

**MODELO WEAP EN LA VALORACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO FRENTE A
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO
2018**

**MODELO WEAP EN LA VALORACIÓN HÍDRICA FRENTE A ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO**

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

VICTOR ANTONIO CABRERA GONZALEZ

Estudiante

Asesor de Monografía

PAULO CABRERA MONCAYO I.AF.

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

2018

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	OBJETIVOS	6
2.1.	Objetivo General.....	6
2.2.	Objetivos específicos.....	6
3.	MARCO TEÓRICO.....	7
3.1.	Cambio climático.....	7
3.2.	Escenarios.....	8
3.2.1	Escenarios de Cambio Climático	8
3.2	Adaptación al cambio climático	10
3.3	Cuenca hidrográfica.....	11
3.4	Enfoques de planificación de recursos hídricos	11
3.5	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)	12
3.6	Modelo.....	13
3.6.1	Modelos hidrológicos.....	15
3.7	Programa de modelación WEAP.....	15
3.7.1	Proceso aplicación de un modelo WEAP.....	17
4	MARCO CONTEXTUAL.....	19
4.1	Antecedentes.....	19
5	MARCO NORMATIVO	24
6	METODOLOGÍA	26
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
7.1.	Estudios de caso.....	29
7.1.1.	Estudio de caso 1: Efectos de mediada de adaptación basado en ecosistemas sobre métricas hidrológicas considerando el cambio climático: Rio Nechi, Colombia. (Ruiz, L., Delgado, J., Angarita, H., Salas, H., Sánchez, J., Cortés, M., & Rueda, O. 2016)	29
7.1.2	Estudio de caso 2: Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia (Andres, F., Labrador, C., Romero, C & Zúñiga, L. 2016).	34

7.2	Funciones que cumple el modelo WEAP en la valoración del recurso hídrico en cuencas hidrográficas	40
7.3	Propuestas de adaptación con base en escenarios de cambio climático en WEAP	45
7.3.1	Propuesta 1: Restauración activa por enriquecimiento de especies en la Cuenca del Rio Nechi.	45
7.3.2	Propuesta 2: Captación de lluvia por surcos y camellones en contorno en la Cuenca del Rio Aipe	49
8	CONCLUSIONES	52
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:Proceso de aplicación de un modelo WEAP.	18
Figura 2:Normativa ambiental relacionada con la GIRH en Colombia	25
Figura 3:Resultados de calibración del modelo WEAP para el periodo 1997-2001.....	31
Figura 4:Caudales simulados y observados en el punto de cierre de la cuenca del río Aipe durante período de calibración	36
Figura 5:Impacto de los escenarios sobre el caudal en el punto de cierre de la cuenca del río Aipe	38
Figura 6:Esquema del método de humedad del suelo.	42
Figura 7:Posición de cultivos sembrados en áreas de surcos y camellones en contorno.	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1:Los cuatro caminos de Forzamiento Radiativo (FR) seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100	10
Tabla 2:Aplicaciones del modelo WEAP en Latinoamérica y Colombia.	19
Tabla 3:Metodología de vinculación de ADR y WEAP.	27
Tabla 4:Escenarios de cambio climático simulados al año 2070	32
Tabla 5:Resumen de los escenarios para la cuenca del río Aipe.....	37
Tabla 6:Especies recomendadas para la reintroducción y enriquecimiento de mosaico de ecosistemas.....	47

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático altera el ciclo hidrológico y los regímenes dentro de las cuencas por lo que tiene el potencial de disminuir la disponibilidad de los recursos hídricos naturales en muchas áreas del mundo (Xu & Singh 2004), debido a las altas temperaturas y los cambios en las condiciones meteorológicas extremas que además de afectar la disponibilidad del agua, afecta la distribución de las precipitaciones, el deshielo, el caudal de los ríos y las aguas subterráneas, deteriorando la calidad de esta, trayendo afectaciones a los ecosistemas, la agricultura y la sostenibilidad ambiental. (UN-Water, 2010). Por lo que es importante tomar medidas de adaptación al cambio climático, haciéndose necesario conocer el comportamiento del recurso hídrico frente a los diferentes cambios futuros en el clima (Sther, 2010).

Colombia es un país muy rico en recursos hídricos, posee cuencas con ríos de gran caudal, según Marín. (2003), la oferta hídrica generada en términos de rendimiento es de 581.0/s por km², esto correspondería a seis veces más la cantidad de agua promedio en el mundo. Por lo que es muy importante mantener el recurso, que puede verse afectado por el cambio climático, haciéndose necesario conocer el comportamiento del recurso y determinar un manejo adecuado que permita generar planes de ordenamiento y manejo de las cuencas del país (Sther, 2010).

En este sentido existen diversas herramientas útiles que permiten evaluar el efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico, entre estas se encuentran los modelos hidrológicos o modelación hidrológica, los cuales han causado gran impacto en la gestión integral del recurso hídrico, dado que su uso permite estudiar los fenómenos al interior de una cuenca hidrográfica, bien sea describiéndolos, explicándolos y/o prediciéndolos, a través de una representación esquemática o conceptual y numérica. Siendo WEAP uno de los modelos hidrológicos más importantes y representativos. (Centro de Cambio Global, 2009)

Por lo tanto, la presente monografía tiene por objetivo mostrar un análisis de experiencias del modelo WEAP en la valoración hídrica frente a escenarios de cambio climático y realizar propuestas de adaptación con base a estos escenarios.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar experiencias del modelo WEAP en la valoración del recurso hídrico frente a escenarios de cambio climático.

2.2. Objetivos específicos

- Describir estudios del modelo WEAP en la valoración del recurso hídrico frente a escenarios de cambio climático en Colombia
- Determinar las principales funciones que cumple el modelo WEAP en la valoración del recurso hídrico en cuencas hidrográficas.
- Plantear una propuesta de adaptación para cada estudio con base a escenarios de cambio climático teniendo en cuenta el modelo WEAP.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Cambio climático

El crecimiento exponencial de la población en los dos últimos siglos y la búsqueda de la mejora en su calidad de vida, han impulsado un rápido crecimiento tecnológico que conlleva a una sobre-explotación de los recursos naturales y la aparición de agentes contaminantes, rompiendo su equilibrio y propiciando cambios climáticos a escala global. El cambio climático se entiende como el “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición química de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 1992).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en sus diferentes reportes señala que el mundo se está calentando, que el clima está cambiando, que muchos de estos cambios están relacionados con los gases efecto invernadero (GEI) y que estos cambios afectarán a los recursos hídricos (IPCC, 2008). Esto ha producido en los últimos años una preocupación científico-social acerca del posible cambio climático inducido por el aumento del dióxido de carbono (CO_2) y otros (GEI) en la atmósfera, lo que ha dado lugar a importantes investigaciones al respecto. (IPCC, 2007)

Lo anterior conlleva analizar la variabilidad climática causando las variaciones del estado promedio y otros datos estadísticos del clima en escalas temporales y espaciales más amplias. La variabilidad se puede presentar debido a procesos internos naturales del sistema climático, lo que se conoce como variabilidad interna, o a procesos influenciados por fuerzas externas naturales o antropogénicas, lo que se denomina variabilidad externa. (IPCC, 2007)

La variabilidad climática señala dos aspectos importantes, el primero tiene que ver con el tipo de clima en un determinado lugar, el cual se puede definir con los promedios de las variables climáticas, el segundo aspecto está relacionado con los eventos del clima fuera de lo normal, estos se denominan “extremos” por ejemplo huracanes, tornados, sequías entre otros, que aun cuando son procesos naturales, marcan los aspectos más notorios de la variabilidad. (Lavell, 2011)

3.2. Escenarios

Según Zurek, M. & T. Henrichs. (2007), un escenario 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 convincente posible estado futuro sobre algo. Los escenarios son una de las principales herramientas de la investigación prospectiva, la cual permite prever lo que ocurrirá si se presentan cada uno de los eventos modelados.

El uso de escenarios se originó en la planificación militar y en los juegos de azar, y a principios de 1960 se amplió en la planificación estratégica de las empresas y de otras organizaciones, en donde los tomadores de decisiones querían analizar, de manera sistemática, las implicaciones de la inversión y de las diversas decisiones estratégicas que tienen, inherentemente, consecuencias en el largo plazo. (IDEAM, 2014)

Los escenarios se constituyen en poderosas herramientas de apoyo a la gestión, ya que permiten al tomador de decisiones de hoy (presidente, gobernadores, empresarios, inversionistas, directivos, investigadores), bajo algunos supuestos veraces y científicamente soportados, enfrentar la complejidad y la incertidumbre, y aproximarse a la manera de cómo podría ser el futuro, de modo que pueda anticiparse a los potenciales hechos que se desarrollarían en un lugar determinado, utilizando la planificación, los proyectos y las inversiones. (IDEAM, 2015)

3.2.1 Escenarios de Cambio Climático

El objetivo de trabajar con Escenarios de Cambio Climático no es predecir el futuro climático, es evaluar un amplio espectro de posibilidades respecto al posible comportamiento del clima en el futuro y entender las incertidumbres asociadas, con el fin de orientar decisiones robustas que permitan anticiparse a los posibles hechos y generar desde hoy un accionar eficaz que permita introducir los cambios sociales, ambientales, económicos y políticos necesarios para no llegar a la situación proyectada de un futuro desfavorable. (IDEAM, 2015)

Un Escenario de Cambio Climático 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. (IPCC, 2013)

Los Escenarios de Cambio Climático para Colombia siguen las rutas metodológicas propuestas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) en su Quinto Informe de Evaluación (AR5) del año 2013. Para su desarrollo los científicos del IDEAM tomaron los 16 modelos globales que mejor representan el clima de referencia de Colombia (1976-2005) y que modelan la temperatura y la precipitación para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. Estos modelos fueron regionalizados con métodos estadísticos con el fin de proyectarlas en el contexto nacional. (IDEAM, 2015)

3.2.1.1 Los nuevos Escenarios de Cambio Climático

En el Quinto Informe del IPCC (AR5), se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, denominados “Caminos Representativos de Concentración” (RCPs, por sus siglas en inglés). Éstos se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 (W/m^2), estos se muestran en la tabla 1. (IPCC, 2013)

La palabra “representativo” significa que cada RCP proporciona sólo uno de los muchos posibles escenarios que pueden conducir a las características de ese Forzamiento Radiativo. El término “camino” hace hincapié en que no sólo los niveles de concentración en el largo plazo son de interés, sino también la trayectoria que ha tomado en el tiempo para llegar a ese resultado. En resumen, el nuevo proceso en paralelo comienza con la selección de cuatro RCPs, cada uno de los cuales corresponde a un camino de Forzamiento Radiativo específico. (IPCC, 2013)

Tabla 1: Los cuatro caminos de Forzamiento Radiativo (FR) seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100

Escenario	Forzamiento radiante (W/m ²)	CO _{2eq} atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura	Trayectoria	Equivalentes para escenarios SRES (AR4)
RCP8.5	8.5	>1370	4.9	2100 en aumento	SRES A1 F1
RCP6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100	SRES B2
RCP4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
RCP2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

Fuente: (IDEAM, 2015)

3.2 Adaptación al cambio climático

Es importante conocer, qué implica adaptarse e implementar medidas para contrarrestar el cambio climático, por lo tanto, cuando se habla de adaptación se refiere al ajuste de los sistemas humanos o naturales frente a entornos nuevos o cambiantes. La adaptación implica ajustarse al clima, descartando, el hecho de si es por cambio climático, variabilidad climática o eventos puntuales, (CIIFEN, 2016)

El término adaptación tiene varios significados, entendiéndose en términos generales como “un ajuste en el comportamiento y características de un sistema que mejoran su capacidad para lidiar con el estrés externo” (Brooks 2003). Más dirigido al contexto de cambio climático el IPCC define la adaptación como un “ajuste de los sistemas ecológicos, sociales o económicas en respuesta a estímulos climáticos reales o previstos y sus efectos o impactos" (IPCC 2001).

De acuerdo con el IPCC (2007), existen diferentes tipos de adaptación; por ejemplo: preventiva y reactiva, privada y pública, y autónoma y planificada. Algunos ejemplos de adaptación son la

construcción de diques fluviales o costeros, la sustitución de plantas sensibles al choque térmico por otras más resistentes, entre otros.

3.3 Cuenca hidrográfica

En la Constitución política de 1991 en el artículo 3 del Decreto 1640 de 2012, se entiende por cuenca u hoya hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

Faustino & Jiménez (2000), definen cuenca hidrográfica como el espacio de terreno limitado por las partes más altas de las montañas, laderas y colinas, en él se desarrolla un sistema de drenaje superficial que concentra sus aguas en un río principal el cual se integra al mar, lago u otro río más grande. Este espacio se puede delimitar en una carta altimétrica (mapa con curvas de nivel), siguiendo la divisoria de las aguas.

3.4 Enfoques de planificación de recursos hídricos

A través del tiempo el ser humano ha sido protagonista del incremento en la demanda del recurso hídrico con el fin de suplir las necesidades internas, industriales y de agricultura, pasando por alto que la demanda de este recurso implica la alteración de la dinámica de los ecosistemas (Loucks y Van Beek, 2005).

Esta problemática obliga a que cada región tenga un conocimiento básico de las cuencas hidrológicas, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, considerando su uso y disponibilidad, tanto en la actualidad como en el futuro (Ordoñez, 2011). Dicho conocimiento se ha plasmado en diferentes manuales de manejo de los sistemas hídricos, documentos que pretenden ser una herramienta de toma de decisiones para los planificadores (Visión Mundial Canadá, 2004). Puede que a simple vista el manejo de una cuenca hidrográfica no sea tan importante como otras

alternativas de solución, sin embargo, el manejo integral de una cuenca debe ser prioridad en la administración del gobierno, por los beneficios regionales y globales que puede generar para toda la sociedad (López, 2014).

El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) desde el año 2004 ha venido trabajando en el desarrollo de nuevos modelos para el manejo sostenible del agua, enfocando su análisis en el caudal ecológico, llegando a brindar una guía rápida para la determinación de este, herramienta que, mediante la aproximación hidrológica, ilustra los procedimientos a seguir para la determinación del régimen del caudal ecológico en cuencas hidrológicas (Salinas, 2011).

Dentro de estos nuevos modelos se encuentra la planificación del recurso hídrico, que cada vez, toma mayor importancia en los temas generales relacionados con el ambiente, debido a que, la humanidad no conforme con transgredir tres de las nueve fronteras (cambio climático, pérdida de biodiversidad y ciclo del nitrógeno), está quebrantando la cuarta, que corresponde a la utilización del agua potable (Kalonji y Erdelen, 2012), lo cual ha llevado a países en desarrollo a tomar medidas y estrategias de planificación con el propósito de disminuir el consumo de agua potable, meta que fue alcanzada según la UNESCO (2009), cuyos reportes manifiestan una disminución de consumo de agua potable en estos países.

3.5 Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)

Gestión se relaciona directamente con administración, y significa “hacer diligencias conducentes al logro de unos objetivos” (Ramírez, 2005); implica la ejecución de acciones para llegar a un resultado, ahora entendido como gestión de organizaciones, es el “conjunto de conocimientos modernos y sistematizados en relación con los procesos de diagnóstico, diseño, planeación, ejecución y control de las organizaciones en diferentes contextos” (Fajardo, 2005).

En un significado más amplio, enfatiza no solamente en el desarrollo social, sino en la gestión consciente para el desarrollo del recurso hídrico, de tal manera que asegure su uso sostenible a largo plazo y para futuras generaciones (OMA, 2005).

Por su parte, la gestión integrada significa que todos los usos diferentes del recurso hídrico deben ser considerados en conjunto. La distribución del agua y las decisiones de gestión consideran los

efectos de cada uno de los usos sobre los otros, tomando de forma global, las metas sociales, económicas y ambientales incluyendo la búsqueda del desarrollo sostenible (OMA, 2005).

Ahora bien, la definición que da la Asociación Mundial para el Agua, (2005) (por sus siglas en inglés GWP), expresa: “La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos es un proceso que promueve la administración y el desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales”. Ya que se aborda desde el concepto de integralidad y de enfoque ecosistémico de los ciclos y procesos de la naturaleza y reconoce al agua como elemento vital, estructurante del medio natural y decisivo en la dinámica de procesos sociales y productivos (IDEAM, 2014).

El enfoque de GIRH involucra la aplicación de conocimiento de diferentes disciplinas, así como las perspectivas de diversos actores para elaborar e implementar soluciones eficientes, equitativas y sostenibles a los problemas hídricos y de desarrollo. Por lo tanto, la GIRH es una herramienta para el desarrollo y la gestión del agua de forma que hace un balance de las necesidades y asegura la protección de ecosistemas para generaciones futuras (Rahaman & Varis, 2005).

Dadas estas condiciones, la GIRH no utiliza un enfoque sectorial, por el contrario, reconoce el impacto de cada uso del agua sobre los demás, contemplando los propósitos interdisciplinarios de la sostenibilidad social, económica y del medio ambiente consideradas de forma colectiva, así como el análisis de las políticas intersectoriales para desarrollar políticas más coherentes y coordinadas (Cap-Net, 2009).

3.6 Modelo

La utilización de modelos es la forma de explicar la realidad, la forma como se reemplaza el objeto real de estudio define el tipo de modelación, el cual puede ser físico, matemático, lógico, análogo, entre otros. El proceso de modelación matemática de cualquier objeto cognitivo (proceso, fenómeno) consiste en un plan de trabajo preciso, el cual involucra los siguientes puntos: (Domínguez, 2013):

- A. Definir el objeto de la modelación: Al definir el objeto de estudio, se puede definir el tipo de modelo más apropiado, con cuál precisión se requiere trabajar y la ventana de tiempo a emplear.
- B. Formulación del modelo conceptual Se formula de acuerdo con la disponibilidad de información existente, la factibilidad de realizar trabajo de campo. De igual forma, se determina la complejidad de los procesos para tener en cuenta y se comprende la percepción del usuario sobre el proceso objeto de modelación.
- C. Selección del tipo de modelo.
- D. Selección del código a aplicar.
- E. Parametrización del modelo: Se define a través de mediciones de campo existentes o adicionalmente programadas, o se establece a través de la solución del problema inverso.
- F. Validación del modelo: Con el fin de probar cual es el rango de bondad del modelo, este se parametriza con información existente, luego sin cambiar los parámetros encontrados, se prueba el modelo en un rango de datos no utilizados en la parametrización, calculando el error promedio del modelo.
- G. G. Simulación.
- H. H. Análisis y presentación de resultados.
- I. Post-auditoria.

Para entender de manera integral la respuesta hidrológica de la cuenca se pueden usar diferentes aproximaciones conceptuales, comúnmente conocidas como modelos hidrológicos. Estos están compuestos por dos partes: modelo conceptual y modelo computaciones. (Pérez, 2013).

El modelo conceptual se soporta en aproximaciones hidrológicas que describen las dinámicas a través de variables, propiedades y procesos relevantes que ayudan a explicar el sistema natural, que para el caso de modelos hidrológicos está representado por el ciclo hidrológico o partes de él.

El modelo computacional es la herramienta capaz de simular los procesos hidrológicos definidos en el modelo conceptual. Esta herramienta está compuesta por funciones o representaciones de la realidad capaces de transformar las variables de entrada en variables de salida, usando parámetros que caracterizan propiedades relevantes del sistema natural o de los procesos asociados a éste.

3.6.1 Modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática (IDEAM, 2016). La modelación hidrológica es una descripción matemática de la respuesta ante procesos físicos del ciclo hidrológico que ocurren en una cuenca (Solisl, et al 1993).

En este sentido es una representación conceptual o numérica de los flujos y almacenamientos de agua en una cuenca determinada. Estos flujos o procesos incluyen, por ejemplo, las precipitaciones, la escorrentía superficial y el flujo sub-superficial en las distintas capas del medio poroso o fracturado; todos estos factores están sujetos a presiones antrópicas que varían su comportamiento y que también deberían tener una representación dentro de un modelo, la construcción de este comprende al menos dos etapas: (1) Se aplican conocimientos del movimiento de agua en la cuenca, interpretando sus mecanismos y forzantes principales, que permiten establecer patrones del tipo causa-efecto (modelo teórico o conceptual); y (2) se traduce ese entendimiento en ecuaciones matemáticas (modelo numérico) que representan el comportamiento de las diferentes variables. (Velez, 1999)

Para Velez (1999), el modelo resultante de este proceso es una aproximación más o menos simplificada de una realidad de complejidad variable. Desde la década de los 60, las herramientas hidrológicas han evolucionado con el objeto de reproducir estos procesos, con un interés creciente en reproducir los patrones espaciales y temporales del ciclo hidrológico con mayor fidelidad.

3.7 Programa de modelación WEAP

WEAP (Water Evaluation and Planning System), fue desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo en 1988, con el fin de simular procesos como lluvia- escorrentía, flujo base, recarga subterránea. Este es un modelo de planeamiento integrado del recurso hídrico, opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas y municipales, a cuencas pequeñas o grandes. (SEI, 2009)

El modelo trabaja con el balance de masa a nivel mensual, el agua es despachada para cumplir con los requerimientos de consumo, sujeto a demandas prioritarias. Se puede escoger entre tres métodos de simulación para procesos como escorrentía, infiltración e irrigación, dependiendo del nivel de complejidad que se requiera. Se requiere información como el tiempo de simulación, fronteras espaciales de la simulación, etc., y como datos de entrada, precipitación, radiación solar, caudales, etc. (Cusgüen, 2013)

De igual manera, tiene capacidad para hacer análisis sectoriales, de conservación de agua, derechos de agua, operación de embalses, generación hidroeléctrica, rastreo de contaminantes, calidad de agua, valoración de vulnerabilidad y mantenimiento de los requerimientos de los ecosistemas, también cuenta con un módulo de análisis financiero que permite hacer comparaciones beneficio-costos de diferentes proyectos o alternativas. Permite considerar alternativas de desarrollo y valorar los efectos en las políticas, costos, hidrología, abastecimientos municipales e industriales y el clima (Logreira, 2008).

El SEI (2009) desarrolla el modelo WEAP mediante la oferta de cuatro métodos para la simulación de procesos de evapotranspiración, escorrentía, infiltración y demandas de riego. Estos métodos deben seleccionarse teniendo en cuenta la información disponible y la complejidad de los procesos que se requieren representar. Los cuatro métodos incluidos en la herramienta de modelación WEAP se describen a continuación:

- Método único para demandas de riego (Método del coeficiente Simplificado). Es el más simple de todos los métodos de demandas de irrigación, ya que usa los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial en la cuenca para calcular demandas que pueden ser requeridas para cumplir con la evapotranspiración requerida que la precipitación no puede satisfacer. Este no simula procesos de escorrentía o infiltración, o cambios en la humedad del suelo.
- Método de Lluvia Escorrentía (Método del coeficiente Simplificado). Este método también determina la evapotranspiración para áreas irrigadas o cultivos secos, usando coeficientes de cultivo. El resto de la lluvia es simulada como escorrentía que puede ser proporcionada a un río y puede fluir a agua subterránea.
- Método de Lluvia Escorrentía (Método de la Humedad del Suelo). Es el más complejo de los cuatro métodos. Se representa como una cuenca con dos capas de suelo, así como el

potencial de acumulación de la nieve. En la capa superior de suelo, este simula evapotranspiración, considerando lluvia e irrigación en suelo agrícola o no agrícola; además simula escorrentía, interflujo superficial y cambios en la humedad del suelo. Este método se distingue porque la caracterización del uso del suelo genera impactos en la respuesta hidrológica. Los cambios en la humedad del suelo y el flujo base son simulados en la capa baja del suelo. La percolación profunda también puede ser transmitida directamente al nodo de agua subterránea por un nodo de interconexión entre la cuenca y el agua subterránea, lo cual genera que el método para esa cuenca pase a tener un esquema de humedad del suelo de 1 capa.

- Método MABIA. Este método simula diariamente los requerimientos de transpiración, evaporación, irrigación programada, de acuerdo con el crecimiento de cultivos y los rendimientos, e incluye los módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de agua en el suelo.

Este usa el método dual del coeficiente de cultivo (K_c), donde el K_c es dividido en un coeficiente de cultivo “Basal” K_{cb} y un componente separado, K_e , el cual representa la evaporación de la superficie del suelo. El K_{cb} representa las condiciones actuales de evapotranspiración cuando la superficie del suelo es seca, pero la humedad en la zona de raíces es suficiente para satisfacer toda la transpiración. En este orden de ideas, se afirma que MABIA es una mejora de CROPWAT, el cual usa el método del coeficiente K_c , por ende, no separa la evaporación y la transpiración. Este es derivado de la herramienta de software privado MABIA, desarrollado en el Institut National Agronomique de Tunisie, por el Dr. Ali Sahli y Mohamed Jabloun.

3.7.1 Proceso aplicación de un modelo WEAP

Según el SEI, (2009), el desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

1. Definición del estudio: En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
2. Búsqueda de información: En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos

partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.

3. Desarrollo del modelo: En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
4. Calibración: Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.
5. Uso del modelo, generación de escenarios: Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

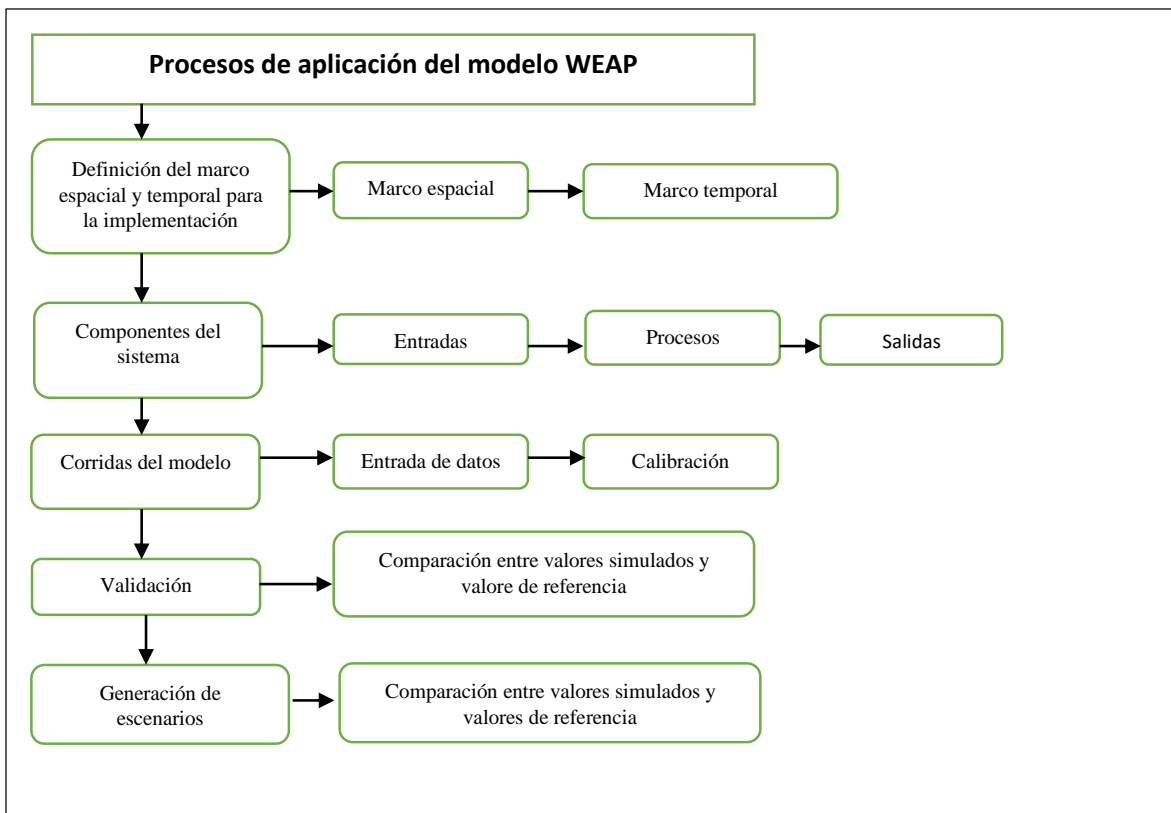


Figura 1: *Proceso de aplicación de un modelo WEAP.*

Fuente: (Hernandez & Londoño Pérez, 2014)

4 MARCO CONTEXTUAL

4.1 Antecedentes

El modelo WEAP, fue creado en 1988 por Jack Sieber, con el patrocinio de Stockholm Environment Institute (SEI). El modelo tiene la capacidad de simular procesos como: lluvia escorrentía, flujo base, recarga subterránea, entre otros. (SEI, 2011)

La primera aplicación importante de WEAP se realizó en la región del Mar de Aral, en 1989. A través de los años, WEAP se ha aplicado en muchos países y cuencas. El software ha sido transferido a planificadores de recursos hídricos alrededor del mundo. (Roffe, Toruño, Orantes & Espinoza. 2014)

Según Escobar *et al*, (2014), existen diferentes aplicaciones del modelo WEAP en Latinoamérica, algunas de ellas también realizadas por Stockholm Environment Institute-U.S. Center (SEI). La mayoría de estos proyectos se relacionan con la agricultura a gran escala y la generación de energía hidroeléctrica. Los estudios en la agricultura reflejan uno de los mayores crecimientos en la producción de biocombustibles del mundo en respuesta al incremento de la demanda de energía. Este análisis indica que en América Central y el Caribe las áreas agrícolas dedicadas a cultivos para biocombustibles probablemente competirán con otras áreas agrícolas y otros usuarios del agua en un crecimiento futuro y en escenarios de cambio climático. En este contexto, la plataforma de WEAP provee un buen entorno para evaluar las medidas de adaptación al cambio climático en una escala local o en cuencas hidrológicas

En la siguiente tabla se da una pequeña descripción de las aplicaciones del moldeo WEAP en Latinoamérica y Colombia:

Tabla 2: *Aplicaciones del modelo WEAP en Latinoamérica y Colombia.*

Nivel	Autor	Título	Resultados
Internacional	Mayra Alejandra	Implementar el sistema de modelación WEAP	Se realizó un estudio de modelación WEAP para determinar el impacto de cambio climático sobre la

Parra Ullauri, (2016). como herramienta que determine el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua en la Cuenca del Río Machángara, Universidad de Cuenca, Ecuador	disponibilidad de agua, don se obtuvo como resultados, un buen ajuste para los caudales medios mensuales en ambas microcuencas, obteniendo un coeficiente de Nash –Sutcliffe de 0,6 en el período de calibración y de 0,8 en el período de validación en la microcuenca del Machángara. En la microcuenca del rio Chulco los coeficientes de Nash –Sutcliffe logrados fueron de 0,6 y 0,65 en calibración y validación respectivamente. En el caso de los escenarios de clima, la precipitación mantuvo la tendencia histórica y fue superior provocando un aumento en los caudales en la microcuenca alta del Machángara, sin embargo, para la microcuenca del rio Chulco para el periodo de meses desde abril a junio existirá un déficit de caudal. Esto vendría a tener repercusiones aumentando el riesgo de inundaciones en el caso de aumento de caudal, pero por otro lado se tendría una buena disponibilidad de agua para los distintos usos. Por otra parte, la temperatura presenta un aumento entre 5°C a 7°C. según lo cual se puede esperar cambios de incidencia extremos.
---	---

Internacional	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2014).	Modelamiento hidrológico de la Cuenca Chancay-Huaral: aplicando el modelo WEAP	Se realizó un estudio de modelamiento de mediante el uso del modelo WEAP como base para la planificación hidrológica, donde los principales resultados fueron una simulación en forma satisfactoria del comportamiento de los caudales comprendidos entre los años 1969 y 2012, teniendo un coeficiente de Nash de 76.7% para la calibración (1969-1978) y 82.9% para la validación (1979-1988). Para el periodo evaluado de (1979-2012) presenta un Nash de 79.7% lo cual indica que los cambios del hidrograma en el periodo de estiaje por las descargas de los reservorios no son significativos.
Internacional	Diego Ignacio Mena Pardo, (2009).	Análisis de impactos del cambio climático en la Cuenca Andina del Río Teno, usando el modelo WEAP En Chile	En este estudio se realizó un análisis del cambio climático usando el modelo WEAP, donde los principales resultados para los escenarios apuntan a una baja de los recursos hídricos en la cuenca. Esta baja sería cercana al 30% para el periodo 2036- 2065 y de un 40% para el periodo 2071-2100 y sería originada principalmente por una disminución de la precipitación en un 26% y 35% y a un aumento en las temperaturas medias anuales cercana a

			<p>los 0,5°C y 1,3°C para cada periodo respectivamente. Esta tendencia se observa también a nivel mensual, salvo en el caso de la temperatura que presenta valores levemente más fríos en invierno.</p> <p>A su vez, existe un aumento en la probabilidad de que se presenten periodos secos que podrían provocar el desabastecimiento de agua en la cuenca y aguas abajo.</p>
Nacional	Oscar Javier Moncayo Calderon, Lindon Losada Palacios y Johana Cruz Padilla, (2016).	Modelación hidrológica de la Cuenca del Río Baché en el departamento del Huila desde la herramienta de Planificación Integrada de Recursos Hídricos	<p>En términos generales los resultados del comportamiento de la oferta hídrica de la Cuenca del río Baché disminuye tanto para el escenario de crecimiento poblacional como para uso agrícola del municipio de Santa María en el departamento del Huila, en 50.4% y 30.9% respectivamente, en este sentido se da alcance al propósito de conocer en qué medida se modifican las condiciones actuales con respecto a la disponibilidad hídrica dentro la cuenca.</p>
Nacional	Luisa Fernanda Cusgüen Castro, (2013).	Evaluación del posible efecto de escenarios de Cambio Climático en la calidad del	<p>En este estudio los principales resultados conseguidos son, la simulación de caudales bajo los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B, los cuales presentaron variedad</p>

agua de la Cuenca Ubaté – Suárez, Colombia	de respuesta hidrológica para los tres periodos modelados (2011 2040, 2041 – 2070, 2070 a 2100). Se puede afirmar de modo general, que el escenario que generó mayor reducción en la oferta de caudales hidrológicos fue el A1B. Por su parte, el que generó mayores eventos extremos fue el A2, con mayor frecuencia de oscilación y magnitud en la oferta de caudales. Por su parte el escenario B2 ofertó mayor caudal, pero con menores frecuencias de eventos extremos. Respecto a los periodos modelados, a medida que los años aumentan, se reduce notoriamente el caudal.
--	--

Fuente: elaboración propia

5 MARCO NORMATIVO

En Colombia la legislación ambiental ha tenido un importante desarrollo en las últimas tres décadas, en especial, a partir de la Convención de Estocolmo de 1972, cuyos principios se acogen desde el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente contenido en el Decreto Legislativo, hoy Decreto Ley, 2811 de 1974 (que se constituyó en uno de los primeros esfuerzos en Iberoamérica para expedir una normatividad integral sobre el medio ambiente). Principios que hoy se han expandido gracias a la Ley 99 de 1993 (que incorpora expresa o tácitamente los principios de las Declaraciones de Estocolmo de 1972 y de Río de Janeiro de 1992 según lo dispone el Numeral 1 del Artículo 1); al Decreto 1200 de 2004 e incluso a la jurisprudencia de la Corte Constitucional. (Corte Constitucional, 1993)

En desarrollo de los nuevos preceptos constitucionales, y de acuerdo con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, realizada en la ciudad brasilera de Río de Janeiro en junio de 1992, se expidió la Ley 99 de 1993, que conformó el Sistema Nacional Ambiental (S.I.N.A) y creó el Ministerio del Medio Ambiente como su ente rector (hoy Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). Con esta ley quiere dársele a la gestión ambiental en Colombia una dimensión sistemática, descentralizada, participativa, multiétnica y pluricultural. (Macías. 1998)

En Colombia la política ambiental se establece como requisito en los planes de desarrollo gubernamentales, teniendo en cuenta la importancia que poseen dichos recursos y que su cuidado, protección y preservación son responsabilidad de todos, principalmente del Estado, cuyo deber primordial debe ser el de salvaguardar y mantener el desarrollo constante de dicha riqueza, elaborando estrategias ambientales efectivas y velando por su cumplimiento. (Pérez, 2013)

La Constitución Política Colombiana, la cual desde su institución en el año de 1991 elevó al grado de norma constitucional el manejo, atención, y preservación de los recursos naturales y el medio ambiente, a través de diversos artículos como por ejemplo el octavo (8) que procura el cuidado de la riqueza natural, el setenta y nueve (79) en armonía con el numeral octavo del artículo noventa y cinco (95) que reconoce el derecho que tenemos todos, a disfrutar de un entorno limpio y a participar activamente de todas aquellas decisiones que lo afecten de una u otra manera, así como el ochenta (80) que resalta la obligación del Estado de asegurar el goce, el progreso controlado y

llevadero de los recursos, así como su cuidado y restablecimiento, con acciones preventivas, coactivas y sancionatorias; entre otros (Pérez, 2013)

En este sentido se da a conocer la actual normatividad sobre las aguas en Colombia, en la siguiente figura:

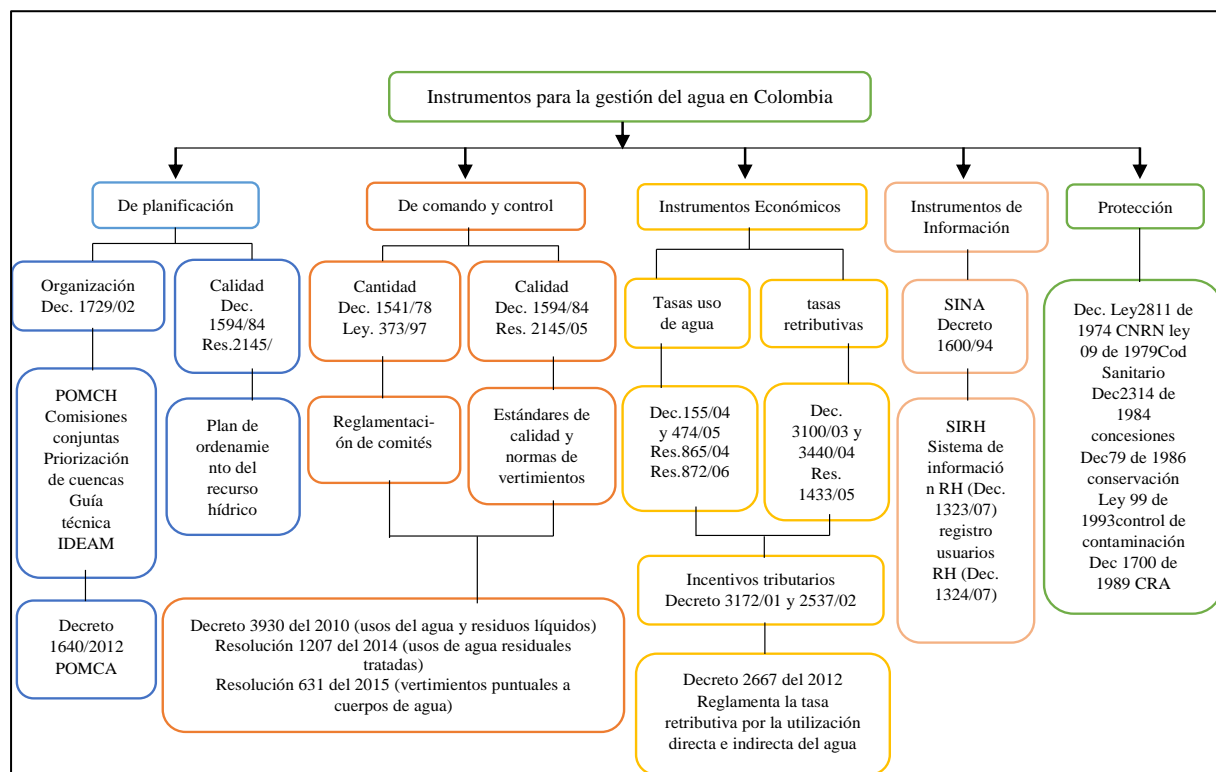


Figura 2: Normativa ambiental relacionada con la GIRH en Colombia

Fuente: (Cenicafé, 2015).

6 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente monografía, se empleó la metodología descriptiva con un enfoque cualitativo planteada por Sampieri, Fernández & Baptista (2010), la cual fue ajustada para el análisis de la contribución del modelo WEAP para valoración hídrica frente a escenarios de cambio climático. Dentro de este contexto se adapta cuatro etapas de conformidad con lo descrito por los autores.

ETAPA I: Recopilación: detectar, consultar y obtener la bibliografía y otros materiales que sean útiles para extraer información relevante y necesaria, mediante una búsqueda, documentación y análisis, en medios tanto físicos como electrónicos, para encontrar referencias de estudios tanto cuantitativos como cualitativos, que se relacionen de manera estrecha con los objetivos.

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

EBSCO, ScienceDirect, Scientific electronic library online (SciELO), Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc),

Institutos y entidades: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Organización de las Naciones Unidas (ONU), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), Ministerios: de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), de Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT),

ETAPA II: Delimitación de información: Se identificaron algunas características que podrían considerarse relevantes, para realizar la selección se utilizaron dos filtros de restricción:

Información disponible por entidad: Para priorizar se plantea una categorización que permite establecer el tipo de información con la que cuenta cada una de las entidades consultados, dicha clasificación está representada por seis números que definen la cantidad y diversidad de esta.

0: Noticia, Documento

1: Noticia, documento, informe.

2: Noticia, documento, informe, artículo.

3: Noticia, documento, informe, artículo, tesis

4: Noticia, documento, informe, artículo, tesis, libro, sitio web.

5: Noticia, documento, informe, artículo, tesis, libro, sitio web, video, programa radial, cartilla.

Información necesaria para realizar la etapa III y IV: para el desarrollo de la investigación se determina un segundo filtro para los numerales 3, 4 y 5 con el fin de seleccionar estudios de caso representativos que describan los procesos del modelo WEAP en la valoración del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático, para lo cual se proponen la metodología desarrollada por el Stockholm Environment Institute (SEI), de análisis denominada Apoyo a Decisiones Robustas (ADR) con el software WEAP que permite modelar los cambios de la hidrología y de la demanda en varios escenarios futuros posibles, para la generación propuestas de adaptación, esta metodología tiene 5 ítems que se describen a continuación

Tabla 3: *Metodología de vinculación de ADR y WEAP.*

FASE de ADR	Cómo ADR y WEAP ayudan a la toma de decisiones
1. Construcción de un modelo	WEAP permite construir un modelo que representa las incertidumbres y las estrategias, y genera valores para las medidas esperadas.
2. Desarrollo de escenarios climáticos	El software ayuda a modelar y calcular a) dinámicas poblacionales, b) impactos del cambio climático según varias proyecciones, c) usos del suelo, d) desarrollo socioeconómico de regiones que influirán en el aumento de diferentes tipos de demanda, e) proyectos de abastecimiento y saneamiento, f) gestión de vertimientos, g) condiciones ambientales que alteren la oferta y

	el estado ecológico proyectado de corrientes y h) calidad del recurso hídrico.
3. Ejecución de un ensamble de corridas del modelo	Ejecución de un ensamble de corridas del modelo que capture todas las incertidumbres identificadas y las estrategias propuestas, y produzca una base de datos con valores para todas las medidas de desempeño definidas,
4. Visualizaciones dinámicas	Análisis de posibles impactos del cambio climático. Las visualizaciones dinámicas también ayudan a los participantes a entender los dilemas y posibles impactos sobre los recursos hídricos, y los orienta en la priorización de decisiones más robustas.
5. Decisiones robustas	Identificando las opciones en cada uno de los escenarios proyectados y priorizando las decisiones más robustas se identifican opciones que mejoren el desempeño del sistema en las dimensiones definidas.

Fuente: (SEI & USAID, 2015).

ETAPA III: Análisis: Relacionar las referencias, para mostrar con precisión los ángulos o dimensiones del contexto, mediante la lectura minuciosa de estas con el fin de determinar la información más sobresaliente y así propiciar un punto de vista.

ETAPA IV: Elaboración: Sintetizar en un compilado la información que servirá posteriormente como fuente de búsqueda.

Para la elaboración de propuestas de adaptación al cambio climático se tiene en cuenta los resultados de la modelación WEAP bajo escenarios de cambio climático de los casos estudiados de igual forma se tiene en cuenta la metodología de vinculación de ADR y WEAP.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la revisión y análisis de información secundaria se presentan dos experiencias de aplicación del modelo WEAP bajo escenarios de Cambio Climático en Colombia y a partir de esto, se permite determinar las funciones del modelo WEAP y el desarrollo de propuestas de conservación hídrica.

7.1. Estudios de caso

7.1.1. Estudio de caso 1: Efectos de mediada de adaptación basado en ecosistemas sobre métricas hidrológicas considerando el cambio climático: Río Nechi, Colombia. (Ruiz, L., Delgado, J., Angarita, H., Salas, H., Sánchez, J., Cortés, M., & Rueda, O. 2016)

Localización:

La cuenca hidrográfica de los ríos Porce-Nechí, se encuentra geográficamente en el departamento de Antioquia Colombia, en el rango de Latitud 6.0°N-8.0°N; Longitud 75.8°W-74.5°W, con un área aproximada de 14.600 km², y rango altitudinal entre 30 y 3.300 m.s.n.m. La zona de estudio es de particular interés para el entendimiento de alteraciones hidrológicas en Colombia debido a que incluye factores que inducen variabilidad natural y componentes que contribuyen a la modificación en el régimen de caudales debido a actividades antrópicas. (CORANTIOQUIA & TNC, 2014)

Construcción del modelo:

En este estudio se desarrolló un modelo basado en escenarios bio-físicos, que incluye el acoplamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río Porce (afluente al río Nechí) y la incorporación de escenarios de cambio climático (ECC), en un periodo de 1996 a 2070, para evaluar posibles impactos, medias de adaptación y vulnerabilidad de los ecosistemas, cuyos efectos son fundamentales para la adecuada gestión gubernamental y la previsión de los impactos sociales (IPCC, 2014).

Para la elaboración del módelo en este estudio se presentaron 24 catchments, (Estos catchments según el Stockholm Environment Institute o SEI, (2009), constituyen las unidades hidrológicas sobre los cuales WEAP aplica las rutinas para estimar evapotranspiración, infiltración, escorrentía

superficial, flujo horizontal entre capas, y flujo base. Los catchments además se pueden subdividir dependiendo de su cobertura vegetal para lograr una mejor representación de los procesos hidrológicos en diferentes tipos de cultivo y suelos), que representan la zona baja de la cuenca del río Nechí, de los cuales 10 estuvieron relacionados con zonas inundables. Los factores de conectividad en este estudio fueron calibrados para los catchment C23 y C24, a los cuales les realizaron una campaña de campo para determinar la conectividad entre el río y las planicies ubicadas en estos catchments. Para la elaboración de estos catchments tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en la salida de campo. Adicionalmente, realizaron una compilación de las demás llanuras inundables alimentadas por el río Nechí, las cuales se agruparon en un solo conjunto de parámetros a simular. Los parámetros del modelo generados a partir de simulaciones de Monte Carlo, se presentan parámetros (K_c) que entran al modelo como datos y fueron determinados a partir de estudios previos.

Para la construcción del modelo WEAP en este estudio se realizó el cálculo de balances de agua de acuerdo con las características de dicha unidad. Para el cálculo de la evapotranspiración utilizaron la ecuación de Penman – Monteith. (FAO N°56, 200). La escorrentía superficial la representaron a partir de parámetros de resistencia al flujo, inclinación, porosidad, entre otras; a partir de ecuaciones empíricas. El flujo vertical entre diferentes capas de suelo lo ajustaron usando un parámetro de conductividad, y parámetro de ajuste que permito estimar la fracción que pertenece al flujo horizontal. Los embalses los simularon en función de sus características físicas, así como los parámetros de operación que reflejan las decisiones basadas en el equilibrio de control de inundaciones, suministro de agua, y el almacenamiento remanente y su operatividad se incluyó como condición de entrada para las simulaciones.

De igual forma incluyeron un modelo conceptual de almacenamiento de humedales y llanuras de inundación, con interacciones laterales entre el río y las planicies adyacentes. Incluyendo un tanque de almacenamiento, con lo que fue posible representar la inundación de una llanura por la creciente en el caudal de un río a través de factores de conectividad lateral y parámetros que indicaron el flujo de intercambio entre la llanura de inundación y el canal del río.

La calibración del modelo WEAP la evaluaron a través de diferentes métricas estadísticas de desempeño: el índice de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970), el BIAS (Moriasi & Arnold, 2007) y el coeficiente de determinación (R^2) de Pearson. Finalmente, a partir de la información

obtenida en campo de la dinámica de las ciénagas El Sapo y Chibolo, cuantificaron el ajuste más cercano a los datos obtenidos en campo a través de los estimadores obteniendo los mejores ajustes posibles con los diferentes juegos de parámetros obtenidos (Porretta, Chormański, Ignar, Okruszko, Brandyk, Szymczak, & Krężałek, K.2010).

Ejecución de ensamble y corridas de modelo

Para cada uno los catchments (C8, C10, C13, C14, C17, C19, C21, C22, C23 y C24), relacionados con zonas inundables, seleccionaron los 3 primeros parámetros para la calibración (como se muestra en la figura 3), realizando alrededor de 500 simulaciones de Monte Carlo (Ortega, 2008), hasta seleccionar los parámetros que exhiben el mejor desempeño. Los catchment 14, 23 y 24, contaron con condiciones que pudieron ser estudiadas de acuerdo con la visita de campo para refinar su calibración ajustada y por eso cuentan con parámetros propios, los demás catchments inundables mencionados fueron agrupados en un mismo conjunto, con el fin de restringir los grados de libertad del modelo.

Los números superiores en los catchments representaron los puntos más bajos en la zona de estudio y en la dirección de flujo del río Nechí. Las ciénagas monitoreadas en campo son El Sapo (C23) y Corrales (C24). El modelo WEAP permitió una adecuada representación de la física del sistema de acuerdo con la información obtenida en la salida de campo y la demás información disponible lo que permite lograr resultados robustos y confiables desde el punto de vista físico y estadístico.

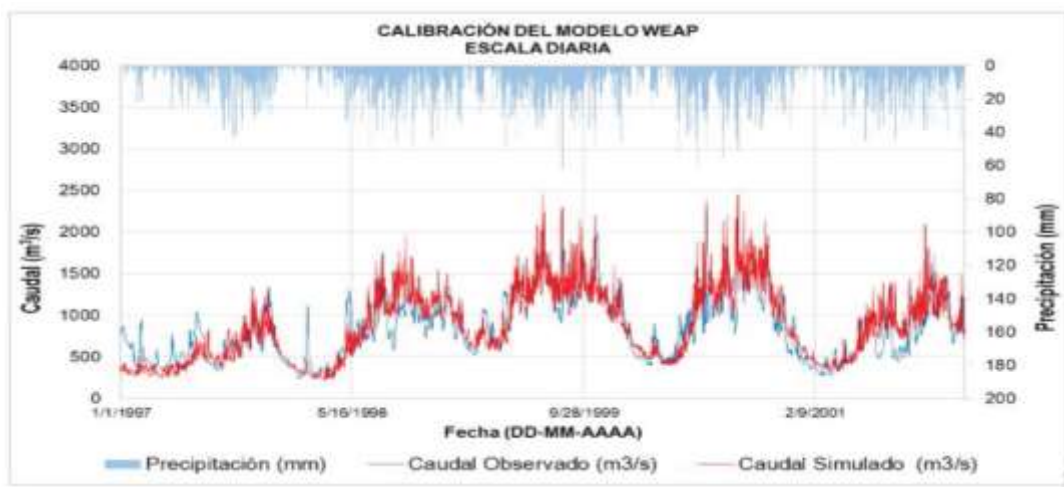


Figura 3: Resultados de calibración del modelo WEAP para el periodo 1997-2001

Fuente: Angarita, (2014)

Desarrollo de escenarios climáticos:

Para la simulación de escenarios, tuvieron en cuenta los cambios en las condiciones del suelo y las dinámicas entre las ciénagas y el río Nechí, teniendo en cuenta los procesos identificados del análisis de imágenes Landsat, incluyendo pérdidas de conectividad y escenarios de cambio climático para Colombia hacia el año 2070. Se realizaron 960 simulaciones, evaluándose la respuesta con las siguientes métricas: i) evapotranspiración real promedio en mm, ii) evapotranspiración potencial promedio en mm, iii) Caudal máximo de la serie promedio diaria en m³/s, iv) caudal mínimo de la serie promedio diaria m³/s, v) caudal medio de largo plazo en m³/s, vi) caudal del 10% de excedencia (Q10%) en m³/s, vii) Caudal del 97.5% de excedencia (Q97.5%) en m³/s, viii) volumen media de inundación en C23 (Sapo) en Mm³, ix) Volumen máximo de inundación en C23 (Sapo) en Mm³, x) volumen media de inundación en C24 (Corrales) en Mm³, y xi) volumen máximo de inundación en C24 (Corrales) en Mm³.

Para cambio climático, se consideran escenarios tendenciales de precipitación y temperatura, teniendo en cuenta el informe de Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 (IDEAM, 2015). En la Tabla 4, se plantean cuatro (4) escenarios de posible cambio en la tendencia de las variables hidroclimáticas. El estudio mencionado pronostica un aumento en la temperatura media cercana a los 2.5°C en el período de simulación, por lo cual consideraron una tendencia creciente hasta los 2.5°C en el año 2070 (E1, E2 y E3). Por otra parte, la precipitación presenta un grado de incertidumbre mayor. El mismo informe indico que la precipitación, hacia el periodo 2071- 2100 puede crecer o decrecer en un rango de 10% por lo que se hace esta consideración los escenarios E1 y E3, asumiendo los valores extremos del rango como escenarios de simulación.

Tabla 4: *Escenarios de cambio climático simulados al año 2070*

Escenario	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
E0	Tendencia actual	Tendencia actual
E1	Disminución del 10%	Aumento gradual hasta 2.5°C mas

E2	Sin cambio en la precipitación	Aumento gradual hasta 2.5°C mas
E3	Aumento del 10%	Aumento gradual hasta 2.5°C mas

Fuete: Angarita, (2014)

Visualización de dinámicas

En este estudio se obtuvieron los siguientes resultados: En lo relacionado con el caudal Q10%, el resultado más importante es el aumento del caudal con la disminución de áreas de bosques y la pérdida de conectividad. Las simulaciones al año 2070 sugieren un aumento superior al 15.0% del caudal Q10%, con respecto al escenario que simula una tendencia similar a la actual, para el mismo periodo de simulación. Los resultados indican que mantener las coberturas del escenario de referencia, pero disminuir la conectividad también conduce a un aumento significativo del caudal Q10% implicando un aumento superior al 10% para una pérdida de conectividad del 90.0%. Se estima un aumento del caudal Q10% del mismo orden manteniendo la conectividad sin cambios, pero asumiendo una pérdida de coberturas del orden del 40.0%. Los resultados obtenidos concuerdan con diversos estudios sobre el efecto de la deforestación en los caudales máximos en las cuencas, los cuales evidencian la importancia de los ecosistemas y su vegetación asociada en el ciclo hidrológico a diferentes escalas, afirmando que la deforestación generalmente aumenta la productividad de agua y el flujo base en los ríos y la reforestación reduce las cantidades de estas dos variables para la mayoría de las cuencas estudiadas.

Los resultados muestran un aumento progresivo del caudal Q97.5% para los escenarios E1, E2, y E3 con variaciones del orden del 10%. Estos resultados podrían vincularse de manera similar a la hipótesis para pesquerías y migraciones ascendentes según la cual “el aumento de magnitud en los caudales bajos puede provocar el descenso en la abundancia de especies que prefieren corrientes lentas y hábitat someros, mientras que las especies especialistas fluviales o reofílicos obligados cambiarían su distribución o disminuirán su riqueza y abundancia si la magnitud de los caudales bajos fuera reducida, modificando así las potenciales pesquerías en la zona”(CORANTIOQUIA & TNC, 2014)

Los valores más altos del Q97.5%, simulados se encuentran entre del 2.0% al 8.0% respecto al escenario de tendencia E0. En cuanto a los escenarios climáticos se observa que para una pérdida

de la conectividad de 30% se presenta el valor más alto de Q97.5% sin afectación por el cambio de cobertura vegetal.

Decisiones robustas

Para la cuenca del río Nechí, los caudales de aguas altas se encuentran asociados a inundaciones, especialmente, en el área de influencia de su desembocadura al río Cauca. Las simulaciones muestran como el aumento de vegetación boscosa permite regular los caudales de aguas altas, disminuyendo la ocurrencia de inundaciones a futuro, esto debido a que influye en el aumento de la capacidad de campo y el almacenamiento capilar. Por tal razón, se presenta como propuesta de medida de adaptación la recuperación de cobertura boscosa en toda la cuenca, especialmente en sus zonas media y alta, para así poder hacer frente a la intensificación de eventos extremos futuros.

7.1.2 Estudio de caso 2: Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia (Andres, F., Labrador, C., Romero, C & Zúñiga, L. 2016).

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 Km² y se extiende entre los municipios de Aipe, Neiva y Palermo. La longitud del cauce principal es 51.31 km. El río Aipe es tributario del río Magdalena.

Construcción del modelo

La cuenca fue modelada con WEAP a escala de subcuencas y estas, a su vez, por bandas de elevación cada 500 metros, configurando así un total de 65 unidades de respuesta hidrológicas o catchments. Se modelaron en total 20 corrientes tributarias directas e indirectas del cauce principal con la información generada en un punto de monitoreo de caudal denominado estación Puente Carretera (2113703). Este estudio consideraron, tres demandas de agua para consumo, los cuales son los centros poblados de San Francisco, Los Órganos y el acueducto municipal de Aipe, utilizando la ecuación del método Geométrico del capítulo B del Reglamento técnico del sector de

agua potable y saneamiento básico o RAS, cuyo propósito es fijar los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de acueducto que se desarrollen en Colombia (RAS, 2000), también los requerimientos hídricos para las principales coberturas vegetales (bosques, pastos, suelos desnudos, zonas agrícolas, zonas urbanas, lagos, café, aguas abiertas, arroz, sorgo y cacao).

La calibración y validación del modelo la desarrollaron utilizando los caudales observados en el punto de cierre de la cuenca (estación Puente Carretera). Durante la fase de calibración se utilizó el 70% de la serie histórica de caudales observados (1980-2001), esto se observa en la figura 4. 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, conociendo la dinámica del modelo, la calidad de la información ambiental y la escala de los procesos naturales de la cuenca en estudio. Una vez calibrado el modelo se procedió a la validación de este 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. El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados, que pueden explicarse por el modelo. (Andres, Labrador, Romero & Zúñiga 2016).

Ejecución de ensamble y corridas de modelo

El modelo WEAP lo corrieron a nivel diario con unos valores iniciales de los parámetros acorde con la inferencia de la información ambiental (mapa de suelos, cobertura vegetal, balance hídrico, mapa geológico etc.). Luego se realizaron un análisis de sensibilidad preliminar para identificar los parámetros más sensibles. Los parámetros más sensibles están en función del tipo de respuesta hidrológica. Por ejemplo, se identificó que los caudales máximos se afectan primordialmente por el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), la conductividad hidráulica en la zona de raíces (K_s) y la capacidad de retención de humedad en la capa superior del suelo (SWC). Cuando el valor de SWC se incrementa se logra un mayor flujo subsuperficial, y por lo tanto el aumento de caudales máximos. Por otro lado, el flujo base es muy sensible a los parámetros: dirección preferencial de flujo (PFD) y la conductividad hidráulica en la zona profunda (K_d). Al aumentar el valor de PFD

aumenta la conductividad en la zona profunda, y, por lo tanto, la descarga de perfiles profundos, y como consecuencia aumenta los caudales bases. De igual forma, regulado la transmisión del flujo base se podrá ajustar la capacidad de retención de humedad en las capas profundas del suelo (DWC). En resumen los parámetros que mejor se ajustaron en el modelo hidrológico fueron: el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), la conductividad hidráulica en la zona de raíces (RZC), la conductividad hidráulica en la zona profunda (DC), dirección preferencial de flujo (PFD), la capacidad de retención de humedad en la capa superior (SWC) y en la capa profunda (DWC), debido a que es un modelo semi-distribuido no hay un único valor de parámetros óptimos, por el contrario cada unidad de respuesta hidrológica tiene su conjunto de parámetros óptimos. (Andrés *et al*, 2016).



Figura 4: Caudales simulados y observados en el punto de cierre de la cuenca del río Aipe durante período de calibración

Fuente: (Andrés *et al*, 2016)

Para el período de validación el desempeño del modelo fue un poco más bajo $R^2 = 0.57$. Sin embargo, el modelo sigue manteniendo una buena representación de la variabilidad estacional de la cuenca. Cuando los modelos hidrológicos muestran un bajo desempeño en la validación usualmente se infiere la no estacionariedad de los parámetros. En este caso se estaría incumpliendo el supuesto de estacionariedad, que puede estar asociado a cambios bruscos por efectos antrópicos. (Andrés *et al*, 2016)

Desarrollo de escenarios

La primera hipótesis plantea la creación de un escenario base de referencia para el cálculo de la oferta hídrica asociado a un incremento poblacional. De acuerdo con los registros del municipio la población de referencia es 23.513 habitantes. Luego esa población de referencia se incrementó un 2% a partir de una proyección geométrica (escenario I, 23.983 habitantes) y luego se incrementó un 10% (escenario II, 25.864 habitantes), estos incrementos de la población tienen un impacto directo sobre la demanda y la oferta hídrica los cuales serán representados por el modelo hidrológico. (Andrés *et al*, 2016)

La segunda hipótesis hace referencia a un cambio del clima. Esta hipótesis es más complicada dada la incertidumbre que manejan los escenarios de cambio climático, la variedad de modelos climáticos y las posibilidades de los escenarios. En este sentido, se utilizó una herramienta basada en múltiples modelos y escenarios, para ilustrar el rango de los cambios posibles en el clima durante el siglo 21 (Angarita, 2014). El propósito de la metodología es generar series de proyecciones climáticas de la variable de precipitación para la cuenca del río Aipe, a nivel de las unidades de análisis del modelo WEAP, informadas por las predicciones del proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5), que, sumadas al clima actual, permitan establecer un rango de comportamiento hidrológico posible en la cuenca del río Aipe para los años 2010 a 2050. Finalmente, del ensamble de posibilidades se seleccionó una tendencia climática húmeda (escenario III) y una climática seca (escenario IV) para evaluar su respuesta hidrológica, estos escenarios se muestran detalladamente en la tabla 5. (Labrador, Romero y Zúñiga 2016)

Tabla 5: *Resumen de los escenarios para la cuenca del río Aipe.*

Nombre	Variable
Escenario I	+2% de población
Escenario II	+10% de población
Escenario III	Clima húmedo
Escenario IV	Clima seco

Fuente: (Andrés *et al*, 2016)

Visualización de dinámicas

Como resultados de las visualizaciones obtuvieron que, la variable incremento de población es presentada en los escenarios I y II. Estos escenarios asumen que la población del municipio de

Aipe continúa su crecimiento y por tanto su demanda de agua potable también incrementa. Este crecimiento no necesariamente tiene que ser por incremento de la tasa de natalidad, también puede obedecer a procesos de migraciones o incremento de población flotante debido a una apuesta de las actividades turísticas. La variación de la oferta hídrica de la cuenca del río Aipe en relación con la línea base (1980 - 2011) para la simulación del escenario I (+2%) mostraron una disminución de $0.43 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y para el escenario II (+10%) de $4.44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. De estos resultados se puede deducir que la fuente será suficiente para abastecer de agua potable al municipio de Aipe. Sin embargo, aparte de estos procesos antrópicos, se deben considerar los impactos naturales debidos a eventos de sequías y variaciones de precipitaciones en espacio y tiempo. (Labrador, Romero y Zúñiga 2016)

Por otro lado, teniendo en cuenta la variable clima se presentaron los escenarios III y IV, para estos escenarios, se mostraron dos series de clima MPI-ESM-MR, que hacen referencia a un clima húmedo y seco. Con respecto a los datos históricos de la estación Puente Carretera cuando el clima es húmedo hay un aumento de $3.67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, lo que indica que el caudal en la cuenca del río Aipe incrementa un 23.97% para el período (2011 -2050). Por el contrario, cuando el clima es seco el caudal disminuye $10.07 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, mostrando una reducción muy marcada del 65.77%. (Labrador, Romero y Zúñiga 2016).

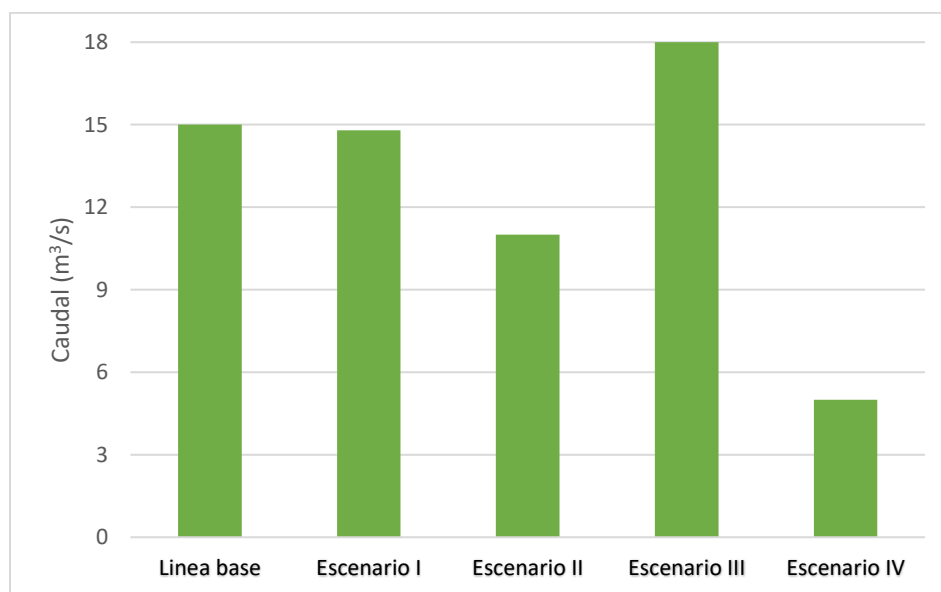


Figura 5: Impacto de los escenarios sobre el caudal en el punto de cierre de la cuenca del río Aipe

Fuente: (Andrés *et al.*, 2016)

El peor escenario sería la combinación de alta demanda de agua (escenario II) y poca producción de escorrentía superficial (escenario IV) lo que podría ocasionar numerosos problemas económicos y conflictos sociales. Por ejemplo, ¿qué pasaría con la tradicional producción de arroz que utiliza grandes volúmenes de agua de riego por superficie? (sistema altamente ineficiente y que promueve el uso irracional del agua), ¿qué pasaría con la producción de tilapia en tierra que actualmente tiene tanta demanda a nivel nacional e internacional?

Decisiones robustas

De acuerdo con lo expuesto, el aporte de este trabajo fue poder mejorar el sistema de gestión de recursos hídricos y asistir a la toma de decisiones, a través de conocimiento confiable de cómo responden las cuencas de aporte ante distintos escenarios climáticos y de demanda hídrica. En este contexto, es necesario dimensionar medidas de adaptación acordes con los escenarios climáticos por lo cual se proponen estas propuestas como medida de adaptación: (I) promoción de cultivos de secano que tengan requerimientos hídricos menos exigentes, (II) aprovechar especies y semillas nativas que no alteren la dinámica ecohidrológica, (III) incrementar la capacidad de infiltración y recarga de la cuenca para alimentar el acuífero a través de mayores tiempos de retención hídrica, (IV) promover prácticas de cosecha de agua lluvia, (V) establecer prácticas de diseño hidráulico para retener agua aprovechando la topografía de la cuenca (línea clave).

Con los dos casos mencionados podemos decir, que las ventajas que presenta el modelo WEAP son el requerimiento de la integración de la demanda, la oferta, la calidad del agua y las consideraciones ecológicas, lo que lo hace una herramienta muy completa orientada a la planificación del recurso hídrico. Así mismo, según lo plantea el Centro de Cambio Global (2009), el modelo WEAP contribuye a la planificación del recurso hídrico a través del balance oferta-demanda, pero a diferencia de otros modelos WEAP está determinado por variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento), además de aspectos como coberturas de uso de suelo, en los que se incluyen escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Por otra parte, WEAP hace posible evaluar los impactos futuros de un sistema a través de la modelación de escenarios, WEAP contribuye a enfrentar uno de los retos más complejos de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), que es la planificación de los recursos con una visión a largo plazo y mediante una evaluación integrada de diferentes alternativas de gestión. Según Phurisamban, (2014), esta visión de WEAP ha permitido apoyar la

planificación de los recursos hídricos, proporcionando un análisis común y un marco de gestión de información que permite involucrar a diferentes actores y tomadores de decisiones en un proceso de planificación abierto.

7.2 Funciones que cumple el modelo WEAP en la valoración del recurso hídrico en cuencas hidrográficas

En base a los casos descritos anteriormente (Cuenca del Rio Nechi y Cuenca del Rio Aipe), se pueden determinar las funciones que desempeño el modelo WEAP, las cuales se describen a continuación:

La función de balance hídrico y físico; esta se desarrolló para los dos casos estudiados, bajo el método de humedad del suelo que simula la lluvia-escorrentía, que consta de componentes diseñados para representar la variabilidad en las suposiciones claves en la escala espacio-temporal, esta función cuenta con funciones empíricas que describen la evapotranspiración, la escorrentía superficial, el escurrimiento sub-superficial, la percolación profunda, (Kiparsky, Joyce, Purkey, & Young. 2014) y en el caso de la cuenca del Rio Nechi la conectividad entre sistemas de llanuras inundables.

Según Yates, Sieber, Purkey, Huber Lee, & Galbraith, (2005) esta función hace que WEAP sea, un modelo continuo con un área de estudio configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento), que es utilizado en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo. Un modelo cuasi físico unidimensional, con dos receptáculos de balance de agua para cada tipo de cobertura/uso de suelo, reparte el agua entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los valores de cada una de estas áreas se suman para obtener los valores agregados en una subcuenca. En cada tiempo de corrida del modelo, WEAP calcula primero los flujos hidrológicos, que son traspasados a los ríos y acuíferos asociados. La distribución de agua se realiza para el mismo tiempo de corrida, donde las restricciones relacionadas con las características de los embalses y la red de distribución, las regulaciones ambientales y a la vez las prioridades y preferencias asignadas a diferentes puntos de demanda son usadas como condiciones

de operación de un algoritmo de programación lineal que maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible.

Una descripción más corta del balance hídrico y físico la realiza Cusgüen, (2013), donde describe que esta función emplea información climatológica, de cobertura vegetal, hidrológica, además de información de oferta y demanda. Entre la información climatológica se puede mencionar precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud y cantidad inicial de nieve; de la información hidrológica se requieren los caudales medios. Respecto a la información de oferta se requiere información de infraestructura física de control y demandas.

Por otra parte, estos estudios se enfocaron en la utilización del módulo de hidrología a través del método de humedad del suelo, que simula el proceso lluvia - escorrentía en unidades de respuesta hidrológicas (URH), por medio de dos tanques, los cuales pretenden estimar los flujos superficiales y subterráneos. Este método unidimensional se fundamenta en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial, flujo subsuperficial y percolación profunda (Duque & Vázquez, 2015).

Según el SENAMHI (2014), este método modela conceptualmente el suelo como dos estanques, que representan la zona de las raíces y la zona profunda del suelo, entre los cuales existe una interacción que simula la percolación desde el estanque de la zona de raíces hacia el estanque profundo. Cada estanque tiene flujos de entrada y salida, los que dependen de las variables forzantes del modelo como también de los parámetros que representan el suelo, este método se representa en la figura 6. Estos elementos a su vez funcionan de forma independiente, es decir, no existe trasvases desde un elemento a otro y los balances que rigen el método, se hacen para cada elemento por separado. Entonces la forma de conectar los resultados de los balances de cada unidad es mediante un cauce que conduce el agua hasta la salida de la cuenca.

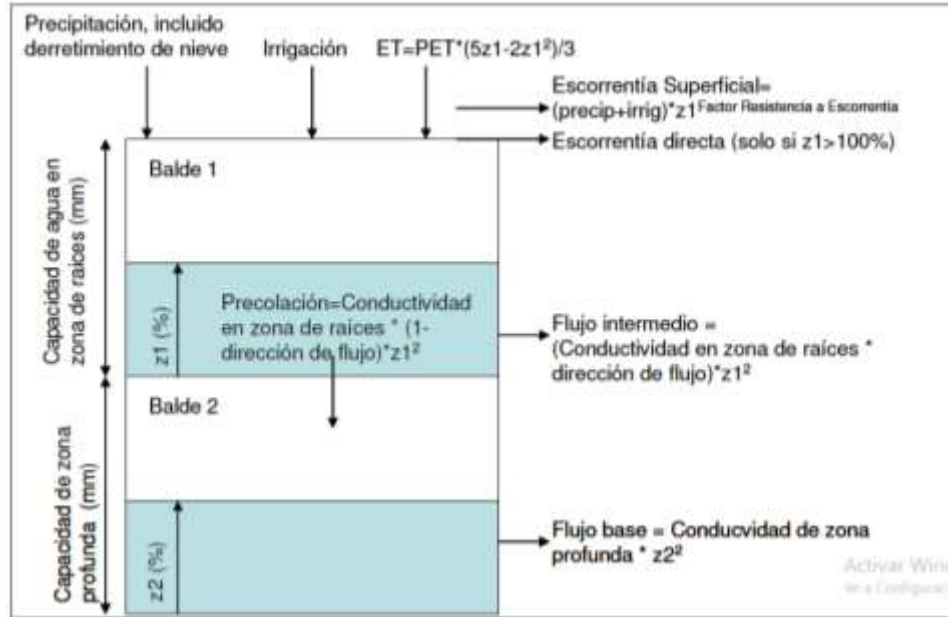


Figura 6: Esquema del método de humedad del suelo.

Fuente: (SEI, 2009)

Función de trabajar en asocio con una interfaz SIG. Otra función del modelo WEAP es trabajar en asocio con una interfaz SIG, en los dos casos de estudios se utilizó esta función. En caso de la cuenca del Río Nechi se realizó una interpretación y análisis de imágenes satelitales, se realizó una clasificación supervisada de 28 imágenes Landsat para el periodo comprendido entre 1996-2015. En cada una de las imágenes se identificó el río principal, los cuerpos de agua asociados, lo cual permitió identificar áreas inundables en diferentes períodos climáticos y bajo la influencia de diferentes fenómenos macro-climáticos como el ENSO. Para los años 1999, 2006 y 2012, se realizó la clasificación las coberturas vegetales de la zona mediante la interpretación de imágenes Landsat, siguiendo la metodología Corine Land Cover (IDEAM, 2010). Esta metodología utiliza niveles de jerarquía según el grado de detalle, siendo su objetivo el de unificar criterios, conceptos y métodos de las coberturas de un territorio (IDEAM, 2010).

En el caso de la Cuenca del Río Aipe se realizó una interpretación y análisis de imágenes satelitales para la ubicación de las diferentes estaciones pluviométricas, de igual forma para las principales coberturas vegetales (bosques, pastos, suelos desnudos, zonas agrícolas, zonas urbanas, lagos, café,

aguas abiertas, arroz, sorgo y cacao), y para el esquema de modelación con las unidades de respuesta hidrológica

Según Vicuña, Coello & Cisneros, (2009), WEAP al trabajar con una interfaz SIG que permite trazar la cuenca con su respectivo esquema, para así poder estimar el comportamiento de oferta y demanda en diferentes escenarios. De igual forma Villafañe & Rada, (2011), dicen que este tipo de modelo puede ser aplicado en proyectos relacionados con el recurso hídrico, teniendo en cuenta la oferta, la demanda, los impactos que alteren el curso del agua, condiciones meteorológicas, relieve, entre otros. La ventaja principal del modelo WEAP, es que facilita la generación de diferentes escenarios, permitiendo así al planificador, elegir la complejidad según la información con la que cuente.

Pardo, (2009), citado por Ovalle & Mayorga (2015), dice que el modelo WEAP utiliza esta interfaz gráfica basada en SIG para permitir al usuario generar un diagrama esquemático utilizando el mouse para “arrastrar y soltar” los elementos (líneas y nodos) que se requiera construir, mover o modificar del sistema, estos elementos pueden ser sobrepuestos en un mapa construido en Arcview y otros archivos de SIG estándar y gráficos. Los datos correspondientes a cualquier componente pueden ser editados directamente haciendo click en el símbolo deseado en el esquema. El usuario puede consultar la función de ayuda contextualizada desde cualquier parte en WEAP. El programa cuenta con asistentes, avisos y mensajes de error que facilitan el uso de la herramienta. Con la completa y flexible herramienta de reporte de WEAP, el usuario puede personalizar los resultados de los reportes basados en gráficos, tablas o mapas. y seleccionar de entre una serie de opciones de formato (ej. Unidades métricas o del sistema inglés, años, valores absolutos, partes porcentuales o tasas de crecimiento). Las configuraciones específicas de los reportes se pueden guardar como "favoritos," que se puede combinar en "vistas generales" o resúmenes, de los indicadores claves del sistema; estas vistas generales pueden ser recuperadas rápidamente para ser revisadas (WEAP, 2015).

Función de generación de escenarios:

En WEAP se puede desarrollar escenarios para explorar posibles futuros en la disponibilidad del recurso hídrico, según el SEI (2009), una vez que se cuente con el modelo para la cuenca completamente calibrado se pueden realizar una serie de estudios específicos. Una clase de estos

estudios corresponde a la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. Los escenarios futuros pueden ser de diferentes tipos:

- Escenarios de crecimiento o cambio en la población
- Escenarios de uso de suelo
- Escenarios de clima

En los casos de estudio analizados utilizaron la generación de escenarios de crecimiento poblacional relacionado con la oferta hídrica, de igual forma se utilizó escenarios de clima estos en el caso de la cuenca del Rio Aipe, en el caso de la cuenca Rio Nechi tuvieron en cuenta escenarios de uso de suelo y escenarios de clima, estos descritos a continuación.

En general, los escenarios de crecimiento o cambio de población pueden diseñarse considerando las tasas de crecimiento de población proyectadas hacia futuro, así como el cambio en la proporción de población rural y urbana, o el aumento de población dada por un evento específico dentro del modelo como la construcción de una represa.

Los escenarios de uso de suelo pueden considerar aspectos de cambio en la cobertura vegetal dada por tendencias futuras como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales, o cambio en tipos de cultivos por tendencias económicas. Todas estas consideraciones deben estudiarse de forma que al implementar el escenario se sepa con claridad que variables y funciones se van a tener en cuenta al definir el escenario.

Los escenarios de clima constituyen uno de los aspectos de mayor uso en un modelo agregado como WEAP. Existen diferentes maneras de implementar proyecciones climáticas dentro de un modelo, incluyendo: Incorporación de deltas de temperatura y/o precipitación con base en proyecciones de modelos climáticos y uso de datos escalados a la región

Desde las funciones del modelo WEAP, se puede decir que está basada en la modelación hidrológica externa, WEAP es un modelo forzado por variables climáticas que incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica. Estas características convierten a WEAP en un modelo ideal para realizar estudios de cambio climático, en los que es importante estimar cambios en la oferta y demanda del agua. Según Vicuña, Coello & Cisneros (2009), el fundamento conceptual del modelo WEAP es el principio básico de balance de masa. A través de este principio se puede simular una amplia gama

de los componentes naturales e intervenidos de los sistemas hídricos, incluyendo análisis hidrológicos lluvia-escorrentía, recarga potencial de los acuíferos por precipitación, generación de energía hidroeléctrica y calidad del agua. Por otra parte, Yates *et al*, (2005) describe las funciones que cumple el modelo WEAP como unos instrumentos útiles a la hora de tomar decisiones, porque permiten contemplar una amplia gama de problemas en cada escenario que se desee plantear, teniendo en cuenta: la variabilidad del clima, las condiciones de las cuencas a estudiar, las demandas previstas, las necesidades ecosistémicas, los objetivos operativos entre otros. Además, trabaja con una interfaz SIG que permite trazar la cuenca con su respectivo esquema, para así poder estimar el comportamiento de oferta y demanda en diferentes escenarios (Vicuña *et al*, 2009).

7.3 Propuestas de adaptación con base en escenarios de cambio climático en WEAP

A continuación, se describen dos (2) propuestas como medidas de adaptación al cambio climático basadas en los resultados obtenidos en la modelación WEAP y la metodología de vinculación de ADR y WEAP para los casos estudiados en la Cuenca del Rio Nechi y La Cuenca del Rio Aipe. Cabe resaltar que las propuestas fueron seleccionadas a partir de las decisiones robustas descritas anteriormente de igual forma se tuvo en cuenta la Política Nacional de Cambio Climático 2017 el cual en sus líneas estratégicas está el desarrollo rural bajo en carbono y resiliente al clima, cuyas líneas se tuvieron en cuenta para la selección de propuestas las cuales fueron: Promover sistemas de producción agropecuaria, forestal y pesquera más adaptados a altas temperaturas, sequías o inundaciones, para mejorar la competitividad, los ingresos y la seguridad alimentaria, especialmente en áreas vulnerables y Promover dentro de las fincas el manejo forestal sostenible, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, la conservación de los bosques y de las márgenes hídricas, así como la restauración de las áreas degradadas (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

7.3.1 Propuesta 1: Restauración activa por enriquecimiento de especies en la Cuenca del Rio Nechi.

Problemática: Teniendo en cuenta los resultados de la modelación WEAP se tiene como principales resultados: (I) aumento en caudales mínimos si aumenta la deforestación y pérdida de conectividad, (II) aumento del caudal Q97.5 para ECC y aumento de deforestación hasta 40%, y (III) aumento del VMI cuando se presentan pérdidas de coberturas y aumento de los caudales de aguas altas hacia aguas abajo de la región de estudio, entre las ciénagas y el río, los caudales de aguas altas se encuentran asociados a inundaciones, especialmente, en el área de influencia de su desembocadura al río Cauca.

Justificación: Las simulaciones muestran como el aumento de vegetación boscosa permite regular los caudales de aguas altas, disminuyendo la ocurrencia de inundaciones a futuro, esto debido a que influye en el aumento de la capacidad de campo y el almacenamiento capilar. Por tal razón, la recuperación de cobertura boscosa en toda la cuenca, especialmente en sus zonas media y alta, constituye parte de una estrategia de adaptación al cambio climático frente a la intensificación de eventos extremos.

Propuesta: se propone la siembra de especies nativas en el interior de parches de bosque secundario y bosques riparios o de galería, las cuales presentan algún grado de amenaza. El enriquecimiento se propone en las áreas que se han identificado como de importancia hídrica, las cuales se distribuyen en las zonas que bordean las ciénagas y los cauces superficiales, además de los fragmentos boscosos más importantes de la zona. La consecución de las especies locales se puede realizar mediante rescate de plántulas en sitios abiertos, al interior del bosque o en áreas productivas con establecimiento de viveros locales.

Teniendo en cuenta lo sugerido, se da la recomendación de algunas de las especies para la reintroducción y enriquecimiento en el área estudiada.

Para el desarrollo de esta recomendación se tiene en cuenta las especies nativas y especies que se adapten a la zona de estudio, para esto se tuvo en cuenta las especies recomendadas en el estudio realizado por Corantioquia y The Nature Conservancy (TNC) en el 2014, las cuales se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: *Especies recomendadas para la reintroducción y enriquecimiento de mosaico de ecosistemas.*

Nombre común	Nombre científico	Familia	Característica
Hobo	<i>Spondias mombin</i>	Anacardiaceae	Árbol pionero de porte mediano a grande. Los frutos son consumidos por monos, aves, murciélagos y otros mamíferos. Lo cual favorece la llegada de otras especies. Un buen árbol para la restauración de bosques de ribera.
Ceiba de majagua	<i>Pseudobombax Septenatum</i>	Bombacaceae	Útil en la silvicultura para hacer reforestaciones mixtas en la recuperación de áreas degradadas. Las flores son consumidas por la fauna silvestre. Útil en la restauración de bosque de lomerío.
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i>	Bombacaceae	Árbol de crecimiento rápido y resistente a diferentes condiciones edáficas, se encuentra en áreas de vegetación secundaria, útil en procesos de reforestación y restauración de bosque de ribera.
Anón	<i>Annona glabra</i>	Annonaceae	Es una especie característica de los firmales en las ciénagas, crece muy bien en lugares inundados y expuestos al sol. Es excelente para áreas inundadas y ofrece refugio y alimento a la fauna, siendo apta para consumo humano.
Corozo de lata	<i>Bactris Guineensis</i>	Arecaceae	Las palmas son un elemento clave en la restauración pues atraen fauna dispersora que contribuye a acelerar la sucesión y a enriquecer los núcleos. Esta especie es esencial para la

			restauración de los bosques inundables de transición.
Olla de mono	<i>Lecythis minor</i>	Lecythidaceae	Especie considerada valiosa por su madera, las semillas brindan alimento a la fauna. Útil para la recuperación de especies forestales valiosas y para la restauración de bosques de ribera y de drenajes en los bosques de lomerío.
Guácimo de montaña	<i>Luehea Seemannii</i>	Malvaceae	Utilizada en construcción, provee alimento a fauna y tiene flores mielíferas. Aguanta un poco de anegamiento, sirve para la restauración de bosque de ribera, bosque de ciénaga, bosque de bajo.
Bejuco	<i>Ficus dendroica</i>	Moraceae	Es una especie característica de los bosques de ribera, es muy útil para contener las márgenes de los caños y protegerlas de la erosión. Así mismo, ofrece un sombrío que contrala la proliferación de gramíneas.
Chispero o Suribio	<i>Zygia longifolia</i>	Fabacea	Esta especie es muy importante para la restauración de los bosques de ribera, especialmente en caños y quebradas. Es melífera, mejora las condiciones del suelo y ayuda a controlar la erosión en las márgenes de caños y quebradas.
Guamo	<i>Inga edulis</i>	Fabaceae	Es un árbol importante para la restauración de bosque de ribera en los primeros estadios de la restauración, pues tolera suelos pobres y facilita el establecimiento de otras especies más exigentes. Es un “cebadero natural”, al igual que las cecropias, atrae a un sinnúmero de especies de fauna.

Fuente: (CORANTIOQUIA & TNC, 2014)

7.3.2 Propuesta 2: Captación de lluvia por surcos y camellones en contorno en la Cuenca del Río Aipe

Problemática: Teniendo en cuenta los resultados de la modelación WEAP se tiene como principales resultados: (I) El aumento de la población en los escenarios I y II evidencian el aumento de la demanda de agua potable. (II) Teniendo en cuenta la variable climática cuando el clima es húmedo hay un aumento de 3.67 m³s⁻¹, lo que indica que el caudal en la cuenca del río Aipe incrementa un 23.97% para el período (2011-2050). (III) cuando el clima es seco el caudal disminuye 10.07 m³s⁻¹, mostrando una reducción muy marcada del 65.77% para el periodo (2011-250), (IV) la combinación de los escenarios sería la combinación de alta demanda de agua (escenario II) y poca producción de escorrentía superficial (escenario IV) lo que podría ocasionar numerosos problemas económicos y conflictos sociales como, ¿qué pasaría con la tradicional producción de arroz que utiliza grandes volúmenes de agua de riego por superficie y la afectación en la producción de tilapia.?

Justificación: La cuenca del río Aipe juega un papel fundamental para el desarrollo del municipio de Aipe. El río Aipe abastece el acueducto principal del municipio y ocho acueductos veredales, de igual forma abastece la extracción de hidrocarburos, la irrigación de los cultivos de arroz (riego por superficie), la producción piscícola y ganadería de leche y carne. En resumen, el río Aipe dependen las principales actividades productivas del municipio y como se evidencia son sectores productivos que demandan bastante recurso hídrico. Esta situación ha generado un conflicto por el uso del agua, básicamente porque las demandas se incrementan y la oferta hídrica es la misma, sino disminuye por fenómenos de variabilidad y cambio climático.

Propuesta: Teniendo en cuenta los resultados de la modelación de la cuenca del río Aipe se propone un sistema de cosecha de agua para el cultivo de arroz como medida de adaptación al cambio climático. El sistema que se propone es la captación de lluvia para la agricultura la cual se basa en la lluvia de diseño, que es la cantidad total de lluvia que ocurre durante el ciclo vegetativo del cultivo. El volumen de la lluvia de diseño sobre el área de captación proveerá la escorrentía superficial necesaria para satisfacer las necesidades de agua del cultivo (Critchel y Siegert, 1996).

El sistema consiste en:

Construcción de surcos y camellones a nivel para la colección de la escorrentía de la faja de terreno entre ellos. Con el suelo retirado del surco se conforma el camellón de tierra aguas abajo del surco, aumentando la capacidad de almacenamiento de la estructura surco-camellón. El conjunto surco-camellón se construye a distancias de 1,0 a 2,0 m.

Diseño:

Los surcos y camellones se construyen en contorno a distancias que varían de acuerdo con la relación captación-cultivo. Las plantas se siembran en las cercanías del surco donde el agua se acumula. En terrenos menos inclinados, los cultivos pueden alcanzar una faja más grande que se mantiene más húmeda, aunque en estos casos la eficiencia de la escorrentía es más pequeña, esto se representa en la figura 7.

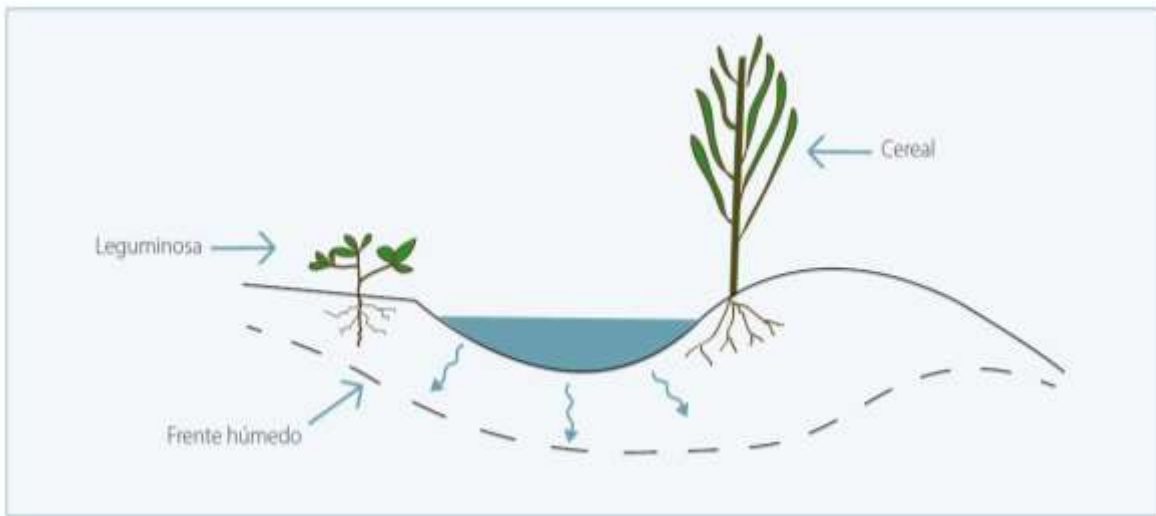


Figura 7: Posición de cultivos sembrados en áreas de surcos y camellones en contorno.

Este sistema es bastante simple en su trazado y construcción, actividades que pueden ser realizadas a mano o con el apoyo de equipos de tracción animal o mecánica, se realiza la rotura y el movimiento de tierra a máquina y se conforma el surco y el camellón de manera imperfecta, para luego perfeccionar el trabajo con equipos manuales. El camellón debe tener por lo menos 0,20 m de alto. El área de captación reducida presenta ventajas en cuanto a la eficiencia y uniformidad de la escorrentía, pero también produce un volumen menor de la misma.

El área de captación debe mantenerse desmalezada, emparejada y compactada, para favorecer la escorrentía. Es conveniente la aplicación de materia orgánica, generalmente mantillo de rastrojos, compost u otros abonos orgánicos en el área de cultivo

El trazado de las curvas a nivel para la construcción de los surcos y camellones: Si los surcos y camellones tienen 1,5 m de distancia, serán 6.670 m lineales por hectárea. A 2,0 m de distancia, serán 5.000 m lineales. Hay que considerar siempre la uniformidad del terreno: para terrenos con pendiente uniforme se pueden trazar líneas paralelas a una curva de nivel principal, lo que reduce la labor de demarcación.

Movimiento de tierra: aproximadamente 300 m³ por hectárea, para surcos y camellones construidos cada 2 m de distancia (5.000 metros lineales por hectárea), con 30 cm de base y 20 cm de alto.

8 CONCLUSIONES

- El modelo hidrológico desarrollado para las cuencas del río Aipe y río Nechi representan una herramienta útil que asiste el proceso de planeación hidrológica a partir de escenarios multicriterio.
- En conclusión, el cambio climático afectará la disponibilidad de agua en las cuencas del río Nechi y río Aipe por lo que se deberán acoger medidas de adaptación para minimizar los efectos sobre la demanda de agua.
- Los modelos calibrados y validados con las condiciones ambientales de cada cuenca contribuyen a mejorar el sistema de gestión integral del recurso hídrico y a apoyar la toma de decisiones, a través de conocimiento confiable ante distintos escenarios climáticos y de demanda hídrica.
- El modelo WEAP es una herramienta de modelación conveniente para representar los efectos del cambio climático gracias a que principalmente utiliza variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) que van a representar el comportamiento hídrico dentro de las cuencas que se quieran investigar, además de utilizar parámetros de uso del suelo que lo hacen un modelo físico muy conveniente para la simulación o proyección de escenarios.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angarita, H., (2014). Metodología para incluir variabilidad climática y escenarios de cambio climático en el modelo WEAP de la macro cuenca del Magdalena y resultados de las simulaciones. The Nature Conservancy. Bogotá. p 44.

Andres, F., Labrador, C., Romero, C & Zúñiga, L. (2016). Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia. *Revista Ingeniería y Región*; 15(1): 23-35

Asociación Mundial del agua OMA. (2005) Net, C., UNDP (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), & Global Water Partnership. (2005). Planes de gestión integrada del recurso hídrico: manual de capacitación y guía operacional. Cap Net.

Brooks, N., (2003) A conceptual framework Vulnerability , risk and adaptation : A conceptual framework. Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich.

Calderón, O., Palacios, L & Padilla, J. (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, Bogota D.C. Recuperado de http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13997/4/TG%20oscar_lindon_johana.pdf. Consultado 5 de febrero de 2018.

Castro. N. (2014). Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta del recurso hídrico en la vereda La Bella. Neiva.

Cap-Net. (2009). La GIRH como herramienta para la adaptación a los cambios climáticas. Gezina.

Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE), (2015). Normativa ambiental relacionada con la GIRH en Colombia. “Estrategias y planes de acción por parte de los caficultores” Disciplina Gestión de Recursos Naturales y Conservación.

Centro de Cambio Global Universidad de Chile. (2009). Guía metodológica: Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP. Environment. Santiago, Boston. (1), 1-86.

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Desarrollada con contribuciones del PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador), Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador.

CIIFEN. (2016). Centro Internacional Para la Investigación del fenómeno del Niño. Obtenido de Centro Internacional Para la Investigación del fenómeno del Niño. Recuperado de <http://www.ciifen.org/>. Consultado 8 de febrero 2018.

Critchley, Siegert. (1996). Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Tomo I: Bases Técnicas y Experiencias en África y Asia. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.

CORANTIOQUIA & TNC. (2014). “Convenio de Asociación No. 953 de 2013.” Medellín.

CORANTIOQUIA & TNC. (2014). Convenio No. 1412-120. Documento de sustento para la declaratoria de un área protegida pública en los complejos cenagosos El Sapo y Hoyo Grande, municipio de Nechí, Antioquia, Bogotá D.C. p 594.

Constitución Política de la Republica De Colombia [Const.]. (1991b). Artículo 3 del Decreto 1640 de 2 de agosto de 2012.

Convención de Estocolmo de 1972. (1972). Declaración de Estocolmo sobre el medio ambiente humano. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, 16 de junio de 1972. Nueva York.

Cusgüen, C, L, (2013). Evaluación del posible efecto de escenarios de cambio climático en la calidad del agua de la Cuenca Ubaté –Suárez. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Colombia. Bogota D.C. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/46286/1/30005.2013.pdf>. Consultado 5 de febrero 2018.

Decreto 2811 de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección Medio Ambiente. Diciembre 18 de 1974.

Decreto 1200 de 2004. Por el cual se determinan los Instrumentos de Planificación Ambiental y se adoptan otras disposiciones. Abril 20 de 2004. DO. N° 45.526.

Domínguez, Calle, (2013). Notas de Clase Modelacion Matematica. Una Introducion al Metodo. Recuperado de www.mathmodelling.org. Consultado 21 de febrero 2018.

Escobar, M., Lima, N., Purkey, D. y Yates, D. (2014). Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades de La Paz y El Alto. Aqua-LAC, (5), 2-4.

Fajardo, E. (2005). Teoría Avanzada de Organización y Gestión. Análisis del desarrollo de competencias en empresas colombianas. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

FAO N°56. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. P 17. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>. Consultado 8 de febrero de 2018.

Global Water Partnership. (2005). Comité Técnico, Estimulando el cambio: Un manual para el desarrollo de estrategias de gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) y de optimización del agua. Recuperado de www.gwpforum.org/gwp/library/Catalyzing_change_Spanish.pdf. Consultado 8 de febrero de 2018.

Hernandez, G. E., & Londoño Pérez , R. D. (2014). Modelo de asignación del recurso hídrico para la micro cuenca de la Quebrada Cune con base en el modelo de simulación Water Evaluation and Planning System (WEAP). Bogotá D.C.

IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.

IDEAM, (2014). Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia. Bogotá. D.C.

IDEAMN, (2015). Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011 – 2100. Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departamental.pdf. Consultado el 21 de 02 de 2018

IDEAM. (2016). AGUA, Modelos Hidrologicos. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica> INEGI. (s.f.). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consultado el 21 de 02 de 2018

IPCC. (2001). Tercer Informe de Evaluación. Cambio climático 2001. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. p 101.

IPCC. (2007). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC, (2012). Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Informe de los Grupos de trabajo I y II del IPCC. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPCC, (2013). Cambio Climático 2013, Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, p 34. Recuperado de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf. Consultado el 21 de 02 de 2018

IPCC, (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. New York: Cambridge University Press, Cambridge

Jaramillo, M., Escobar, M., & Figueroa, C. (2014). Implementación del modelo WEAP para el estudio de la calidad del agua en la cuenca del río La Vieja. Recuperado de http://seius.org/Publications_PDF/SEI-USAID-FS-2014-Modelo-WEAP-calidad-agua-rio-La-Vieja.pdf. Consultado 5 de Febrero 2018

Kalonji, G. & Erdelen, W. (2012). El agua tiene su punto de no retorno. *Un Mundo de Ciencia*, (1), 10 - 23.

Kiparsky, M., B. Joyce, D. Purkey, & C. Young. (2014). Potential Impacts of Climate Warming on Water Supply Reliability in the Tuolumne and Merced River Basins, California. *PloS one* 9(1), 16.

Knebl, M., Yang, Z., Hutchison, K. & Maidment, D. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/ RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*. p 325 – 336.

Lavell, A. (2011). Desempacando la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo: Buscando las relaciones y diferencias: Una crítica y construcción conceptual y epistemológica. UICN-FLACSO.

Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diciembre 22 de 1993. DO. N° 41146.

Loucks, D. & Van Beek, E. (2005). Water resources systems planning and management: An introduction to Methods, Models and Applications Turin, Italy: United Nations. Educational, Scientific and Cultural organization. SR Nova, 95 p.

Lozano, J. (1997). Aplicación de la teoría regional de desarrollo en un ejercicio de planificación y manejo ambiental de cuencas hidrográficas. In Curso Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas, Ibagué (Colombia).

Logreira R, A. (2008). Metodologías técnicas en el ámbito biofísico para la determinación y monitoreo de los servicios ambientales relacionados con regulación hídrica y control de sedimento, y su relación con el uso del suelo. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, y Patrimonio Natural – Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas.

López, W. (2014). Análisis Del Manejo De Cuencas Como Herramienta Para El Aprovechamiento Sustentable De Recursos Naturales. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, (8), 39–45.

Macías, A. (1998). Introducción al derecho ambiental. Bogotá, D.C. editorial Legis; primera edición. 120 p.

Marín, R. (2003). Colombia: Potencia Hidrica. Colombia: Boletín Sociedad Geográfica De Colombia, Academia Colombiana De Ciencias Geográficas.

Mena, P. (2009). Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca Andina del Río Teno, usando el modelo WEAP. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Chile. Recuperado de

http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/celis_c/sources/celis_c.pdf. Consultado 5 de Febrero 2018.

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Política Nacional de Cambio Climático. Documento para tomadores de decisiones. Bogotá D.C. (1), 74.

Moriasi, D. & Arnold, J. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.” *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.

Nash, J. & Sutcliffe. V. (1970). “River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I — A Discussion of Principles.” *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–90.

Ordoñez, J. (2011). ¿Qué es cuenca hidrológica?. Lima, Perú. 80 p.

Ortega, F. (2008). Núcleo de Monte Carlo Y Camino Aleatorio En Ambientes de Alto Desempeño. Instituto Politécnico Nacional.

Perez, A. (2013). Análisis del desarrollo de la política ambiental en Colombia. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ciencias Económicas. Bogotá D.C. 20 p.

Phurisamban, R. (2014). Addressing Climate Change Adaptation in Water Resource Management: A Case Study of the Sacramento Region. University of California, Berkeley.

Purkey, D. & Mendoza, T. (2015). Relevancia y utilidad del proceso ADR y del sistema WEAP para la formulación de Planes de ordenamiento y Planes de manejo de cuencas y ríos en Colombia (POMCAs y PORHs). SEI, 1–4. Recuperado de <http://sei-us.org/publications/id/53>. Consultado 8 de Febrero de 2018

Porretta, L., Chormański, J., Ignar, S., Okruszko, T., Brandyk, A., Szymczak, T., & Krężałek, K. (2010). “Evaluation and Verification of the WetSpa Model Based on Selected Rural Catchments in Poland.” *Journal of Water and Land Development* 14(1):115–33.

Rahaman, M.M. & Varis, O. (2005). Integrated water resources management: evolution, prospects and future challenges. *Sustainability: Science, Practice, & Policy* Recuperado de <http://ejournal.nbii.org/archives/vol1iss1/0407-03.rahaman.html>. Consultado 19 de Febrero de 2018.

Ramírez, C. (2005). *Fundamentos de Administración*. Bogotá D.C: Textos Universitarios.

RAS. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS. Título B, sistema de acueducto. Ministerio de Desarrollo Económico. Bogotá D.C. Recuperado de <http://www.ceo.org.co/images/stories/CEO/ambiental/documentos/Normas%20ambientales/1990-2000/2000/Resolucion%201096%20de%202000%20-%20Titulo%20B.pdf>. Consultado 19 de febrero de 2018.

Rodríguez Eraso, N., Pabón Caicedo, J., Bernal Suárez, N., & Martínez Collantes, J. (2010). Cambio Climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Bogotá D.C: Alianza Ediprint Ltda. - Guerra Editores.

Roffe, T., Toruño, P., Orantes, E & Espinoza, E. (2014). Servicios ambientales y gestión de los recursos hídricos utilizando el modelo WEAP: casos de estudio en Iberoamérica. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*. (1), 72-87.

Ruiz, L., Delgado, J., Angarita, H., Salas, H., Sánchez, J., Cortés, M., & Rueda, O. (2016). Efectos de mediada de adaptación basado en ecosistemas sobre métricas hidrológicas considerando el cambio climático: Rio Nechi, Colombia. *Aqua-LAC*, (8), 21 – 33.

Salinas, S. (2011). *Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos*. México.

Sampieri, R., Fernández, C & Baptista, L. (2010). *Metodología de la investigación*. México: Editorial Mc Graw Hill.

SENAMHI. (2014). Modelamiento hidrológico de la Cuenca Chancay-Huaral: aplicando el modelo WEAP. Ministerio del Medio Ambiente. Lima, Perú. 63 p.

SEI & USAID. (2014). Instrumentos de Planificación y Apoyo a Decisiones Robustas (ADR) en la Gestión del Agua en Colombia. Resumen de discusión, 4 p.

SEI & USAID. (2015). Ríos del Páramo al Valle, por Urbes y Campiñas creando capacidad de adaptación en la planeación de recursos hídricos. Bogota D.C, Colombia. Recuperado de http://docplayer.es/32706639-Acuerdo-de-cooperacion-numero-aid-514-a-con-el-instituto-del-ambiente-de-estocolmo-u-s-sei-us.html#show_full_text. Consultado 21 de febrero 2018.

Sther, A., Debels, P., Aarumi, J., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: Experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. Tecnología y Ciencias del Agua, (1): 37-58.

Stockholm Environment Institute, (SEI). (2011). <http://www.weap21.org/>. Recuperado de http://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf. Consultado 8 de febrero de 2018.

Stockholm Environment Institute, SEI. (2009): Guía de modelación WEAP. Recuperado de http://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf. Consultado 8 de febrero de 2018.

Solis, H., Oreamuno, R., Murillo, W., & Chacon, J. (1993). Modelación hidrológica e hidráulica para el control de inundaciones en centroamérica. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Ullauri, M. (2016). Implementar el sistema de modelación WEAP como herramienta que determine el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua en la cuenca del Río Machángara. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/25834/1/Tesis.pdf>. Consultado 5 de febrero de 2018.

UN-Water. (2010). Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water. The United Nations Inter-Agency Mechanism on all Freshwater Related Issues Including Sanitation.

UNESCO. (2009). Water in a Changing World. *World Water*, 11(4), 1027-1045.

Velez, M., (1999). Hidráulica de aguas subterráneas. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Vicuña, S., Coello, C. & Cisneros, F. (2009). Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos de la cuenca del Río Paute. (1), 1–14.

Visión Mundial Canadá. (2004). Manual de manejo de cuencas. World Vision. Recuperado de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Manual+de+manejo+de+cuencas#9>

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, 14 p.

WEAP. (2015). Water Evaluation and planning System. Recuperado de <http://www.weap21.org/>. Consultado 8 de febrero 2018.

Xu, C., & Singh, V. (2004). Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resources Management*, (1), 591-612.

Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee, and H. Galbraith. (2005). WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*. 30(4), 487-500.

Zurek, M., & T. Henrichs. (2007). Linking scenarios across geographical scales in international environmental assessments. *Technological Forecasting and Social Change*: (1), 1282–95.