totales por filas equivale al total de los activos que representa al grado de causalidad de cada problema sobre los demás problemas y la suma del total de las columnas establece el total de los pasivos que se expresa como el grado de causalidad de todos los problemas sobre el problema particular (Cueto,2015).

El siguiente paso es elaborar un plano cartesiano con base en los valores totales que aparecen tanto en el eje X, el cuál es el total por fila, y en el eje Y, que se encuentra el total por columna. Por lo tanto, lo primero que se debe hacer es determinar el máximo valor y el menor valor tanto en el eje X como en el eje Y, para luego obtener el punto medio en el cual se interceptan los cuadrantes que definen si los problemas son pasivos, indiferentes, críticos o activos (Gómez, 2009).

Para ubicar el eje de los cuadrantes Pinzón (2012) propone la siguiente fórmula:

$$\text{Eje (x, y)} = ((\text{Valor M\u00e1ximo} - \text{Valor M\u00ednimo}) / 2 + \text{Valor M\u00ednimo})$$

En el eje Y (pasivos) se muestra el grado de influencia y el eje X (activos) indica el grado de dependencia de los problemas analizados, despu\u00e9s de ubicados los puntos se divide el cuadrante en cuatro como se observa en la siguiente Figura:

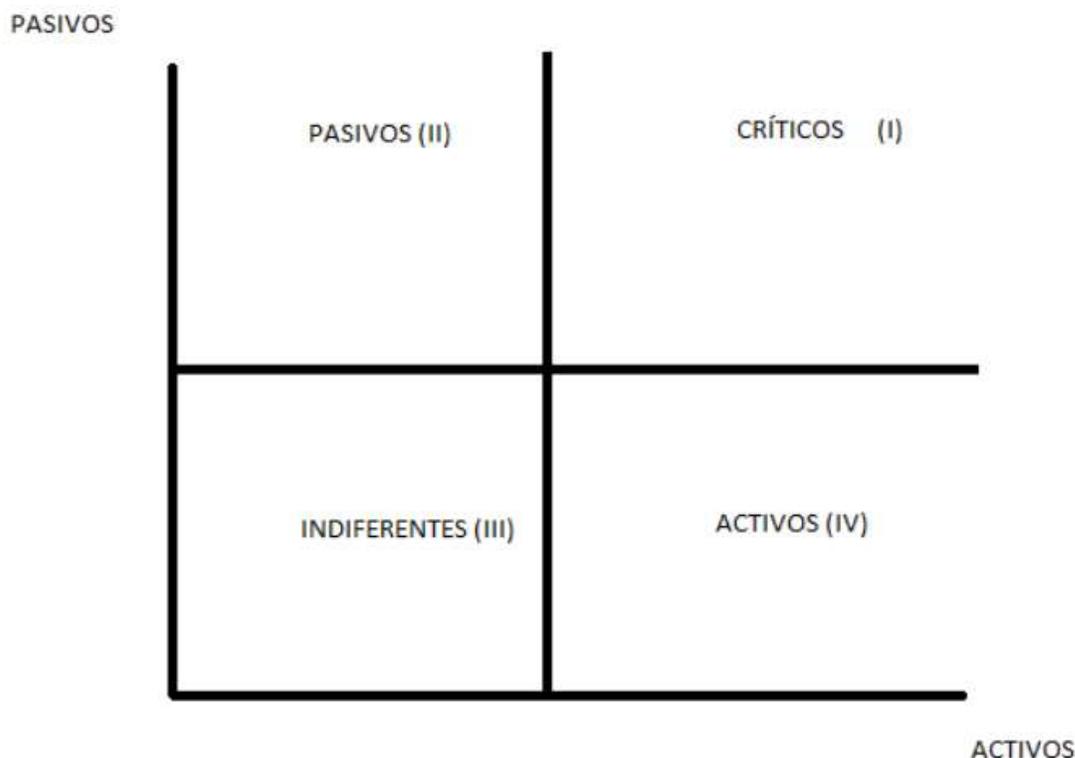


Figura 4. Ubicaci\u00f3n de los problemas en los cuadrantes

Fuente: Cueto (2015)

La matriz de Vester tiene tres etapas; la primera etapa es la identificaci\u00f3n de los problemas, la segunda etapa es la valoraci\u00f3n con respecto al grado de causalidad entre los problemas y la \u00faltima etapa es el c\u00e1lculo del grado de causalidad que cada problema tiene sobre los dem\u00e1s, en esta etapa los problemas pueden ser activos cuando tienen un alto puntaje y adem\u00e1s son causa de la mayor\u00eda de los problemas y pasivos son aquellos problemas que no tienen mucha influencia sobre los otros (Porras,2014).

## 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1. Identificación de la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la evaluación de escenarios del cambio climático en relación con la disponibilidad del recurso hídrico

Teniendo en cuenta la revisión y el análisis de información secundaria se presentan algunos estudios en los cuales se aplica el modelo WEAP para la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico teniendo en cuenta escenarios de cambio climático (RCP), a continuación, se mencionarán los estudios más importantes sobre este tema los cuales se presentan a nivel internacional, nacional y local.

#### 9.1.1. Estudios de caso de aplicación del modelo WEAP

**López, Manzano y Ramírez (2017)** realizaron el estudio denominado “Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México”. Cuyo objetivo es desarrollar del modelo mediante el uso del programa WEAP para la zona del Valle de Galeana, Nuevo León; para la determinación de los impactos de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 y la integración de escenarios de adaptación.

**Localización:** El Valle de Galeana se encuentra dentro del denominado Altiplano Mexicano. Es una zona con condiciones de aridez al pie del lado oeste de la Sierra Madre Oriental (López et al., 2017).

**Metodología:** El sistema hídrico en el que se basó el modelo WEAP está formado por las demandas (salidas) y por la oferta (entradas). Se obtuvo la información de la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), sobre las concesiones hasta el 2011 y el estudio de disponibilidad de agua para el acuífero. La modelación consistió en un análisis hidrológico, considerando datos de precipitación y temperatura para el escenario base y dos escenarios regionales de cambio climático, con una malla de 0.5 x 0.5 grados para el futuro cercano (2015-2030). Las variables ingresadas en el programa WEAP fueron la precipitación media (mm), temperatura media(°C), la evapotranspiración (mm), coeficiente de infiltración, entradas y salidas (López et al., 2017).

**Calibración:** Previo a la corrida del modelo WEAP con los diferentes escenarios se calibró el programa mediante el ingreso de variables conocidas, cuya fuente de información fue el

estudio de disponibilidad de agua del acuífero. Con dicha información se pudo corroborar que el comportamiento del modelo era compatible con los resultados esperados, lo que se consideró como el escenario base (López et al., 2017).

**Escenarios:** El escenario base fue construido con información histórica de temperatura media y precipitación mensual del periodo 1961-2000, para los escenarios de cambio climático se emplearon los datos de temperatura media y precipitación mensual. Se simuló los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 desde el año 2015 al año 2030 y dos escenarios de adaptación, en el primero se considera una reducción en la demanda para uso agrícola implementando sistemas de riego gradual y el segundo contempla un plan hídrico integral mediante programas de reforestación y recuperación de suelos, estos dos escenarios se simularon con base al escenario RCP 8.5 (López et al., 2017).

**Resultados:** Se obtuvo para el escenario base un volumen de agua de  $40.05 \text{ mm}^3$  en el año 2015 lo que indica que la demanda es insatisfecha, sin embargo, en los siguientes años el volumen aumentaría a  $50.68 \text{ mm}^3$ ; para el escenario RCP 4.5 se alcanzó un volumen de  $79.43 \text{ mm}^3$ ; en el RCP 8.5 el volumen llegaría hasta  $80.59 \text{ mm}^3$ . Para el caso del escenario del riego eficiente el volumen presenta una reducción gradual hasta el año 2025, ya que en dicho año se espera tener el 100% de conversión de sistemas para alcanzar un volumen de  $49.30 \text{ mm}^3$ , el cual se mantiene hasta el final del periodo analizado. En caso de que se implemente un plan hídrico, la demanda insatisfecha disminuye teniendo un volumen mínimo de  $11.07 \text{ mm}^3$  a partir del año 2035 (López et al., 2017).

**Conclusiones:** El autor menciona que el modelo aplicado para representar el sistema hidrológico del Valle de Galeana concuerda con los resultados del estudio de disponibilidad de agua que se realizó para este acuífero, pues en ambos existe un desbalance hidrológico, dado que el volumen de salidas es mayor respecto al volumen de las entradas, lo que no permite que el acuífero se recargue. Al parecer, la situación de la recarga del acuífero bajo escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) empeora, esto puede ser causado debido a la presencia de los pozos que actualmente se encargan del abastecimiento de agua en la región; sin embargo, para tener mayor certeza se deberá realizar un estudio minucioso (López et al., 2017).

Con base en este estudio se determina que la modelación hidrológica utilizando programas computacionales proporciona grandes beneficios en este caso con el modelo WEAP en el

cual se puede introducir escenarios de cambio climático, desarrollo de estrategias de adaptación y políticas regionales, entre otros, y con base en estas proyecciones se pueden tomar decisiones para contrarrestar los efectos que se presentan por el cambio climático y otras problemáticas que afectan la disponibilidad del recurso hídrico (López et al., 2017).

Pero a pesar de que los resultados concuerdan con el estudio realizado previamente sobre la disponibilidad de agua en el acuífero, se puede decir que, por el hecho de implementar acciones enfocadas para la sostenibilidad del sistema, en este caso mediante un plan hídrico, pero con este no se garantiza que la recarga será constante en el acuífero (López et al., 2017).

Los resultados del escenario que contempla un plan hídrico integral mediante programas de reforestación y recuperación de suelos concuerdan con lo manifestado por Marulanda (2017) que aunque es importante mencionar que la modelación hidrológica presenta limitaciones y restricciones para simular coberturas vegetales y usos del suelo, se determinó que los procesos de reforestación no serían suficientes para contar con mayor disponibilidad hídrica en los acueductos y será necesario recurrir a otras técnicas en función del abastecimiento requerido.

**Satos, D (2015) realizo un estudio denominado “Impacto del cambio socioeconómico y climático en la gestión de recursos hídricos (Cuenca del río Chancay-Huaral).** Cuyo objetivo es analizar las implicancias del Cambio Socioeconómico y Climático en la Gestión de los Recursos Hídricos de la cuenca Chancay-Huaral mediante el uso del modelo WEAP.

**Localización:** La cuenca del río Chancay-Huaral, está ubicado en la costa central del Perú comprendida entre los paralelos 11°00'00" y 11°39'00" de Latitud Sur y los meridianos 76°26'00" y 77°15'00" de Longitud Oeste (Santos,2015).

**Metodología:** La metodología del WEAP que se utilizó para simular los procesos internos de la cuenca fue la de humedad de suelo o “Soil Moisture Model”, este método simula los procesos hidrológicos que ocurre en cada "catchment" el cual requiere datos de entrada como precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento de nieve, latitud y cobertura vegetal, para estimar los componentes de balance hidrológico, como evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, subsuperficial y flujo base. Pero la cuenca presenta pocas estaciones climáticas, por ello la

información tanto temporal como espacial es insuficiente, por lo cual fue necesario completar la información con base en las cuencas vecinas (Santos,2015).

El modelo WEAP permite representar en forma semi distribuida los procesos hidrológicos que ocurren en los tributarios del cauce principal y en base a puntos de interés hídrico se identificaron 13 tributarios y 17 elementos aportantes mediante la herramienta ArcGIS, y para facilitar la calibración del modelo, se definieron 5 tipos de cobertura vegetal (Santos,2015).

**Calibración:** Debido a la falta de información del sistema de lagunas reguladas no se puede establecer el caudal, entonces el criterio utilizado para la calibración del modelo fue utilizar el periodo menos perturbado por acciones antrópicas (reservorios y centrales hidroeléctricas) desde 1969 a 1978. La validación se analizó bajo dos periodos, uno corto de 1979 a 1988 para evaluar la confiabilidad del modelo y de 1979 a 2012 para comprobar a través de pruebas estadísticas si se mantiene ante los cambios antrópicos actuales. Para evaluar el ajuste del modelo WEAP, se aplicaron el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el porcentaje de error (PBIAS) (Santos,2015).

**Escenarios:** Se realizaron las proyecciones hídricas para el periodo de tiempo de 2021-2050 con los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, se evaluó el análisis del ciclo anual y estacional de precipitación y temperatura. Para el análisis estacional de la precipitación se dividió en periodo seco el cual se encuentra entre los meses de mayo a noviembre y el periodo húmedo el cual corresponde a los meses de diciembre a abril (Santos,2015).

**Resultados:** En el escenario RCP 4.5 tanto en el periodo seco y húmedo se presentó un incremento del 14% y el 10%. Para el RCP 8.5 la precipitación tendrá un incremento de 12,9% a nivel anual siendo el mes de julio con el mayor incremento mientras que agosto tiene el menor incremento. La precipitación a nivel estacional se obtuvo que el periodo húmedo tiene un incremento de 13,4% y el periodo seco tiene un incremento de 10,4%. Para el caso de la temperatura en el escenario RCP 4.5 se presentó un incremento uniforme en todos los meses. La temperatura a nivel estacional para el periodo húmedo tiene un incremento de 14,0% y para el periodo seco de 20,9% (Santos,2015).

**Conclusiones:** El autor concluye que el modelo hidrológico WEAP reproduce bien la respuesta hidrológica de la cuenca tanto a nivel anual como mensual lo que permite

representar la dinámica en la cuenca para analizar escenarios de balances hídricos, además el coeficiente de Nash indica un alto grado de correspondencia entre los caudales simulados y los observados. Para el periodo de calibración se obtuvo valores de Nash de 0.8 y  $R^2$  de 0.80, indicando la capacidad del modelo de representar adecuadamente las condiciones hidrológicas en la cuenca. Para el caso de los dos periodos de validación (1979-1988 y 1979-2012), estos simularon satisfactoriamente los eventos secos y húmedos observados y presentaron estadísticamente resultados cercanos en sus análisis con Nash de 0.82 y 0.79 y,  $R^2$  de 0.83 y 0.79, corroborando que los cambios antrópicos desarrollados en la cuenca para dicho periodo no son significativos (Santos,2015).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se puede decir que en este estudio la modelización hidrológica por medio del WEAP fue compleja debido a que la información es insuficiente para algunas variables y se tomaron en cuenta los datos de cuencas vecinas, pero se realizó la calibración y validación del modelo, por lo tanto, los resultados presentados deben ser usados como referencia más no como valores exactos ya que los resultados de PBIAS del modelo varían de 9% a -4% la cual indican errores en la simulación hídrica, esto es debido a que el modelo tiende a subestimar al caudal observado tanto en la calibración como en la validación. Sin embargo, dichos resultados del PBIAS se encuentran dentro del rango óptimo de criterios de evaluación lo que sugiere un buen rendimiento del modelo y además reproduce bien la respuesta hidrológica de la cuenca (Santos, 2015).

Leguizamón (2016) señala que es necesario mejorar las bases de datos que cuentan con información meteorológica, ya que esto permitiría mejorar las calibraciones y por consiguiente la precisión de los modelos. Y es necesario incentivar el uso del software WEAP, ya que es una herramienta completa que facilita estudios con el recurso hídrico, con los cuales se puede informar a la población sobre los posibles riesgos que se pueden presentar.

Según Hernández, Méndez y Sánchez (2018) indican que en su estudio las principales limitaciones que presenta el modelo WEAP para los análisis integrales de mayor alcance, se basan en la ausencia de estaciones de aforo en el río, las escasas mediciones de demandas y del comportamiento de los patrones de consumo.

Al respecto Marulanda (2017) afirma que una de las limitaciones que se presentan en la modelación hidrológica es la falta de registros históricos de los datos climáticos debido a esto se genera cierto grado de incertidumbre. Por lo cual se recomienda que las entidades encargadas realicen monitoreos de las estaciones climáticas y los caudales. De esta manera se podría mejorar la respuesta de los modelos hidrológicos en la simulación de eventos extremos, fenómenos no detectables y escenarios de cambio climático, mediante el uso de datos climáticos recientes y fomentando su aplicación en investigaciones.

**Del rio, P (2015) realizó un estudio denominado “Análisis del impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca de Pangal en Pangal”.**

El objetivo de este trabajo es analizar el potencial impacto del cambio climático frente a escenarios futuros posibles, utilizando el programa WEAP con el módulo de glaciares en la cuenca del río Pangal en Pangal en la VI Región.

**Localización:** La VI Región del Libertador Bernardo O’iggins, cuya capital es Rancagua, se localiza en la macrozona central de Chile, aproximadamente entre 33°53’ y 35°01’ de latitud sur y desde los 70°02’ de latitud oeste llegando hasta el Océano Pacífico. Abarca una superficie de 16.365 km<sup>2</sup>, siendo está un 2,2% del territorio nacional. Limita por el norte con la Región Metropolitana y por el noroeste con la Región de Valparaíso, al sur con la Séptima Región del Maule, al oeste con el Océano Pacífico y al este con la Republica de Argentina. La cuenca del rio Pangal se ubica en la parte noreste de la cuenca de Rapel (Del rio,2015).

**Metodología:** El primer paso antes de iniciar las simulaciones es definir las condiciones iniciales dentro de cada objeto este proceso se hace únicamente para los glaciares localizados, mientras para las partes no glaciares de las subcuencas se utilizará la rutina de WEAP, con base en los datos de precipitaciones los cuales son extraídos desde la base de datos de las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA), por medio del registro de glaciares de la DGA, se pudo realizar una desagregación por subcuencas de los 147 glaciares que actualmente existen en la cuenca de Pangal. El método utilizado en WEAP es el de humedad del suelo (Del rio,2015).

El volumen de escurrimiento dentro de la subcuenca será el resultado de la suma de la contribución de la fusión del hielo, la nieve y el escurrimiento proveniente de la zona no

glaciar de la subcuenca, en este trabajo se modificó para uso diario, además todo el equivalente de agua nieve que se encuentra en la banda será derretida (Del rio,2015).

Es posible calcular la tasa de crecimiento/decrecimiento glaciar calculando la evolución del área año a año, dato fundamental para la calibración de este trabajo, porque no se conocen los valores de los caudales de deshielo de la cuenca por ello se realizará una comparación entre los valores de la tasa de decrecimiento glaciar de un estudio realizado en el año 2000 y la tasa modelada (Del rio,2015).

**Calibración:** Con la información meteorológica a escala diaria se realizó la calibración y validación del modelo WEAP. Para los dos procesos se realizaron tres pasos: el primero, se calibra la cuenca con la información meteorológica incorporando el módulo de glaciares sin modificar sus parámetros; en el segundo se hace la calibración de los parámetros que incluyen el módulo de glaciares con los resultados calibrados en el primero paso; y en el último se calibran todos los parámetros en conjunto (Del rio,2015).

Para el primer paso se identifican las variables influyentes en la modelación, en este caso los parámetros relacionados con la nieve son influyentes a la hora de modelar, por ser una cuenca predominantemente nival. Entonces se agregó el módulo de radiación, y con ello 3 nuevos parámetros, para poder así modelar de mejor forma los deshielos (Del rio,2015).

Para el segundo pase en el cual se calibra el módulo de glaciares usando los datos de retroceso anual de glaciares, también llamado tasa de abrasión, por ello se utilizó los valores máximos y mínimos de los parámetros del módulo de glaciares encontrados en estudios previos.

La calibración realizada en el paso dos, produjo alteraciones en los indicadores obtenidos en la primera calibración, ya que cada año del módulo de glaciares modifica el área glaciar aumentando el área en el modelo WEAP. Por esto en la tercera calibración se optó por seleccionar los mismos parámetros antes calibrados al ser éstos los más sensibles al modelo y luego se calibran los parámetros menos sensibles (Del rio,2015).

Los resultados del modelo WEAP se comparan con los caudales observados y se evalúan bajo los siguientes coeficientes estadísticos: Coeficiente de Nash-Sutcliffe, Error cuadrático medio (ECM), BIAS (Del rio,2015).

**Escenarios:** Mediante el modelo WEAP se proyectó los caudales para los años 2045-2075, utilizando los dos escenarios extremos denominados RCP 2.6 y RCP 8.5 que corresponden al más optimista y al más desfavorable (Del rio,2015).

**Resultados:** Los resultados obtenidos mostraron que la implementación del módulo de glaciares al programa WEAP resultó acorde, a pesar de que se toman datos que no son propios de los glaciares de la zona, según lo proyectado en el escenario RCP 8.5 para el año 2061 desaparecerán los glaciares de la cuenca del estero Puquios y en el escenario RCP 2,6 la desaparición se dará en el año 2068, con respecto a los otros glaciares se espera que reduzcan su área en un 40%. En la simulación de la precipitación en el escenario RCP 8.5 se presenta una variación anual de  $-0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  mientras que el escenario RCP 2.6 no presenta variación, ya que la reducción de precipitaciones es de un 4% para el RCP 2.6 y un 8% para el RCP 8.5. Al comparar los resultados de los escenarios RCP con el escenario histórico se obtuvo que en el RCP 2.6 en los meses enero, febrero y octubre, se supera los valores del escenario histórico en un 10%, mientras que en el RCP 8.5 se presentan los valores superiores en los meses de diciembre, enero y febrero. Para la temperatura se presentaron diferencias en la época de verano (Del rio,2015).

**Conclusiones:** El autor menciona que la modelación de la cuenca es exitosa y la integración del módulo de glaciares al programa WEAP resultó acorde a lo esperado, a pesar de usar datos que no son propios de los glaciares de la cuenca del río Pangal logró su objetivo, es decir modelar la evolución de los glaciares y su aporte al caudal de la cuenca. Determinando que los glaciares se ven seriamente afectados, según lo proyectado los glaciares de la cuenca del estero Puquios desaparecen en el año 2061 para el escenario RCP8.5 y en el 2068 para el escenario RCP2.6, los demás reducen su área en un 40% (Del rio,2015).

Con base en este estudio se puede decir que el modelo WEAP es una buena herramienta para simular los incrementos y reducciones de la temperatura y la precipitación ya que los resultados obtenidos concuerdan con los valores reportados en la literatura (Del rio, 2015)

**Escobar et al., (2013) realizaron el estudio denominado “Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades la paz y el alto, Bolivia”.** Esta investigación tuvo como objetivo evaluar cuáles podrían ser

las implicaciones del cambio del clima futuro en el abastecimiento de agua en un horizonte de tiempo 2011-2050 bajo un ambiente de incertidumbres. El enfoque y el tipo de modelo desarrollado podrían ser útiles en el proceso de toma de decisiones en la planificación de recursos hídricos y adaptación al cambio climático.

**Localización:** El estudio caso está referido a los sistemas de agua de las ciudades de La Paz y El Alto que están ubicadas en la región Occidental de Bolivia (Escobar et al., 2013).

**Metodología:** Se planteó el uso de un paso de tiempo mensual para lo cual requiere datos de entrada como precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento de nieve, latitud, y cobertura vegetal; para estimar la evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo base (Escobar et al., 2013).

En esta investigación se divide la cuenca en zonas glaciares y no glaciares, los glaciares son conceptualizados por el modelo grado-mes. El área inicial del glaciar se obtiene con imágenes satelitales este valor es usado en el cálculo del volumen glaciar inicial mediante una ecuación empírica. Para cada mes del año hidrológico el volumen de escurrimiento superficial es la suma de la fusión de nieve, glaciar y el escurrimiento modelado por el método Soil Moisture del modelo hidrológico de WEAP en zonas no glaciares. Al final del año hidrológico calcula el balance de masas para evaluar los cambios en el volumen total del glaciar. El modelo glaciar utiliza solo tres parámetros: la temperatura crítica ( $T_0$ ), el factor de grado -mes ( $a_{ice}$ ) y Nieve ( $a_{snow}$ ) (Escobar et al., 2013).

**Calibración:** Se calibra en el periodo de tiempo (2004 – 2010) primero el módulo glaciar grado-mes para la cuenca glaciar Zongo y luego se hace la calibración de la precipitación-escorrentía para las cuencas Condoriri, Tuni y Huayna Potosí. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utilizó el índice de eficiencia de Nash Sutcliffe y la desviación relativa (Escobar et al., 2013).

**Escenarios:** Se plantearon 18 escenarios de temperatura y 18 escenarios de precipitación, pero solo se seleccionaron seis combinaciones de temperatura y precipitación, excluyendo los más extremos. Con este procedimiento se realizaron las proyecciones climáticas para el futuro (Escobar et al., 2013).

**Resultados:** En cuanto a los resultados del módulo glaciar se obtuvo que se puede presentar un retroceso glaciar de la cuenca Tuni, donde los resultados indican que los

glaciares desaparecerían en los próximos 30 años. Esto definitivamente podría tener implicaciones en el abastecimiento de agua en el sistema El Alto, donde la demanda modelada hasta el año 2026 fue en  $1.29 \text{ m}^3 / \text{s}$  y hasta el año 2050 en  $1.55 \text{ m}^3 / \text{s}$ . Con la actual infraestructura la cobertura de la demanda para el escenario de clima pesimista a mediano y largo plazo sería del 71% y 51% respectivamente; mientras que en el escenario de clima optimista la cobertura a mediano y largo plazo sería de 75% y 62% (Escobar et al., 2013).

Se obtuvo que en la cuenca El Alto en un futuro podría sufrir serios problemas en el abastecimiento debido al incremento de la demanda y la reducción de la oferta de agua por los cambios en el clima. Asimismo, en la cuenca el Pampahasi también se podrían presentar problemas, pero menos preocupantes que en el caso de El Alto. En el caso de la cuenca Achachicala, si bien las cuencas podrían sufrir cambios en la disponibilidad de agua ésta no presentaría problemas en la cobertura de la demanda (Escobar et al., 2013).

**Conclusión:** El autor menciona que la investigación se desarrolló una herramienta que permite la modelación de los recursos hídricos, y que en el modelo WEAP se pueden incluir incertidumbres como cambio climático que puede ser útil en la planeación del recurso hídrico (Escobar et al., 2013).

Cabe destacar lo que afirman Escobar et al, 2013, que los estudios en los cuales se simuló el módulo glaciar tienen una mayor complejidad ya que el modelo WEAP no cuenta con un modelo hidro glaciológico, pero se tuvo en cuenta algunos estudios previos en los cuales se utiliza una metodología para modificarle el modelo de grado - día y de grado - mes, las cuales se utilizaron en el estudio realizado en Santiago de Chile de la cuenca del río Pangal (grado - día), mientras que en el estudio de Bolivia realizado en las cuencas El Alto y la Paz se utilizó la metodología de grado - mes.

En los dos casos de estudio mencionados anteriormente se puede decir que el modelo WEAP simula correctamente el módulo de glaciares pero se deben hacer algunas consideraciones como las limitaciones que se presentaron ya que en las investigaciones los datos sobre los glaciares no son suficientes como lo manifiestan Escobar et al., 2013 que en las cuencas de suministro de La Paz y El Alto, existen escasos datos climáticos, y en el caso de los glaciares fue necesario extrapolar datos del glaciar Zongo, del mismo modo Del río (2015) manifiesta que en su estudio en la cuenca del río Pangal fue necesario utilizar los

datos reportados en estudios previos principalmente de los glaciares de la cuenca del estero Puquios para simular las proyecciones para los glaciares en el modelo WEAP.

Se debe mencionar que en el caso de estudio realizado en Bolivia se utilizó adicionalmente un modelo que se llama AguAAndes pero en otras partes del mundo se conoce como WaterWorld, sirve para calcular el balance hídrico y se emplea en cuencas con escasez de datos y características muy heterogéneas, sin embargo los caudales modelados en este modelo para un periodo de tiempo desde el año de 1950 hasta el año 2000, mientras que la modelación en WEAP se realizó para el periodo de 1995 hasta el 2010 (Escobar et al., 2013).

Estos estudios de caso se diferencian en que en el caso de la cuenca del río Pangal se utilizaron aparte de los 11 parámetros que se usan en WEAP se agregaron 3 parámetros más para el módulo de radiación, y 5 más para el módulo de glaciares (Del río, 2015). Mientras que en la cuenca de la Paz y el Alto se usan solo tres parámetros para el módulo glaciar. Otra diferencia es en el proceso de calibración del modelo WEAP ya que en la cuenca del río Pangal se realizó tres calibraciones ya que primero, se calibra la cuenca con la información

meteorológica incorporando el módulo de glaciares sin modificar sus parámetros; luego se calibran los parámetros que incluyen el módulo de glaciares con los primeros resultados calibrados; y por el último se calibran todos los parámetros en conjunto. Mientras que en la cuenca la Paz y el Alto solo se calibra el módulo glaciar y luego se calibra los datos para ingresados en la metodología de precipitación- escorrentía que utiliza WEAP.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en ambos estudios que implementan el modelo de glaciares pero estos valores pueden usarse como referencia, más no se consideran como valores exactos, pero aun así se debe destacar que el modelo WEAP tiene la capacidad de completar los datos faltantes esta es una ventaja muy importante como lo menciona Alcamo et al, (2003) el modelo es capaz de completar datos faltantes mediante distintos métodos como: interpolar, reemplazar, repetir o interpolar con el método de año agua, en aquellos casos donde la información hidrometeorológica se encuentra incompleta.

Por el contrario, Salinas y Paz (2011) expresan que, si bien el modelo WEAP es una excelente herramienta a la hora de pensar en la planificación, pero cuando se utiliza el método de los años de agua, es insuficiente debido a la simplicidad para el cálculo de los

años hidrológicos que dependen meramente de una variable de incremento o decremento en la precipitación y no así en la gran cantidad de parámetros necesarios para su evaluación. Por lo tanto, para realizar un mejor análisis se recomienda trabajar con un método hidrológico que se encuentra incorporado en el modelo WEAP y no aplicar el método de los años de agua.

Además, el modelo WEAP permite crear condiciones actuales y futuras para observar el comportamiento de las fuentes hídricas. Para Villafañe y Rada (2011), esta es la principal ventaja del modelo porque facilita la generación de diferentes escenarios, permitiendo así al planificador, elegir la complejidad según la información con la que cuente.

De acuerdo con Salinas y Paz (2011) aseguran que sin duda la principal ventaja que tiene el modelo WEAP es la facilidad para desarrollar escenarios que exploran posibilidades en el manejo del recurso hídrico, pero el nivel de complejidad depende de la habilidad del modelador y del acceso a los datos requeridos en el modelo. Por ello se recomienda el uso de WEAP como una herramienta para proyectos de planificación por los gobiernos municipales y departamentales.

Mediante la generación de escenarios, se pueden evidenciar las potencialidades de WEAP para la toma de decisiones ante cambios futuros en la planeación y administración integral de una cuenca, siendo de gran utilidad en la operación y en la gestión de ordenamiento territorial y su efecto en la planeación y administración del recurso hídrico (Hernández et al., 2018)

**Autoridad Nacional del Agua (ANA), (2015) realizaron un estudio denominado “Evaluación de Recursos Hídricos en la cuenca Pativilca Autoridad Nacional del Agua”.** Su objetivo es determinar la disponibilidad hídrica de las cuencas hidrográficas con un modelo de soporte para la toma de decisiones”

**Localización:** La cuenca del río Pativilca se ubica entre los 9°50' y 10°55' de Latitud Sur y los meridianos 76°45' y 77°50', de Longitud Oeste. Altitudinalmente, se extiende desde 0 msnm hasta los 5500 msnm (ANA,2015).

**Metodología:** La cuenca del río Pativilca se dividió en 21 subcuencas. Para la subdivisión de dichas subcuencas se realizó un análisis previo de las características topográficas, geológicas e hidrológicas. El modelo hidrológico describe el comportamiento de la cuenca

de manera semidistribuida en subcuencas. En la cuenca se encuentran varios nevados por lo tanto serán objeto de modelación. En el modelo WEAP se utilizan los datos de la temperatura media mensual, precipitación, las pérdidas, topología, resolución, entre otros, en un periodo de tiempo desde 1965 hasta 2013 (ANA,2015).

En el modelo WEAP se utilizó el método de lluvia – escorrentía con base en los datos climáticos, para conocer el volumen de escurrimiento de cada subcuenca. Para ello se emplean los datos de la precipitación, escorrentía y evapotranspiración. Con el módulo de precipitación – escorrentía de WEAP se ha generado una serie de caudales (ANA, 2015).

**Calibración:** La calibración permite el ajuste de los parámetros del modelo durante un periodo comparando los valores simulados y los caudales reales. La validación se realiza mediante la comprobación de la capacidad predictiva del modelo aplicando los parámetros de la calibración durante un periodo diferente al empleado para ésta. La precisión del modelo se determinó con los índices de Nash-Sutcliffe, BIAS y el coeficiente de correlación (ANA, 2015).

**Escenarios:** Para estimar el cambio climático para el año 2035 se utilizaron los escenarios RCP 2,6 y RCP 8,5 en los cuales se incrementó la temperatura y la precipitación en un 0,7°C y 0,3 % para el escenario RCP 2,6 y en un 1,1 °C y 2,0% en el escenario RCP 8,5 en los años 1986 y 2005. Estos incrementos de la temperatura y la precipitación se realizaron con base en el documento llamado “Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030” realizado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (ANA, 2015).

**Resultados:** Se obtuvo que los resultados del escenario RCP 2.6 son muy similares a los del escenario histórico, pero en el escenario RCP 8.5 los caudales medios son mayores comparados con los caudales históricos, en este escenario se determinó que 1,631 hm<sup>3</sup>/a de oferta media es afectada por el cambio climático. En cuanto a la temperatura promedio entre los años 1965 y 2013 las variaciones se dan en función del relieve de la cuenca. Pero gracias al incremento de la precipitación se compensa el aumento en la temperatura, por ello los caudales presentan un aumento en todos los meses, pero serán menores en los meses secos, se presenta un leve cambio en enero, febrero y marzo. La variación mensual que se presentó en el régimen natural entre el escenario actual y el escenario proyectado

incluido el impacto del cambio climático es mínima, ya que el máximo aumento que alcanzan en estos meses es de 2,63 hm<sup>3</sup>, lo cual equivale a un 0,87% respecto a la situación actual (ANA, 2015).

**Conclusiones:** El autor concluye que los resultados del modelo WEAP proporcionan información consistente en relación con los efectos de la variabilidad climática sobre la demanda. En cuanto a la oferta de agua de la cuenca, se estimó mediante el cálculo por subcuencas a escala mensual durante un período temporal de 50 años (desde el año 1965 hasta el año 2013), partiendo de datos locales hidrometeorológicos (ANA, 2015).

En este estudio se puede decir que existe una mayor complejidad ya que se aplica la metodología de lluvia-escorrentía que tiene el modelo WEAP en la cual se considera tanto el recurso hídrico superficial como el recurso subterráneo, y adicional a esta metodología, se tiene en cuenta la infraestructura que se utiliza para la gestión de la cuenca (presas de regulación, centrales hidroeléctricas y canales de trasvase). Pero cabe destacar que, en este estudio, la información hídrica de partida no era la más apropiada tanto en calidad como en la confiabilidad debido a que se utilizó la información de las estaciones climáticas vecinas, pero si se realizaron diferentes metodologías para mejorar su confiabilidad. Estas carencias reflejan la debilidad institucional por parte de los entes encargados de la gestión del recurso hídrico y la falta de inversión económica (ANA, 2015). Por lo cual se puede decir que los estudios de modelación en los cuales se requieren datos históricos ayudan a conocer la cantidad y calidad de los datos con la que cuenta el área de estudio y en caso de tener deficiencias se refleja la necesidad de realizar más investigaciones que ayuden a mejorar la recopilación y obtención de información.

La implementación del software de simulación WEAP es una gran herramienta para el fortalecimiento de la toma de decisiones para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda La Bella, pero en este trabajo se presentaron algunas limitaciones en cuanto a la obtención de información, tanto climática como de los usos de suelo, debido a que la vereda es un área pequeña. No obstante, a pesar de la carencia de instrumentación hidroclimatológica se demostró que es posible utilizar información climatológica de un macroproyecto. Sin embargo, es importante aclarar que esta es una estrategia útil para conocer ciertas zonas de las que no se cuenta con información oficial, pero esta medida no

iguala la veracidad de los análisis realizados a partir de información propia, por lo tanto se recomienda que se realice el fortalecimiento de la instrumentación, ya que esto debería ser una prioridad para la gestión de los recursos hídricos no solo en las cuencas de ríos principales sino también de sus tributarios (Castro,2014).

A continuación, se presentan algunas experiencias de aplicación del modelo WEAP en Colombia y a partir de esto, se permite conocer los avances de modelación hídrica con esta herramienta teniendo en cuenta la metodología y los resultados de cada estudio.

**Pimiento y Restrepo, 2018 realizaron un estudio denominado “Análisis de la relación oferta-demanda hídrica en la cuenca del río Gualí bajo escenarios de cambio climático”.** El objetivo es analizar la relación oferta-demanda de agua en la cuenca del río Gualí bajo escenarios de cambio climático, a partir de indicadores.

**Localización:** La cuenca del río Gualí se encuentra ubicada en la zona norte del departamento del Tolima con coordenadas 5°12'0'' N y 4°43'60'' W sobre la cordillera central. Sus límites están dados por la cuenca del río Guarino al norte, las cuencas del río Lagunilla y Sabandija al sur, aporta a la cuenca del río Grande del Magdalena al oriente y al occidente colinda con la cuenca del río Chinchiná (Pimiento y Restrepo,2018).

**Metodología:** Esta investigación se divide en 3 etapas metodológicas:

- Se estimó de la oferta hídrica actual y futura
- Se realizó la obtención de la demanda actual y futura
- Se plantearon y evaluaron medidas potenciales para la disminución de demanda insatisfecha de los diferentes sectores hidro dependientes.

Los datos de entrada en el modelo WEAP que se utilizaron fueron: cobertura y uso del suelo, tipo de suelo, geología, tecnologías de irrigación, precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, nubosidad, latitud, longitud y la información sobre la demanda.

El modelo WEAP usa el método de lluvia-escorrentía de tipo continuo, configurado a partir de un área de estudio compuesta por subcuencas contiguas. Además, este modelo cuenta con dos receptores que distribuyen el agua en escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación (Pimiento y Restrepo,2018).

**Calibración:** En el caso de WEAP el proceso de calibración se lleva a cabo por medio de un conjunto de parámetros hidrológicos que permiten realizar el ajuste de las condiciones simuladas a las observadas, en donde con estos resultados se aplican medidas estadísticas que permitan calcular la precisión del modelo y así ajustar los parámetros hasta que se obtengan los resultados óptimos (Pimiento y Restrepo,2018).

Cuando se han determinado los valores correspondientes de la calibración se procede a realizar la correlación entre los datos observados y los datos simulados a través de un análisis estadístico llevado a cabo mediante índices de correlación. Para el modelo WEAP se utiliza el índice de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo (también llamado desviación relativa de los caudales o Bias) (Pimiento y Restrepo,2018).

**Escenarios:** Se realizó la modelación de los escenarios de cambio climático RCP 2,6 y RCP 8,5 teniendo en cuenta los valores de la precipitación y temperatura el análisis se realizó en tres periodos de tiempo, el primer periodo comprende desde el año 2013 al año 2040, el segundo periodo comprende desde el año 2041 al año 2070 y el tercer periodo va desde el 2070 al 2100 y se determinó la demanda insatisfecha (Pimiento y Restrepo,2018).

**Resultados:** En la cuenca del río Gualí, para el periodo comprendido entre los años 2013 a 2040 se presentarán mayores reducciones del caudal cuyos valores oscilan entre el 5.8% y 9.56% para el RCP 2.6 y para el RCP 8.5 la disminución sería de 2.18% y 6.86%, en cuanto a la demanda insatisfecha se obtuvo que para el periodo de referencia que va desde el año 1989 hasta el año 2013 no se presenta demanda insatisfecha, pero para los dos escenarios RCP 2,6 y RCP 8,5 se obtuvo que el periodo más crítico se encuentra entre los años 2071 al 2100 ya que solo este periodo tiene demanda insatisfecha. El escenario RCP 8.5 tiene una menor reducción del caudal y menor demanda insatisfecha porque hay una mayor oferta hídrica en el caudal comparado con los resultados del escenario RCP 2.6 (Pimiento y Restrepo,2018).

**Conclusiones:** El autor menciona que las proyecciones obtenidas señalan disminuciones en la oferta hídrica, lo que sumado al crecimiento poblacional y a la expansión agrícola e industrial de la zona, esto puede generar estrés hídrico debido al aumento en la presión sobre los ríos de la cuenca (Pimiento y Restrepo, 2018).

Con base en los resultados obtenidos en este estudio se puede decir que las autoridades ambientales, los actores institucionales y gubernamentales tienen la responsabilidad de

controlar las actividades económicas que hacen uso del recurso para reducir el riesgo por desabastecimiento hídrico (Pimiento y Restrepo, 2018).

Además, se debe mencionar que en Colombia es muy evidente que existe un gran desconocimiento sobre el estado del recurso hídrico por lo cual es necesario implementar estaciones hidro-meteorológicas a nivel de microcuencas, principalmente donde se ubiquen las fuentes hídricas abastecedoras, para obtener datos certeros en el tiempo y de esta manera se pueden tomar mejores decisiones (Folleco,2017).

**Labrador et al., 2016 realizaron un estudio denominado “Desarrollo de un modelo para planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe, Huila, Colombia”.** Cuyo objetivo es desarrollar un modelo hidrológico para conocer el impacto de los escenarios de cambio climático sobre la oferta hídrica para el período (2011–2050), como herramienta para apoyar la toma de decisiones en la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia.

**Localización:** La Cuenca hidrográfica del río Aipe está localizada en el noroccidente del departamento del Huila, sur de Colombia. Se localiza con las coordenadas 3° 13’N y 75°14’O, cubre un área de 688.9 Km<sup>2</sup> y se extiende entre los municipios de Aipe, Neiva y Palermo (Labrador et al., 2016).

**Metodología:** A nivel climático la cuenca del río Aipe esta monitoreada por 12 estaciones pluviométricas y dos estaciones climatológicas ordinarias (San Alfonso y Santa María) las cuales tienen registros diarios desde 1970 hasta 2011, y se utilizaron los registros de caudales diarios desde 1980 – 2011 (Labrador et al., 2016).

La cuenca fue modelada con WEAP a escala de subcuencas para un total de 65 unidades de respuesta hidrológicas. Se modelaron 20 corrientes tributarias directas e indirectas del cauce principal con la información generada en 1 punto de monitoreo, además se consideraron 3 demandas de agua para consumo y los requerimientos hídricos para las principales coberturas vegetales (bosques, pastos, suelos desnudos, zonas agrícolas, zonas urbanas, lagos, entre otros) (Labrador et al., 2016).

**Calibración:** Para realizar la calibración del modelo se utilizó el 70% de la serie histórica de los caudales observados (1980-2001) en el punto de cierre de la cuenca. La calibración

se realizó a través de conocimiento experto en hidrología y el método de prueba y error. Este método implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Una vez calibrado el modelo se procedió a la validación con el 30% de los datos de caudales observados restantes (2002 - 2011). Tanto la calibración como la validación fueron evaluadas con la métrica del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), cuyo principal objetivo es establecer una correlación confiable entre los valores simulados y observados. (Labrador et al, 2016).

**Escenarios:** En la cuenca del Rio Aipe se consideraron dos incertidumbres para el clima y dos incrementos en la demografía. Pero primero para calcular la oferta hídrica se estableció el número de habitantes el cual es igual a 23.513 el cual se tomó como población de referencia a la cual en el escenario I se hace un incremento del 2% (escenario I, 23.983 habitantes) y luego se incrementa un 10% (escenario II, 25.864 habitantes), los cuales generan un impacto en la oferta y demanda de la cuenca (Labrador., et al 2016).

Para los escenarios climáticos se realizó una serie de proyecciones climáticas de la precipitación, para ello se utilizaron las predicciones del proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) las cuales considerando el clima actual determinan una tendencia climática húmeda para el escenario III y para el caso del escenario IV se consideró una tendencia climática seca. La simulación se desarrolló para los años 2011 a 2050 (Labrador., et al 2016).

**Resultados:** Se obtuvo como resultado que la oferta hídrica de la línea base (1980- 2011) es igual a  $15.31 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , para el escenario I el caudal disminuye en  $0,43 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  el cual equivale a -2,81% dando como resultado un valor de  $14,88 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y en el escenario II la reducción es igual a  $4,44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  cuyo porcentaje es igual a -29% dando como resultado un caudal de  $10,87 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , pero a pesar de estos procesos antrópicos y su efecto sobre la oferta esta será suficiente para satisfacer la demanda del municipio (Labrador., et al 2016).

Por otro lado, teniendo en cuenta los escenarios de clima, se obtuvo como resultado que el caudal para el caso del escenario III aumenta en  $3.67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  dicho incremento es igual al 23,97% dando como resultado  $18,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Para el caso del clima seco el caudal disminuye en  $10.07 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cual equivale al 65.77% cuyo valor es de  $5,24 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (Labrador., et al 2016).

**Conclusiones:** En este estudio se concluye que el modelo fue capaz de simular el comportamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Aipe, ya que, a pesar de los problemas asociados a la disponibilidad y la calidad de la información ambiental, el modelo mostró un buen desempeño ( $R^2 = 0.75$ ) por ende se puede decir que la representación de la dinámica hidrológica de la cuenca se puede considerar confiable hídrico (Labrador et al, 2016).

En este estudio se puede manifestar que el modelo hidrológico WEAP desarrollado en la cuenca del río Aipe es una herramienta muy útil que contribuye en la asistencia y toma de decisiones en el proceso de planeamiento hidrológico basándose en escenarios multicriterio y considerando los diferentes usos del recurso hídrico (Labrador et al, 2016).

Mediante la utilización de escenarios, los cuales sirven de apoyo para las instituciones en la toma de decisiones frente a los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático, ya que mediante la simulación de escenarios se puede representar el comportamiento del clima en los próximos 50 años y también conocer si los recursos hídricos serán suficientes para los usos doméstico, industrial y ecológico. Con base en esta información se puede aplicar las herramientas propuestas en sus procesos de planeación (Stockholm Environment Institute

(SEI) & Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID),2014).

En los estudios en donde se incorpora el cambio climático es con el propósito de pronosticar el comportamiento futuro de las fuentes hídricas y de esta manera apoyar los análisis mediante la simulación de escenarios ya que se consideran los efectos sobre el abastecimiento de agua (Marulanda, 2017).

Por otra parte, Salinas y Paz (2011) indican que para los escenarios en los cuales se consideran algunos patrones de crecimiento poblacional se presentó una sobrestimación de la demanda, siendo no aconsejable el uso de esta función para un análisis preciso, pero si para una estimación rápida.

Por eso a través de la herramienta WEAP se recomienda desarrollar escenarios de planificación y gestión del recurso hídrico, con la participación de los gobiernos municipales, organizaciones sociales, empresas, cooperativas y gobierno nacional, para evaluar los impactos en el balance de la oferta y demanda de agua, ya que gracias a las proyecciones que se realizan se puede conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca

en un futuro próximo, contribuyendo en la toma de decisiones para el manejo y la gestión de la cuenca y por consiguiente en las medidas de adaptación al cambio climático (Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN), 2013).

A nivel local se encuentra un estudio realizado en el municipio de Chachagüí en el cual se simulan en el modelo WEAP escenarios para determinar el incremento de la población y su relación con la oferta y la demanda de las dos fuentes hídricas, además se considera si es necesario solicitar la concesión del río Bermúdez para el abastecimiento de los diferentes usos del agua. Sin embargo, en este estudio no se consideran los escenarios de cambio climático solo se simularon escenarios de gestión, pero si se analiza la gestión del recurso hídrico con el modelo WEAP, a continuación, se mencionan los datos más importantes sobre este estudio.

**Folleco (2017) realizo un estudio denominado “Aplicación de una herramienta de gestión haciendo uso del modelo WEAP como soporte de decisión en las microcuencas la Tebaida, las Helechas y Bermúdez del Departamento de Nariño”** cuyo objetivo fue aplicar una herramienta de gestión, para la planificación del recurso hídrico a través del balance de la oferta hídrica y demanda doméstica de agua en el municipio de Chachagüí, departamento de Nariño.

**Localización:** La quebrada La Tebaida pertenece al área hidrográfica Pacífico transita por los municipios de Chachagüí y Buesaco, la quebrada nace en la longitud: 77° 14' 54,0" W y latitud 1° 17' 31,6" N a una altura de 2298 msnm, la quebrada las Helechas hace parte del municipio de Chachagüí con una longitud del cauce principal de 4.69 Km y un área de microcuenca de 5.84 Km<sup>2</sup>. Esta quebrada nace en la longitud: 77° 17' 43,0" W y latitud: 1° 20' 10,9" N a una altura de 2931 msnm. El río Bermúdez nace en las coordenadas 77° 15' 1,2" W longitud y latitud 1° 16' 13,6" N a una altura de 2888, estas tres quebradas forman parte del municipio de Chachagüí (Folleco, 2017).

**Metodología:** Se realizó la búsqueda de información secundaria tanto de las corrientes hídricas abastecedoras como de las características del acueducto y su demanda, con el fin de obtener datos iniciales que puedan ser ingresados al modelo. Se realizaron cuatro visitas de campo con el fin de corroborar parte de la información primaria encontrada, hacer un

reconocimiento de la zona y tener acercamientos con la empresa de servicios públicos que es la entidad que conoce de primera mano el desabastecimiento y los inconvenientes que se han presentado debido a la falta de agua (Folleco, 2017).

Para llevar a cabo esta simulación se requiere ingresar al modelo WEAP los datos de oferta y demanda de agua. Los componentes del balance hidrológico requeridos por el programa WEAP son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo base, esto sumado a los datos climatológicos y de cobertura vegetal. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como catchments (Folleco, 2017).

**Calibración.** Con la información anterior y una vez corrido el modelo, se procede a su calibración, la cual busca que la información hidrológica generada se acerque lo más posible a la realidad de la cuenca, a partir de la comparación entre las series de datos de caudales generadas versus las modeladas, fase en la cual se aplican medidas estadísticas para ajustar el modelo para que tenga una mayor precisión (Folleco, 2017).

Sin embargo, para el desarrollo de este estudio no fue posible seguir este procedimiento pues además de no contar con estaciones hidro-climatológicas dentro de las microcuencas de estudio, no se cuenta con información de caudales que permitan calibrar el modelo, razón por la cual se aplicó un procedimiento simple de ingreso de información existente con relación a la demanda de agua, y con base a la oferta se aplicó el método de transposición de caudales (Folleco, 2017).

**Escenarios.** Para calcular la oferta hídrica se plantearon un escenario en el cual no hay reducción de la oferta y otro en el cual se reduce la oferta en un 25%, estos escenarios solo se aplican a la quebrada la Tebaida. Para la demanda se consideró la demanda actual para el sector urbano y rural, y otro escenario plantea una demanda de 115 l/hab/día. Los escenarios de población se presentan incrementos poblacionales de 1.2% y 2%. Para las pérdidas del sistema se plantean un escenario con una tendencia de pérdidas actuales, otro con reducción del 25%, y un tercer escenario asumiendo unas pérdidas máximas del 35%. Adicionalmente se simuló un escenario con la concesión actual; otro con un aumento de 25% y el último con un incremento del 50%. (Folleco, 2017).

**Resultados:** Se obtuvo que la demanda bajo el escenario que considera las condiciones actuales la cobertura del acueducto sería del 76% y a partir de 2014 se empieza a disminuir

hasta finalizar con un 56,2% en el año 2040. Cuando se activa una concesión del río Bermúdez la cobertura de acueducto se mantendría en el 100% únicamente hasta el año 2024, y posteriormente la cobertura empieza a descender. Para evaluar las pérdidas en el escenario con una disminución de la oferta hídrica en un 25% con una tasa de crecimiento de población de 2% anual; la cobertura con las dos corrientes hídricas inicia en 76% para el año 2014 y finaliza en 45,4%, mientras que si se activa la tercera concesión del río Bermúdez la cobertura del 100% se mantendría hasta el año 2021. En el escenario en el cual se reducen las pérdidas a un 25% y el consumo de agua (115 l/hab/día) se mantiene la cobertura de acueducto en un 100% sin necesitar una tercera fuente hídrica. Para el escenario en el cual se reducen las pérdidas hasta un 35%; y el incremento poblacional es del 1.2% se tendría una cobertura del 100% hasta el año 2035 (Folleco, 2017).

**Conclusiones:** El autor concluye que los resultados del modelo WEAP permitieron determinar la vulnerabilidad de la cobertura por abastecimiento para consumo humano, así como la cobertura de los caudales ecológicos en sus actuales y que las altas pérdidas en el sistema de abastecimiento y el excesivo consumo de agua generan presión sobre el recurso hídrico (Folleco, 2017).

De acuerdo con el estudio mencionado se puede decir que el modelo WEAP es una herramienta muy útil ya que se logró determinar la vulnerabilidad en la cobertura de las fuentes hídricas que abastecen el municipio y se concluyó que no es necesario tener una tercera concesión de agua sin embargo no se consideró un escenario en el cual se presenten fenómenos climáticos extremos en dado caso no se podría cubrir la demanda por lo cual se recomienda actualizar el plan de contingencia para reducir el riesgo por desabastecimiento y afectaciones ambientales severas sobre el recurso.

Con los resultados obtenidos se puede decir que para tener sostenibilidad ambiental se necesita realizar una mayor gestión por parte de las instituciones ambientales (Folleco, 2017). Esto concuerda con Reyes (2012) el cual en su estudio concluye que, si se tuviera una red de estaciones de mejor calidad, en cuanto a la continuidad de los registros, la densidad de estaciones y las variables monitoreadas, se podría conseguir una mejor representación de la cuenca y mejores ajustes entre los resultados de las observaciones y las simulaciones, ya que sólo se pudo estudiar la precipitación y la temperatura, y no fue

posible calibrar otras variables. Por lo cual, en la cuenca no fue posible cuantificar el aporte de agua de origen glaciar al no tener un monitoreo que entregue información de la evolución del glaciar más largo del Chile.

Al respecto Cruz et al., 2016 mencionan que WEAP es una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones y sirve como apoyo en las medidas que utilicen las diferentes autoridades ambientales, ya que brinda la posibilidad de desarrollar algunas estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático orientando algunas tareas que ayuden en la planificación y la gestión del recurso hídrico.

Según Hervís, López, Rolón, Sánchez y Vargas, (2018) mencionan que el planeamiento hidrológico es una herramienta de gran utilidad en la elaboración de los planes de desarrollo ya que emplean los modelos de simulación, pues permite determinar los recursos hídricos a nivel local, regional y nacional. El estudio y la planificación de los recursos hídricos se encamina en la creación de las bases organizativas y el conocimiento necesario para asegurar la conservación y el uso racional del agua.

Los modelos de simulación son herramientas capaces de apoyar la toma de decisiones ante fenómenos de estrés hídrico como por ejemplo la sequía, sus resultados han sido claves en la prevención y anticipación de períodos de sequía, esto permite que se desarrollen planes para mitigar sus efectos (Hervís et al., 2018). Según FAN (2013) es necesario desarrollar medidas de adaptación y mitigación a los efectos de las sequias recurrentes y prolongadas, estas acciones contribuyen en la optimización del uso del recurso hídrico y se realicen prácticas de conservación, de carácter prioritario en las zonas de recarga acuífera y áreas de abastecimiento de agua.

Existen muchos modelos de simulación que se emplean en la actualidad para el planeamiento y evaluación de los recursos hídricos, entre los más empleados en el mundo por su fiabilidad, se encuentra el modelo WEAP, utilizado ampliamente para analizar los efectos del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico. WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua, que opera bajo el modelo de balance hídrico (Hervís et al., 2018).

Amestoy, Cretaz, Diaz, Geler y Hervís (2018) señalan que los modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos como el modelo WEAP monitorean y revisan continuamente el estado del recurso hídrico, enfocándose en el flujo del agua que se presenta en la cuenca luego de eventos hidrológicos para la distribución del agua que queda disponible en respuesta a tales eventos, facilitando el manejo adaptativo de la cuenca.

Estos modelos construyen virtualmente una cuenca hidrográfica y todos sus elementos como son: ríos, embalses, lagunas, acuíferos, y además tiene en cuenta a los usuarios del agua. Gracias a la consideración de escenarios, se puede analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores del recurso hídrico. Entre dichas incertidumbres se destacan el análisis de políticas de manejo, proyecciones de demanda, regulaciones ambientales, cambio de uso de la tierra y escenarios climáticos. WEAP permite optimizar y evaluar alternativas de la gestión del agua dentro de la cuenca, por solo citar algunos ejemplos: trasvases de agua, uso de fuentes alternativas, restricción de uso de fuentes o infraestructura de aprovechamiento en épocas del año, prácticas de ahorro, entre otros (Amestoy et al., 2018).

El modelo WEAP permite estimar la disponibilidad del recurso hídrico determinando el estado actual y frente a escenarios climáticos. Este modelo sirve como herramienta de planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático del sector agropecuario. Por ejemplo, se pueden realizar análisis de los calendarios de siembra de los cultivos agrícolas ya que cuando las zonas agrícolas están afectadas por la baja disponibilidad, los resultados del modelo permitirían tomar decisiones como el aplazamiento del inicio de la siembra cultivo mientras se presenta un mejoramiento de la situación de la disponibilidad del recurso hídrico, y si se presentan casos extremos se podría decidir no sembrar o sembrar cultivos menos consumidores de agua (Amestoy et al., 2018).

En sentido general, se puede decir que el modelo WEAP como herramienta de planificación permitirá evaluar si los recursos hídricos disponibles, considerando diferentes horizontes de planeación para determinar si será posible sostener el nivel de la demanda actual de la agricultura hasta se podría cuestionar su permanencia como actividad económica a futuro (Hervís et al., 2018).

La potencialidad del modelo WEAP como herramienta de apoyo, pues a partir de sus resultados se pudiera decidir aplazar el inicio de la siembra o reducir las áreas destinadas para la siembra del cultivo para disminuir la demanda y con ello el déficit. Porque si las áreas de los cultivos se sembraran sin prever situaciones de estrés hídrico se pueden perder las cosechas o disminuir los rendimientos de los cultivos. Por lo tanto, la información que se puede obtener de este tipo de análisis serviría en la evaluación de alternativas de gestión del recurso hídrico, pudiendo identificar posibilidades de trasvasar agua de las cuencas aledañas para compensar los déficits e incluso, en caso de estrés muy severo decidir no sembrar los cultivos que requieren niveles altos de demanda de agua (Hervís et al., 2018).

A partir de la información y estudios consultados, se evidencia que el modelo WEAP es de gran importancia en la gestión del recurso hídrico, porque mediante este software es posible evaluar los impactos futuros de un sistema a través de la simulación de escenarios. Esta capacidad de WEAP contribuye a enfrentar uno de los retos más complejos de la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH), que es la planificación de los recursos con una visión a largo plazo. Por lo cual se puede decir que el modelo WEAP sirve de apoyo en la planificación y gestión de dicho recurso, permitiendo involucrar a diferentes actores y tomadores de decisiones en un proceso de planificación abierto (Phurisamban, 2014).

Al respecto Cruz et al., 2016 afirman que el software de modelación de recursos hídricos WEAP es una herramienta de gran utilidad y sirve de apoyo en la toma de decisiones que realizan las autoridades ambientales y los usuarios del recurso hídrico puesto que brinda la posibilidad de desarrollar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático orientando y fomentando tareas de planificación y gestión del recurso hídrico. Este modelo ayuda a entender las dinámicas de un sistema complejo e interconectado como una cuenca y permite la implementación de incertidumbres en escenarios a modelar para determinar la respuesta a cambios potenciales.

Al respecto Amestoy et al., (2018) establecen que el modelo WEAP es una excelente herramienta para el apoyo a la toma de decisiones para la gestión integral del recurso hídrico ante los desafíos del clima futuro. Las potencialidades de su uso se evidencian porque permite plantear estrategias de adaptación del sector agropecuario al cambio

climático, enfocadas en resolver problemas concretos de la planificación de los recursos hídricos y la posibilidad de aplicarlas en otras cuencas.

Monge (2007) manifiesta que el modelo WEAP es una ventajosa herramienta para realizar trabajos para las evaluaciones hidrológicas, sin embargo, su nivel de precisión depende de la información disponible. Además, los resultados de la simulación de escenarios ayudan a tomar acciones de cambio en el manejo del recurso hídrico, pero para la elaboración de planes de manejo se necesita tener en cuenta diferentes aspectos tanto climatológicos, físicos, hidrológicos, geológicos, socioeconómicos y de riesgo.

Lo anteriormente mencionado coincide con los resultados obtenidos en un estudio realizado por Mena (2009) en el cual se concluye que gracias al modelo WEAP se evidencia que el cambio climático afectará la disponibilidad de agua en la cuenca del río Teno por lo que se recomienda tomar medidas de adaptación para minimizar los efectos sobre los consumidores ya que es uno de los recursos del cual dependen muchos sectores y el ser humano necesita para subsistir.

Por el contrario, la ANA (2015) manifiesta que a pesar de que faltaban algunos datos se pudo simular bien la realidad evaluando tanto la gestión actual como la situación futura de la cuenca estudiada y se logró determinar con los resultados obtenidos que los efectos causados por el cambio climático no afectan significativamente la zona de estudio.

En ese sentido se puede decir que el modelo WEAP es una gran herramienta con la cual se pueden proyectar los cambios que se podrían presentar en un futuro y permite simular las medidas o estrategias de control desde la situación actual y la adaptación a las diferentes condiciones meteorológicas que se presentan considerando el cambio climático que hoy en día se está evidenciando con los diferentes fenómenos naturales (Villa,2013).

Además, el modelo WEAP puede simular las condiciones actuales y futuras para observar el comportamiento de las fuentes hídricas. Según Villafañe y Rada (2011), esta es la principal ventaja de este modelo porque facilita la generación de diferentes escenarios, permitiendo así al planificador, elegir la complejidad según la información con la que cuenta. Por otra parte, Burbano (2009) menciona que el modelo WEAP permite una planificación a escalas locales o regionales, además, este modelo integra los procesos hidrológicos con el sistema de manejo de recursos hídricos, de tal manera que puede recibir

directamente información climática, y está basado en una visión holística e integrada del manejo de los recursos considerando tanto la oferta y demanda de agua.

Por lo tanto, se puede decir que en el modelo WEAP se pueden entender las dinámicas que se presentan en un sistema complejo e interconectado como una cuenca, en la cual se pueden representar las incertidumbres en escenarios obteniendo la respuesta a los posibles cambios.

Además, en el modelo WEAP también se puede hacer predicciones a futuro. Con respecto a esto Labrador et al., 2016 encontró que el modelo tiene la habilidad para predecir el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Aipe, cuenca de clima tropical con heterogeneidad y anisotropía en los suelos y la vegetación que introducen una complejidad natural en la forma hidrológica de la cuenca.

Según Castro, 2014 menciona que WEAP permite manejar niveles de incertidumbre en cuanto a la información que solicita, lo que lo hace más flexible y práctico frente a otros modelos hidrológicos como SWAT, el cual requiere más información.

Teniendo en cuenta los estudios consultados se puede decir que, en Colombia, como en otros países ha tomado gran importancia el tema de la gestión y aprovechamiento adecuado del recurso hídrico con el fin de generar una sostenibilidad entre su utilización y la conservación de este recurso. En donde el modelo WEAP hace parte de esos procesos de gestión.

Cabe mencionar que no solo en Colombia se han realizado estudios con el modelo WEAP sino también en otros países, Xue et al. (2015) menciona que el modelo WEAP cuenta con muchas implementaciones en diferentes partes del mundo, como California, Massachusetts, Georgia, Sur y Norte de África, varios países asiáticos. En la región Andina se encuentran aplicaciones principalmente en Bolivia, Colombia y Chile, en este último específicamente, se implementó el modelo WEAP en cuencas Nivales para simular los caudales futuros de acuerdo con las proyecciones de cambio climático para los períodos 2036-2065 y 2071-2100 (Mardones, 2009).

Actualmente en Colombia la gestión del recurso hídrico ha tomado gran importancia ya que se considera el aprovechamiento adecuado de dicho recurso para establecer la sostenibilidad entre la utilización y la conservación.

Por el contrario, Londoño, Mayorga y Ovalle (2015) mencionan que la aplicación del modelo WEAP es una herramienta útil para las evaluaciones hidrológicas y que se puede crear escenarios con los cuales se puede proponer acciones de cambio para un manejo adecuado del recurso hídrico, ya que se proyectan la demanda, el balance hídrico, la priorización de los usos del agua y el clima. Pero es importante mencionar que en el modelo WEAP se presentan restricciones respecto a:

- No se obtiene un análisis integrado en un solo gráfico o tabla, por lo que el usuario debe integrar los resultados para la demanda, el abastecimiento y la disponibilidad del recurso hídrico.
- Los resultados en este modelo están en un conglomerado de los más representativos ya sea en un gráfico o en una tabla, pero no se puede desagregar los resultados a conveniencia o interés del usuario.
- Los parámetros que utiliza el modelo no representan necesariamente las condiciones reales de la cuenca, ya que existen parámetros de los cuales no se tienen mucha información, o que varían significativamente frente a un cambio espacial dentro de la cuenca (p.67).

Monge (2007) concuerda que el programa WEAP es muy útil para el análisis de las proyecciones de demanda, abastecimiento y cobertura del recurso hídrico, pero no es posible obtener un análisis integrado en un solo gráfico o tabla, por lo cual el usuario debe encargarse de integrar los resultados de la disponibilidad del recurso hídrico. Es decir que el área de resultados en el modelo WEAP se muestran como un conglomerado de las más representativos mediante un gráfico o una tabla, pero no se pueden desagregar a conveniencia o interés del usuario.

Mardones (2009) asegura que el modelo WEAP posee una interfaz gráfica basada en el Sistema de Información Georreferenciada (SIG), a partir de la cual el usuario puede diseñar el modelo esquemático sobreponiendo los componentes del sistema como por ejemplo ríos, nodos de demanda, nodos de entrada, embalses, entre otros.

Por el contrario, Mondragón (2017) afirma que WEAP es un software que permite la modelación de sistemas hídricos bajo un ambiente gráfico y una interfaz amigable con el usuario, representando los sitios de demanda del agua tanto naturales como antropogénicos, sistemas de abastecimiento y tratamiento de agua, las actividades relacionadas al uso del

recurso hídrico, así como las interacciones entre los usuarios de este. Todo lo antes mencionado se muestra en un mismo esquema gráfico, se pueden agregar componentes como la representación hidrológica de la cuenca, la distribución del agua, factores físicos, almacenamiento, áreas de regadío, entre otros. El enfoque integral que tiene WEAP permite la consideración de aspectos de planificación que son importantes para los proyectos como lo es la gestión de demanda, la evaluación de estrategias de impacto o mitigación, análisis financieros y análisis de calidad de agua.

Por lo tanto, los escenarios que se representan en el modelo WEAP establecen enfoques actuales y futuros bajo diferentes regímenes considerando distintas condiciones y sus resultados se presentan en varios formatos que dependen del uso final que se le quiera dar (Mondragón, 2017).

Entre sus ventajas, además de sus capacidades flexibles de modelado, se destaca su capacidad de interactuar con otros softwares y herramientas útiles de manejo de información como lo son los sistemas de información georreferenciada (SIG) y su conexión con Excel (Mondragón, 2017).

Amestoy et al., (2018) mencionan que la integración de WEAP con otras herramientas de modelación permite complementar los análisis de la gestión del agua, a continuación, se mencionan algunas de las posibles integraciones y sus potencialidades.

#### **Integración con modelos de manejo agronómico:**

- **Modelo CROPWAT:** Con esta integración se puede evaluar el balance de la disponibilidad y la demanda para la variación de los cultivos por los efectos del cambio climático, principalmente el aumento de la temperatura (Amestoy et al., 2018).
- **Modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer):** Se puede simular las necesidades de riego de un cultivo agrícola y conocer si es posible suplir esta demanda con base en la disponibilidad del recurso hídrico (Amestoy et al., 2018).

- **Plataforma BioMa (Biophysical Modelling Framework):** Permite evaluar el rendimiento de cultivos agrícolas bajo riego ante diferentes escenarios climáticos y estimar los volúmenes de agua disponible (Amestoy et al.,2018).

#### **Integración con modelos de agua subterránea:**

- **Modelo Modflow:** Permite el análisis de la interacción del agua superficial y subterránea, además de mejorar los resultados del balance de aguas subterráneas en la gestión del agua (Amestoy et al., 2018)

#### **Integración con modelos de calidad del agua:**

- **Modelo QUAL2K:** La integración con este modelo permite analizar la calidad del agua en la gestión de los recursos hídricos, su implicación para otros usuarios y el rastreo de contaminantes en el área (Amestoy et al., 2018).

Según SEI & USAID (2014) menciona que la integración de estos modelos tuvo como resultado principal la identificación del comportamiento espacio temporal de los parámetros de calidad del agua oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO ) y temperatura (T) en una escala de agregación mensual y la evaluación de la implementación de dos estrategias de control de la contaminación hídrica: sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y sistemas de tratamiento anaerobio para la remoción de carga orgánica en el beneficio del café. Por esto la principal ventaja del desarrollo de integración entre estos dos modelos ha sido la simulación continua de WEAP, permitiendo realizar análisis de resultados para cada paso de tiempo.

#### **Integración con otros modelos hidrológicos y de gestión de los recursos hídricos:**

- **Modelo hidrológico SWAT:** Aunque ambos modelos se emplean para el planeamiento de los recursos hídricos, SWAT posee mayor fortaleza como modelo espacial y permite simular mejor la relación lluvia-escorrentía a nivel de subcuencas que el modelo hidrológico de WEAP. Sin embargo, SWAT no tiene en cuenta la gestión del recurso hídrico, por esto, la integración permite emplear las fortalezas de este y emplearlas en WEAP de forma indirecta (Amestoy et al., 2018).

- **Modelo de gestión HEC-PRM:** Aunque WEAP de igual forma permite analizar la operación de embalses simples, el modelo HEC-PRM es más completo en este tipo de análisis por ser un modelo especializado en estos temas.

De acuerdo con Leguizamón (2016) expresa que el modelo WEAP, es una herramienta que facilita la modelación, ya que permite evaluar no solo parámetros físicos si no también químicos, del mismo modo se obtienen resultados gráficos, de tabla y de mapa que mejoran la interpretación de los resultados.

## **9.2.Planteamiento de alternativas para la gestión integral del recurso hídrico de un estudio de caso: “Modelación hidrológica de la cuenca del río Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos”**

Con el fin de plantear alternativas para la gestión integral del recurso hídrico primero se identificó las problemáticas mediante una Matriz de Vester con base en información secundaria obtenida en el estudio denominado “Modelación hidrológica de la cuenca del río Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos”. Se escogió este estudio porque en él se presentan varios escenarios en los cuales se considera el cambio climático, el incremento poblacional y el cambio de cobertura, para determinar los efectos sobre la oferta disponible hasta el año 2050.

### **9.2.1. Estudio de caso: “Modelación hidrológica de la cuenca del río Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos”**

**Localización:** La cuenca del río Baché se encuentra en el municipio de Santa María, ubicado en la parte norte del Departamento del Huila. Esta cuenca tiene un área total aproximada de 153.452,52 hectáreas. Sus coordenadas planas son de X: 838.177.75 – 871.770.87 y Y: 795.304.17 – 853.286.81 (Figuras 5 y 6). Se localiza al noroccidente del departamento del Huila, la cuenca limita al noroccidente con la cuenca del río Aipe; al nororiente con la cuenca de Fortalecillas Villa vieja, al sur con la cuenca del río Yaguará; al suroccidente con la cuenca del río Pérez y al occidente con el municipio de Planadas, departamento del Tolima (Cruz et al., 2016).



Figura 5. Mapa de localización Municipio de Santa María - Huila

Fuente: (Cruz., et al 2016).



Figura 6. Mapa de localización del Río Bache

Fuente: (Cruz., et al 2016).

**Metodología:** Se recopiló la información relacionada con la administración del recurso hídrico, información climatológica de la zona, información cartográfica de la cuenca del Río Baché y su respectiva demografía en entidades como el IDEAM, la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios para Programas Sociales (SISBEN), entre otras. Con la información obtenida se definió el área de estudio teniendo en cuenta la cartografía, las curvas de nivel, la divisoria de aguas. Se depuro la información para tener resultados confiables (Cruz et al., 2016).

**Implementación del modelo WEAP:** Para la construcción del modelo hidrológico de la cuenca del Río Bache en WEAP se utilizó la información principalmente en cuencas, cobertura vegetal, demanda de agua e hidro climatología como se describe a continuación:

- **Cuencas.** Con base en el estudio de zonificación y clasificación de cuencas del Departamento del Huila en el año 2005, se tienen 18 subcuencas, para la cuenca del Río Bache representadas como corrientes tributarias directas e indirectas al cauce principal, con un único punto de monitoreo de caudal ubicado en la salida de la cuenca El modelo se alimentó a través de bandas de elevación cada 500 metros, configurando un total de 66 unidades hidrológicas o catchments (Cruz et al., 2016).
- **Demanda de agua.** Se consideró la demanda de agua para consumo humano representada por un nodo de demanda, al cual se le incluyó la ecuación de crecimiento, teniendo en cuenta las estimaciones de población desde 1985 - 2005 y las proyecciones de población del IDEAM para el municipio desde el año 2005 hasta el año 2020, con una población total de 2723 habitantes y una tasa de crecimiento anual de 1.2%. En cuanto a la demanda hídrica para cultivos agrícolas en la cuenca no se obtuvo registro siendo el de mayor uso el cultivo de arroz, pero su abastecimiento se hace aguas abajo del punto de cierre, para este ejercicio únicamente se les activó el sistema de riego con prioridad de segundo orden a los catchments con cobertura de café y pastos el cual internamente simula la humedad del suelo (Cruz et al., 2016).

- **Hidro climatología.** La información climática (precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar), es tomada de la red de estaciones del IDEAM localizadas dentro y fuera del área de influencia cuyos rangos de elevación van desde 866 msnm hasta 2326 msnm. Estas estaciones proporcionaron información media mensual para el periodo 1970 al 2014, con procedimientos de interpolación se generaron series mensuales para cada uno de los 66 catchments implementados en el modelo WEAP (Cruz et al., 2016).

De los métodos hidrológicos con que cuenta WEAP, se utilizó el método de Dos-Baldes (Soil-Moisture Method) para determinar el escurrimiento superficial, consiste en dividir el perfil del suelo en dos capas o baldes. Este es un método semi-empírico que determina la evapotranspiración, escorrentía superficial, flujo subsuperficial, percolación, y flujo base (Cruz et al., 2016).

**Calibración del modelo.** La etapa de calibración del modelo se desarrolló manualmente buscando reproducir con WEAP lo más cercanamente posible los correspondientes caudales históricos medidos en la estación El Socorro, siendo necesario comparar con los simulados, aplicando métricas estadísticas se estima la precisión del modelo para determinar en qué sentido se debe mejorar la calibración\_ (Cruz et al., 2016).

**Escenarios:** En la cuenca del Rio Bache se consideraron tres escenarios considerando el incremento poblacional para el caso del escenario bajo se consideró un incremento igual a 0.1%, el escenario medio tiene un incremento de 1.6% y el escenario alto presenta un incremento igual a 2.9% .Además, se simulo tres escenarios climáticos, para ello se tomó un escenario base con la información meteorológica desde 1970 hasta 2014, para el caso del escenario climático tendencial (MPI-ESM-MR) se aumentó la temperatura media entre 0,9 – 2°C y el promedio de la precipitación se aumenta en 1,05% y el ultimo escenario es el de mayor variabilidad (CanESM2 R3) en el cual se amplían los valores extremos de la precipitación y la temperatura. Es importante mencionar que se proyectaron las series climáticas mensuales a partir del año 2015 hasta el año 2050, pero el escenario base se simulo desde 1970 hasta 2050 (Cruz., et al 2016). Los escenarios descritos anteriormente se resumen a continuación:

Cuadro 8. Escenarios definidos en la cuenca del Rio Bache

	<b>Nombre</b>	<b>Categoría</b>	<b>Escenario</b>
Clima	Histórico	Suministrado por el IDEAM	3
	Tendencial	Escenario MPI- ESM-MR	
	Mayor variabilidad	Escenario CanESM2 R3	
Población	Bajo	Tasa de crecimiento del 0,1%	3
	Medio	Tasa de crecimiento del 1,6%	
	Alto	Tasa de crecimiento del 2,9%	
		Combinación de incertidumbres	9

Fuente: Cruz et al., 2016).

**Resultados:** Los resultados de los caudales de la oferta y la demanda se considera que se encuentra en estado crítico el escenario que simula el clima tendencial con crecimiento de población alta tiene la oferta hídrica más baja con un valor de 48.52 litros por segundo y la demanda más alta es la que corresponde al uso doméstico equivalente al 17.13 litros por segundo, teniendo en cuenta estos resultados se determinó que la presión de la demanda por uso de agua es de 35%, la cual se clasifica como una presión alta con respecto a la oferta disponible. (Cruz et al., 2016).

Con base en la información mencionada anteriormente se realizó un listado de las posibles problemáticas y se elaboró una Matriz de Vester para identificar el problema más crítico que se presenta en la cuenca del Rio Bache, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2 y en el Grafico 1.

Tabla 2. Matriz de Vester de las problemáticas presentes en la cuenca del Rio Bache

Problemas	Descripción de los problemas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Total de activos (Eje X)
<b>Problema 1</b>	Uso inadecuado del agua de las corrientes hídricas	0	2	4	1	3	2	4	4	2	22
<b>Problema 2</b>	Fenómenos climáticos extremos	2	0	3	1	3	1	4	3	3	20
<b>Problema 3</b>	Disminución de caudales de las fuentes superficiales	2	1	0	1	3	1	4	4	0	16
<b>Problema 4</b>	Incremento acelerado de la población	3	2	3	0	2	3	3	3	2	21
<b>Problema 5</b>	Afectación del desarrollo de los ecosistemas naturales	0	1	2	1	0	3	0	1	2	10
<b>Problema 6</b>	Expansión de la frontera agrícola	2	1	2	1	3	0	4	3	4	20
<b>Problema 7</b>	Presión sobre la oferta hídrica	3	1	4	1	2	2	0	4	1	18
<b>Problema 8</b>	Reducción de la oferta hídrica en la cuenca	0	1	4	1	2	0	4	0	2	14
<b>Problema 9</b>	Cambios de la cobertura vegetal	1	2	2	1	4	3	2	2	0	17
<b>Total de pasivos (Eje Y)</b>		13	10	24	8	22	15	25	24	16	

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se elaboró una tabla en la cual se ubican los resultados obtenidos para los nueve problemas con su respectivo valor del total de los activos y el total de los pasivos (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados del total de los activos y pasivos

<b>Problemas</b>	<b>Activos (Eje X)</b>	<b>Pasivos (Eje Y)</b>
<b>Problema 1</b>	22	13
<b>Problema 2</b>	20	10
<b>Problema 3</b>	16	24
<b>Problema 4</b>	21	8
<b>Problema 5</b>	10	22
<b>Problema 6</b>	20	15
<b>Problema 7</b>	18	25
<b>Problema 8</b>	14	24
<b>Problema 9</b>	17	16

Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados obtenidos se aplica la siguiente fórmula para determinar el punto de intersección entre el eje X y el eje Y.

$$\text{Eje (x.y)} = ((\text{Valor Máximo} - \text{Valor Mínimo}) / 2 + \text{Valor Mínimo})$$

$$\text{Eje X} = ((22-10) / 2 + 10) = ((12/2+10)) = 16$$

$$\text{Eje Y} = ((25-8) / 2 + 8) = ((17/2+8)) = 16.5$$

Una vez definidos los dos puntos se realizó la gráfica en la cual se ubicaron cada uno de los puntos, al igual que los dos puntos intermedios para el eje X y eje Y en los cuales se trazó una línea horizontal y otra vertical sobre el punto de intersección (punto naranja).

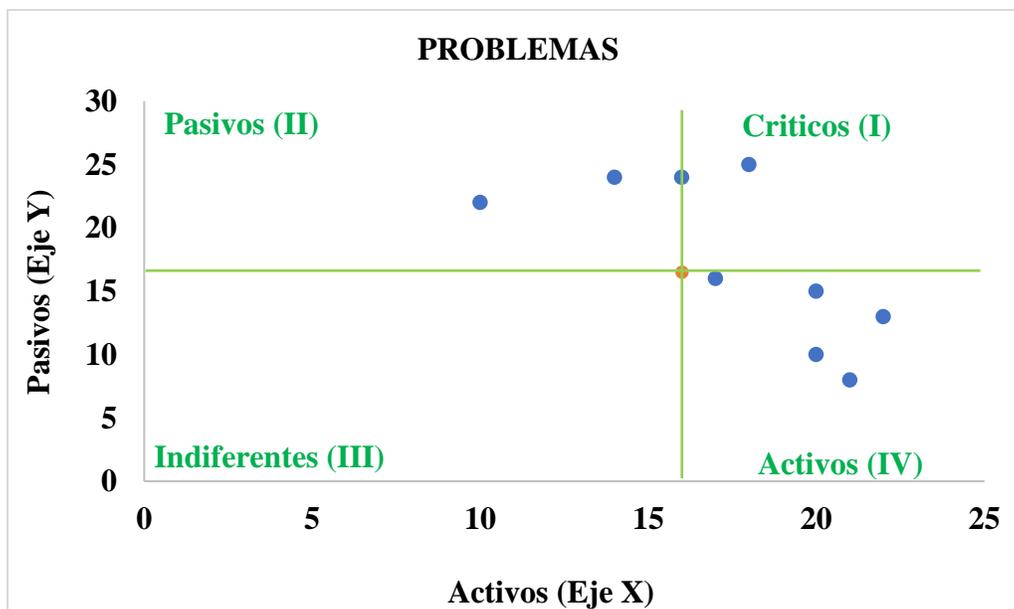


Gráfico 1. Clasificación de las problemáticas encontradas en la cuenca Rio Baché

Fuente: Elaboración propia

Con base en este gráfico se puede observar que el problema **7 (Presión sobre la oferta hídrica)** y el problema **3 (Disminución de caudales de las fuentes superficiales)** se clasifican como problemas críticos. Mientras que los problemas 1 (Uso inadecuado del agua de las corrientes hídricas), el problema 2 (Fenómenos climáticos extremos), el problema 4 (Incremento acelerado de la población), el problema 6 (Expansión de la frontera agrícola) y el problema 9 (Cambios de cobertura vegetal) se clasifican como problemas activos, en el caso de los problemas pasivos son los problemas 5 (Afectación del desarrollo de los ecosistemas naturales) y el problema 8 (Reducción de la oferta hídrica en la cuenca). Como problemas indiferentes no se ubica ningún problema.

Como alternativas para enfrentar las problemáticas más críticas y que sirvan para la gestión del recurso hídrico se plantearon las siguientes alternativas:

#### ***9.2.1.1. Alternativa 1: Reforestación***

Para el caso del problema **3 (Disminución de caudales de las fuentes superficiales)** el cual no solo puede ser causado por la variabilidad climática, sino que también por el cambio de la cobertura vegetal o la alta demanda que ejercen los habitantes sobre este

recurso debido a que el agua se usa para otras actividades como el riego para los cultivos de arroz, se propone la **reforestación** con especies arbóreas que ayuden en la conservación de las fuentes hídricas, aunque es muy importante tener en cuenta que este proceso ayuda en la regulación de los caudales, es decir que permite mantener la cantidad de agua en épocas de sequía y se reduce la posibilidad que se presenten inundaciones.

Además otros beneficios que brinda la reforestación son la disminución de la pérdida de suelo y de los sedimentos transportados por el agua, la recuperación de la biodiversidad, restauración del paisaje, captura de CO<sub>2</sub>, entre otros, pero este proceso no puede tomarse como una actividad que incremente los caudales, porque teniendo en cuenta algunos estudios manifiestan que no existen investigaciones que comprueben que mediante la aplicación de algún tipo de acción se incrementa el caudal de una fuente hídrica (Folleco, 2017).

Es importante mencionar que la Ley 1450 del año 2011 establece que los acueductos municipales, distritales y regionales deben destinar de sus ingresos corrientes un porcentaje no menor al 1% para la adquisición y mantenimiento de zonas para la conservación del recurso hídrico. Dichas áreas prioritarias serán determinadas por las autoridades ambientales y su administración está a cargo del distrito o municipio. Además, los municipios, distritos y departamentos tienen que garantizar la inclusión de los recursos naturales dentro de sus planes de desarrollo y presupuestos anuales. La misma Ley obliga a las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) a velar por la protección, recuperación y monitoreo de cuencas (Folleco, 2017).

De acuerdo con lo anterior, el municipio de Santa María debe garantizar la destinación de los recursos necesarios para la compra y recuperación de las zonas de importancia para la conservación del recurso hídrico con dichos recursos se puede llevar a cabo la reforestación para la protección de la cuenca. Considerando que, con el buen manejo y la conservación de las fuentes hídricas, se puede mantener la oferta tanto en calidad como en cantidad, hasta en periodos de sequía, para lo cual es necesario fomentar en las comunidades la necesidad de implementar los bosques nativos, los cuales ayudan en la protección del suelo y la producción del agua. También se deben organizar grupos de vigilancia del agua, que estén atentos en las situaciones que van en contra del recurso, y apliquen medidas correctivas.

### ***9.2.1.2.Alternativa 2: Educación ambiental***

Para el caso del problema 7 (**Presión sobre la oferta hídrica**) esta problemática puede ser causada debido a la falta de conciencia ambiental por parte de la población. Por lo tanto, se propone como alternativa la **educación a la población**, porque si hay una gestión integrada del recurso hídrico de la cuenca del Rio Bache los únicos responsables de implementar las estrategias de planificación y gestión de dicho recurso es la comunidad que se encuentra utilizando el agua. Por esta razón, es muy importante transmitir, informar y educar de manera adecuada y eficiente a la población que se encuentra en la zona de estudio (Villa,2013).

Adicional a lo anterior, según Chalas, Clases y Huertas (2014) el uso eficiente del agua, además de ser una medida de adaptación al cambio climático, también debe considerarse como educación intrínseca, es decir, se debe brindar la educación a los niños sobre el uso adecuado del agua para que se formen con la idea de que el agua es un recurso indispensable y por ende comprendan que no se debe desperdiciar, porque generalmente el agua se emplea con poco criterio para su ahorro y conservación, por lo que se recomienda implementar una amplia campaña de educación mediante un programa de capacitación a la comunidad sobre las técnicas de uso eficiente del recurso hídrico, con base en estas capacitaciones en la zona de estudio se podría implementar un programa de educación comunitaria sobre ahorro del agua.

Además, para tener más trascendencia sobre este tema es necesario que se utilicen los medios de comunicación masiva como son: radio, televisión, periódicos, entre otros, para lograr la difusión sobre el uso eficiente y ahorro del agua. Para el caso de la educación a la niñez primero se deben capacitar a los docentes de las escuelas y colegios sobre la importancia del agua, su manejo adecuado y su conservación para que ellos puedan educar a los niños sobre este tema (Chalas et al., 2014).

### ***9.2.1.3.Alternativa 3: Almacenamiento de agua***

Otra alternativa para esta problemática es el **almacenamiento de agua** para utilizarla en periodos de sequía ayudando a incrementar la productividad agrícola, favorable para la adaptación a las variaciones de temperatura y la precipitación y también para mejorar el bienestar de las personas (Bharati et al., 2014).

El sistema de almacenamiento consiste en acumular el agua durante los periodos de lluvia para luego usarla en los periodos de sequía, esto es una manera de manejar el déficit hídrico debido a las variaciones que se presentan en las precipitaciones o en los caudales. Generalmente se cree que solo se puede almacenar agua en los embalses y las presas de gran tamaño, pero actualmente hay una gran variedad de opciones como son los humedales naturales, acuíferos subterráneos, estanques y pequeños depósitos. Se recomienda que los depósitos de agua estén cubiertos para evitar la evaporación de agua en caso de que aumente la temperatura, estas medidas se puede combinar con otras tecnologías para el ahorro del agua, como por ejemplo el micro riego (Bharati et al., 2014).

El almacenamiento de agua desempeña un papel muy importante en el desarrollo sostenible y en la adaptación al cambio climático, pero la mayoría de estos sistemas de almacenamiento son vulnerables a los impactos de la variabilidad climática ya que cuando la lluvia se presenta con menor frecuencia esto ocasiona que los estanques y los depósitos no se llenen o lo hagan en menor cantidad de agua por ello el riego de los cultivos es insuficiente (Bharati et al., 2014).

Es importante mencionar que todos los sistemas de almacenamiento tienen un costo y presentan un abastecimiento de agua diferente, pero desde un pequeño deposito hasta un gran embalse genera un efecto sobre el ecosistema en el que se encuentra, además de ser más eficaces cuando se combinan con otras estrategias o tecnologías para el ahorro de agua (Bharati et al., 2014). Algunos beneficios que brinda el almacenamiento se muestran en la siguiente figura.

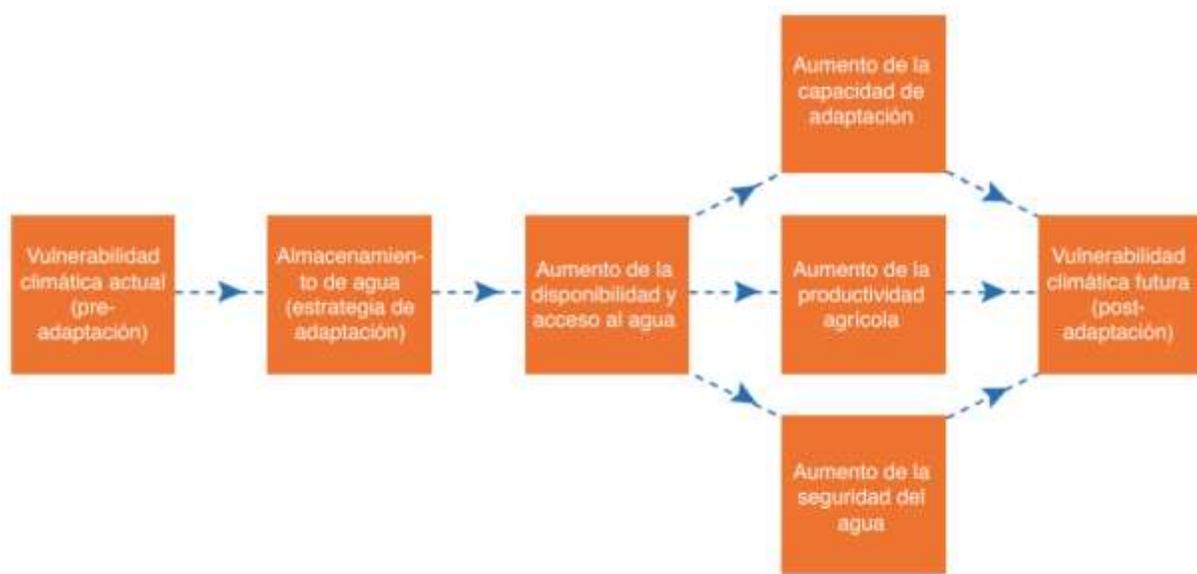


Figura 7. Almacenamiento del agua

Fuente: Bharati et al., 2014

#### 9.2.1.4. Alternativa 4: Riego eficiente

Cabe destacar que a nivel mundial la agricultura usa el 70-80% del agua dulce, por eso se puede presentar una competencia en la distribución del agua entre los agricultores y los otros usuarios este problema se puede presentar en los próximos años en varios países, ya que durante los próximos 40 años, los agricultores se verán enfrentados a producir entre un 60-70% más para poder satisfacer las necesidades de los alimentos de la creciente población mundial y tendrán que lograrlo a medida que decrece la cantidad de agua dulce (Bharati et al., 2014).

Por ello se debe aumentar la productividad del agua para lo cual se puede **intensificar de manera eficiente la producción agrícola**, mejorando la resiliencia de las comunidades y minimizando la degradación del medio ambiente, debido a que en el municipio Santa María una de sus principales actividades económicas es la producción de arroz. Por ejemplo, en Asia y en África algunos agricultores establecieron un sistema de intensificación de arroz en el cual usan menos agua debido a que riegan de manera intermitente en vez de inundar los campos de arroz, este sistema aumenta el rendimiento y protege el medio ambiente, aunque exige mayor mano de obra porque se necesita incrementar las actividades de deshierbe y más atención a la gestión del agua. (Bharati et al., 2014).

Según un artículo denominado “Climate Change Impacts on Water Supply and Demand in Rheraya Watershed (Morocco), with Potential Adaptation Strategies” realizado por Babqiqi, Messouli, Reichert, Rochdane y Yacoubi (2012), donde se utilizó el modelo WEAP para evaluar el impacto de escenarios climáticos A2 y B2 y para investigar si la gestión del recurso hídrico podría reducir los impactos del cambio climático. Se encontró que a partir de los escenarios A2 y B2 se simularon cuatro escenarios de gestión en los cuales se plantean una serie de estrategias durante un período de 2010 a 2100. Para la propuesta 1 no se aplica ningún tipo de estrategia, la propuesta 2 se plantea una estrategia que busca implementar el riego por goteo para ahorrar agua, en la propuesta 3 se pretende aumentar los instrumentos para transmitir la conciencia pública para lo cual se incluye: marketing y gestión de consultores, exposición a los medios de comunicación, materiales de apoyo, centros de formación y asociaciones a niveles nacionales e internacionales. Con base en esta estrategia se espera que se presente una reducción por persona del 20% en el consumo de agua para el año 2020. En la última propuesta se unen las propuestas 2 y 3.

Para la propuesta 1 se obtuvo que los dos escenarios presentan una tendencia del aumento de la demanda agua, sin embargo, en el escenario A2 se evidencia un mayor incremento, para el caso de la propuesta 2 sobre el mejoramiento de la eficiencia del riego se obtuvo que en el escenario A2 la demanda de agua para la agricultura seguiría aumentando, pero en el escenario B2 la demanda de agua fue mayor comparada con el escenario A2. Para el caso de la propuesta 4 donde se combinan las dos estrategias de adaptación propuestas en el escenario A2 para los usos: doméstico, de turismo y de ganado la demanda del agua se cumple, pero solo hasta el año 2033, mientras que en el escenario B2 la demanda del agua se satisface hasta el año 2053 para dichos usos.

En este estudio se puede concluir que mediante la evaluación de las estrategias de gestión del agua se espera compensar algunas de las consecuencias previstas del cambio climático mediante la reducción de los factores de estrés sobre los recursos hídricos en la cuenca, sin embargo, los resultados demuestran que las evaluaciones de las estrategias de adaptación propuestas por los actores que toman decisiones son eficaces, pero no son sostenibles para la cuenca. Teniendo en cuenta el papel que juega el cambio climático en el desequilibrio del recurso hídrico se considera la posibilidad de establecer nuevas políticas con el propósito

de evaluar la sostenibilidad del recurso hídrico que ayuden a estabilizar la oferta y la demanda del agua.

Por otro lado, se puede mencionar un estudio realizado con el modelo WEAP en Bolivia, contempló un horizonte de tiempo entre los años 2010 y 2050, y mostró la desaparición total de los glaciares, lo cual puede llegar a afectar en especial la población de El Alto, y con base en los resultados obtenidos se contempló una alternativa de almacenamiento de agua como medida de adaptación al cambio climático (Escobar et al., 2013)

A partir del análisis y evaluación de los diferentes estudios revisados, se establece que el modelo WEAP se consolida como una herramienta de planificación eficaz que permite determinar y organizar el manejo que se le da al recurso hídrico y su posible afectación a lo largo del tiempo con la aplicación de escenarios y la proyección de estrategias que ayudan a mitigar los efectos del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico.

Además, este software contribuye en el mejoramiento de la relación de oferta y demanda de agua, porque mediante la modelación se pueden establecer los cultivos adecuados para implementar en una determinada zona de estudio y sirve de apoyo en la toma de decisiones para la planeación regional e integral del recurso hídrico (Cruz., et al 2016).

Por último, se puede decir que se debe cuidar el agua, pues debido al incremento poblacional que se ha presentado en los últimos años, de aproximadamente 2500 millones de habitantes en 1950 la población mundial, a casi los 7 mil millones de personas en el 2013, dicho recurso junto con el suelo se ha visto sometidos a una gran presión. Además, se debe tener en cuenta que los agricultores deben hacer frente al cambio climático y a otros cambios que afectarán su producción, aunque no se sabe con certeza los impactos que generará, pero es muy probable que afecte el recurso hídrico disponible. Pero la agricultura y la seguridad alimentaria dependen en gran medida de la gestión de este recurso porque el agua es la base para que se presente el desarrollo sostenible, el cual ayuda en la adaptación al cambio climático (Bharati et al, 2014).

Finalmente, para la gestión del recurso hídrico existe una gran variedad de estrategias que consideran los efectos del cambio climático, las cuales se fundamentan en la integración y aplicación de algunas herramientas y tecnologías para lograr que las comunidades afectadas

desarrollen la resiliencia e incrementen la sostenibilidad para que logren adaptarse al cambio climático, así, en este trabajo se propusieron varias alternativas como son: **Reforestación, Educación ambiental , Almacenamiento de agua y el Riego eficiente,** con el fin de que las personas tomen conciencia sobre el ahorro de agua, aprendan a almacenarla, y como en el municipio se maneja la producción de arroz, se recomienda intensificar de manera eficiente la producción agrícola usando de forma intermitente el riego en el cultivo, o se puede implementar un sistema de almacenamiento de agua.

## 10. CONCLUSIONES

- La importancia del modelo WEAP radica en que es una herramienta que permite la planificación y el manejo de los recursos hídricos ya que a través de la modelación y simulación donde se puede analizar la variación de este recurso a lo largo del tiempo y así tomar decisiones en cuanto a priorizar los usos y realizar un mejor manejo de este recurso.
- Teniendo en cuenta la aplicación del modelo WEAP en la gestión del recurso hídrico se puede destacar su importancia como una herramienta computacional que busca apoyar y brinda asistencia a los planificadores experimentados del recurso hídrico lo que puede generar una serie de ventajas en la toma de decisiones que conlleven a un manejo sostenible de este recurso natural.
- El modelo WEAP trabaja bajo escenarios futuros de cambio climático y permite realizar la simulación del recurso hídrico utilizando datos climáticos, topográficos, y uso del suelo, entre otros; y con los resultados que arroja el modelo se muestra el posible comportamiento sobre la oferta y la demanda de dicho recurso, y con esta información se pueden plantear alternativas referentes a la gestión integral del recurso hídrico.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T. & Siebert, S. (2003). Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences*
- Amestoy, I., Cretaz, E., Diaz, R., Geler, T & Hervís, G. (2018). El modelo WEAP: una herramienta para la planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático. *Revista Ingeniería Agrícola*, 8, (3) .40-47. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/326020104\\_El\\_modelo\\_WEAP\\_una\\_herramienta\\_para\\_la\\_planificacion\\_hidrologica\\_en\\_la\\_adaptacion\\_al\\_cambio\\_climatico](https://www.researchgate.net/publication/326020104_El_modelo_WEAP_una_herramienta_para_la_planificacion_hidrologica_en_la_adaptacion_al_cambio_climatico)
- Aquino, K, Artiga, S & Menjívar, A. (2010). Causas y efectos del cambio climático generados por el sistema de producción industrial actual; los esfuerzos de la comunidad internacional para contrarrestarlo y los compromisos adquiridos por los países desarrollados como los principales contaminantes, periodo 1990-2007 (Tesis de pregrado). Universidad el Salvador, Ciudad Universitaria San Salvador, El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/4558/1/CAMBIOS%20Y%20EFECTOS%20DEL%20CAMBIO%20CLIMATICO%20GENERADOS%20POR%20EL%20SISTEMA.pdf>
- Báez, A. (2012). Modelación del hábitat invernal de la mariposa monarca ante escenarios de cambio climático (Tesis de pregrado). Universidad nacional autónoma de México, México. Recuperado de [https://www.zaragoza.unam.mx/portal/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis\\_baez\\_islas.pdf](https://www.zaragoza.unam.mx/portal/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis_baez_islas.pdf)
- Babqiqi, A., Messouli, M., Reichert, B., Rochdane, S y Yacoubi, M. (2012). Climate Change Impacts on Water Supply and Demand in Rheraya Watershed (Morocco), with Potential Adaptation Strategies. *Water* 4 (1), 28-44. doi: 10.3390 / w4010028
- Bharati, L, Clement, F, Cornick, P, Johnston, R, McCarthney, M, McIntyre, B, Smakhtin, V., & Sugden, F. (2014). *Afrontar el Cambio: Cuidar del Agua, de la Agricultura y de la Seguridad Alimentaria en una Era de Incertidumbre Climática*. Recuperado de <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=wffdcs>

- Burbano, N. (2009). Métodos de Evaluación de los Recursos Hídricos. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI. Ecuador. Recuperado de: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/Santiago/pres/7%20Ecuador%20-%20Burbano%20-%20Evaluacion%20de%20RH.ppt>
- Cárdenas, G., Mafla, F., Paz, P., y Realpe, D. (2016). Estrategias de planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento para consumo humano. *Revista UNIMAR*, 34 (2), 221-238. Recuperado de <http://www.umariana.edu.co/ojs-editorial/index.php/unimar/article/viewFile/1252/pdf>
- CARE Internacional-Avina. (2012). *Programa Unificado de Fortalecimiento de Capacidades. Módulo 8: Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Cuenca, Ecuador.* Recuperado [de:http://www.avina.net/avina/wp-content/uploads/2013/03/MODULO-8-OK.pdf](http://www.avina.net/avina/wp-content/uploads/2013/03/MODULO-8-OK.pdf)
- Castro, N. (2014). Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda la Bella (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4468/3339116C355.pdf?sequence=1>
- Cedillo, L. 2012. Evaluación de las Fuentes Abastecimiento de Agua para la Zona Metropolitana de Monterrey (Tesis de maestría). Instituto tecnológico y de estudios superiores de monterrey, Monterrey, Nuevo León, México. Recuperado de [https://repositorio.itesm.mx/ortec/bitstream/11285/571550/1/DocsTec\\_12513.pdf](https://repositorio.itesm.mx/ortec/bitstream/11285/571550/1/DocsTec_12513.pdf)
- Celmi, G. (2014). Generación de escenarios de disponibilidad del recurso hídrico aplicando el modelo WEAP subcuenca Parón – Llullan, provincia de Huaylas, Áncash – Perú-1978-1998 (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Ancash, Perú.
- Chalas, J, Clases, J., Huertas, F. (2014). Simulación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos y estrategias de adaptación, usando el modelo Water Evaluation and Planning (WEAP), en la cuenca de la región Yaqué del Norte de la República Dominicana. *Aqua-LAC*,6 (2), 21-36. Recuperado de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/03-Ferbillet.pdf>

- Chávez, A. (2012). Propuesta metodológica para la identificación de medidas de adaptación al cambio climático en sistemas de recursos hídricos (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Recuperado de [http://www.fundacionaquae.org/wp-content/uploads/2014/11/tesis\\_chavez\\_jimenez\\_adriadna\\_0.pdf](http://www.fundacionaquae.org/wp-content/uploads/2014/11/tesis_chavez_jimenez_adriadna_0.pdf)
- Cruz, J, Losada, L., y Moncayo, O. (2016). Modelación hidrológica de la cuenca del río Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos (Tesis de especialización). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, D.C, Colombia. Recuperado de [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13997/4/TG%20oscar\\_lindon\\_johana.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13997/4/TG%20oscar_lindon_johana.pdf)
- Cueto, E. (2015). Análisis microeconómico del transporte masivo y colectivo en la cuenca tres de Medellín Antioquia (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/54526/1/1020399948.2016.pdf>
- Del rio, P. (2015). Análisis del impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca de Pangal en Pangal (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/135204/Analisis-del-impacto-del-cambio-climatico-en-la-disponibilidad-del.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Depsky, N, Estacio, J, Flores, F, Mehta, V, Purkey, D, Tehelen, K & Yates, D. (2013). *Análisis integrado de amenazas relacionadas con el cambio climático, aspectos naturales y socioeconómicos*. Recuperado de [http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/phocadownload/cambio\\_climatico/Proyectos/wp1\\_analisis\\_clima\\_dmq.pdf](http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/phocadownload/cambio_climatico/Proyectos/wp1_analisis_clima_dmq.pdf)
- Domingo, L. (2013). Análisis de la vulnerabilidad y medidas de adaptación de un proyecto de regadío frente al cambio climático. Caso proyecto Lonquén (Tesis de maestría). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112739/cf-duque\\_ly.pdf?sequence=1](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112739/cf-duque_ly.pdf?sequence=1)

- Escobar, M., Lima, N., Purkey, D., Yates, D., y Forni, L. (2013). Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades la paz y el alto, Bolivia. *Aqua-LAC*, 5(2), 23-34. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/306013913\\_MODELACION\\_HIDROLOGICA\\_Y\\_ESCENARIOS\\_DE\\_CAMBIO\\_CLIMATICO\\_EN\\_CUENCAS\\_DE\\_SU\\_MINISTRO\\_DE\\_AGUA\\_DE\\_LAS\\_CIUDADES\\_LA\\_PAZ\\_Y\\_EL\\_ALTO\\_BOLIVIA\\_HYDROLOGIC\\_MODELING\\_AND\\_SCENARIOS\\_OF\\_CLIMATE\\_CHANGE\\_ON\\_WATER\\_SUPPLY\\_CA](https://www.researchgate.net/publication/306013913_MODELACION_HIDROLOGICA_Y_ESCENARIOS_DE_CAMBIO_CLIMATICO_EN_CUENCAS_DE_SU_MINISTRO_DE_AGUA_DE_LAS_CIUDADES_LA_PAZ_Y_EL_ALTO_BOLIVIA_HYDROLOGIC_MODELING_AND_SCENARIOS_OF_CLIMATE_CHANGE_ON_WATER_SUPPLY_CA)
- Flores, M. (2014). Gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca hidrológica del río Papagayo, estado de Guerrero (Tesis doctoral). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México. Recuperado de [http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/463/T\\_046.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/463/T_046.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Flores, P. y Navarro, Y. (2016). Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos: un Análisis de la Experiencia en Venezuela. *Novum Scientiarum*, 2(4), 45-55. Recuperado de <http://www.ecoambienteydesarrollo.org/revista/ojs/index.php/novum/article/view/132/efectosCambioClima>
- Folleco, M. (2017). Aplicación de una herramienta de gestión haciendo uso del modelo WEAP como soporte de decisión en las microcuencas La Tebaida, Las Helechas y Bermúdez del departamento de Nariño (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira, Pasto. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8528/36361F667.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN). (2013). Disponibilidad Hídrica y Demanda de agua en la cuenca Pirai: Situación actual y escenario de cambio climático con aplicación de SWAT y WEAP. Recuperado de [http://www.fan-bo.org/wp-content/files/Oferta\\_y\\_Demanda\\_de\\_agua\\_p.pdf](http://www.fan-bo.org/wp-content/files/Oferta_y_Demanda_de_agua_p.pdf)
- Gómez, J. (2009). Diagnóstico de Comunicación Organizacional de Pedro Gómez y Cia (Tesis de pregrado). Universidad Javeriana, Bogotá, D.C, Colombia. Recuperado de <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/comunicacion/tesis205.pdf>

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (1997). *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del IPCC*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-II-sp.pdf>
- Hervís, G., López, T., Rolón, J., Vargas, R & Sánchez, G. (2018). Aplicación del modelo Weap para la planeación hidrológica de la cuenca san diego, municipio los Palacios, Provincia Pinar del Río, Cuba. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/320776369\\_Aplicacion\\_del\\_modelo\\_WEAP\\_para\\_la\\_planeacion\\_hidrologica\\_de\\_la\\_cuenca\\_San\\_Diego\\_municipio\\_Los\\_Palacios\\_provincia\\_Pinar\\_del\\_Rio\\_Cuba](https://www.researchgate.net/publication/320776369_Aplicacion_del_modelo_WEAP_para_la_planeacion_hidrologica_de_la_cuenca_San_Diego_municipio_Los_Palacios_provincia_Pinar_del_Rio_Cuba)
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100*. Recuperado de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento\\_nacional\\_departamental.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departamental.pdf)
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2010). *Estrategia nacional de educación, formación y sensibilización de públicos sobre cambio climático*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/40860/219937/ESTRATEGIA+NACIONAL+DE+EDUCACION+CAMBIO+CLIMATICO.pdf>
- Labrador, A., Zúñiga, J., y Romero, J. (2016). Desarrollo de un modelo para planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe, Huila, Colombia. *Revista Ingeniería y Región*, 15(1),23-35. Recuperado de <https://www.journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/1176/2295>
- Leguizamón, C. (2016). Evaluación de las garantías de suministro del recurso hídrico en la provincia del Tequendama por medio de la herramienta WEAP (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2507/Leguizamoncamilia2017.pdf?sequence=1>
- Londoño, R, Mayorga, T & Ovalle, O. (2015). Estudio comparativo de la asignación del recurso hídrico para la microcuenca de la quebrada Cune mediante el uso del modelo Water Evaluation and Planning System (WEAP) (Tesis de pregrado).

Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. Recuperado de [http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18087/41092704\\_2015.pdf?sequence=1](http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18087/41092704_2015.pdf?sequence=1)

- López, T., Manzano, M., y Ramírez, A. (2017). Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1), 105-114. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v8n1/2007-2422-tca-8-01-00105.pdf>
- Martillo, M. (2003). Estudio para mejorar las mediciones y proyecciones del cambio climático (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/5506/1/Baja%C3%B1a%20Martillo%20Marco%20Filemon%202965.pdf>
- Mardones, G. (2009). Implementación y uso del modelo WEAP en cuencas nivales de la IV región para el análisis del cambio climático (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/30755806\\_Implementacion\\_y\\_Uso\\_del\\_Modelo\\_Weap\\_en\\_Cuencas\\_Nivales\\_de\\_la\\_IV\\_Region\\_para\\_el\\_Analisis\\_del\\_Cambio\\_Climatico](https://www.researchgate.net/publication/30755806_Implementacion_y_Uso_del_Modelo_Weap_en_Cuencas_Nivales_de_la_IV_Region_para_el_Analisis_del_Cambio_Climatico)
- Martín, L., y Bautista, J. (2015). Análisis, prevención y resolución de conflictos por el agua en América Latina y el Caribe. Naciones Unidas, pag.52. Santiago de Chile.
- Marulanda, A. (2017). Estimación de la amenaza por déficit hídrico en acueductos municipales con problemas de abastecimiento en Caldas (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Recuperado de <https://www.researchgate.net/project/Estimacion-de-la-amenaza-por-deficit-hidrico-en-acueductos-municipales-con-problemas-de-abastecimiento-en-Caldas>
- Mena, D. (2009). Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando el modelo WEAP (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/mena\\_d/sources/mena\\_d.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/mena_d/sources/mena_d.pdf)

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D.C, Colombia: Nuevas Ediciones Ltda.
- Mondragón, R. (2017). Modelación de la calidad del agua con aplicación WEAP en la cuenca del Rio Conchos, México: Consideraciones Ambientales (Tesis de pregrado) Universidad de las Américas Puebla, México. Recuperado de : [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lin/mondragon\\_monroy\\_r/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lin/mondragon_monroy_r/capitulo1.pdf)
- Monforte, G., y Cantú, P. (2009). Escenario del agua en México. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3238728.pdf>
- Monge, C. (2007). Modelación hidrológica de la cuenca del rio Jiboa, con el modelo WEAP para evaluación del manejo del recurso hídrico (Tesis de pregrado). Universidad Centroamérica “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador. Recuperado de [http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis\\_descargables/modelacion\\_del\\_jiboa\\_con\\_weap.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/modelacion_del_jiboa_con_weap.pdf)
- Parra, J. (2010). Crecimiento ambiental de las organizaciones (Tesis de maestría). Universidad ICESI, Cali, Colombia. Recuperado de [http://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/5442/9/parra\\_crecimiento\\_ambiental\\_2010.pdf](http://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/5442/9/parra_crecimiento_ambiental_2010.pdf)
- Phurisamban, R. (2014). Addressing Climate Change Adaptation in Water Resource Management: A Case Study of the Sacramento Region. University of California, Berkeley
- Pimiento, M y Restrepo, L. (2018). Análisis de la relación oferta-demanda hídrica en la cuenca del río Gualí bajo escenarios de cambio climático (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C, Colombia. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/12538/2018melissapimiento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pinzón, C. (2012). Propuesta metodológica para correlacionar el comportamiento del tránsito vehicular mixto y las variables ambientales que afectan las condiciones de

- la calidad de vida en las vías urbanas (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C, Colombia. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/3488/PinzonSanchezCarlosAugusto2012.pdf;sequence=1>
- Porras, C. (2014). Estudio de caso: Caracterización de un sistema de producción bovino en Paraguay (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. Recuperado de [http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/17663/13071085\\_2014.pdf?sequence=3](http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/17663/13071085_2014.pdf?sequence=3)
- Ramos, L. (2014). Estimación del efecto de cambio climático en la precipitación en la Costa norte del Perú usando simulaciones de modelos climáticos globales (Tesis de pregrado). Universidad Nacional La Agraria, Lima, Perú. Recuperado de [http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2014/tesis\\_final\\_yakelyn\\_ramos.pdf](http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2014/tesis_final_yakelyn_ramos.pdf)
- Reyes, C. (2012). Proyección de variables hidrológicas diarias a largo plazo en la cuenca del río Tinguiririca en bajo los briones, bajo escenarios A1B y A2 de cambio climático (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112018/cf-reyes\\_cb.pdf?sequence=1](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112018/cf-reyes_cb.pdf?sequence=1)
- Salinas, A. y Paz, O. (2011). Aplicación del Modelo de Planificación Hídrica de Cuencas Weap al Proyecto: Aducción de Recursos Hídricos Mururata. *Revista Técnicas de Investigación Documental*, 6 (6), 27-38. Recuperado de <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rtid/v6n6/v6n6a04.pdf>
- Sampieri, R., Fernández, C & Baptista L. (2010). Metodología de la investigación. México: Editorial Mc Graw Hill.
- Sánchez, Y.; Méndez, O & Hernández A. (2018). Evaluación de la Cuenca subterránea Vento con el modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP). *Revista Hidrolatinoamericana*, 2, 29-32. Recuperado de <https://iahr.org/PDF/Journals/Revista%20HidroLat%202018/Evaluaci.pdf>
- Santos, D. (2015). *Impactos socioeconómicos y climáticos en la gestión del recurso hídrico Cuenca del río Chancay – Huaral*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-68.pdf>

- Stockholm Environment Institute (SEI) & Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). (2014). Implementación del modelo WEAP para el estudio de la calidad del agua en la cuenca del río La Vieja. Recuperado de <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/Water-sanitation/SEI-USAID-FS-2014-Modelo-WEAP-calidad-agua-rio-La-Vieja.pdf>
- Vergara, K. (2011). Variabilidad climática, percepción ambiental y estrategias de adaptación de la comunidad campesina de Conchucos, Ancash (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de [http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1240/VERGARA\\_RODRIGUEZ\\_KARLA\\_VARIABILIDAD.pdf?sequence=1](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1240/VERGARA_RODRIGUEZ_KARLA_VARIABILIDAD.pdf?sequence=1)
- Villa, E. (2013). Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua y sus efectos sobre los usos de agua en la cuenca del río Elqui (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/115546/cf-villa\\_eo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/115546/cf-villa_eo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Villafañe, A. & Rada, O. (2011). Aplicación del modelo de planificación hídrica de cuencas WEAP al proyecto: Aducción de recursos hídricos Murata. Técnicas de Investigación Documental, La Paz, Bolivia.
- Xue, L., Yue, Z., Chunli S., Jian S., Zhong-Liang, W, Yuqiu W. (2015). Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, Chia Ocean & Coastal Management. 106, 97-10
- Zuleta, C. (2013). Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica (Tesis de maestría). Centro Agronómico tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. Recuperado de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11471e/A11471e.pdf>