

INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS WEAP Y QUAL2K PARA LA SIMULACIÓN DE LA CALIDAD AGUA DE FUENTES SUPERFICIALES. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO LA VIEJA, COLOMBIA

INTEGRATION OF WEAP AND QUAL2K MODELS FOR THE SIMULATION OF WATER QUALITY SURFACE SOURCES. CASE STUDY: LA VIEJA RIVER BASIN, COLOMBIA

Jaramillo, María Fernanda¹; Galvis, Alberto¹; Escobar, Marisa²; Forni, Laura²; Purkey, David²; Siebel, Jack Siebel²; Lozano, Gabriel³; Rodríguez, Cesar³; Castaño, Juan⁴; Sabas, Carlos⁴

Resumen

En esta investigación se evaluó el impacto de las aguas residuales domésticas y agroindustriales en la cuenca del río La Vieja, Colombia, considerando como factores para la evaluación el crecimiento poblacional, el desarrollo agroindustrial y los efectos de la variabilidad y el cambio climático. La evaluación de la calidad del agua se logró mediante la integración de las herramientas de modelación WEAP (Water Evaluation And Planning System) y QUAL2K, que permitió realizar el análisis dendrítico (sistema ramificado de 11 fuentes hídricas que tributan al cauce principal) del comportamiento de la cantidad y la calidad del agua del río La Vieja. La cuenca del río La Vieja se localiza al centro sur de Colombia, con una extensión aproximadamente de 2.880 km². Las principales ventajas de la integración de los modelos corresponden a la posibilidad de modificar la cinética de degradación de los contaminantes por tramo de río en el modelo QUAL2K y la dinamización de los resultados de este modelo en pasos de tiempo mensual, beneficio que aporta el modelo de planificación WEAP. La integración de modelos tuvo como resultado principal la identificación del comportamiento espacio temporal de los parámetros de calidad del agua Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Temperatura (T) en una escala de agregación mensual en el año de línea base considerado como 2011 y la evaluación de la implementación de dos estrategias de control de la contaminación hídrica: sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y sistemas de tratamiento anaerobio para la remoción de carga orgánica en el beneficio del café. Los valores de concentración de DBO no superan los 5 mg/L en el escenario de línea base. La concentración de OD se encontró entre 4 y 9.5 mg/L. Los resultados obtenidos, representan el comportamiento del río La Vieja, que cumple con la normatividad local para los usos actuales del agua.

Palabras claves: Integración de modelos, WEAP, QUAL2K, Calidad del Agua, Río La Vieja-Colombia.

Abstract

In this research we evaluate the domestic and agro-industrial sewage water impact on "La Vieja" river basin, Colombia, considering as factors to evaluate: Population growth, agro industrial development, climate variability effects and climate changes. Water quality evaluation was achieved through the integration of the modeling WEAP (Water evaluation and planning system) and QUAL2K, this allowed to make the dendritic analysis (analysis of 11 tributaries and of the main stem of the river) of the quantity and quality dynamic of the La Vieja river. La Vieja river basin is located in the south center of Colombia. It is approximately 2.880 km². The main advantages of the models integration are: The possibility to modify the degradation of the kinetic of the pollutants by elements of the river in the QUAL2K model and that it was possible to have results of QUAL2K in monthly time steps dynamically, benefit that it is provided by the WEAP model. The models integration had as a main result the identification of the space - time performance of the quality parameters of the water quality OD, DBO5 and temperature in a scale of monthly aggregation in the base line year considered as 2011 and the evaluation of the implementation of two water contamination control strategies such as: Sewage water treatment systems and anaerobe treatment systems for the removal of organic load in coffee profit. The BOD concentration values do not exceed 5 mg / L in the baseline scenario. OD concentration was between 4 and 9.5 mg/L. The results represent the behavior of La Vieja river, which meets the local regulations for current uses of water

Key words: Models Integrations, WEAP, QUAL2K, Water Quality, La Vieja river, Colombia.

¹ Investigador Instituto CINARA, Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle. Cali, Colombia. maria.f.jaramillo@correounivalle.edu.co, alberto.galvis@correounivalle.edu.co

² Investigador Senior, Instituto SEI, Davis, California, Estados Unidos. marisa.escobar@sei-us.org

³ Investigador Grupo CIDERA, Universidad del Quindío, Colombia. galozano@uniquindio.edu.co

⁴ Investigador Grupo EIS, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. jmc@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La degradación de la calidad de los recursos hídricos superficiales en las cuencas colombianas se ha incrementado debido a la disposición de aguas residuales de origen doméstico y agroindustrial sin considerar los objetivos de calidad de los cuerpos hídricos receptores (MAVDT, 2010). Bajo el marco normativo colombiano, los objetivos de calidad de los cuerpos hídricos deben ser determinados por las Autoridades Ambientales mediante el desarrollo del instrumento de planificación "Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico". En la cuenca del río La Vieja en Colombia, la contaminación hídrica de las fuentes superficiales es causada de manera similar por disposición de aguas residuales de origen doméstico y agroindustrial y los objetivos de calidad del agua para esta fuente, no han sido definidos al año 2015.

La cuenca del río La Vieja se localiza en el centro occidente de Colombia, forma parte de la Ecorregión del Eje Cafetero y tiene una extensión de 2.880 km²

que abarcan los departamentos Quindío (68%), Valle del Cauca (22%) y Risaralda (10%) (Figura 1). En función de los parámetros climatológicos y de acuerdo con la caracterización realizada por CRQ *et al.*, (2008), la cuenca del río La Vieja presenta un comportamiento bimodal de la precipitación característico de la zona andina como consecuencia de la convergencia intertropical con dos periodos húmedos (marzo-abril-mayo y octubre-noviembre-diciembre) y dos periodos secos (enero-febrero y junio-julio-agosto-septiembre). La precipitación media anual multianual corresponde a 2.072 mm/año, con precipitaciones máximas de 2.400 mm/año y mínimas de 1.700 mm/año. Respecto a la temperatura, esta puede oscilar entre los 4°C en zonas con elevación superior a los 4.000 m.s.n.m y 24°C en zonas con elevación aproximada a los 950 m.s.n.m. El gradiente de este parámetro respecto a la elevación corresponde a una disminución de 0,87 °C por cada 100 m.s.n.m.



Figura 1. Localización zona de estudio

El rendimiento hídrico de toda el área de drenaje del río La Vieja (2.880 km²) fue estimado en 34 L/s-km² con una oferta hídrica de 2.975 Mm³/año. El mayor aportante de oferta hídrica dentro del sistema corresponde a la subcuenca del río Quindío (277 km²) con una oferta hídrica de 187 Mm³/año y rendimiento específico de 21 L/s-km². El menor aportante corresponde a la cuenca de la quebrada El Loro (7 km²) con una oferta hídrica de 4,57 Mm³/año y un rendimiento específico de 18 L/s/km² (CRQ *et al.*, 2008).

En función de la magnitud de los vertimientos de aguas residuales domésticas, se realizó en esta investigación, un análisis a los Programas de Saneamiento y Manejo de Vertimientos de los municipios ubicados en la cuenca del río La Vieja, en el cual se identificó que el 87% de la carga contaminante que genera el sector doméstico (7,5 ton DBO₅/día), se destina sin tratamiento a fuentes hídricas superficiales. El 13% restante, que corresponde a 1,2 ton DBO₅/día, se destina a las fuentes hídricas superficiales luego de realizarse

únicamente un tratamiento a nivel primario para la remoción de sólidos.

En el sector agroindustrial el aporte de carga contaminante al río La Vieja corresponde al 45 % (7,5 ton DBO₅/día), de los cuales el 31% (2,3 ton DBO₅/día) es proveniente del sector cafetero. Ambos sectores doméstico y agroindustrial aportan 95% de la contaminación puntual al río La Vieja. Razón por la cual se hace necesaria la evaluación de estrategias de prevención y control de la contaminación hídrica enfocadas en estos sectores.

Debido a la situación anterior, este estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de la generación y disposición de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas en la calidad del agua del río La Vieja y once de sus principales afluentes, a través de la integración de los modelos QUAL2K y WEAP. Esta integración de modelos se realiza por primera de forma dendrítica para más de 4 fuentes tributarias a un cauce principal y mediante la utilización de un modelo hidrológico para la cuenca del río La Vieja, previamente desarrollado en WEAP.

Este artículo presenta los resultados de la integración de los modelos WEAP y QUAL2K desarrollada de manera conjunta entre el SEI y el Instituto Cinara de la Universidad del Valle. La relevancia de esta investigación corresponde la construcción de una herramienta de modelación integrada de los dos modelos de simulación, en el caso de estudio de la cuenca del río La Vieja en Colombia. Con los modelos integrados fue posible evaluar el comportamiento de la calidad del agua superficial del río La Vieja y de 11 de sus principales afluentes. Los parámetros evaluados correspondieron al caudal, mediante el desarrollo de un modelo hidrológico y de demanda, la DBO₅, el OD y la T.

La integración de los modelos permitió dinamizar la escala temporal de las simulaciones que se realizan con el modelo QUAL2K obteniendo resultados de cantidad y calidad en WEAP para cada paso de tiempo, mientras que el modelo QUAL2K permitió una modelación de tipo dendrítico y en la cual la cinética de degradación de los parámetros modelados pudo ser modificada según las condiciones físicas del sistema.

3. METODOLOGÍA

La evaluación del impacto de las aguas residuales domésticas e industriales se realizó mediante la integración del modelo WEAP en su versión más actualizada y QUAL2K (versión 2.07). En función de los modelos empleados, el modelo QUAL2K es un modelo para el análisis del comportamiento de la calidad del agua, respaldado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). Este modelo considera el flujo de agua como unidimensional y permanente. Para la simulación del transporte de sustancias contaminantes QUAL2K emplea el balance de calor y temperatura en función de datos meteorológicos horarios, introducidos en un espacio de ciclo diario.

El QUAL2K simula sistemas hídricos de tipo dendrítico y el cauce es considerado completamente mezclado horizontal y verticalmente. El modelo acepta entradas puntuales y no puntuales (distribuidas) de cargas contaminantes y caudales. La fuente hídrica simulada es representada como una sucesión de tramos o segmentos llamados elementos computacionales, a través de los cuales se efectúan los correspondientes balances de masa, flujo y calor (EPA, 2013). Así mismo, el programa QUAL2K utiliza dos formas para representar el carbono orgánico, siendo éstas: DBO rápida y DBO lenta. Además, simula condiciones de anoxia reduciendo a cero las tasas de oxidación. Para procesos de denitrificación el modelo emplea una reacción de primer orden (Chapra, 2008).

El modelo QUAL2K ha sido empleado ampliamente para estudiar el comportamiento de la calidad del agua de fuentes superficiales en diferentes partes del

mundo. Algunas de sus aplicaciones en el contexto de la evaluación de impactos y toma de decisiones frente a una gestión integral del recurso hídrico han sido desarrolladas. Zainudin *et al.*, (2010) realizó la evaluación de la calidad del agua del río Tebrau para analizar la influencia de los vertimientos industriales y la implementación de diferentes estrategias de saneamiento como parte del plan de gestión de su cuenca.

Pai *et al.*, (2010) realizó la evaluación del impacto del tratamiento de agua residual tratada con sistemas ecológicos de la ciudad de Taichung, Taiwan, utilizando la modelación del cuerpo hídrico antes y después de la implementación de los sistemas. El QUAL2K también ha sido usado para analizar la calidad del agua, bajo el impacto de la implementación de reuso de efluentes provenientes de canales agrícolas en Egipto (Rashed y El-Sayed, 2014)

El modelo WEAP es considerado como una herramienta de planificación integrada de recursos hídricos, que puede ser implementada para representar las condiciones actuales de un sistema hídrico (superficial o subterráneo) en un área determinada. WEAP es usado para evaluar la demanda y opciones de suministro incorporando los objetivos ambientales y normativos del contexto específico de análisis (Yates *et al.*, 2005). Mediante WEAP es posible evaluar los impactos futuros de un sistema a través de la modelación de escenarios. Esta capacidad de 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. 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 (Phurisamban, 2014).

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 (Vicuña *et al.*, 2009). Por medio de rutinas programadas en WEAP, es posible evaluar de manera integrada los componentes citados y otra variedad de elementos de análisis para la planeación y evaluación de los recursos hídricos, como son instrumentos normativos de un contexto específico y escenarios de cambio climático.

La herramienta WEAP, también ha sido diseñada para ser integrada con otros modelos de simulación, permitiendo con esto realizar análisis de tipo robusto. En la evaluación de la calidad del agua WEAP puede ser integrado con el Modelo QUAL2K. La principal ventaja del desarrollo de integración entre estos dos modelos, ha sido la simulación continua de WEAP, permitiendo realizar análisis de resultados para cada paso de tiempo continuo en todo el horizonte de evaluación (Yates *et al.*, 2005).

Para la calidad del agua, el modelo WEAP puede modelar contaminantes conservativos y no conservativos. Contaminantes conservativos son modelados a través de un balance de masa y los contaminantes no conservativos son modelados con diversos métodos que son incorporados en WEAP. Los parámetros que son posibles modelar con WEAP son: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Oxígeno Disuelto (OD), Temperatura (T), sales y Sólidos Suspendidos Totales (SST). A través de la conexión entre los modelos WEAP y QUAL2K, es posible modelar un grupo al menos 20 parámetros de calidad de agua de forma simultánea (Yates *et al.*, 2005). Recientemente se desarrolló un Sistema

de Soporte a la Decisión (DSS) para la toma de decisiones y para la evaluación de la calidad del agua de la cuenca del río Litani, en el marco de los planes nacionales de gestión del agua en el Líbano. El análisis de calidad del agua se realizó mediante el uso de las rutinas de calidad del agua en WEAP, para OD y DBO₅ desarrolladas por Chapra (2008). El modelo desarrollado permitió evaluar el impacto de diferentes sistemas de tratamiento de agua municipales bajo diferentes escenarios de clima (Assaf y Saadeh, 2008).

La primera integración de los modelos WEAP y QUAL2K se realizó en el año 2007, permitiendo modelar hasta 4 fuentes hídricas de manera simultánea, debido a la limitación del modelo QUAL2K en su versión 2.04. Bajo la presente investigación, en el año 2013-2014 se desarrolló la integración computacional de la versión más reciente del modelo WEAP y el modelo QUAL2K en su versión V.2.07, que permitió modelar de manera simultánea hasta 12 fuentes hídricas.

El esquema metodológico de la modelación de calidad de agua, mediante la integración de los modelos, se presenta en la Figura 2.

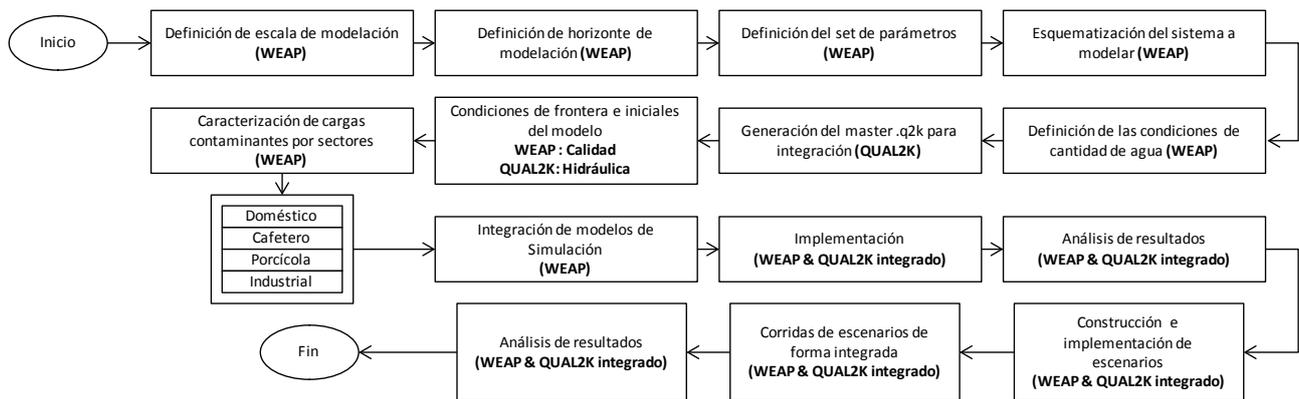


Figura 2.- Esquema metodológico de integración de modelos WEAP y QUAL2K

El primer paso consistió en la definición de la escala temporal de análisis a paso de tiempo mensual. La caracterización de la cantidad de agua y la demanda hídrica del sistema fue desarrollada con base en la modelación hidrológica del río La Vieja, realizada por Lozano *et al.*, (2015), que empleó tres puntos de monitoreo de caudal, para la comparación entre las simulaciones realizadas y los registros históricos. La selección de escala de tiempo mensual, para la calidad de agua, fue coherente con la escala temporal del modelo hidrológico empleado en WEAP. Adicionalmente los registros históricos de calidad de agua corresponden a monitoreos puntuales, suministrados por la Autoridades Ambientales,

representan el comportamiento típico de cada paso de tiempo mensual simulado.

En la caracterización de la cantidad de agua se realizaron dos modelos, un modelo histórico que fue calibrado y validado para un periodo comprendido entre 1970 y 2010 y un modelo “futuro” para análisis de escenarios en el periodo comprendido entre 2011 y 2050. Para la modelación de la calidad de agua se empleó el modelo “futuro” de cantidad y demanda de agua desarrollado por Lozano *et al.*, (2015). El año de línea base para la modelación de calidad fue el 2011, que permitió el uso de información existente (Tabla 1) para una calibración preliminar

Tabla 1. Fuentes de información para la calidad del agua en la cuenca del río La Vieja.

Fuente de información	Descripción	Parámetros monitoreados	Periodo y frecuencia de monitoreo
CVC, UTP y Aguas y Aguas	Muestreos históricos de calidad en el cauce principal del río La Vieja y río Consota	DBO, OD, pH, T, SST, Nitratos, Sulfatos, Fosfatos, Coliformes, Dureza, Turbiedad	Periodo: 2006 - 2010 Frecuencia: muestreo semestral (invierno-verano)
Universidad del Quindío <i>et al.</i> , (2012)	Histórico de muestreos de calidad en el cauce principal del río Consota	DBO, SST, pH, T, Coliformes	2007 - 2010
Universidad del Quindío <i>et al.</i> , (2012)	Programa de monitoreo de la cantidad y la calidad del recurso hídrico.	DBO, SST, pH, T OD, Coliformes totales y fecales	Periodo: 2011 Frecuencia: Seguimiento de masa de agua mediante monitoreo de 57 puntos

La estimación de cargas contaminantes por sectores productivos se realizó con base en la revisión de literatura y algunas caracterizaciones de vertimientos realizada por la Universidad del Quindío *et al.*, (2012). Las cargas contaminantes del sector cafetero se estimaron con base en la metodología desarrollada por Comité de Cafeteros y CVC (2012). Todos los vertimientos fueron representados en WEAP como cargas puntuales, que fueron localizadas de forma distribuida en la cuenca según su ubicación en las diferentes subcuencas y su aporte a los afluentes.

Los criterios considerados para la determinación de cargas fueron específicos para cada sector productivo. Para el sector doméstico se consideró la población de cada municipio y la carga contaminante generada por habitante/día. Para el sector industrial se consideraron las auto declaraciones de carga contaminante vertida en los cuerpos hídricos, que realizan las industrias a las autoridades ambientales y para los sectores cafetero y porcícola: se consideraron los periodos de producción, las cargas contaminantes por unidad productiva y la producción de cada sector. En el sector cafetero se consideró el manejo que los caficultores colombianos realizan a los subproductos del café. Los parámetros de calidad del agua definidos para esta investigación correspondieron a DBO₅, OD y Temperatura.

El sistema hídrico modelado se consideró de tipo dendrítico con 11 afluentes al río La Vieja, que corresponde al cauce principal. La esquematización para la modelación de calidad se realizó en el componente de modelación hidrológica en WEAP. Para la esquematización se consideraron dos características hidrológicas: i) la red de drenaje que considera 150 áreas de drenaje (denominadas catchments en el modelo WEAP) y ii) la elevación de la media de la cuenca que determina la dirección

de flujo del agua desde el terreno al cauce de modelación.

Para la esquematización de la zona de estudio en WEAP, se emplearon coberturas cartográficas correspondientes al límite de la cuenca del río La Vieja, las subcuencas, coberturas de suelo, los límites departamentales, las cabeceras municipales, la red hídrica y el modelo digital de terreno. Para la caracterización hidráulica se emplearon secciones transversales del río La Vieja y de sus principales tributarios. Con esta información y datos de aforos de la zona se obtuvieron las relaciones caudal-profundidad-ancho de cada fuente a simular por tramos.

Una vez realizada la caracterización de la calidad y la cantidad de agua en WEAP, se desarrolló la esquematización en QUAL2K (V.2.07) que permitió la integración de los modelos de simulación. Para la integración de los modelos de manera computacional, se modificó el código de programación de WEAP que permitió la lectura de los datos hidroclimáticos como condiciones de frontera desde el WEAP para ser migrados al modelo QUAL2K.

Para el análisis de escenarios de calidad de agua frente al cambio climático, el horizonte de modelación se definió con el modelo "futuro" desarrollado para el periodo 2011 y 2050, que permitió analizar escenarios de cambio climático construidos específicamente para la zona de estudio con el apoyo del Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés).

Otros escenarios para la evaluación del impacto de las aguas residuales en la cuenca del río La Vieja fueron construidos mediante la implementación del análisis XLRM, el cual es una metodología para la identificación y construcción del problema asociado al manejo de los recursos hídricos.

El XLRM contextualiza, de manera participativa, el problema, sus causas y efectos a través de la caracterización de incertidumbres y estrategias que contribuyen al mejoramiento del sistema físico, que en este caso consiste los recursos hídricos (Valencia *et al.*, 2013). Mediante el desarrollo de 2 sesiones de trabajo con diferentes actores de la cuenca del río La Vieja, se identificaron las incertidumbres (X) y estrategias (L) para la gestión del agua en el contexto local. Mediante el combinatorio de las incertidumbres y estrategias se construyeron los escenarios que fueron simulados bajo la integración de los modelos (R) que permitieron extraer medidas de desempeño (M), que para este caso correspondieron a indicadores de calidad del agua como DBO₅, OD y T.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Línea base de la cantidad de agua

Los resultados de la modelación hidrológica realizada fueron calibrados en WEAP, aplicando dos de las métricas estadísticas planteadas en Moriasi

et al., (2007): i) la métrica de Nash Sutcliffe, que determina la magnitud relativa de la varianza residual (“ruido”) en comparación con la variación de datos de medición “información” (Nash y Sutcliffe, 1970) y el estadístico del PBIAS que evalúa el sesgo

midiendo la tendencia media de los datos simulados para ser mayor o menor que sus contrapartes observados (Gupta et al., 1999). La estimación de las métricas descritas se presenta en las ecuaciones [1] y [2].

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,mean})^2} \right] \quad (1)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs})} \right] \quad (2)$$

Donde

$Y_{i,obs}$: caudal observado en el mes i

$Y_{i,sim}$: caudal simulado en el mes i

$Y_{i,mean}$: caudal promedio observado del periodo de análisis

Los resultados de la modelación hidrológica obtenidos por Lozano et al., (2015), sobre la cual posteriormente se realizó la modelación de la calidad del agua, se presentan en la Figura 3. Mediante la estimación de las métricas NASH y PBIAS se observó el buen ajuste de los datos simulados con el WEAP con respecto a

los datos de caudales históricos registrados se en las estaciones hidrométricas Alambrado, Cartago y La Española. Los índices NASH y PBIAS para cada estación respectivamente fueron: Alambrado 0,72 y -5,41; Cartago 0,78 y 2,88 y La Española 0,56 y -22,70.

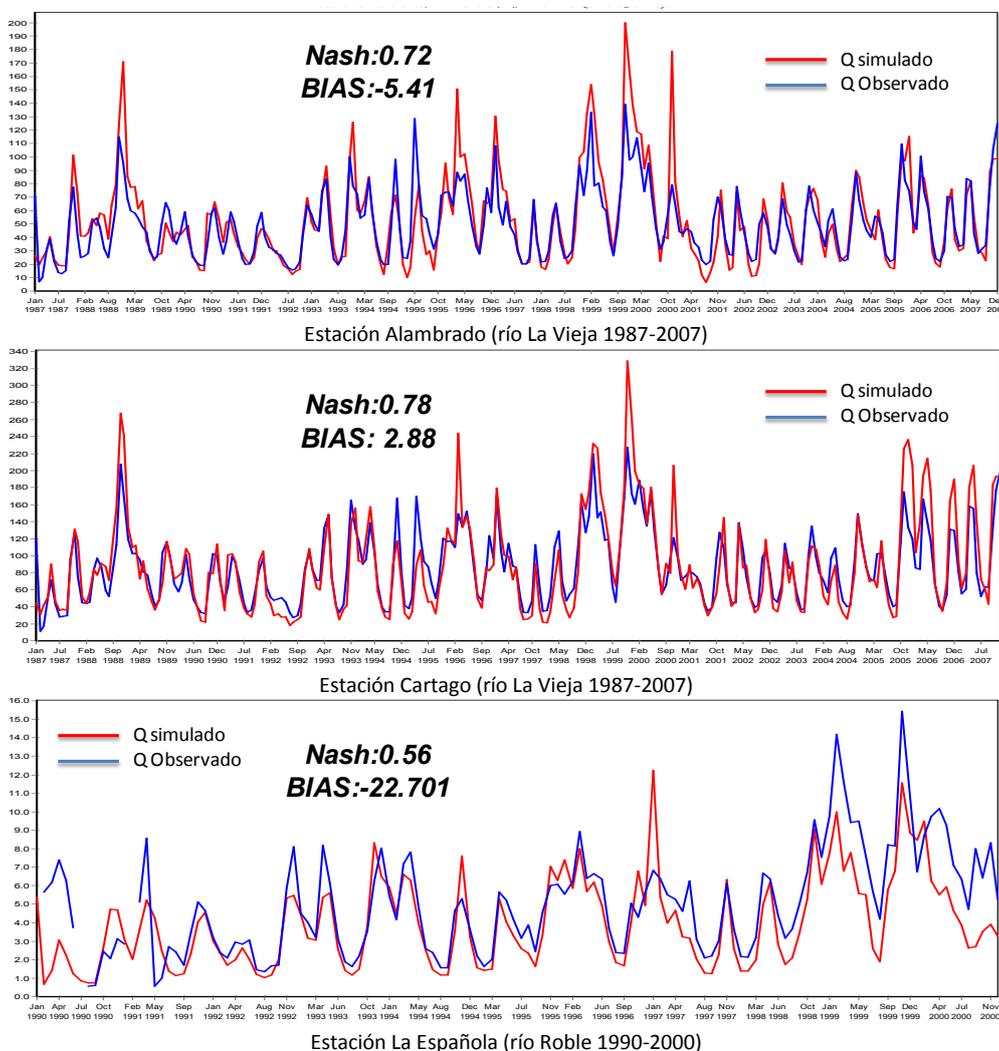


Figura 3.- Calibración del modelo hidrológico en las estaciones Alambrado, Cartago y La Española

4.1. Línea base de la calidad del agua

El sistema dendrítico modelado fue esquematizado y sistematizado en WEAP (Figura 4). Los resultados de la integración de modelos para la línea base,

considerada en el mes de enero del año 2011, se presenta en las Figuras 5 y 6 que corresponden a los perfiles longitudinales para el Caudal, la DBO₅ la T y el OD en el cauce principal del río La Vieja.

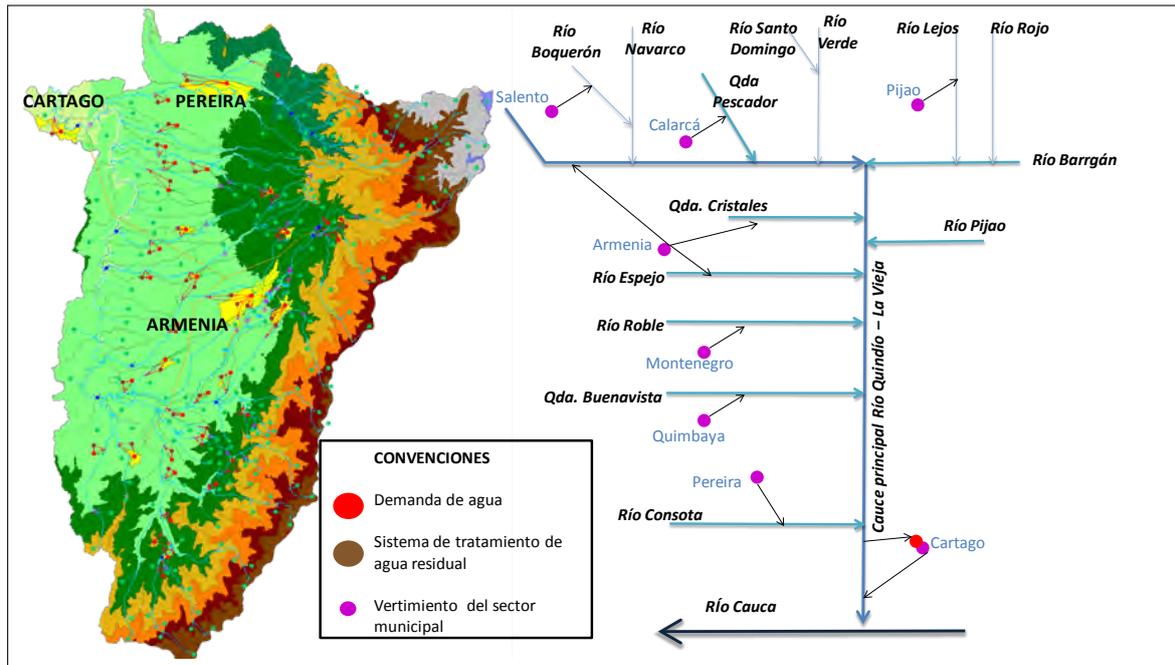


Figura 4.- Esquematación del sistema dendrítico modelado en WEAP

El perfil de la DBO₅ y del OD para el sistema hídrico modelado, y en comparación con las observaciones históricas realizadas, se presenta en la Figura

5-superior. La condición de cantidad y temperatura asociada a las observaciones históricas se presenta en la Figura 5-Inferior.

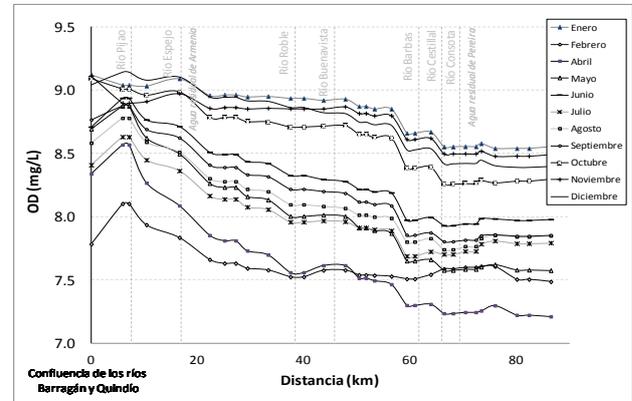
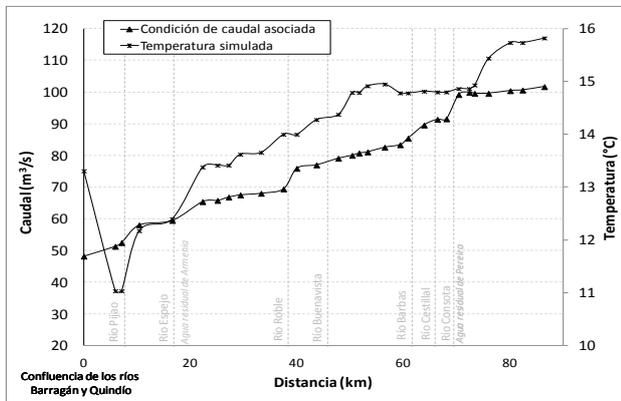
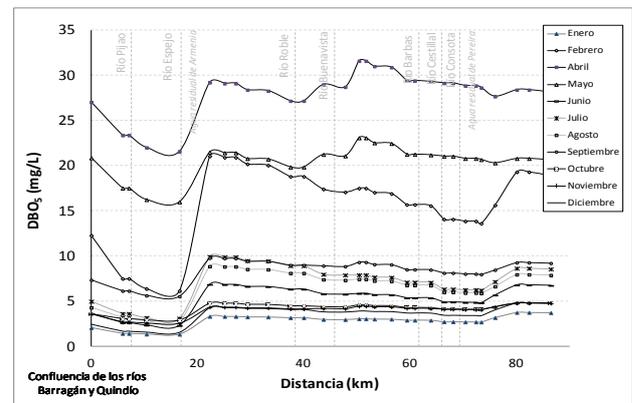
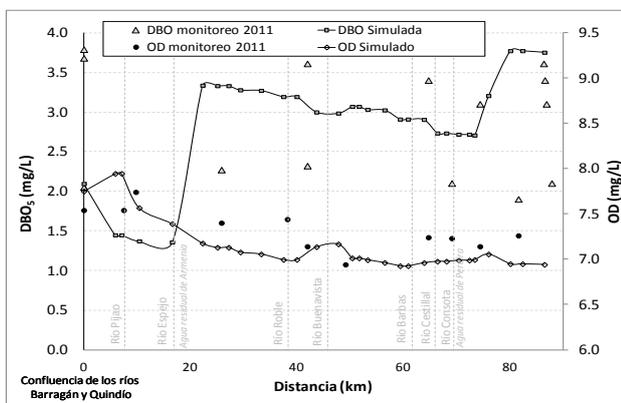


Figura 5.- Perfiles de calidad del río La Vieja. Condición de línea base (Enero 2011). Superior: Perfil de DBO₅ y OD simulado y monitoreado 2011. Inferior: Condición de cantidad y temperatura simuladas, asociadas a las condiciones del monitoreo de enero de 2011

Figura 6.- Variación mensual de la calidad del agua Superior: Perfil de DBO₅ simulada 2011. Inferior: Perfil de OD simulado 2011

En función de la DBO₅, se observó que la modelación representa las condiciones típicas históricas para el cauce principal. Especialmente el primer incremento de la concentración de la DBO₅ se presenta aguas abajo del río Espejo, en el cual se vierten las residuales domésticas de Armenia, aproximadamente a 16,6 km desde la confluencia de los ríos Quindío y Barragán. El segundo incremento de la DBO₅ corresponde al impacto del río Consota, que recibe las aguas residuales del municipio de Pereira, aproximadamente a 72,4 km del nacimiento del río La Vieja. En el total de su tránsito, el río La Vieja incrementa su DBO₅ aproximadamente en 2 mg/L desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Cauca.

De la comparación del perfil de OD simulado respecto a las mediciones históricas puntuales, la modelación representó las condiciones del cauce principal (Figura 5-superior). Especialmente el comportamiento del OD es el esperado, presentando mayor magnitud de concentración hacia el nacimiento del sistema hídrico. A medida que el río es impactado la concentración de OD disminuye en aproximadamente 1 mg/L desde su nacimiento hasta su confluencia con el río Cauca.

En la Figura 6 se observa la variación espacio-temporal de la DBO₅ y el OD, debido a la dinamización mensual de la simulación con WEAP. La variación mensual de la DBO₅ presenta valores máximos en los meses de abril y mayo, meses en los cuales se realiza la cosecha principal de Café en la región. Esto implica una mayor generación de carga contaminante (2,3 ton DBO₅ /día), dando como resultado el comportamiento de los perfiles simulados (Figura 6-superior).

Los meses de menor concentración de la DBO₅ corresponden a octubre, noviembre, diciembre y enero. En estos meses, aunque se realiza beneficio de café, generando aportes de carga contaminantes al cuerpo receptor, la condición hidrológica favorece a la dilución de la carga contaminante por efecto de la precipitación. En los meses correspondientes a Julio, agosto y septiembre no se realiza beneficio de Café por tanto el aporte de carga contaminante es menor. Sin embargo la condición hidrológica de verano, hace que la contaminación de otros sectores (Doméstico e Industrial) impacte el cuerpo receptor obteniendo el perfil de calidad simulado.

La variación temporal del OD que presenta valores mínimos en los meses de febrero, abril, julio y agosto y valores máximos en los meses de enero, diciembre, octubre y noviembre (Figura 6-inferior). Esto obedece a la variación en el aporte de las cargas contaminantes de los diferentes sectores y al comportamiento climatológico de la zona de estudio.

En todas las simulaciones realizadas para la condición de Línea Base (a escala mensual para el año 2011) se observó el efecto de las descargas de agua residual de los diferentes sectores mediante el aumento de la DBO₅ y disminución del OD en el recorrido del cauce principal del río La Vieja.

4.2 Análisis de escenarios de calidad de agua

Los resultados asociados a la construcción y simulación de escenarios de control de la contaminación hídrica, surgen de la implementación del análisis XLRM, ajustados a cada uno de los componentes de análisis en el sistema de recursos hídricos (cantidad y calidad), donde se identificaron para el estudio de la calidad del agua del río La Vieja, 4 tipos de incertidumbres y 3 estrategias de prevención y control de la contaminación (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del XLRM para la construcción de escenarios de calidad del agua

XLRM	TIPO / SECTOR	INCERTIDUMBRE / ESTRATEGIA
Incertidumbre (X)	Clima	Variabilidad Climática
		Cambio Climático
	Urbano	Cambio demográfico
		Consumo de agua por persona
Agrícola	Variabilidad en la producción	
Estrategias (L)	Municipio	Implementación de Sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR)
	Cafetero	Implementación de beneficio ecológico
		Implementación de Sistema modular de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de beneficio de café (SMTA)

En función de las incertidumbres en esta investigación se desarrollaron 30 escenarios de cambio climático con el apoyo del NCAR, de los cuales 6 fueron priorizados para el caso de estudio, siendo estos representativos del clima histórico analizado y de las condiciones extremas en función de la Temperatura y la Precipitación.

Para este artículo, la calidad del agua fue analizada en el escenario climático con incremento en la precipitación en un 7% y un aumento de temperatura de 1,2 °C respecto al clima histórico. La variabilidad climática del año de referencia 2011 fue considerada con base en el período histórico, como resultado del modelo hidrológico implementado con variaciones bimodales características de la zona de estudio. El cambio demográfico fue considerado bajo 3 posibles valores según las proyecciones del DANE (2005) y el consumo de agua por persona se mantuvo constante para el desarrollo de las simulaciones presentadas en este artículo.

En la identificación de las estrategias de calidad de agua, los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, propuestos por los municipios de la cuenca del río La Vieja, cumplirán con el requerimiento normativo colombiano con una eficiencia de remoción de la DBO₅ del 80%. Los Sistemas de tratamiento anaeróbico identificados para el sector cafetero fueron propuestos con una eficiencia de remoción de DBO₅ del 70% (Roa *et al.*, 2009).

En función de la construcción de las estrategias de control de la contaminación hídrica, en la implementación de Plata de Tratamiento de Aguas Residual (PTAR) para el sector municipal se consideraron 3 elementos: i) año de inicio de

la PTAR, ii) cobertura de la PTAR en función del sistema de recolección de las aguas residuales del municipio y iii) la eficiencia de remoción de la DBO₅. En total fueron considerados 20 municipios en la zona de estudio (Tabla 3).

Tabla 3. Implementación de PTAR en los municipios de la cuenca del río La Vieja

Municipio	Elemento 1. Implementación PTAR			Elemento 2. Aumento de la cobertura			Elemento 3. Aumento de la eficiencia		
	Año de inicio	Eficiencia	Cobertura	Año	Eficiencia	Cobertura	Año	Eficiencia	Cobertura
Caicedonia	2011	88	35	2015	88	100			
Cartago	2019	50	100				2033	80	100
Armenia	2033	80	71						
Buenavista	2011	70	70						
Buenavista	2019	80	30						
Calarca	2023	80	52						
Calarca	2023	80	48						
Circacia	2023	80	73						
Córdoba	2015	80	100						
Filandia	2019	80	19						
Filandia	2019	80	81						
Génova	2023	80	100						
Montenegro	2023	80	10						
Montenegro	2019	80	90						
Tebaida	2011	65	70	2015		100	2015	80	
Pijao	2023	80	100						
Salento	2011	65	70	2015		100	2015	80	
Salento	2011		30						
Quimbaya	2019	80	100						
Pereira	2018	30	70	2025		100	2025	80	
Ulloa	2011	80	30	2015	80	100			
Alcalá	2023	80	100						

En la construcción de la estrategia de implementación de SMTA para el sector cafetero, se consideró la variación temporal de la producción de carga contaminante de acuerdo con el comportamiento de los periodos de beneficio en la región, que corresponden a una cosecha principal en los meses de marzo, abril y mayo y una cosecha menor o mitaca en los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Combinadas incertidumbres y estrategias, se obtuvieron 57 escenarios de calidad del agua. Cada escenario fue simulado y comparado con su situación tendencial (condición en la cual no se implementa ninguna estrategia, pero si existe impacto por las incertidumbres) en dos horizontes de evaluación 2019 y 2033 (Figura 7).

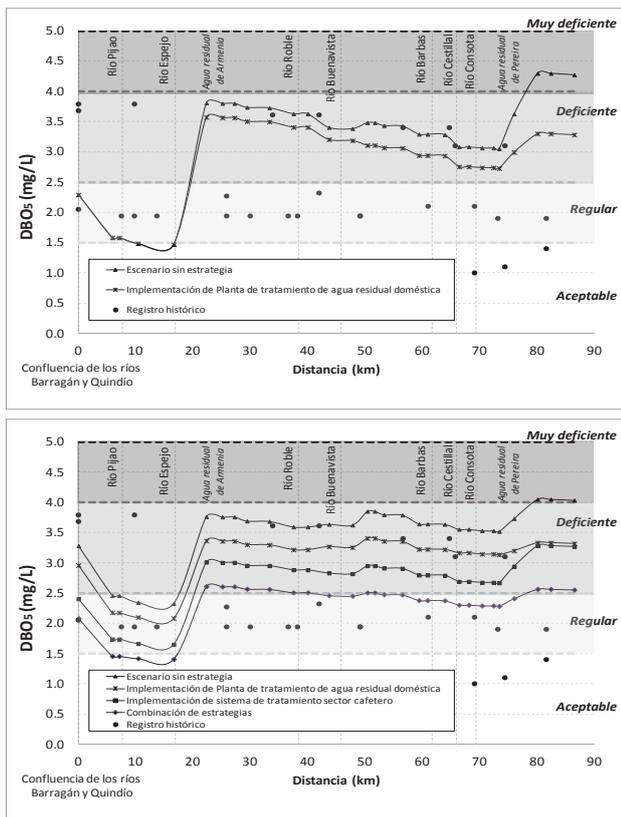


Figura 7.- Evaluación de escenarios en el río La Vieja. Superior: Año de evaluación 2019. Inferior: Año de evaluación 2033.

En la Figura 7-superior se presenta la evaluación de la implementación de PTAR al año 2019. Se observó que tanto la situación tendencial como el escenario de implementación de PTAR presentan un comportamiento similar, sin embargo, la condición de calidad del río La Vieja presenta un incremento luego de su paso por el municipio de Armenia, con un decremento de aproximadamente 0,5 mg /L de DBO_5 . Esta condición de mejora tiende a incrementarse a medida que el cauce del río La Vieja transcurre, recibiendo las aguas residuales tratadas de los 19 municipios restantes.

En la Figura 7-inferior se presenta la evaluación de los escenarios implementados al año 2033. Todos los escenarios presentan la misma tendencia en el comportamiento de la DBO_5 , sin embargo la estrategia combinada entre implementación de PTAR y SMTA presenta el mejor impacto en el cauce principal del río La Vieja, incluso recuperando el río desde una condición catalogada de “Deficiente” a “Regular” para fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, de acuerdo con el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

En la evaluación de las dos estrategias de prevención y control de la contaminación hídrica, se observa un mejoramiento del cauce principal, en función de la DBO_5 , debido a la implementación de estrategias de manera simultánea y a escala de cuenca.

5. CONCLUSIONES

Con la integración de los modelos WEAP y QUAL2K, para la simulación de la calidad del agua de fuentes hídricas superficiales, fue posible evaluar el impacto de las aguas residuales provenientes del sector doméstico y agroindustrial. Esta integración de las herramientas computacionales es de utilidad debido a la simbiosis de escalas espacio-temporales de ambos modelos y por permitir modificar parámetros en los diferentes elementos de río. Esta integración permite la dinamización de la escala espacio-temporal y la integración entre modelos hidrológicos y de cauces superficiales.

Con el modelo de línea base desarrollado y calibrado para el caso de estudio, es posible evaluar escenarios para la prevención y control de la contaminación hídrica en la cuenca del río La Vieja. Estos escenarios pueden ser desarrollados en el marco del análisis de decisiones robustas y con objetivo de planificación ambiental.

El modelo desarrollado para la evaluación de escenarios permitió evaluar estrategias para el control de la contaminación a escala de cuenca. La importancia de este tipo de evaluación, corresponde a la simplificación de sistemas de complejos que contribuyen a la planificación hídrica por sectores y a diferentes tipos de actores. La cuenca como unidad de análisis representa un sistema complejo, que mediante la integración de los modelos WEAP y QUAL2K puede ser analizada de forma sistémica y en el marco de las decisiones robustas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Gobierno de los Estados Unidos de América por la financiación del proyecto “Construcción de capacidades frente al Cambio Climático: Ríos del páramo al valle por urbes y campiñas”, a través de La Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y bajo la coordinación técnica del Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo (SEI).

También expresan sus agradecimientos a los socios directos del proyecto: Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Aguas y Aguas de Pereira, Grupo de investigación CIDERA de la Universidad del Quindío, Grupo de Investigación EIS de la Universidad Tecnológica de Pereira y al grupo de investigación GIRH del Instituto Cinara de la Universidad del Valle.

7. BIBLIOGRAFÍA

Assaf, H., y Saadeh, M. (2008). Assessing water quality management options in the Upper Litani Basin, Lebanon, using an integrated GIS-based

- decision support system. *Environmental Modelling & Software*, 23(10), 1327-1337.
- Chapra, S. (2008). *Surface water-quality modeling*, Waveland press, Long Grove, Estados Unidos.
- Comité de Cafeteros, y CVC. (2012). *Taller regional para la definición de cargas contaminantes del sector cafetero*. Cartago, Colombia.
- CRQ, CVC, CARDER, UAESPNN, MAVDT, IDEAM, y GTZ. (2008). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río La Vieja*.
- DANE. (2005). *Censo general*. Colombia.
- EPA. (2013). *River and Stream Water Quality Model (QUAL2K)*. <<http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/qual2k.html>>.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., y Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.
- Lozano, G., Rodríguez, C., Purkey, D., Escobar, M., Castaño, J., Sabas, C., Galvis, A., y Jaramillo, M. F. (2015). *Modelación hidrológica de cuencas hidrográficas en WEAP como una herramienta de evaluación y adaptación al cambio climático. Caso de estudio cuencas de los ríos La Vieja y Otún en la región cafetera de Colombia* En: *Water Week Latinoamérica 2015*, Santiago de Chile, Chile.
- MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico*
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Pai, T.-Y., Huang, J.-T., Wang, S.-C., Chang, D.-H., Huang, K.-J., Lee, C.-C., Lin, S.-R., Tseng, C.-H., Sung, P.-J., y Leu, H.-G. (2010). Evaluation of Ecological Water Purification Processes in Dali River Using QUAL2K. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 20(4), 239-243.
- Phurisamban, R. (2014). *Addressing Climate Change Adaptation in Water Resource Management: A Case Study of the Sacramento Region*. University of California, Berkeley.
- Rashed, A. A., y El-Sayed, E. (2014). Simulating Agricultural Drainage Water Reuse Using QUAL2K Model: Case Study of the Ismailia Canal Catchment Area, Egypt. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5).
- Roa, G., Oliveros, C., Álvarez, J., Ramírez, C., Sanz, J., Davila, M., Álvarez, J., Zambrano, D., Puerta, G., y Rodríguez, N. (2009). *Beneficio ecológico del Café, Chichiná, Colombia*.
- Valencia, J., Forni, L., Castaño, J., Purkey, D., Escobar, M., Sabas, C., Lozano, G., Rodríguez, C., Galvis, A., y Jaramillo, M. (2013). *Aplicación de la metodología XLRM para la definición de escenarios de modelación en WEAP: Una herramienta para la construcción de modelos de cambio climático*. En: *AGUA2013. Seminario Manejo del riesgo en el ciclo del agua.*, Cali, Colombia.
- Vicuña, S., Coello, C., y Cisneros, F. (2009). *Modelación hidrológica de recursos hídricos de la cuenca del río Paute*. En: *XII Seminario Latinoamericano: Agua y Cambio Climático*, Chile.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., y Huber-Lee, A. (2005). WEAP21. A demand, priority, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500.
- Zainudin, Z., Rahman, N. A., Abdullah, N., y Mazlan, N. F. (2010). Development of Water Quality Model for Sungai Tebrau using QUAL2K. *Journal of Applied Sciences*, 10, 2748-2750.