

**EL MODELO SWAT COMO HERRAMIENTA PARA LA SIMULACIÓN Y PLANIFICACIÓN  
DEL RECURSO HÍDRICO**

**JESUS ALBERTO CERON MARTINEZ**

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

**2018**

**EL MODELO SWAT COMO HERRAMIENTA PARA LA SIMULACIÓN Y PLANIFICACIÓN  
DEL RECURSO HÍDRICO**

**JESUS ALBERTO CERON MARTINEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de ingeniero  
agrónomo.**

**Asesor:**

**DIANA CAROLINA MORALES PABÓN  
Ingeniera Sanitaria y Ambiental.M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1<sup>ro</sup> del acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del honorable consejo directivo de la universidad de Nariño.

## **AGRADECIMIENTOS:**

Quisiera agradecer a los profesores: Diana Morales Pabón, Paulo Cesar Cabrera, Geovanny solarte, que sin su ayuda y dedicación no hubiese sido posible realizar este trabajo; a mis compañeros de clase y a mis amigos y familiares por el apoyo y por estar siempre a mi lado.

## **DEDICATORIA**

A mi madre Marina y a mi padre Bernardo, a mis hermanos y a mis compañeros por el apoyo en mi vida universitaria.

A Dios por darme salud y ganas de seguir adelante.

## Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. JUSTIFICACIÓN.....	9
3. ANTECEDENTES.....	10
4. MARCO TEÓRICO .....	13
4.1. EL CAMBIO CLIMÁTICO .....	13
4.2. LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LOS ECOSISTEMAS.....	13
4.3. LA DEFORESTACIÓN Y SUS EFECTOS SOBRE EL RECURSO HÍDRICO. ....	14
4.4. MODELACIÓN.....	15
4.5. SIMULACIÓN. ....	15
4.6. EL MODELO SWAT. ....	16
5. OBJETIVOS.....	20
5.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
6. METODOLOGÍA .....	21
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
7.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL MODELO SWAT QUE LO HACEN IMPORTANTE PARA LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO. ....	22
7.2. UTILIDAD Y PRINCIPALES OPORTUNIDADES DE APLICACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA PLANIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO.....	25
8. CONCLUSIONES.....	32
9. RECOMENDACIONES: .....	33
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estudios en los que se ha utilizado el modelo SWAT para la simulación y planificación del recurso hídrico a nivel mundial .....	10
Tabla 2 Estudios en los que se ha utilizado el modelo SWAT para la simulación y planificación del recurso hídrico en Colombia. ....	11
Tabla 3. Estudios en los que se ha utilizado el modelo SWAT como herramienta para la simulación y planificación del recurso hídrico en Nariño. ....	12
Tabla 4: principales características del modelo SWAT. ....	25

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua, uno de los recursos más importantes para el desarrollo de la vida, se ha visto vulnerado puesto que la humanidad lo ha utilizado para diversos usos, excediendo la capacidad de suministro de agua sin contemplar las necesidades de las generaciones futuras. En la actualidad el ser humano es más consciente de las consecuencias que el mal uso de este recurso puede causar, además comprende que la distribución del agua no es homogénea en todas partes del mundo. Es por ello que, a nivel mundial se han establecido diferentes lineamientos y políticas sobre la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH). (Mafla, 2016).

Para una correcta planificación del recurso hídrico, es indispensable analizar el comportamiento del ciclo hidrológico, el cual gobierna la presencia de agua en una determinada región y está condicionado por factores como la latitud, altitud, las actividades humanas, entre otros. Ha sido evidente, a lo largo de los años, que el ciclo hidrológico de las cuencas se ha transformado mundialmente debido al cambio climático y a la actividad humana, siendo ésta última la que más ha aumentado la demanda del recurso hídrico, por el rápido desarrollo de la ciencia y la tecnología, así como por la expansión de la escala económica. (López *et al*, 2016).

El uso del modelo SWAT, genera aportes en términos de gestión del recurso hídrico, siendo un tema de interés no solamente para los entes territoriales sino también para otros actores claves como ONG's, Acueductos, usuarios, usufructuarios y otros, dando criterio para articular dichos resultados con los instrumentos de planeación, atendiendo las necesidades de todos aquellos que se benefician directa o indirectamente de la cuenca de estudio. (Hernandez, 2015).

Los resultados que se obtienen a través del uso de SWAT como la predicción de caudales y sedimentos es una alerta temprana para las autoridades ambientales, gobernaciones y entidades no gubernamentales, para estrechar lazos de acompañamiento en la planificación del territorio y gestión de cuencas, con lo cual se garantiza atender problemas como la escasez de agua no solamente para uso doméstico sino también para sectores productivos. (Hernandez, 2015).

En este trabajo se realizó una recopilación de los estudios más relevantes en los que se ha aplicado el modelo SWAT como herramienta para la planificación y el manejo del recurso hídrico. Además se presenta un marco teórico en el que se expone las características más importantes de este modelo, el impacto de la deforestación sobre la producción de agua y el efecto del cambio climático sobre el recurso hídrico.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El agua es considerada como fuente de vida debido a su función esencial en los procesos biológicos y a su importancia como elemento fundamental de desarrollo. (Monforte y Cantú, 2009), de ahí, que se esté haciendo mucho hincapié en la protección y preservación de este recurso, sin embargo, las personas aún siguen atentando contra este, ya sea contaminando las fuentes hídricas o atentando en contra de las reservas forestales que ayudan a preservar las corrientes de agua. (Martin, 2015)

SWAT es un software que permite realizar una mejor gestión y planificación del recurso hídrico. El modelo permite conocer la dinámica hídrica de las cuencas bajo escenarios actuales y futuros; permite realizar los análisis necesarios en la planificación referente al cambio de uso del suelo, actividades de reforestación, establecimiento de centros poblados, establecimiento de obras hidráulicas (como captación, embalses, canales, corrección de cauces, etc.). Debido a estas potencialidades que brinda un modelo de simulación, este se ha convertido en una herramienta de mucha utilidad en el estudio y manejo de cuencas hidrográficas. (Barbudo *et al*, 2016.)

El presente estudio nace a raíz de observar como en Colombia y en Nariño se evidencia la expansión de la frontera agrícola hacia zonas forestales estratégicas e indispensables para la conservación del recurso hídrico, que es un servicio ambiental fundamental para la población. Además a escala mundial existe otro factor que está afectando al recurso hídrico y es el cambio climático. “Este último supone un importante factor adicional de presión sobre la capacidad de los sistemas naturales para proporcionar, de manera sustentable, los bienes y servicios necesarios para el desarrollo económico y social; en particular, para el abastecimiento de agua dulce, aire y alimentos”. (Greenpeace, 2009).

El presente trabajo es importante porque expone las características del modelo hidrológico SWAT que lo hacen un instrumento valioso para realizar la planificación y gestión de cuencas hidrográficas. Conscientes de lo anterior, también hay que tener en cuenta el papel que juega la planificación de cuencas ya que esta permite emplear mecanismos de acción para preservar las fuentes hídricas.

### 3. ANTECEDENTES

A continuación se presentan 3 tablas en las cuales se exponen varios estudios en los que se ha utilizado el modelo SWAT para la simulación y planificación de los recursos hídricos a nivel mundial (Tabla 1) en Colombia (

Tabla 2) y en Nariño (

Tabla 3).

**Tabla 1. Estudios en los que se ha utilizado el modelo SWAT para la simulación y planificación del recurso hídrico a nivel mundial**

AUTOR	TITULO	OBJETIVO	RESULTADOS MÁS RELEVANTES
(Stehr et al, 2010)	-Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile.	-cuantificar, a partir de simulaciones realizadas mediante un modelo matemático, la sensibilidad de la hidrología de dos subcuencas del río Biobío frente a diferentes escenarios de cambio climático.	-Los resultados indican que, para la mayor parte de los escenarios de cambio climático modelados, se producirá una reducción en la magnitud de los caudales medios mensuales y anuales, siendo esta variación mayor en las épocas de primavera y verano. Estos resultados permiten realizar una primera interpretación cualitativa de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Biobío.

AUTOR	TITULO	OBJETIVO	RESULTADOS MÁS RELEVANTES
(Zuleta, 2013)	-“análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río pejibaye”.	-Analizar el comportamiento del recurso hídrico de la cuenca del río pejibaye, bajo escenarios de cambio de uso de suelo y climáticos, como un aporte a la posterior planificación del recurso hídrico en la cuenca.	-Como muestran los resultados, todos los componentes analizados (caudal, percolación, escorrentía, producción de agua, y producción de sedimentos) fueron sensibles a las variaciones climáticas de precipitación y temperatura estimadas para el año 2030 por el GCM Had CM3 para los escenarios A2 y A1B con respecto al escenario BASE (año 2011). Sin embargo se evidencia que estos componentes no varían significativamente en los escenarios con cambio del uso del suelo (CUS) (mapa 2030) y sin cambio del uso del suelo (CUA) (mapa 2011).
(Feler et al, 2014)	Validación del modelo SWAT en la cuenca del río Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca.	-validar el modelo SWAT y estudiar su capacidad para su posterior implementación en el análisis de la respuesta hidrológica ante diferentes escenarios climáticos y de uso del suelo en la Cuenca del Río Quequén Grande en Argentina.	-La descarga promedio anual de la subcuenca para el período 1996-2006 fue de 0.35 m <sup>3</sup> /s con vegetación de pastizal y 0.71 m <sup>3</sup> /s con el uso actual.  -El modelo permitió analizar los cambios del escurrimiento superficial y subsuperficial, expresado en lámina, lo cual permite analizar estrategias de implementación de buenas prácticas para mejorar la infiltración en las tierras agrícolas a fin de asemejarse a la situación original.

**Tabla 2. Estudios en los que se ha utilizado el modelo SWAT para la simulación y planificación del recurso hídrico en Colombia.**

AUTOR	TITULO	OBJETIVO	RESULTADOS MÁS RELEVANTES
(Uribe y Valencia, 2010)	Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: caso cuenca del río Tunjuelo-Cundinamarca.	-Evaluar el impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: caso cuenca del río Tunjuelo - Cundinamarca.	-la cobertura de bosque en las cuencas, evita que se produzcan más sedimentos que afectarían la calidad del agua. Si esta cobertura fuera reemplazada en zonas de cultivos, eriales, arenas, entre otros; los sedimentos en la cuenca se reducirían en el doble a los que actualmente se producen. -En cuanto a la cantidad total de agua en las cuencas, esta variaría levemente, siendo un poco menor bajo cobertura boscosa
(Pajarito, 2017)	Implementación del modelo hidrológico SWAT, como herramienta para el manejo del recurso hídrico en la unidad hidrológica río hacha – Florencia Caquetá.”	-implementar el modelo de simulación hidrológica SWAT en la unidad hidrológica del Río Hacha ubicada en el municipio de Florencia (Caquetá);	-La implementación del modelo de simulación hidrológica, arroja como promedio anual de precipitación un valor de 2585 mm, el cual relacionándolo con el último comunicado de Cambio Climático del IDEAM se halla que se encuentra dentro del rango reportado para la zona (2.000 – 4.000 mm); igualmente se encontró que la zona presenta un régimen de lluvias monomodal, con mayor precipitación en los meses de abril a noviembre. -Con los datos obtenidos en la calibración se llega a la conclusión que el modelo de simulación SWAT, se puede pensar como una buena aproximación a la realidad del área de estudio y podría ser considerado como una línea base de la cuantificación de los recursos hídricos en el área, a su vez se considera que los datos

AUTOR	TITULO	OBJETIVO	RESULTADOS MÁS RELEVANTES
			resultados de la simulación apoyan la toma de decisiones en el territorio en cuanto al manejo del recurso hídrico.

**Tabla 3. Estudios en los que se ha utilizado el modelo SWAT como herramienta para la simulación y planificación del recurso hídrico en Nariño.**

AUTOR	TITULO	OBJETIVO	RESULTADOS MÁS RELEVANTES
(Obando y Moran, 2013)	"Modelación del recurso hídrico en la microcuenca peñas blancas, municipio de Tangua, departamento de Nariño".	Este trabajo tuvo como objetivo general modelar el recurso hídrico en la microcuenca peñas blancas, Municipios Tangua, departamento de Nariño, y como objetivos específicos la aplicación del modelo SWAT, para determinar el comportamiento hidrológico de la microcuenca y proponer alternativas de manejo que contribuyan a la conservación del recurso hídrico de la microcuenca Peñas blancas.	<p>- La modelación hidrológica arrojó resultados variables, donde los caudales simulados se ajustan regularmente en algunos meses del primer año con respecto a los caudales observados; sin embargo, se observaron diferencias significativas en el segundo año. En este estudio se presenta los resultados de caudales cada dos (2) meses para los cuatro (4) años. Durante los meses de julio y agosto del año 2008, se observa una subestimación por parte del modelo en los meses de Julio-agosto, donde el caudal observado fue cercano a 1.4 m<sup>3</sup> y el modelo arrojó un caudal de 1.2m<sup>3</sup>. Por otra parte, en los últimos meses del año 2009 se presenta diferencias de caudal de 0.2 m<sup>3</sup> entre lo observado y simulado. A finales del año 2010, el modelo presenta diferencias significativas de 0.4 m<sup>3</sup> con respecto al valor real de caudal. Finalmente, en el último año se presenta variaciones marcadas de 0.3 m<sup>3</sup> de caudal.</p> <p>-Con respecto a los valores anuales promedios producidos por SWAT, relacionados con el balance hídrico, los cuales se consideran apropiados a las condiciones climáticas, hidrológicas y de uso de la cuenca, válidas para el periodo 2008 – 2012. Se observa que, del total de lluvia precipitada sobre la microcuenca, el 51.25% vuelve a la atmósfera vía evapotranspiración (ET) y 47.95% sale en forma de escorrentía por los canales tipo superficial y en forma subsuperficial y subterránea; 0.8% pasa a formar parte de la recarga a los acuíferos profundos y sale del sistema.</p> <p>-Se debe tener en cuenta que los usos de suelo encontrados en la microcuenca como Bosques, Paramo y subparamo, no deben ser alterados, ya que es de estas zonas donde existe la mayor recarga hídrica de la microcuenca.</p>

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1. EL CAMBIO CLIMÁTICO**

Según la subgerencia cultural del banco de la república de Colombia (2015), este es un cambio en el clima, atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición global atmosférica, agregada a la variabilidad climática natural observada en periodos comparables de tiempo. Actualmente, se está frente a un cambio climático provocado por la actividad humana. La industria, los automóviles, los grandes cultivos y la manutención de ganados, todo aquello que permite la supervivencia de los 6 mil millones de seres humanos que poblamos el planeta, provoca también grandes cambios. Uno de ellos, quizás el más preocupante, es el calentamiento global de la Tierra, provocado por un aumento del efecto invernadero.

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), en su artículo 1, define el “cambio climático” como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables. Para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el término como tal denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. (Díaz, 2012)

### **4.2. LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LOS ECOSISTEMAS**

Según la Asociación Mundial para el Agua (GWP), la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) es “un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales”. Esta definición incluye los ecosistemas como proveedores y como usuarios del agua. Es decir, los ecosistemas vitales bajo el concepto no deberán ser comprometidos. Bajo la GIRH, los ecosistemas juegan un papel crucial como proveedores de servicios, pero también como usuarios del agua. Es así como el aprovechamiento del agua no puede verse de forma independiente de los ecosistemas que la generan, ni pretender que los problemas de abastecimiento de agua pueden resolverse. (Echeverría, 2015)

Uno de los desafíos más graves ante los que se encuentra el mundo de hoy es la crisis del agua que se avecina y en efecto, en el siglo pasado la demanda mundial sobre los recursos hídricos se multiplicó por más de seis mientras que la población del planeta se triplicó. De no mejorar la gestión de los recursos hídricos y los ecosistemas conexos, se estima que para el

2025 dos tercios de la población mundial padecerá problemas de penuria de agua, con escasez grave o moderada. (Martínez y Villalejo, 2018)

La gestión o manejo integrado de los recursos hídricos se entiende entonces como un proceso que promueve el desarrollo y la administración coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados para llevar al máximo el resultante económico y la asistencia social de una manera equitativa sin afectar la sostenibilidad de ecosistemas esenciales. Con este enfoque se busca orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recursos hídricos, a través de una conciliación entre el desarrollo económico y social y la protección de los ecosistemas. (Martínez y Villalejo, 2018)

### **4.3. LA DEFORESTACIÓN Y SUS EFECTOS SOBRE EL RECURSO HÍDRICO.**

La deforestación es el resultado de procesos derivados de múltiples causas que se producen a diversas escalas y que difieren de forma significativa según el lugar. A pesar de las preocupaciones a nivel mundial, falta información cuantitativa sobre los factores que impulsan la deforestación. Las causas de la deforestación pueden ser inmediatas (directas) o subyacentes (indirectas). Las causas inmediatas de la deforestación son las actividades humanas con repercusiones directas en la cubierta forestal, por ejemplo, la expansión agrícola, el crecimiento urbano, el desarrollo de infraestructuras y la minería. Los factores subyacentes que afectan a la conversión de los bosques en terrenos agrícolas son el crecimiento de la población, el desarrollo agrícola, la seguridad de la tenencia de la tierra, y la gobernanza del cambio del uso de la tierra. (FAO, 2016)

La deforestación es también un factor coadyuvante del cambio climático. Los suelos de los bosques son húmedos, pero sin la protección de la cubierta arbórea, se secan rápidamente. Los árboles también ayudan a perpetuar el ciclo hidrológico devolviendo el vapor de agua a la atmósfera. Sin árboles que desempeñen ese papel, muchas selvas y bosques pueden convertirse rápidamente en áridos desiertos de tierra estéril. (Salgado, 2014)

La deforestación masiva que se produce en las partes altas de las cuencas de los ríos altera fuertemente su ciclo, provocando disminución de caudales y la pérdida de calidad del agua, además de influir negativamente sobre los ecosistemas y sus especies. Considerando que los recursos hídricos son directamente afectados por el manejo forestal. (Salazar y Marín, 2016)

Los bosques prístinos son áreas importantes de recarga hidrológica, debido a su baja densidad aparente del suelo, alta macro-porosidad, y alta conductividad hidráulica saturada, resultando en altas tasas de infiltración y almacenamiento del agua en la matriz del suelo y acuíferos. La deforestación para uso agrícola y ganadero cambia estas condiciones del suelo forestal, los cuales generalmente resultan elevando las tasas de escorrentía superficial, erosión de suelo, pérdida de nutrientes y pérdida del carbono orgánico del suelo. El cambio hidrológico de una cuenca no solamente afecta la agricultura, la producción de energía eléctrica y el suministro del agua para el uso poblacional, sino también la disponibilidad del

agua en el suelo para las plantas, los micro-organismos y los ecosistemas acuáticos. (Gonzales y Llanos, 2015)

#### **4.4. MODELACIÓN**

Un modelo constituye una representación o abstracción de la realidad. Entre los diferentes tipos de modelos se pueden mencionar los analógicos, físicos, gráficos, esquemáticos y matemáticos. La modelación matemática es un intento de describir alguna parte del mundo real en términos matemáticos. Modelos matemáticos han sido construidos en todas las ciencias tanto físicas, como biológicas y sociales. Los elementos que lo componen son tomados del cálculo, el álgebra, la geometría y otros campos afines. (Brito *et al*, 2011)

Es natural que los modelos matemáticos sean modelos de analogía incompleta, es decir, que reflejan solamente algunas propiedades del objeto modelado. A la vez, los modelos matemáticos se caracterizan por una suficiente generalidad, describiendo una clase completa de objetos o fenómenos. Por otra parte, la creación de modelos matemáticos no requiere significativos gastos materiales y la realización del propio proceso de modelación con ayuda de los modernos medios de cómputo permite efectuarla en un tiempo relativamente pequeño. (Brito *et al*, 2011).

La modelación brinda la oportunidad de crear escenarios virtuales que permiten poner a prueba hipótesis sobre la dinámica del sistema social de interés. En algunos casos también pueden tener validez cuantitativa y servir como herramientas de pronóstico. El software para su implementación es cada vez más asequible en precio y plataformas de desarrollo más amigables con el usuario, por esto puede llegar a ser un lenguaje para profesionales de áreas diversas con interés en un problema común. (Aguirre y Ramírez, 2014)

#### **4.5. SIMULACIÓN.**

Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema". (Carrión, 2018)

En algunos casos las relaciones matemáticas que constituyen los modelos son sencillas y pueden encontrarse una solución analítica del modelo. Sin embargo en la mayoría de los casos, los modelos no pueden resolverse analíticamente y deben estudiarse con ayuda del ordenador, aplicando métodos numéricos. Este experimento numérico realizado sobre el modelo matemático recibe el nombre de simulación. (Urquia y Martin, 2016).

La simulación por computadora es actualmente una de las estrategias más poderosa de las que dispone la ciencia para predecir sucesos en sistemas con un alto grado de complejidad;

es una de las herramientas más precisas para determinar el comportamiento de un sistema deseado. Podemos definir simulación como una técnica que imita el comportamiento de un sistema del mundo real conforme evoluciona en el tiempo. (Márquez *et al*, 2013)

#### **4.6. EL MODELO SWAT.**

El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) que en español es herramienta para la evaluación del suelo y agua, para una cuenca hidrográfica. Este fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas; su propósito es predecir el impacto que generan las prácticas del manejo del suelo en el recurso agua y en la generación de sedimentos en una cuenca hidrográfica. (Castañeda, 2016)

El modelo SWAT realiza la simulación de la hidrología de la cuenca en dos divisiones: la primera es la fase terrestre del ciclo hidrológico que controla la cantidad de agua, sedimento y pesticidas transportados al canal principal por cada subcuenca. La segunda división es la del agua o la fase de rutina la que puede definirse como el movimiento del agua, sedimentos, entre otros, a través de la red del canal hasta el sitio de descarga de la cuenca. La calibración y validación del modelo es un factor clave para reducir la incertidumbre y el aumento en la capacidad de predicción, convirtiéndole en un modelo más eficaz para análisis de información. Por lo tanto, la calibración hidrológica es el primer paso en la comprensión del complejo proceso hidrogeológica de la cuenca, su análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo ayuda a comprender el comportamiento de la respuesta de la cuenca y sus interacciones. (Castañeda, 2016)

En SWAT, una cuenca se divide en subcuencas y éstas, a su vez, se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRUs), las cuales son unidades homogéneas en uso y manejo de la tierra y en las características del suelo. Las HRUs representan porcentajes del área de una subcuenca y no tienen identificación espacial dentro de una simulación SWAT. Alternativamente, una cuenca puede dividirse solamente en subcuencas caracterizadas por el tipo de suelo y por el uso y manejo de la tierra dominantes. (Barrios y Urribarri, 2010).

En esa dirección Ruiz (2014) refiere que los componentes del modelo SWAT son los siguientes:

➤ **Los componentes de SWAT:**

- Clima
- Escorrentía Superficial
- Flujo de retorno
- Percolación
- Evapotranspiración
- Perdidas de Transmisión
- Depósitos y Almacenamientos de Agua
- Crecimiento del cultivo y riesgo
- Flujo de Agua Subterránea
- Alcance del enrutamiento
- Carga de nutrientes y pesticida
- Transferencia de agua.

Por otro lado Arroyo et al (2010) menciona que los requerimientos para el desarrollo del modelo son los que se relacionan a continuación:

➤ **Requerimientos de equipos y programas:**

- Computadora personal, Pentium 3 o más.
- Microsoft Windows 95, 98, NT o XP.
- SWAT 2000 (AV 3.1. o 3.2), SWAT 2005 (AV 3.1 a 3.3) y ArcSWAT (ArcGis 9.1)
- Extensión Spatial Analyst 1.1 o más (programa).

En ese orden de ideas (Fernández, 2017) muestra el proceso para realizar la modelación y simulación con SWAT.

## ➤ El proceso de modelización con SWAT:

La modelización hidrológica y sedimentaria con SWAT de una gran cuenca siempre requiere de seis pasos o tareas indispensables, las cuales se desarrollarán brevemente a continuación: (Fernández, 2017)

-Delimitación de la cuenca y las subcuencas (Watershed Delineator): Es el primer proceso y mediante esta herramienta, y partiendo de un modelo digital del terreno (MDT) el programa determinará la cuenca, las subcuencas y la red de drenaje que componen el sistema hidrológico a modelizar. Este módulo permite una gran cantidad de opciones para definir con claridad las cuencas, es muy versátil y permite añadir diferentes elementos al modelo como, por ejemplo: puntos de salida y de entrada de agua en nuestro sistema, embalses o grandes reservas de agua. En esta parte inicial el programa genera una serie de informes que permiten la caracterización mediante parámetros morfológicos del sistema hidrológico. (Fernández, 2017)

-Definición de las Unidades de respuesta hidrológica (HRU Analysis): A su vez, las subcuencas se dividen en unidades de respuesta hidrológica, estas unidades corresponden con áreas, de una misma subcuenca, que presentan homogeneidad en cuanto a los tipos de suelo, los usos y coberturas vegetales y la pendiente del territorio. Por tanto, las HRU, así estimadas, deben presentar una respuesta similar a la precipitación y un balance hidrológico homogéneo dentro de una misma HRU. Esta subdivisión de la cuenca, en entidades menores, permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración para los distintos tipos de suelos y coberturas vegetales, así como en la generación de escorrentía y en las tasas erosivas. Posteriormente el modelo estima el agua y los sedimentos que alcanzan la red de drenaje en función del modelo digital del terreno para obtener el total en la cuenca. (Fernández, 2017)

- Incorporación de datos climáticos (Write Input Tables): Las variables climáticas necesarias para la modelización son: precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. En el caso de no disponer de alguno de ellos el programa dispone de modelos avanzados de generación de los datos por distintos modelos empíricos. (Fernández, 2017)

-Edición de los datos de entrada del modelo (Edit SWAT input): A través de esta fase se pueden modificar las bases de datos del modelo, donde se contienen los datos necesarios para la modelización de los suelos, de los usos y coberturas vegetales, entre otros. Finalmente, el programa crea una base de datos con todos los parámetros necesarios para la modelización de cada HRU. (Fernández, 2017)

-Simulación: En esta fase se realiza la configuración temporal de la simulación (duración y lapsus de tiempo deseado). (Fernández, 2017)

- Calibración y validación del modelo: Corresponde con la última fase de la modelización. Durante la fase de calibración se evalúa la semejanza entre las variables simuladas y las observadas por comparación entre índices estadísticos (Coeficiente de correlación de Pearson, coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe, error medio cuadrático o desviación del volumen de esorrentía). En el caso de que se observen desviaciones significativas entre lo observado y lo simulado se ha de proceder a la modificación de los parámetros más significativos del modelo (generalmente mediante el análisis de sensibilidad realizado por la herramienta SWAT-CUP. Este proceso se ha de repetir hasta que la comparación entre las variables simuladas y observadas muestre valores satisfactorios de los índices estadísticos. Una vez calibrado el modelo, se procede a su validación con una muestra de datos que no se hayan empleados en la calibración. (Fernández, 2017)

Además cabe decir que según Ruiz (2014), las siguientes son algunas aplicaciones del modelo SWAT.

#### ➤ **Aplicaciones del modelo SWAT:**

Entre las múltiples aplicaciones que tiene SWAT podemos dar un resumen inicial:

- Apoyo a la toma de decisiones y apoyo a seguir la normativa y regulaciones ambientales
- Análisis de escenarios económicos-sociales-ecológicos:
  - Uso de agua municipal y agrícola
  - Tendencias agrícolas como tipo de labranza
  - Escenarios de aplicación de fertilizantes y estiércol
  - Impacto de estructuras de control de inundación
- Inventario de descarga de contaminación en zonas costeras
  - Simulación de ríos, reservorios y fuentes puntuales
- Evaluar efectos de manejo en la calidad y cantidad de agua
- Simulación, manejo y evaluación de los cambios climáticos
- En el campo agrícola el análisis de los cultivos

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar la importancia del modelo SWAT como herramienta para la simulación y planificación del recurso hídrico.

### **5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir las principales características del modelo SWAT que lo hacen importante para la modelación y simulación del recurso hídrico.
- Exponer la utilidad y las principales oportunidades de aplicación del modelo SWAT en la planificación del recurso hídrico.

## 6. METODOLOGÍA

La metodología empleada fue la de recopilar información de diferentes fuentes como: artículos, tesis, páginas web, entre otros, la cual se relaciona con la utilización del modelo SWAT en la modelación y simulación del recurso hídrico. La mayoría de los estudios consultados tienen en común que utilizan el modelo SWAT para determinar la variación de la producción de agua en cuencas hidrográficas bajo escenarios de cambio de uso de suelo y/o de cambio climático.

Este estudio es una monografía de compilación en la cual según (Rodríguez, 2010) “El investigador, alumno o académico después de elegir un tema específico, analiza y redacta una presentación crítica de la bibliografía y referencias teóricas que existen al respecto. Para este tipo de monografía es fundamental disponer de un buen nivel de comprensión, de lectura y de capacidad de análisis crítico, para poder referirse a diferentes puntos de vista y exponer una opinión personal a partir de la bibliografía consultada tras una revisión exhaustiva”.

En el presente trabajo se presenta el apartado de resultados, en el que se muestra los estudios en los que se ha utilizado el modelo SWAT como instrumento para la planificación del recurso hídrico. Cabe señalar que se tomó investigaciones realizados a nivel mundial, en Colombia y en Nariño; a escala mundial se presentan estudios realizados en cuencas hidrográficas de argentina y chile. En Colombia se presenta una tesis de pregrado realizada en la cuenca hidrográfica de Riohacha en Florencia, Caquetá y en Nariño se expone el trabajo de grado realizado en la microcuenca Peñas Blancas en Tangua, solo por mencionar algunos estudios.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL MODELO SWAT QUE LO HACEN IMPORTANTE PARA LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO.

El modelo SWAT utiliza como datos de entrada las prácticas de manejo del suelo, las propiedades de los suelos, la topografía, la climatología, entre otros. Utilizando los datos climáticos el modelo SWAT simula la variación del caudal de las fuentes hídricas en las cuencas hidrográficas.

Para propósitos de la simulación, la cuenca hidrográfica es dividida en un número de subvertientes o subcuencas. El uso de subvertientes en la simulación es muy útil, particularmente cuando hay diversas áreas de la misma cuenca, que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos bastante desiguales de tal forma que impactan grandemente la hidrología del sector. Al dividir la cuenca hidrológica en subcuencas, el usuario puede referirse a diversas áreas de la vertiente de acuerdo al espacio. La información de entrada para cada subvertiente es agrupada u organizada en las categorías siguientes: clima; unidades de respuesta hidrológicas; estanques; agua subterránea; canal principal; y drenando la subcuenca. (Uribe, 2010).

El modelo SWAT es unidimensional, físicamente basado que puede ser aplicada a escala regional o local. Trabaja por unidades de respuesta hidrológica, las cuales son el cruce de los diferentes tipos de suelo y a cada una se le asigna un atributo diferencial. (Moncayo *et al*, 2016).

El modelo SWAT crea varias unidades de respuesta hidrológica para mostrar con mayor precisión la variación de los caudales de las fuentes hídricas en cada subcuenca, debido a que en cada subcuenca tiene distinto tipo de suelo, topografía y manejo del suelo, y estos factores caracterizan a cada subcuenca e influyen en la variación de los caudales de las mismas.

Con el modelo SWAT, la simulación hidrológica de la cuenca puede ser separada en dos divisiones mayores. La primera división es la fase terrestre del ciclo hidrológico, esta fase controla la cantidad de agua, sedimentos, las cargas de pesticida al canal principal en cada subcuenca, la segunda división es la fase de enrutamiento del ciclo hidrológico la cual define el movimiento del agua y sedimentos, a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero. (Uribe, 2010).

Lo anterior, lleva a decir que SWAT se encarga de simular el ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica, es decir, que este modelo tiene en cuenta aspectos como la precipitación, la escorrentía y la evapotranspiración que indican la variación del flujo del agua en cada una de las fases del ciclo hidrológico. Además, el modelo SWAT se utiliza para cuantificar la erosión hídrica y la escorrentía en una cuenca, lo cual es importante porque permite saber que tan

deteriorados están los suelos y que prácticas para la conservación de este se deberían implementar. En la (Tabla 4) se presenta algunas de las características más relevantes de este modelo hidrológico.

Otra característica del SWAT es que es un modelo continuo de tiempo, es decir un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado. El SWAT requiere información específica sobre el clima y el tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento del sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, etc. Son modelados directamente por SWAT. (Uribe, 2010)

El mismo (Uribe, 2010), expone los algunos beneficios del modelo SWAT, los cuales son los siguientes:

- Interface gráfica ArcGis, la cual hace más sencillo su manejo y utilización.
- El impacto relativo de una variación en los datos de entrada (por ejemplo, cambios en prácticas de gestión, clima, vegetación.)
- Método ágil de extrapolación e integración de la información.
- Simulación dirigida
- Disponibilidad inmediata de datos de entrada y de salida
- Amplio proceso de iteraciones de procesos físicos.

También cabe decir que según Arroyo *et al* (2010), el modelo SWAT requiere varios datos de entrada:

➤ **Datos de entrada que requiere el modelo SWAT:**

- Cobertura de uso: Archivo en formato “shapefile” o “grid” con la clasificación de la cobertura de uso de la tierra proveniente del procesamiento de imágenes satelitales o fotografías aéreas y/o información de campo. (Arroyo *et al*, 2010).
- Suelos: Archivo en formato “shapefile” o “grid” con la clasificación de suelos de la cuenca. La información mínima necesaria para cada clase de suelo es la textura y el porcentaje de materia orgánica.
- Topografía: Modelo Digital de Elevación (formato “grid”, cada píxel contiene la altitud promedio) proveniente de la interpolación de curvas de nivel o generado a partir de técnicas de percepción remota. (Arroyo *et al*, 2010).
- Hidrología: Delimitación de ríos (formato “shapefile”), los cuales serán empleados para la delimitación de cuencas (SWAT) o para realizar la interpolación de curvas de nivel (obtención de MDE). (Arroyo *et al*, 2010)

- Información climática: Se requiere información de un mínimo de 3 estaciones climáticas dentro de la cuenca. Con dicha información se puede construir la tabla de datos estadísticos de clima. Es ideal tener datos continuos de un período mayor a 5 años; los datos requeridos son:

- temperatura mínima y máxima diaria (°C)
- precipitación diaria (mm/día)
- radiación solar (opcional)
- evapotranspiración (opcional)
- velocidad del viento (opcional).

- Base de datos de cultivos y manejo: En caso de que el SWAT no disponga en su base de datos de cultivos y tipos de laboreo, algún tipo de cultivo o práctica de manejo específica para la cuenca en estudio, el usuario deberá construir dicha base de datos con datos de medidas en campo y/o revisión de literatura (p.ej., piña, café). (Arroyo *et al*, 2010)

- Prácticas de manejo: (datos cuantitativos de aplicación de riego, empleo de fertilizantes y aplicación de pesticidas) y calendarios de cultivo. (Arroyo *et al*, 2010)

Según Oñate (2013) el modelo SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca y a continuación se presenta algunos parámetros que este modelo tiene en cuenta para realizar la simulación hidrológica.

➤ **calculo del balance hídrico utilizando el modelo SWAT:**

La hidrología del modelo se basa en el criterio de que el agua entra, sale y se almacena como lo describe la ecuación:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde  $SW_t$  es el contenido de agua en el suelo el día  $t$ ,  $SW$  es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15 bar,  $t$  es el tiempo en días,  $R$  es la precipitación diaria,  $Q$  es la cantidad de escorrentía diaria,  $ET$  la evapotranspiración diaria,  $P$  la percolación diaria y  $QR$  el flujo de retorno o flujo base; todas las unidades son en mm (Oñate, 2013).

La cantidad de escorrentía es estimada aplicando la metodología del número de la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que la escorrentía está determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice. (Oñate, 2013).

El agua que penetra en el suelo o infiltración puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde esta agua también llegara hasta los canales de drenaje y recargar acuíferos profundos. El SWAT considera flujo lateral, percolación y flujo de retorno. (Oñate, 2013).

El modelo SWAT ofrece tres métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial: Penman-Monteith, Hargreaves and Sammami y Priestley – Taylor. (Oñate, 2013).

**Tabla 4: principales características del modelo SWAT.**

<b>EL MODELO SWAT</b>
1. Integra casi 40 años de desarrollo por parte de la USDA.
2. Interfaces GIS para ingreso de datos y visualización de resultados (ArcGIS, GRASS.)
3. Utiliza como datos de entrada los tipos de suelo, precipitación, uso de suelo, caudales, temperatura máxima, temperatura mínima; entre otros.
4. Extensamente usado en el mundo para simular el ciclo hidrológico en régimen natural
5. Es una herramienta usada para la planificación y gestión del recurso hídrico.

## **7.2. UTILIDAD Y PRINCIPALES OPORTUNIDADES DE APLICACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA PLANIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO.**

En varias investigaciones citadas se muestra como el cambio del uso del suelo y por ende la deforestación en cuencas hidrográficas, trae consigo la disminución del caudal de las quebradas y los ríos en determinadas regiones. También cabe decir que en zonas con cultivos agrícolas existe una mayor erosión del suelo a causa de la escorrentía, lo cual causa la pérdida de la capa arable que es fundamental para el desarrollo de los cultivos.

A nivel mundial hay que tener en cuenta que actualmente el cambio climático es más adverso que el cambio del uso del suelo para los recursos hídricos, esto se debe a que según (La FAO, 2015) “desde 1990 hasta el 2015, la tasa de deforestación neta mundial ha disminuido en más

del 50%". De ahí que el impacto a los recursos hídricos por efectos de esta no sea tan grande, sin embargo, en Colombia y en Nariño hace falta la aplicabilidad de más estrategias para la conservación de estas áreas. Entre estas estrategias se propone que se debe enfatizar mucho más en la creación de sistemas de pago por servicios ambientales (PSA) y el establecimiento de áreas protegidas.

Estudios realizados a nivel mundial en los que se ha utilizado el modelo SWAT indican que el cambio climático también ocasiona una reducción en los caudales de las fuentes hídricas en cuencas hidrográficas.

En la investigación que realizó (Zuleta, 2013) en Costa Rica, en la que se analizó el comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo (CUS) y el cambio climático (CC) en la cuenca del río Pejibaye, se utilizan dos escenarios climáticos. El escenario A2 toma como base una disminución drástica de las precipitaciones promedio en la cuenca (periodo 2012- 2030) con un aumento paulatino de la temperatura, mientras que para el escenario A1B se toma como base un aumento gradual en las precipitaciones promedio y un aumento gradual de la temperatura (menor que el escenario A2) y en esta se evidencia que el cambio climático es un agente más perjudicial para los recursos hídricos que el cambio de uso de suelo.

En la investigación que realizaron (Feler *et al*, 2014) en Argentina, que se titula "Validación del modelo SWAT en la cuenca del río Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca", se pudo constatar que los caudales mensuales fueron, en promedio, satisfactoriamente predichos por el modelo. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (R2 Nash) fue de 0,75 en calibración y 0,61 en validación, siendo RMS de 14,17 y 33,31, respectivamente. El coeficiente de correlación R de Pearson fue 0,72 en calibración y 0,80 en validación, indicando que el modelo predijo bien la tendencia mensual, es decir los aumentos y disminuciones de caudal a lo largo del tiempo.

Dicho trabajo se realizó en el marco de un proyecto internacional enfocado en la evaluación en los cambios en la productividad del agua frente a futuros potenciales escenarios climáticos. SWAT fue seleccionado como modelo para trabajar a escala de cuenca por constituir una herramienta valiosa para estudiar el impacto de cambios climáticos, de uso de tierras, como así también el impacto de cambios en prácticas de manejo y uso de fertilizantes y agroquímicos sobre la calidad y cantidad de fuentes de agua, en cuencas agrícolas. (Feler *et al*, 2014)

En este mismo estudio también se realizó la Simulación Hidrológica para tres escenarios Climáticos:

Los escenarios planteados proyectaron valores de precipitación anual promedio de 1001 mm, 921 mm y 891 mm para "Húmedo", "Normal" y "Seco", respectivamente. En términos de lluvias anuales presentan una tendencia normal para escenarios climáticos de 100 años. Luego de generar proyectos independientes para cada escenario, se configuró el modelo SWAT con los

valores ajustados en la calibración y se corrieron simulaciones para un período de 100 años en cada escenario. (Feler *et al*, 2014)

Analizando el caudal de los 3 escenarios planteados, el caudal medio anual predicho fue contrastante para el escenario húmedo, pero no hubo grandes diferencias entre los escenarios “Seco” y “Normal”. Si se considera el escenario normal como línea de base, con un caudal medio anual de 27,5 m<sup>3</sup> /s, el escenario húmedo se diferenció con un caudal anual medio de 40,4 m<sup>3</sup> /s, mientras el caudal medio fue de 25,5 m<sup>3</sup> /s para el escenario seco, mostrando diferencias principalmente entre los meses de enero y abril. (Feler *et al*, 2014)

Los resultados obtenidos permiten dimensionar la utilidad de los modelos hidrológicos para la estimación de cambios a nivel de cuenca. Sin embargo, exponen la necesidad de continuar el análisis de la calibración para lograr un mayor nivel de confiabilidad en las predicciones de los escenarios que se planteen a esta escala. (Feler *et al*, 2014)

En el estudio que realizó (Pajarito, 2017), en Colombia, en el cual se empleó el modelo hidrológico SWAT, como herramienta para el manejo del recurso hídrico en la unidad hidrológica río Hacha (Florencia, Caquetá) se utilizó el modelo SWAT para realizar la simulación y cuantificar las diferentes variables climáticas como son: la precipitación, la escorrentía, la recarga de acuíferos, caudal total, la oferta hídrica total; entre otros; en las distintas subcuencas que componen la unidad hidrológica río Hacha y se pudo constatar que los caudales observados vs los caudales simulados son muy parecidos y el proceso de simulación fue excelente. También hay que decir que la obtención del balance hídrico es indispensable porque permite cuantificar el aporte de agua a los cauces por parte de la precipitación y además cuantifica cuánta agua se devuelve a la atmósfera por efectos de la evapotranspiración.

Las subcuencas con mayor potencialidad hídrica encontradas permiten resaltar la importancia de las dos quebradas que confluyen en la parte media del río Hacha, eso quiere decir que aunque la principal fuente de consumo para el municipio de Florencia, se ubica sobre el río Hacha, se debe contemplar que la unidad hidrológica se encuentra conformada como un sistema en el cual todos los componentes aportan de manera potencial al producto final de la zona, por lo tanto los procesos en pro del mejoramiento de las condiciones de cobertura se deben también enfocar en esta zona y no únicamente en la parte alta de la unidad hidrológica. (Pajarito, 2017).

La herramienta de modelación hidrológica, bajo el concepto del balance hídrico, permite evaluar los aspectos principales de una unidad hidrológica de forma detallada, lo cual genera una aproximación de la afectación que genera la expansión de la frontera agropecuaria y urbana en las zonas con alto nivel de conservación, dado lo anterior, se puede afirmar que si la frontera agropecuaria aumenta en la zona del río Hacha, la oferta del recurso hídrico se va a ver afectada en alto nivel, debido a que la zona boscosa es la que actualmente está proporcionando los niveles más altos de oferta y disponibilidad hídrica. (Pajarito, 2017).

Relacionando lo anterior, se considera relevante los resultados obtenidos mediante la simulación hidrológica, los cuales permitirán a las autoridades ambientales competentes tomar decisiones en el territorio, sin embargo, es importante considerar que la interpretación de los mismos debe realizarse correctamente, esto con el fin de analizar información clara y concisa del proceso que se está desarrollando. (Pajarito, 2017).

Con respecto a los niveles de recarga de acuíferos, se podría considerar relevante generar un análisis más detallado, ya que el panorama que muestra los resultados de la simulación se orientan hacia la posible disminución del recurso hídrico en la parte central de cuenca, partiendo de que este indicador muestra un bajo nivel de recarga, con respecto a los niveles de lluvia de la zona de estudio, esto también se asocia principalmente al tipo de suelo, lo que generaría un cambio si se desarrollan estudios detallados de los suelos y sus características fisicoquímicas. (Pajarito, 2017).

Como propuesta de manejo, se considera pertinente evaluar inicialmente la función de las zonas de protección ambiental existentes en la unidad hidrológica, esto con el fin de mejorar las condiciones de la cobertura natural que se encuentra en estas áreas, igualmente se considera importante iniciar procesos de declaración de áreas de protección ambiental a nivel local, principalmente en la zona de acueductos veredales o acueductos multifamiliares, que presenten posibles problemas de abastecimiento, los cuales se pueden identificar con los indicadores calculados en el presente documento. (Pajarito, 2017).

En este mismo estudio se analizó la metodología que el autor utilizó y al usar SWAT se puede notar que esta herramienta es un software al cual se le puede introducir diferente tipo de información como: información climática, de cobertura del suelo, de tipos de suelo, y utilizando esta información se realiza la simulación del balance hídrico con todos los datos introducidos a este programa y así evaluar la variación del recurso hídrico por efecto de estas variables.

También hay que tener en cuenta que SWAT es una herramienta que ayuda a realizar un mejor manejo del recurso hídrico en un futuro y además ayuda a comprender que el cambio climático y el cambio del uso del suelo son factores que afectan y seguirán afectando a las fuentes hídricas, de ahí que es necesario generar estrategias para que el impacto de estos dos factores no sea tan severo.

En la investigación que realizaron (Obando y Morán, 2013), en la cual se utilizó la herramienta SWAT para la modelación del recurso hídrico en la microcuenca peñas blancas en Tangua (Nariño), se da a conocer la variación de las coberturas vegetales a lo largo del tiempo y por ende se compara las coberturas del año 1989 y las del 2013. En este estudio el autor quiso tomar el año 1989 como un escenario ideal para implementar en el futuro ya que la expansión de la frontera agrícola en ese año no había sido un problema y en ese año el área correspondiente a paramos y subparamos era mayor que en el 2013 y por ende no existían efectos negativos para los recursos hídricos y de esta forma el estudio llegó a la conclusión de que con el escenario de uso del suelo del año 1989 hay un 12% más de producción de agua en la microcuenca.

Según (Obando y Morán, 2013), La microcuenca peñas blancas tiene un área de 1935 hectáreas conformadas por coberturas de bosque, paramo, subparamo, pastos y cultivos. Para el año 1989 el área correspondiente a cultivos era de solo 50,1 hectáreas, mientras que para el año 2013 el área ocupada por los cultivos aumento hasta 253,5 hectáreas, lo cual demuestra que en el año 2013 hubo una gran disminución de las áreas forestales indispensables para la producción de agua. Además hay que tener en cuenta que en el año 1989 la producción de agua por parte de la microcuenca era de 758.05 (mm H<sub>2</sub>O), mientras que para el año 2013 la producción de agua era de 685.75 (mm H<sub>2</sub>O), lo cual demuestra que hubo una notable disminución del recurso hídrico en la microcuenca.

Además en este estudio SWAT modeló favorablemente el recurso hídrico de la microcuenca ya que los caudales simulados y los aforados son similares. La modelación se realizó para el periodo 2008-2012 y al tener éxito la modelación nos permite intuir que el caudal de las fuentes hídricas se está viendo afectado negativamente por el cambio de uso de suelo y la expansión de la frontera agrícola.

La situación de la microcuenca en el tema de conservación es preocupante debido a que 385.9 hectáreas de la microcuenca esta desprovista de cobertura vegetal, lo que afecta seriamente la producción de recurso hídrico en la zona. De igual forma, la tendencia de la ampliación de la frontera agrícola es una amenaza latente en la microcuenca. Es por esto que se deben plantear alternativas de uso del suelo que disminuyan el impacto de las actividades agrícolas en la generación del recurso hídrico superficial en la microcuenca Peñas Blancas. (Obando y Morán, 2013).

Se propone como alternativa para la conservación del recurso hídrico en la microcuenca, el incremento de la cobertura boscosa, la inclusión de sistemas agroforestales dentro de los sistemas productivos y el cambio de la cobertura de pasturas por sistemas en los que se incluya el componente leñoso. (Obando y Morán, 2013)

Se debe tener en cuenta que los usos de suelo encontrados en la microcuenca como Bosques, Paramo y subparamo, no deben ser alterados, ya que es de estas zonas donde existe la mayor recarga hídrica de la microcuenca, sin embargo se propone realizar acciones de regeneración asistida para mitigar los impactos antrópicos que han recibido estas zonas, también es necesario proteger los causes hídricos dejando un espacio mínimo de 10 metros, entre el cauce y los lotes de producción agropecuaria, debido a que estas actividades causan impactos negativos en la cantidad y calidad de agua. (Obando y Morán, 2013)

Este estudio deja en claro y expone los problemas que afrontan las cuencas hidrográficas en Nariño, estos problemas son la deforestación y la expansión de la frontera agrícola que generan impactos negativos sobre el recurso hídrico. (Obando y Morán, 2013). Situación que en la actualidad debe seguir siendo atendida, ya que con respecto a la situación evidenciada en el estudio de Tangua, se muestra que existe una alteración en el uso del suelo y un impacto con la expansión de la frontera agrícola; lo anterior siendo reafirmado debido a que en 1989 el área ocupada por los cultivos agrícolas en la microcuenca equivalían a un 2,6 % y en 2013 esta aumentó en un 13,1 %.(Obando y Morán, 2013). Lo anterior nos lleva a establecer que

es de gran importancia buscar alternativas para detener la expansión de la frontera agrícola en mencionado municipio y en varias cuencas hidrográficas del departamento de Nariño, las cuales pueden estar presentando similares circunstancias en cuanto al uso del suelo.

En ese sentido, se debería realizar capacitaciones y acompañamiento a las comunidades que se benefician de los servicios ambientales que les proporcionan las cuencas hidrográficas. Las capacitaciones deberían estar dirigidas hacia recalcar la importancia de las áreas boscosas y los páramos en la producción del agua. También sería importante implementar estrategias que ayuden a la preservación de los bosques como son el pago por servicios ambientales, la adquisición de predios en áreas estratégicas, la restauración de bosques, entre otros.

Hay que decir que en el municipio de Tangua se tienen establecidos cultivos como la papa, alverja, cebada y pastos naturales para la ganadería. (Guerrero, 2016), teniendo en cuenta lo anterior sería conveniente la implementación de prácticas para la conservación del suelo y del agua. Entre las prácticas más utilizadas para este fin está el mantenimiento de coberturas vegetales dentro de estos cultivos para regular la humedad del suelo y limitar la erosión hídrica. Además en cultivos como la papa y la alverja, la aplicación de prácticas como la siembra en contorno y el cultivo en fajas son una buena opción para proteger el suelo de la erosión hídrica.

En la zona papicultora de Cundinamarca y Boyacá se realizó un estudio en el cual se estableció que en suelos con cobertura vegetal de kikuyo (*penisetum clandestinum*) y con intensidades de lluvia de 25 y 75 mm/ha, la pérdida de agua por escorrentía fue mucho menor que en un suelo descubierto variando de 2,2 a 25,6 mm de lluvia, mientras que en un suelo sin cobertura vegetal la pérdida de agua por escorrentía fue de 6,1 hasta 38 mm de lluvia. (Murcia, 2009). Lo anterior demuestra que las coberturas vegetales son muy importantes porque permiten la captación de las lluvias y de esta forma se mantiene la humedad de los suelos y por ende se garantiza el aprovechamiento de esta agua para el desarrollo y la producción de los cultivos.

Por otra parte Molina (2009), quien realizó una investigación en el altiplano central de Bolivia, en la cual se cuantificó la escorrentía bajo dos sistemas de siembra (siembra a favor de la pendiente y siembra en contra de la pendiente) en un cultivo de cebada. Este estudio expone que la escorrentía alcanzó valores de 9,8 % de la precipitación total, en surcos en sentido de la pendiente, contra 2.63 % en surcos en sentido contrario. Lo anterior demuestra que se puede aprovechar mejor las lluvias si se aplica la práctica de siembra en contra de la pendiente o siembra en contorno, no solo en el cultivo de cebada sino que también se la puede aplicar en cultivos como la papa, la arveja, el maíz, entre otros.

También cabe decir que como lo determinado por (Obando y Morán, 2013) en su estudio, la expansión de la frontera agrícola y la ganadería extensiva contribuyen a que se estén deforestando extensas áreas de bosques en el municipio de Tangua, de ahí que es necesario generar conciencia en las comunidades rurales para que implementen prácticas enfocadas hacia una agricultura sostenible y amigable con el medio ambiente. Entre estas prácticas está

el buen manejo de agroquímicos para que no se contamine las fuentes hídricas, el uso eficiente del agua y nutrientes para el manejo de cultivos, entre otros.

Actualmente es una realidad de que en Tangua y otros municipios de Nariño la expansión de la frontera agrícola es inducida por fenómenos como la pobreza en zonas rurales. (CORPONARIÑO, 2012), de ahí que sería necesario emplear estrategias dirigidas hacia la capacitación de estas comunidades para que realicen un mejor manejo agronómico de cultivos como la papa, la alverja, y otros cultivos y obtengan una mayor producción de estos cultivos en una menor área de terreno, es decir que pasen de una agricultura extensiva a una intensiva, para no afectar los páramos y zonas boscosas.

Las cuencas hidrográficas en Nariño y en Colombia son muy importantes porque ofrecen el recurso hídrico que en la agricultura es muy importante ya que las cuencas ayudan al mantenimiento de quebradas y ríos que proporcionan el agua utilizada en sistemas de riego agrícola. (Luna y Madroñero, 2015), Por consiguiente el modelo SWAT es importante porque nos permite realizar una mejor planificación del recurso hídrico, el cual es indispensable para el mantenimiento de cultivos agrícolas que garantizan la seguridad alimentaria de las personas.

## 8. CONCLUSIONES

- El modelo SWAT trabaja bajo escenarios futuros de cambio de uso de suelo y de cambio climático y permite realizar la simulación del recurso hídrico utilizando datos climáticos, topográficos, de uso del suelo, entre otros; y con los resultados que arroja el modelo se puede tomar acciones referentes a la gestión de cuencas hidrográficas.
- el modelo SWAT permite realizar la modelación, simulación y caracterización de cuencas hidrográficas. Además este modelo crea unidades de respuesta hidrológica, las cuales son áreas de una cuenca que son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica y características geo-climáticas, esto hace de SWAT una herramienta que permite conocer las zonas de la cuenca con mayor potencial para la producción de agua.
- En los últimos años, se está tomando más conciencia de la importancia de la conservación de las áreas forestales estratégicas debido a que estas ayudan a mantener la oferta hídrica de las quebradas o ríos que son indispensables para muchas comunidades. De ahí que es indispensable la utilización de herramientas como SWAT que permite analizar el impacto que tiene el cambio del uso de suelo y la deforestación sobre el recurso hídrico.
- SWAT es una herramienta que permite la planificación y el manejo de los recursos hídricos ya que a través de la modelación y simulación donde se puede analizar la variación de este recurso a lo largo del tiempo y así tomar decisiones en cuanto a priorizar los usos y realizar un mejor manejo de este recurso.

## 9. RECOMENDACIONES:

-En Colombia y en Nariño los páramos y subparamos son coberturas vegetales indispensables para la producción de agua, de ahí que es necesario realizar más estudios concernientes a evaluar la variación de estas coberturas y de esta forma analizar los efectos que trae consigo esta variación a los recursos hídricos, utilizando herramientas para la simulación y planificación del recurso hídrico como: SWAT, WEAP, JAMS, entre otros.

- la deforestación es uno de los factores que más repercuten sobre la disminución del recurso hídrico. En Nariño y en Colombia la principal causa de la deforestación es la expansión de la frontera agrícola, el cual es un fenómeno provocado fundamentalmente por las comunidades rurales, de ahí que es necesario que se pongan en práctica políticas de conservación de zonas forestales estratégicas y tener en cuenta la aplicabilidad de una agricultura sostenible y amigable con el medio ambiente.

- En Nariño se han realizado pocos estudios en los que se utilice herramientas para la simulación y la planificación de los recursos hídricos. Además cabe destacar que SWAT es una herramienta que podría ser utilizada en muchos estudios para saber cómo será la variación del recurso hídrico en numerosas cuencas hidrográficas de Nariño teniendo en cuenta escenarios de cambio climático y de cambio de uso del suelo.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, C. (2013). ¿Qué son los páramos y qué puedes hacer para protegerlos? Disponible en: <http://www.aida-americas.org/es/blog/%C2%BFqu%C3%A9-son-los-p%C3%A1ramos-y-qu%C3%A9-puedes-hacer-para-protegerlos>. accedido en 10 de abril del 2018.
- Aguirre, J., y Ramírez, M. (2014). Análisis cenciometrico de modelación y simulación de sistemas de innovación. Instituto tecnológico metropolitano. Medellín. Colombia. Disponible en: <https://fondoeditorial.itm.edu.co/libros-electronicos/analisis-cienciometrico/detalle-libro.html>
- Arroyo, L., Heidinger, H., y Araya, E. (2010). Modelo Hidrológico SWAT como Herramienta para Procesos de Toma de Decisión. San José, Costa Rica. Disponible en: [http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/08/00398folletomodelohidrologicos\\_wat.pdf](http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/08/00398folletomodelohidrologicos_wat.pdf)
- Barbudo, L., Ochoa, J., y Verbel, E. (2016). Aplicación del modelo SWAT en el estudio hidrosedimentologico de la cuenca quebrada San Pedro en el municipio de Curumaní, Departamento del Cesar (tesis de pregrado).Universidad de Manizales. Caldas. Colombia.
- Barrios, A., y Urribarri, L. (2010). Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. Revista Geográfica Venezolana, vol. 51, núm. 1, enero-junio, 2010, pp. 11-29 Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- Brito, M., Alemán, L., Fraga, I., García, J., y Arias, R. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Ingeniería Mecánica*, 14(2), 129-139. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59442011000200005&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442011000200005&lng=es&tlng=es).
- Carrión, J. (2018). Simulación en ingeniería industrial. Disponible en: <https://ulisesmv1.files.wordpress.com/2018/02/simulacion.pdf>
- Castañeda, Y. (2016). Modelación del efecto del cambio de uso del suelo en la cuenca del Rio Coello, bajo escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT (soil and water assessment tool) (tesis de pregrado). Universidad distrital Francisco Jose de Caldas. Bogotá. Colombia.
- CORPONARIÑO, (2012). Plan de gestión ambiental regional 2002-2012. Disponible en: <http://corponarino.gov.co/expedientes/pgar20022012/pgar2002-2012.pdf>

-Díaz, G. (2012). El cambio climático. Instituto Tecnológico de Santo Domingo. República Dominicana vol. XXXVII, núm. 2, pp. 227-240.

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024179004>

- Echeverría, J. (2015). Agua y ecosistemas. VII foro mundial del agua. República de Corea. Disponible en:

<https://www.caf.com/media/2630028/agua-ecosistemas-america-sur-caf.pdf>

- FAO. 2016. El estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma. Disponible en:

<http://www.fao.org/3/a-i5588s.pdf>

- Feler, M., Vázquez, G., Van, H., Gaspari, F., Mercuri, P., Prieto, D., y Flamenco, E. (2014). Validación del modelo SWAT en la cuenca del río Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca. Buenos Aires. Argentina.

-Fernández, R. (2017). Utilización del programa "SWAT" para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas usando software "SWAT" (Universidad de Huelva) España. Tordesillas Revista de Investigación Multidisciplinar. Pág. 22-23.

- Fernández, R. (2017). Utilización del programa "SWAT" para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas. Universidad de Huelva. España. pp. 21-32.

- Garavito, L. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. Barranquilla. Colombia. Disponible en:

[revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/download/530/413](http://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/download/530/413).

-Gonzales, C., y Llanos, R. (2015). Evaluación de los efectos de la deforestación en la hidrología y pérdida lateral de carbono orgánico del suelo de la cuenca del Alto Mayo (tesis de pregrado). Lima, Perú.

- Greenpeace Colombia (2009). Cambio climático: futuro negro para los páramos. Disponible en: [https://www.greenpeace.org/colombia/Global/colombia/informes/informe\\_todo3.pdf](https://www.greenpeace.org/colombia/Global/colombia/informes/informe_todo3.pdf).

- Greenpeace Colombia (2013). Paramos en peligro, el caso de la minería de carbón en Pisba. Disponible en:

<http://www.greenpeace.org/colombia/Global/colombia/images/2013/paramos/12/Informe%20P%C3%A1ramos%20en%20peligro.pdf>. Accedido en 10 de abril del 2018.

- Guerrero, C. (2016). Plan de desarrollo municipal de Tangua (2016-2019). Nariño. Colombia. Pag.122.

- Hernandez, D. (2015). Estimación de los parámetros morfométricos y las unidades de respuesta hidrológica de la cuenca del Río Ráquira (Departamento de Boyacá) a través del programa SWAT. Universidad católica de Colombia. Bogotá. Colombia. Pág. 15.
- Hofstede, R. (2014). Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo. UICN, Quito, Ecuador. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2014-025.pdf>.
- La FAO. (2015). La deforestación se ralentiza a nivel mundial, con más bosques mejor gestionados. Durban. Roma. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/327382/icode/>
- Lopez, A., Martinez, L., Feria, J., y Cruz, J. (2016) "Planning of water resource in Aguas Blancas creek, rural area of Monteria, Córdoba", Prospect, Vol 14, N° 2, 71-80.
- Luna, S., Madroñero, S. (2015). Importancia del componente social en el manejo del recurso hídrico, Río el Encano, humedal Ramsar, La cocha (Nariño, Colombia). Universidad de Caldas.
- Mafla, F., Paz, P., Realpe, D., y Cárdenas, G. (2016). Estrategias de la planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento para consumo humano. Revista UNIMAR, 34(2), 221-238.
- Márquez, J., Mendoza, P., y Céspedes, J. (2013). Modelado y simulación de redes de computadores. Editorial universidad del norte. Barranquilla. Colombia. Disponible en: <https://www.libreriadelau.com/modelado-y-simulacion-de-redes-de-computadores-aplicacion-de-qos-con-opnet-modeler-ecoe-ediciones-9789587413748>.
- Martín, L., y Bautista, J. (2015). Análisis, prevención y resolución de conflictos por el agua en América Latina y el Caribe. Naciones Unidas, pag.52.Santiago de Chile.
- Martínez, Y., y Villalejo, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. La Habana, Cuba. pág. 58-72. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382018000100005](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100005).
- Molina, J. (2009). Efecto de tres formas y dos densidades de siembra en cebada sobre la erosión hídrica de un suelo en el Altiplano central de Bolivia. La paz. Bolivia. Disponible en: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRISUM.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000272>
- Moncayo, O., Losada, L., y Cruz, 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 pregrado). Universidad católica de Colombia. Bogotá. Colombia.
- Monforte, G., y Cantú, P. (2009). Escenario del agua en México. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3238728.pdf>

- Murcia, G. (2009). Investigación y transferencia de tecnología en labranza de conservación como un componente en la recuperación de suelos de laderas degradadas en el sistema de producción de papa. Bogotá. Colombia
- Obando, J., y Morán, J. (2013). Modelación del recurso hídrico en la microcuenca peñas blancas, municipio de Tangua, departamento de Nariño (tesis de pregrado). Universidad de Nariño. San Juan de Pasto. Colombia.
- Oñate, Fernando. (2013). aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del Rio Catamayo. Universidad técnica particular de Loja. Ecuador.
- Pajarito, X. (2017). Implementación del modelo hidrológico SWAT, como herramienta para el manejo del recurso hídrico en la unidad hidrológica rio hacha – Florencia Caquetá (tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Bogotá, Colombia.
- Reyes, A. (2010). “Colombia no tiene que ampliar la frontera agrícola, debe usar mejor la tierra que posee”. Meta. Colombia. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/download/.../9647/>
- Rodríguez, M. (2010). La técnica de la monografía. Disponible en: <https://metodologiasdelainvestigacion.wordpress.com/2010/11/26/la-tecnica-de-la-monografia/#comments>. Accedido en 14 de marzo del 2018.
- Ruiz, L. (2014). Visión general sobre el software SWAT. Disponible en: <http://latingeomatica.blogspot.com/2014/10/vision-general-sobre-el-software-swat.html>. Accedido 6 de octubre del 2018.
- Salazar, C., y Marín, O. (2016). Beneficios de la reforestación en la regulación hídrica en Colombia (trabajo de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Manizales, Colombia.
- Salgado, R. (2014). Deforestación. *La ciencia en pocas palabras*, (14), 1-2. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4761345.pdf>
- Stehr, A. (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(4), 37-58. Disponible en <[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222010000400002&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000400002&lng=es&nrm=iso)>.
- Subgerencia Cultural del Banco de la República. (2015). Cambio climático global. Disponible en: [http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/ciencias/cambio\\_climatico\\_global](http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/ciencias/cambio_climatico_global)

- Uribe, N., y Valencia, J. (2010). Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: caso cuenca del río Tunjuelo – Cundinamarca. Centro internacional de agricultura tropical (CIAT). Santiago de Cali, Colombia. Disponible en: [file:///C:/Users/dell/Downloads/Informe\\_Final\\_Tunjuelo\\_Julio.pdf](file:///C:/Users/dell/Downloads/Informe_Final_Tunjuelo_Julio.pdf)

-Uribe, N. (2010).SWAT, conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Disponible en: <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>

-Urquia, A., y Martin, C. (2016). Métodos de simulación y modelado. Editorial UNED. Madrid. España. Disponible en: [http://portal.uned.es/EadmonGuiasWeb/htdocs/abrir\\_fichero/abrir\\_fichero.jsp?idGuia=86359](http://portal.uned.es/EadmonGuiasWeb/htdocs/abrir_fichero/abrir_fichero.jsp?idGuia=86359)

-Zuleta, C. (2013). Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río pejibaye (tesis de maestría). Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.

