



UNA REVISIÓN DEL MODELO WEAP 21 Y SWAT PARA LA PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

A REVIEW OF THE WEAP 21 AND SWAT MODEL FOR WATER RESOURCES PLANNING

Ana Fabiola Ortega Pereira¹
Josselyn Marcela Treminio Martínez²
Ruth Méndez Rivas³

(Recibido/received: 09-agosto-2022; aceptado/accepted: 18-octubre-2022)

RESUMEN: La predicción precisa del caudal es clave para la toma de decisiones en la planificación y gestión de los recursos hídricos, pronóstico de inundaciones y prácticas de riego. La utilización de modelos para diseñar y evaluar estrategias de gestión, medir resultados y tomar decisiones permite optimizar recursos y disminuir vulnerabilidades ante el impacto de la variabilidad y cambio climático. El diseño de estrategias para la gestión integral de los recursos hídricos demanda la configuración lo más precisa posible del sistema hidrológico con el apoyo de herramientas que simulen los procesos físicos involucrados en la lluvia-escorrentía. Modelos como el SWAT y el WEAP han sido diseñados para suplir esta demanda desde los tomadores de decisiones y formuladores de políticas públicas de desarrollo. Estos modelos cuentan con características y parámetros específicos, que permiten representar mejor el funcionamiento hidrológico en una cuenca. En este artículo se identifican y describen las diferentes eficiencias que poseen estos modelos hidrológicos para describir estos procesos que han sido estudiadas por otros autores. En general, estos modelos simulan a escala de tiempo continuo la escorrentía, carga de nutrientes en la calidad del agua y cargas de sedimentos que pueden afectar a embalses para diferentes usos. El SWAT presenta muy buenos resultados cuando se realiza la calibración directa y el WEAP es una excelente herramienta para la evaluación de escenarios. Ambos modelos presentan limitaciones para estimar la recarga de las aguas subterráneas, por lo tanto, uno de los mayores desafíos corresponde a la simulación de la descarga de las aguas subterráneas durante el período de bajo flujo en los ríos.

PALABRAS CLAVE: Escenarios, gestión de recursos hídricos, simulación lluvia-escorrentía.

¹ Programa de Investigación de Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente de la UNI (UNI-PIENSA). Estudiante de maestría en ciencias ambientales con mención en Gestión ambiental Correo: anfaby.2377@gmail.com.

² Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ENACAL). Especialista Ambiental en el Programa Integral Sectorial de Agua y Saneamiento Humano (PISASH), marcela.treminio@gmail.com.

³ Programa de Investigación de Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente de la UNI (UNI-PIENSA). Docente investigador.

ABSTRACT: Accurate flow prediction is key to decision making in water resources planning and management, flood forecasting and irrigation practices. The use of models to design and evaluate management strategies, measure results and make decisions makes it possible to optimize resources and reduce vulnerability to the impact of climate variability and change. The design of strategies for integrated water resources management demands the most accurate possible configuration of the hydrological system with the support of tools that simulate the physical processes involved in rainfall-runoff. Models such as SWAT and WEAP have been designed to meet this demand from decision makers and formulators of public development policies. These models have specific characteristics and parameters that allow them to better represent the hydrological functioning of a watershed. This article identifies and describes the different efficiencies they have to describe these processes that have been studied by other authors. In general, these models simulate at a continuous time scale the runoff, nutrient loading in water quality and sediment faces that can affect reservoirs for different uses. SWAT shows very good results when direct calibration is performed and WEAP is an excellent model for scenario evaluation. Both models have limitations in estimating groundwater recharge, therefore, one of the major challenges for both models are the simulation of groundwater discharge during the period of low river flow.

KEYWORDS: Scenarios, water resources management, rainfall-runoff simulation

INTRODUCCIÓN

Los modelos hidrológicos son importantes para una serie de aplicaciones, desde la planificación, desarrollo y gestión de los recursos hídricos, hasta el pronóstico de inundaciones y modelamientos acoplados que incluyen calidad de agua, hidro ecología y el clima (Pechlivanidis *et al.*, 2011; Asencio, 2020). El estrés hídrico estimado a partir de la relación entre el total de agua dulce extraída por todos los sectores de consumo y el total de los recursos de agua dulce disponible, sin incluir los requisitos de caudal, constituyen una de las amenazas más graves para el desarrollo sostenible (FAO, 2021), por lo que actualmente está siendo monitoreado como el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6.4.2. Este estrés ha ocasionado una serie de impactos en el clima regional y local, debido al cambio en la humedad del suelo y evapotranspiración, además, el cambio en el uso del suelo altera la descarga fluvial y la calidad del agua (Pranesh *et al.*, 2021). Por lo tanto, es crucial conocer la configuración hidrológica de los distintos sistemas a escala local, con el objetivo de hacerle frente a este desafío con estrategias eficaces de gestión de recursos hídricos.

En Centroamérica, el desarrollo de investigaciones enfocadas en la evaluación integral de los recursos hídricos enfrenta grandes desafíos, entre los que se puede mencionar, la falta de recursos humanos altamente capacitado y la disponibilidad financiera para este fin. El enfoque general para estudios de línea base de cuencas se enfatiza en el manejo forestal y de suelo, mientras pocos recursos son destinados al análisis de los sistemas hídricos (Faustino & Garcia, 2001; Faustino, Jiménez & Kammerbauer, 2007). Ciertas características de la cuenca como el uso del suelo, factores socio-económicas y fuentes de contaminación puntual son investigadas

más profundamente que los procesos hidrológicos. Nicaragua posee una Política Nacional de Recursos Hídricos establecida en el año 2001. Este instrumento proporciona las guías generales bajo las cuales los recursos hídricos nacionales deben ser manejados. La política reconoce la naturaleza finita de los recursos hídricos, así como su valor económico, social y ambiental. Esta Política ha estado en revisión desde el año 2010 (Calderón, 2010), en vista de los cambios en los fundamentos socio-políticos del país. La discusión busca actualizar la política de acuerdo a los nuevos valores filosóficos del gobierno que se reflejan en el Plan Nacional de Desarrollo Humano y en la Ley General de Aguas Nacionales (2007).

En el país se han realizados varios estudios hidrológicos que promuevan la gestión, manejo y administración en el ámbito nacional de los recursos hídricos; a pesar de ello, existe poca experiencia en el empleo de modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos; en la revisión se encontraron unos pocos trabajos que emplearon el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a una menor escala, y un nulo registro de experiencias con acceso al público en general en el uso del modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System). Espinoza y Zelaya (2022), articulan experiencias de la modelación con SWAT y concluye que el modelo permitió identificar las unidades hidrográficas que por sus características no aportan agua a la red de drenaje en las regiones del Pacífico, Norcentral y Central de Nicaragua. Según el Plan Nacional de los Recursos Hídricos de Nicaragua, la información sobre los recursos hídricos se encuentra en muchos casos dispersa en varias de las instituciones del país. Es por ello, que se resalta la necesidad de mejorar la calidad de la investigación hidrológica en Nicaragua, de modo que se mejore la gestión del conocimiento basada en la comprensión hidrológica para la toma de decisiones.

Una red de monitoreo que ofrezca datos observados de alta resolución espacial y temporal son un requisito indispensable para que los modelos hidrológicos alcancen sus objetivos, principalmente por la heterogeneidad de las cuencas. Sin embargo, esto representa una de las mayores limitaciones, principalmente en países en vías de desarrollo como Nicaragua. En este contexto se han desarrollado una gran variedad de modelos hidrológicos que han sido utilizados para una amplia gama de procesos ambientales a diferentes escalas espacio-temporales (Pranesh *et al.*, 2021; Bai *et al.*, 2018; Nagdeve *et al.*, 2021). Por esta razón, la selección adecuada de un modelo hidrológico a partir de modelos aplicados en otros sitios con características específicas, podría facilitar su uso en países con capacidad limitada o escasa en modelamiento hidrológico, ya sea por falta de capacidad técnica y el alto costo computacional. En este sentido, un modelo hidrológico podría ser seleccionado en función de las preguntas de investigación, considerando los parámetros de entrada disponibles y las características locales (Pranesh *et al.*, 2021), aunque en la práctica suelen elegirse según su practicidad, conveniencia, experiencia y costumbre.

En este artículo se presenta una revisión de las ventajas y desventajas del uso del modelo WEAP en comparación al SWAT, orientadas al usuario, que ofrezca una mejor orientación y soporte en la toma de decisiones para las previsiones hidrológicas, basándose en métodos científicos confiables y medibles. Al respecto, se realizó una revisión sistemática de publicaciones electrónicas de documentos de diferente red de revistas científicas de acceso abierto no

comercial que publican artículos originales de investigación, artículos cortos y reseñas, entre las revistas citadas, se mencionan: Global NEST Journal, Revista SCielo, Ciencia Sur Revista Científica, Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Revista de ciencia y tecnología de ingeniería multidisciplinaria; libros, páginas web; que abordan de diferentes perspectivas los casos de aplicación del modelo hidrológico WEAP como modelo para la gestión de los recursos hídricos, y su relación con el uso del suelo y los cambios climáticos.

DESARROLLO

Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son las herramientas más utilizadas para el análisis de los procesos naturales que ocurren en una cuenca (Singh & Woolhiser, 2002). Estos modelos son representaciones de los componentes biofísicos de una cuenca, que simulan con cierto grado de confianza las diversas salidas del ciclo hidrológico (Salgado & Guitron, 2012). Entre los modelos usados para el análisis hidrológico a escala de cuenca sobresalen SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y WEAP (Water Evaluation and Planning System). (Water Evaluation and Planning System). El modelo SWAT es un modelo de tiempo continuo, semidistribuido, basado en procesos, desarrollados para evaluar las estrategias de gestión sobre recursos hídricos y contaminación de fuentes no puntuales de grandes cuencas. Su directriz es el balance hídrico, el cual afecta el crecimiento de las plantas y movimiento de sedimentos, nutrientes, pesticidas y patógenos (Cuceloglu, Abbaspour & Ozturk, 2017). Por otra parte, WEAP es un modelo hídrico conceptual, base física y de un número reducido de parámetros, que simula los componentes naturales e intervenidos de los sistemas de recursos hídricos, que ha sido aplicado en cuencas de diversos tamaños y es adecuado para evaluación de escenarios (Hernández, 2017).

El modelo WEAP, fue creado en 1988 por Jack Sieber, con el patrocinio del Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI, por sus siglas en inglés). Es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua, que opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas. El modelo se distingue por integrar a la simulación componentes naturales (demandas por escorrentías, flujo base) y componentes humanos (demanda humana, embalses).

El modelo WEAP21 es un software que asiste en el análisis, evaluación y toma de decisiones en materia de agua, incluyendo la distribución de recursos hidráulicos, estrategias de preservación ambiental, suministro y demanda orientadas a la simulación modelada. Considera explícitamente objetivos económicos, ambientales y sociales y por lo tanto apoya la identificación de soluciones de manejo sustentable del desarrollo y administración de los recursos hidráulicos (Sieber, 2001) El modelo SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas) desarrollado por el Dr. Jeff Arnold (Arnold, 1998) para el servicio de Investigación Agrícola (Servicio de Investigación Agropecuaria, ARS) del departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Predice el efecto en el agua y sedimentos resultantes los manejos pesticidas y otras prácticas de explotación de la tierra en general. Permite al usuario estudiar impactos de largo plazo y una gran cantidad de procesos físicos en cuencas tanto pequeñas como grandes por lo que, requiere de información específica del clima, escurrimiento, flujos de retorno, propiedades del suelo, percolación,

topografía, vegetación, evapotranspiración, pérdidas, cuerpos de almacenamiento de agua y uso de la tierra en la cuenca, ingresando igualmente las características de cultivo para los campos agrícolas, irrigación, cargas de pesticidas y nutrientes entre tantos otros.

Uribe (2010), señala que el SWAT requiere información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada. Los beneficios de este enfoque son: interface gráfica ArcGis (Software de Sistema de Información Geográfica) la cual hace más sencillo su manejo y utilización, el impacto relativo de una variación de los datos de entrada (por ejemplo; cambios en prácticas de gestión, clima, vegetación, etc.), método ágil de extrapolación e integración de información, simulación dirigida, disponibilidad inmediata de datos de entrada y salida, amplio proceso de interacciones de procesos físicos.

En cambio, el WEAP, apoya la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las propiedades de demanda y oferta). WEAP emplea una paleta de diferentes objetos y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetos de operación e infraestructura disponible. (Purkey *et al.*, 2007). A continuación, se muestra los parámetros de entrada que requieren ambos modelos.

Tabla 1: Matriz comparativa de los modelos SWAT y WEAP 21

	SWAT	WEAP 21
Parámetros de entrada		
Propiedades hidráulicas del acuífero	✓	✓
Gradiente hidráulico	x	x
Sistema de flujo geométrico / límites	x	x
Área y geometría de la fuente	✓	✓
Propiedades físicas del suelo	✓	✓
Climatológica	✓	✓
Topografía	✓	x
Derechos de agua	x	✓
Multicuencas	✓	✓
Propiedades de abastecimiento	x	✓
Disponibilidad	✓	✓
ArcGis	✓	x
Simulaciones		
Recargas	✓	✓
Evapotranspiración	✓	✓
Flujos	✓	✓

	SWAT	WEAP 21
Descargas	✓	✓
Humedad del suelo	x	x
Heladas del suelo	x	x
Cumplimiento de requerimiento	x	✓
Secuencias mensuales	x	✓
Secuencias diarias	✓	✓
Niveles de reserva almacenada	x	✓
Creación de escenarios	x	✓

Fuente: Uribe (2010) & Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (2009)

Implementación de WEAP y SWAT

Sánchez *et. al* (2017), elaboraron un estudio en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con el modelo hidrológico SWAT, en el cual evaluaron la eficiencia de dicha herramienta para simular biomasa, escurrimientos y sedimentos para el período 1975-1985. En ese trabajo se optó por comparar las bondades del modelo WEAP para simular, en este mismo período y sin calibrar parámetros, los escurrimientos aforados a través de la información empleada y generada en SWAT. El proceso utilizado por Sánchez *et. al* (2017), fue información calibrada con SWAT y observa el desempeño de un modelo como WEAP con una conceptualización hidrológica diferente a SWAT en el cálculo del escurrimiento superficial, infiltración, percolación, y el flujo superficial y base, complementar el análisis hidrológico de la cuenca con procesos no incluidos en SWAT, como la evapotranspiración a través de coeficiente de cultivos y el movimiento de agua con valores de conductividad hidráulica; y comparar la respuesta de WEAP, con menores requerimientos de información y en igualdad de datos de entrada, con los escurrimientos aforados y usados en la calibración con SWAT.

Es posible obtener resultados satisfactorios en WEAP utilizando parámetros calibrados en SWAT, como se ha realizado en otras investigaciones. Los modelos SWAT y WEAP se han utilizado conjuntamente en cuencas de Etiopía y Lesoto. El primero, para conocer el sistema y su comportamiento hidrológico; mientras que el segundo, utilizando resultados de SWAT para cuantificar la distribución de los recursos hídricos de la cuenca bajo diversos criterios (Adgolign, Srinivasa & Abbulu, 2016, Hussien, Mekonnen & Pingale, 2018, Maliehe & Mulungu, 2017). Sus resultados muestran que los modelos SWAT y WEAP son capaces de simular satisfactoriamente los escurrimientos mensuales y anuales de la cuenca del Río Sordo, según los índices de eficiencia. Sin embargo, en la escala de tiempo anual, WEAP presenta un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE=0.3, un valor inferior al alcanzado por SWAT.

La cantidad de datos para el funcionamiento de estas dos herramientas es desigual. Por un lado, SWAT, modelo de base física, requiere una enorme cantidad de información; mientras que WEAP, modelo conceptual-base física, demanda menor cantidad de datos. Sin embargo, esta característica a favor de WEAP presenta el inconveniente de que los valores de esos pocos parámetros que lo definen no están plenamente acotados en la literatura, como sucede con

SWAT. De esa investigación se dedujo que, es posible obtener resultados satisfactorios utilizando datos de la herramienta SWAT, sin embargo, solo se recomienda para alimentar WEAP cuando se cuente con un trabajo de un sitio de interés, ya que antes de elegir un mejor modelo se debe tener claro los objetivos de estudio, al igual que la disponibilidad, capacidades y necesidades de la herramienta computacional a utilizar.

Argota (2011), dice que, el análisis en SWAT está basado en el cálculo del balance hídrico utilizando información cartográfica, temática y climática debidamente organizada. La calibración en SWAT consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los escurrimientos observados y los calculados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia; Fernández (2017), agrega que, 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 escorrentía). Para SWAT, generalmente el ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenido durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo. Es decir que, de haber variación entre los datos medidos y los simulados por el modelo, se realizan diferentes ajustes de una serie de parámetros hasta llegar a valores adecuados (Arroyo, Heidinger y Araya, 2010).

Por otro lado, el análisis en WEAP está basado en la ecuación general de balance hídrico, utilizando el principio básico de balance de masa pudiendo ser implementado en sistemas municipales y agrícolas, a una sola cuenca o complejos sistemas de cuencas transfronterizas (Argota, 2011). La calibración en WEAP consiste en comparar los caudales aforados o medidos con los caudales simulados e ir ajustando los parámetros del método humedad del suelo. Para determinar el grado de relación del modelo con el sistema físico real se utiliza las métricas de BIAS o desviación ponderada y el coeficiente de eficiencia de NASH (Lozano y Valeriano, 2012). En WEAP, generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base; por ejemplo, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente afectada por el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) y la conductividad de zona de raíces (Ks), los cuales afectan la reactividad de las cuencas. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar dirección preferencial de flujo (f) y conductividad de zona profunda (Kd); es decir que, dependiendo del elemento del caudal que se requiera mejorar, se debe ajustar el o los parámetros correspondientes (Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile, Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, 2009).

Rosenzweig *et al.*, (2004), analizaron la aplicación del modelo WEAP a las principales regiones agrícolas de Argentina, Brasil, China, Hungría, Rumania y los Estados Unidos mediante la simulación de escenarios futuros sobre el cambio climático, el rendimiento agrícola, la población, la tecnología y el crecimiento económico. Hagan (2007), usó WEAP en Ghana para simular el impacto de embalses de diferentes tamaños en el Alto Volta, un río de África occidental. Sus resultados revelaron que el modelo funcionó bien y se encontró que los embalses de tamaño pequeño no tienen ningún impacto en la cuenca del río Volta. Omari *et al.*, (2009) ha utilizado WEAP como un sistema de apoyo a la gestión del agua para la cuenca de Amman Zarqa en

Jordania utilizando un tratamiento avanzando de aguas residuales y escenarios optimistas. Otros investigadores han utilizado WEAP para modelar grandes cuencas fluviales, por ejemplo, la cuenca del río Olifants en Sudáfrica que limita con Mozambique (Levite *et al.*, 2003) y el Lago Naivasha, Kenia (Alfarra, 2004).

Kraemer *et al.*, (2010), implementó en la microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada (Argentina) el modelo hidrológico SWAT. Fue calibrado y validado utilizando los valores de escurrimientos medidos in situ. Se encontraron buenas eficiencias a escala diaria (coeficiente de determinación o R^2 : 0.55; y la medida de eficiencia de Nash–Sutcliffe (ENS) R^2_{ENS} : 0.52) y pobres escala mensual (R^2 : 34; R^2_{ENS} : 0.04). En la calibración, los escurrimientos fueron sobreestimados en un 31.8 porcentaje y 32.6 porcentaje para la escala mensual y diaria respectivamente, mientras que en la validación se sobreestimo un 42.5 porcentaje para los valores mensuales y un 41.2 porcentaje para los diarios. La aplicación de SWAT en esta cuenca resultó auspiciosa y conduce a la inclusión de dicho modelo en futuros trabajos. Laino *et al.*, (2017), estudiaron los efectos de la restauración forestal sobre el balance hídrico y el movimiento de nutrientes considerando las condiciones climáticas actuales, la demanda de agua, el crecimiento poblacional y los escenarios futuros de cambio climático en el río Grijalva mediante el uso del modelo WEAP. Los cambios de uso de suelo y su efecto en el mantenimiento de la seguridad hídrica, considerando el crecimiento poblacional y el cambio climático fueron analizados para un periodo de 15 años, partiendo del 2012 como año base. Específicamente, se modeló la sustitución de los suelos en barbecho y la selva baja por bosque de pino-encino.

Los resultados de Laino *et al.*, (2017), mostraron que en Xelajú en cuencas de los ríos Bacanton, disminuciones de 8,561 Kg y 1870 Kg en generación de nitrógeno respectivamente; y descensos de 2,335 Kg y 551 Kg en fósforo generación respectivamente. Sin embargo, el balance hídrico proyectado sugiere que, en el caso de una restauración forestal idealista, escenario, la evapotranspiración se reducirá y aumentará la infiltración y la escorrentía superficial. La reducción en la evapotranspiración y el aumento de la escorrentía superficial no es consistente con la literatura y podría reflejar la falta de datos apropiados para modelar las condiciones locales. Con base en los resultados encontrados, es preciso crear para Nicaragua una base de datos analítica consistente, mediante el desarrollo de un modelo hidrológico como WEAP que facilite la propuesta de estrategias de desarrollo, y la toma de decisiones en función de la mejor información disponible a nivel de país. Por otro lado, considerando que, uno de los obstáculos para el desarrollo de proyectos científicos es la disponibilidad de información, se sugiere que, a nivel de instituciones, se implemente una estrategia de divulgación pública e institucional que ayude a garantizar el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, enfocados en la gestión de recursos hídricos. Una de las ventajas que ofrece el WEAP es la evaluación de escenarios basado en la demanda, prioridades y preferencias en el marco de evaluación de la demanda sectorial, caudal, funcionamiento de embalses, medidas de conservación, prioridades en la asignación y análisis de costos y beneficios.

Garantizar la implementación de herramientas de apoyo en la toma de decisiones es clave para el desarrollo económico sostenible de Nicaragua, más aún en los sectores en los cuales se tiene un amplio desarrollo del área agrícola, sin embargo, una serie de problemáticas se presentan

debido a los efectos del cambio climático, afectando de manera categórica los diversos sectores productivos de nuestro país.

Considerando el cambio climático

Yilmaz (2015), aplicó WEAP para evaluar los impactos del cambio climático en la cuenca de Gediz, una cuenca hidrográfica predominantemente agrícola de Turquía. Las simulaciones del Modelo de Circulación Global como ECHAM5 y el Modelo Climático Regional como RegCM3 se utilizan en WEAP para estimar relaciones Oferta/Demanda, demandas insatisfechas y la disminución del rendimiento de los cultivos. Las simulaciones se realizaron hasta el año 2100 con la serie temporal proyectada de datos de lluvia, temperatura, evapotranspiración y escorrentía. Los resultados mostraron que la cuenca está bajo estrés hídrico y bajo el cambio climático la situación puede ser peor, lo que indica la necesidad de fuentes alternativas de suministro y estrategias de gestión de la demanda.

Bhatti y Patel (2015) utilizaron el modelo WEAP para programar el riego de cultivos de algodón en clima semiárido del distrito de Vadodara del proyecto Sardar Sarovar (SSP), en India. Optimizar la eficiencia del uso del agua para maximizar el rendimiento de los cultivos es una necesidad en condiciones de riego deficitario. Ante esto, utilizaron el modelo WEAP para determinar los requisitos de agua de los cultivos y analizaron los efectos de las estrategias de riego en la eficiencia del uso de agua, la eficiencia del agua en el riego, y el rendimiento de los cultivos para cinco escenarios diferentes de estrés hídrico de riego. La cantidad de riego se decidió sobre la base del porcentaje del agua fácilmente disponible y la profundidad fija. Estos mismos autores, generaron escenarios de riego convencional, riego déficit (estrés hídrico en floración y formación de películas). Sin estrés hídrico en fase vegetativa y sin estrés hídrico durante todo el crecimiento. Los resultados mostraron que la cantidad de riego administrada en el caso de que no se permita estrés es la más alta (307 mm) y, por lo tanto, hay un aumento significativo en el rendimiento del cultivo del algodón. La reducción de la transpiración también se nota en otros escenarios en comparación con el caso sin tolerancia al estrés.

López *et al.*, (2017) realizaron una modelación con el programa WEAP para determinar el impacto de los escenarios de cambio climático Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) RCP4.5 y RCP8.5 en los recursos hídricos en el periodo 2015-2030 en el Valle de Galeana, Nuevo León. Se desarrollaron dos escenarios de adaptación: el primero considera una reducción en la demanda hídrica para uso agrícola por cambio de sistemas de riego gradual, el segundo contempla un plan hídrico integral para mejorar la capacidad de infiltración de la zona de recarga mediante programas de reforestación y recuperación de suelos. Los resultados obtenidos por López *et al.*, (2017), mostraron que la situación del acuífero con escenarios de cambio climático y con el uso actual del agua es crítica, pues en ambos escenarios se tendrían afectaciones importantes en el acuífero a partir de 2015, ocurriendo una mínima recarga hacia el acuífero de 0.96 porcentaje y 1.5 porcentaje con respecto a su capacidad total durante los meses de lluvia típicos (agosto y septiembre, respectivamente). Considerando el escenario de adaptación de cambio en sistema de riego, se espera una ligera recuperación a partir del año 2023, alcanzando un máximo de recarga de 3.11 Mm³ en temporada de lluvia.

Quiroz & Paz (2018) identificaron los potenciales impactos del cambio climático con la hidrología de la cuenca del Río Katari que alimenta Viacha y proponer las alternativas que garanticen el suministro de agua hasta el año 2100. Los procesos hidrológicos de la cuenca fueron simulados mediante el modelo WEAP para el periodo de referencia 1991-2014. Los factores de cambio para diferentes variables climáticas (precipitación y temperatura) fueron obtenidos a partir de resultados de modelos climáticos regionales para Bolivia en los periodos 2001-2030 y 2050-2100 considerando tres situaciones de cambio climático. El análisis y contraste de los resultados de la modelación bajo escenarios realizada por los autores Quiroz & Paz (2018), permitió vislumbrar los potenciales impactos en los procesos hidrológicos al interior de la cuenca del Río Katari, se identificaron cambios tanto en los volúmenes de flujo anuales como en la oferta de los recursos hídricos y su distribución al interior de la cuenca. Los resultados demuestran que existirá escases de agua a partir del año 2020 para consumo humano, a partir del año 2042 para consumo agrícola, no existiría escasez ni para el consumo ganadero ni para las industrias que cuentan con pozos de abastecimiento propio.

Una ventaja que muestra el uso de WEAP, es la capacidad de incluir el cambio climático en el desarrollo de escenarios futuros, convirtiéndole en una herramienta potencialmente eficaz para informar la formulación de políticas de adaptación climática; es decir que, al utilizar WEAP, pueden crearse escenarios sobre la demanda de agua, infraestructura y regulación ambiental, pudiendo hacer simulaciones en un área en particular, es decir, que la escala a utilizar para la simulación, es la que mejor le convenga al evaluador, pudiendo evaluar desde un pequeño sector de la microcuenca o hasta la cuenca; con esto será posible que WEAP origine resultados que demuestren si se satisface la demanda de agua durante uno o varios meses en particular.

Los datos para simular escenarios de cambio climático en WEAP, para el caso de Nicaragua, pueden derivarse de visores de escenarios de cambio climático sobre Centroamérica para calcular la cantidad de precipitación que cae en un área particular, la cual termina como escorrentía en los arroyos, recarga de aguas subterráneas o evapotranspiración a través de la vegetación.

Modelización de calidad de agua

Según la Organización Mundial de la Salud (2022), más de 200 millones de personas viven en países con escasez de agua, situación que probablemente empeorará en algunas regiones como resultado del cambio climático y el crecimiento de la población. Mishra *et al.*, (2017) aplicaron el modelo WEAP para evaluar la sostenibilidad de los recursos hídricos del valle de Katmandu, Nepal. Se utilizó WEAP para simular las condiciones de calidad de agua del año 2014 y futuras 2020 y 2030 del río Bagmati en términos de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) para explorar opciones alternativas. El análisis tuvo tres componentes principales: hidrológico, calidad de agua y modelado de escenarios.

Estos autores calibraron con WEAP, la descarga mensual con precipitación efectiva y la relación escorrentía/infiltración como parámetros, resultando un desempeño satisfactorio. Los resultados

demonstraron que, una gran parte del río Bagmati está gravemente contaminada a medida que disminuye el Oxígeno Disuelto (OD) y aumenta la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) a medida que el río fluye hacia el centro de la ciudad. Estos valores se mantendrán mucho más allá de los límites aceptables en 2020 y 2030, lo que demuestra el inadecuado manejo de las plantas de tratamiento de aguas residuales, no aliviando así, la contaminación del río. Otra de las grandes ventajas que manifiesta WEAP, es que también contribuye a la planificación del recurso hídrico, a través de simulaciones de la calidad de agua en ríos. Ante esto, y considerando que, Nicaragua es un país rico en recursos hidrológicos, pero que, gran parte del agua superficial está contaminada, resulta hiperactivamente necesario simular al menos los parámetros mínimos para realizar un análisis efectivo, y se tomen las medidas de mitigación que permitan una mejor planificación. Tal como ya se ha mencionado, WEAP ha sido utilizado ampliamente alrededor del mundo en aplicaciones similares, de calidad del recurso, lo que da veracidad y confianza ante la puesta en marcha de este modelo hidrológico.

CONCLUSIONES

El modelo WEAP y SWAT son ampliamente aplicados a nivel mundial como herramientas útiles para conocer el comportamiento y distribución de los recursos hídricos en una cuenca. En cada uno de los estudios citados se comprobó la utilidad de las herramientas, y sus diferencias, en la disponibilidad de datos en cada una. En ese sentido, se ha seleccionado la herramienta WEAP en este artículo como la adecuada para la planificación de los recursos hídrico a pesar de la complejidad de los datos requeridos. No obstante, elegir un modelo u otro, estará en dependencia de la disponibilidad de los datos, objetivos que se persiguen, y de las salidas de interés. Ante la diversidad de escenarios que pueden ser simulados considerando distintas condiciones, distintos enfoques actuales y futuros bajo diferentes regímenes, el presente documento demuestra el enfoque integral del modelo WEAP en aspectos de planificación que son esenciales para gestionar las demandas del recurso agua, para evaluar las estrategias de impacto o mitigación y análisis de calidad del agua, en dependencia del uso final que se le quiera dar. Así mismo, otra de las ventajas es, su capacidad de interactuar con otro software y herramientas útiles de manejo de información.

Una desventaja del modelo WEAP es que se requiere de un rango amplio de datos. Por otro lado, el modelo SWAT es un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado, ya que se requiere información específica sobre el clima y tiempo. El empleo de herramientas de modelación en la evaluación y planificación de los recursos hídricos es un tema pendiente ya que a nivel nacional es casi nula la disponibilidad de información sobre la aplicación de estos modelos, por lo tanto, se requiere investigación y fomentar los casos de estudios nacionales con el fin de obtener resultados con datos confiables y medibles que sean una base sólida para los tomadores de decisión.

REFERENCIA

Asamblea de Nicaragua (2020). Ley N° 1046, Ley de Reforma a la Ley N° 620, Ley General de Aguas Nacionales. Managua, Autor.

- Asencio-Díaz, W. (2020). Modelo Hidrológicos Aplicación Práctica en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Recuperado de: <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/4699/ANA0003195.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Adgolign-Bekele, T., Srinivasa-Rao, G., & Abbulu, Y. (2016). WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 2, 55-70. doi.org/10.1007/s40899-015-0041-4
- Argota-Quiroz, T. (2011). *Simulación Hidrológica de la Cuenca del Rio Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el Modelo SWAT* [Tesis de maestro en ciencias en hidráulica, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, del Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio institucional Instituto Politécnico Nacional <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/5819/1/TRINIDAD%20ARGOTA%20QUIROZ.pdf>
- Arroyo-Morales, A., Heidinger, H., & Araya-Morales, E. (2010). Modelo Hidrológico SWAT como Herramienta para Procesos de Toma de Decisión.
- Alfarra, A. (2004). Modelado de la Gestión de Recursos Hídricos en el Lago Naivasha [Tesis de Maestría]. Instituto Internacional de Geoinformación y Observación de la Tierra.
- Bai, Y.; N., Zhao; R., Zeng y X.. (2018). Storm Water Management of Low Impact Development in Urban Areas based on SWMM. *Water Journal*, 11(33). doi:10.3390/w11010033
- Bhatti, G. & Patel, H. (2015). Estrategias de programación de riego para cultivos de algodón en climas semiáridos usando el modelo WEAP. *Journal of Indian Water Resources Society*, 35(1)
- Cuceloglu, G., Abbaspour, K., & Ozturk, I. (2017). Assessing the water-resources potential of Istanbul by using a soil and water assessment tool (SWAT) hydrological model. *Water (Switzerland)*, 9(10), 814- 832. doi.org/10.3390/w9100814
- Calderon, H. (2010). Dictamen científico técnico de la actual Política Nacional de los Recursos Hídricos (Scientific and technical analysis of the National Water Resources Policy) (pp.28). Managua: National Water Authority.
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Recuperado de: https://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf

- Espinoza-Acuña, M. y Zelaya-Martínez, C. (2022). Aplicación del modelo hidrológico SWAT en unidades hidrográficas de Nicaragua: Simulación del escurrimiento superficial. *Revista La Calera*. ISSN-e: 1998-8850
- Fernández-De Villarán, R. (2017). Utilización del Programa "SWAT" Para la Estimación de la Emisión de Sedimentos en Cuencas. Recuperado de: http://www5.uva.es/trim/TRIM/TRIM12_files/RFernandez.pdf
- Faustino, J.; Jiménez, F. & Kammerbaeur, H. (2007). La Cogestión de cuencas hidrográficas en América Central: Planteamiento conceptual y experiencias (Comanagement of watersheds in Central America: Conceptual set up and implementation). Turrialba, CR, CATIE/Asdi.
- Faustino, J. & García, S. (2001). Manejo de Cuencas hidrográficas (Watershed management). Conceptos, gestión, planificación implementación, y monitoreo. San Salvador, El Salvador.
- Hussen, B., Mekonnen, A., & Pingale, M. (2018). Integrated water resources management under climate change scenarios in the sub- basin of Abaya-Chamo, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 221-240. doi.org/10.1007/s40808-018-0438-9
- Hernández-Vargas, M. (2017). Implementación de la herramienta WEAP al sistema Cutzamala. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hagan, I. (2007). Modelado del impacto de pequeños embalses en la región este superior de Ghana. (Tesis de Maestría). Universidad de Lund, Suecia.
- Kraemer, F., Chagas, C., Vázquez, G., Palacín, E., Santanatoglia, O., Castiglioni, M., & Massobrio, M. (2010) Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. *Revista SCielo*. ISSN electrónico 1850-2067.
- Laino-Guanes, R., Suárez-Sánchez, J., González-Espinosa, M., Musálem-Castillejos, K., Ramírez-Marcial, N., Bello-Mendoza, R., & Jiménez, F. (2017). Modelación del Balance Hídrico y el Movimiento de nutrientes utilizando WEAP: Limitaciones para modelar los efectos de la restauración forestal y el cambio climático en la cuenca alta del río Grijalva. *Aqua-LAC*, 9(1), 46-58. doi.org/10.29104/phi-aqualac/2017-v9-2-04
- López-García T., Manzano-G, M., & Ramírez-L, A. (2017) Disponibilidad hídrica bajo escenario de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 8(1), 105-114. ISSN 0187-8336. doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-08
- Lozano-Velásquez, R., Valeriano-León, K. (2012). Calibración y Validación de un modelo Hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del Río Guadalquivir. *Ciencia Sur Revista Científica*, 7 (8), 72-88. ISSN: 2789-4738

- Levite, H., Hilmy, H. & Julien, C. (2003). Testing Water Demand Management Scenarios in a Water stress, Basin in South Africa: Application of the WEAP Model. 28 (20-27), 779–786. doi10.1016/j.pce.2003.08.025
- Maliehe & Mulungu (2017). Evaluación de la disponibilidad de agua para usos competitivos utilizando SWAT y WEAP en la Cuenca sur de Phuthiatsana. doi.org/10.5377/calera.v22i38.14116
- Mishra, B., Regmi, R., Masago, Y., Fukushi, K. & Saraswat, P. (2017). Evaluación de la contaminación del río Bagmati en el valle de Katmandú: Modelado y análisis basados en escenarios para el desarrollo urbano sostenible, Sostenibilidad del agua Calidad y Ecología. (9):67-77
- Nagdeve, M., Kumar, P., Zhang, Y. y Singh, R. (2021). Fosa de contorno continuo (CCT): Comprensión de los procesos hidrológicos después de la estandarización de dimensiones y el desarrollo de un software fácil de usar. Sciencedirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198720305742>
- Organización Mundial de la Salud (2022). Agua para consumo humano. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Omari, A., Quraan, S., Salihi, A. & Abdulla, F. (2009). A Water Management Support System for Amman Zarqa Basin in Jordan. Water Resources Management. 23, 3165-3189
- Pranesh-Kumar, P., Yongqiang, Z., Ning Ma, Ashok Mishra, Niranjana, P., Rajendra, S. (2021). Selecting hydrological models for developing countries: Perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models. Journal of Hydrology. 600, ISSN 0022-1694. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126561
- Pechlivanidis, I., Jackson, B. McIntyre, N., & Hheater, H. (2011). Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*, 13(3), 193-214.
- Purkey, D., Joyce, S., Vicuna, M., Hanemann, L., Dale D., Yates y Dracup, J. (2007) Robust analysis of future change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climate Change*. doi: 10.1007/s10584-007-9375-8
- Quiroz, A., Paz, O. (2018). Evaluación del Recurso Hídrico disponible Viacha en situación de cambio climático usando el modelo de planificación hídrica de cuencas WEAP. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 59-72.

- Rosenzweig, C., Strzepek, KM, Major, DC, Iglesias, A., Yates, DN, McCluskey, A. y Hillel, D. (2004). Recursos hídricos para la agricultura en un clima cambiante: estudios de casos internacionales ambientales, *14*(4), 345-360.
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Ménez, M. R., Rubio-Granados, E., & Ríos-Berber, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *8* (5), 141-156. doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10
- Singh, M., Shinde, V., Pradhan, SK, Chalodiya, AL y Shukla, KN. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del río Mahanadi en India utilizando el modelo de lluvia-escorrentía, entorno natural y tecnología de contaminación. ISSN: 0972-6268 vol. 13 núm. 2 págs. 385-392
- Singh, V.P., & Woolhiser, D.A. (2002). Mathematical modeling of Watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, *7* (4), 270-292. Recuperado de <https://doi.org/10.1061>
- Salgado, J., & Güitrón, A. (2012). Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos. En: XXII Congreso Nacional de Hidráulica (p. 5), Acapulco, Guerrero, México.
- Sieber, J (2001). *The Water Evaluation and Planning System*. Stockholm Environmental Inst. Boston Tellus Institute. Boston, MA 02116-3411, USA
- Uribe, N. (2010). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Conceptos básicos y guía rápida para el usuario versión SWAT 2005. Recuperado de: <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Yilmaz, B. (2015). Evaluación de los impactos del cambio climático en el balance hídrico de la cuenca de Gediz con el modelo WEAP. *Revista de ciencia y tecnología de ingeniería multidisciplinaria*, *2* (11).

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Ana Fabiola Ortega Pereira. Ingeniera en calidad ambiental, estudiante de maestría de ciencias ambientales con mención gestión ambiental en el Programa de Investigación de Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA) de la UNI. Es servidora pública en una institución del estado. anfaby.2377@gmail.com



Josselyn Marcela Treminio Martínez. Ingeniera en calidad ambiental, estudiante de maestría de ciencias ambientales con mención gestión ambiental en el Programa de Investigación de Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA) de la UNI. Es servidora pública en una institución del estado. marcela.treminio@gmail.com



Ruth Aracelly Méndez Rivas. Ingeniería Civil (UNI), con Maestría en Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Docente-investigadora del Programa de Investigación de Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA) de la UNI.