



## APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

## APPLICATION OF HYDROLOGICAL MODELS

Orianna Sofía Trivisany Rodríguez<sup>1</sup>  
Ruth Méndez Rivas<sup>2</sup>

(Recibido/received: 27-septiembre-2022; aceptado/accepted: 30-noviembre-2022)

**RESUMEN:** Los modelos hidrológicos son herramientas esenciales para la planificación y gestión de los recursos hídricos y del medio ambiente. En las últimas décadas se han desarrollado diversos modelos hidrológicos, cada uno con características y parámetros específicos, con el objetivo de representar mejor la microfísica del ciclo hidrológico, aunque, algunos investigadores han encontrado que incluso el uso de técnicas complejas de modelamiento no garantiza una mejor evaluación, debido a la heterogeneidad del suelo y al cambio climático que desempeña un papel determinante en el comportamiento del régimen hidrológico. En este artículo, se presenta un breve resumen de once distintos modelos hidrológicos, ocho de libre acceso. Los modelos incluidos corresponden al modelo de capacidad de infiltración variable (VIC), TOPMODEL, HBV, MIKE SHE, herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT), HSPF, VELMA, PIHM, KINEROS, WEAP y HEC-HMS. Considerando aspectos como la región de aplicación, escala espacial, datos de entrada y si la interfaz es amigable e intuitiva, se concluye que el modelo SWAT seguido de los modelos HEC-HMS y WEAP son los más versátiles y adecuados para ser aplicados en regiones como Nicaragua. Este estudio proporciona una guía a los modeladores para identificar el tipo de modelo hidrológico que podrían aplicar en una cuenca específica para resolver un problema determinado, así mismo, les permitirá determinar la viabilidad de uno con respecto al otro según la disponibilidad de datos de entrada que se requieran y los recursos disponibles tanto informáticos como financieros.

**PALABRAS CLAVES:** Selección de modelos hidrológicos, escorrentía, protocolo de modelamiento, revisión bibliográfica, SWAT, HEC-HMS, WEAP

**ABSTRACT:** Hydrologic models are essential for planning and managing water resources and the environment. In recent decades, several hydrological models have been developed, each with specific characteristics and parameters, with the aim of better representing the microphysics of the hydrological cycle, although some researchers have found that even the use of complex modeling techniques does not guarantee a better assessment, due to soil heterogeneity and climate change that plays a determining role in the behavior of the hydrological regime. In this article, a summary of eleven different hydrological models, eight of which are freely available, is presented. The models included corresponding to the Variable

<sup>1</sup> Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente, PIENSA. Universidad Nacional de Ingeniería, UNI. Nicaragua. [orisofitra@gmail.com](mailto:orisofitra@gmail.com)

<sup>2</sup> Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente, PIENSA. Universidad Nacional de Ingeniería, UNI. Nicaragua. Investigadora. [ruth.mendez@piensa.uni.edu.ni](mailto:ruth.mendez@piensa.uni.edu.ni), <https://orcid.org/0000-0003-2337-8017>

Infiltration Capacity (VIC) model, TOPMODEL, HBV, MIKE SHE, Soil and Water Assessment Tool (SWAT), HSPF, VELMA, PIHM, KINEROS, WEAP, and HEC-HMS. Considering aspects such as the region of application, the performance given by the efficiency coefficient NSE, input data, and whether the interface is user-friendly and intuitive, it is concluded that the SWAT model followed by the HEC-HMS and WEAP models are the most versatile and suitable to be applied in regions such as Nicaragua. This study provides a guide for modelers to identify the type of hydrological model they should apply in a particular watershed to solve a given problem, as well as to determine the feasibility of one model over the other depending on the availability of the required input data and the available computer and financial resources.

**KEYWORDS:** Hydrological model selection, runoff, modeling protocol, review, SWAT, HEC-HMS, WEAP

## INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua dulce se está estresando en todo el mundo debido al continuo aumento de la población y al acelerado crecimiento socioeconómico (Wang y Yan, 2017; Paul et al., 2021). Este estrés ha provocado severos efectos en el clima, debido al cambio en la humedad del suelo y la evapotranspiración (Dirmeyer, 2011), así mismo, los cambios en el uso del suelo en las partes altas de la cuenca afectan el escurrimiento superficial y la calidad del agua en la parte baja de la cuenca, todos estos procesos físicos y químicos forman parte del sistema hidrológico de una cuenca (Freeman et al., 2007; Alcamo, 2009). La hidrología es la rama de la ciencia que se ocupa de la ocurrencia, distribución y circulación de los recursos hídricos, así como de sus procesos físicas, químicas, biológicas y la forma en cómo reaccionan con el medio ambiente (Ray, 1975), estudiando la interconexión entre los recursos hídricos y el medio ambiente según como se presente en cada una de las fases del ciclo hidrológico (Devi et al., 2015). Incluye todas las fases del agua de la tierra, lo que la hace esencial para la vida humana y el medio ambiente (Chow et al., 2015). Aunque en la práctica, la hidrología se enfoca en el agua terrestre, en conjunto con el ciclo global del agua involucrando el intercambio de agua entre la superficie, el océano, la atmósfera y el subsuelo (Marshall, 2013).

La hidrología tiene varias aplicaciones prácticas, principalmente para la gestión de desastres naturales por inundación, deslizamiento de tierra, planificación del suministro de agua, diseño y funcionamiento de estructuras hidráulicas, reducción de la contaminación, manejo de aguas residuales, riego, control de erosión, sedimentos, entre otros (Shaw et al., 2010; Khalid et al., 2016; Abdulkareem et al., 2018; Pandi et al., 2021). Por lo tanto, la ciencia de la hidrología proporciona los lineamientos para la planificación, gestión y control de los recursos hídricos mediante la aplicación de principios de ingeniería (Abdulkareem et al., 2018). La configuración del sistema hidrológico contempla los cambios en el uso del suelo y la cobertura del suelo generados por la urbanización, deforestación, industrialización y otras formas de cambios, así como el cambio climático y la heterogeneidad del suelo, los cuales afectan directamente el flujo en un en una cuenca (Devi et al. 2015), lo que permite evaluar su estado actual y futuro frente a diferentes escenarios de intervención. Por lo tanto, es crucial un conocimiento profundo de las condiciones hidrológicas que permita enfrentar eficientemente el estrés hídrico a través del diseño de estrategias eficaces de gestión de los recursos hídricos, además que proporcionan una herramienta robusta para los tomadores de decisión.

Garantizar la disponibilidad del recurso hídrico en términos de calidad y cantidad frente a los desafíos que representa la variabilidad y el cambio climático constituye uno de los mayores desafíos que enfrenta la sociedad (Wang y Yan, 2017). Lo que hace imperativo el conocimiento profundo de las condiciones hidrológicas para hacerle frente de manera eficiente mediante una estrategia que permita la gestión de los recursos hídricos. Por otro lado, las observaciones de los procesos hidrológicos representan una barrera en los países en vías de desarrollo, dado que son escasas o inexistentes. En este contexto, el modelamiento hidrológico se convierte en una herramienta poderosa para desarrollar escenarios que proporcionen alternativas de gestión sostenible de los recursos hídricos (Paul et al. 2021). Por lo tanto, se han desarrollado una amplia variedad de modelos hidrológicos para una extensa serie de procesos medioambientales a distintas escalas espaciotemporales (Zhang et al., 2020; Zhang y Chiew, 2009; Bai et al., 2020; Paul et al., 2021; Nagdeve et al., 2021). Cada modelo tiene sus propias características y utiliza diferentes parámetros para proporcionar un mejor ajuste (Martínez-Austira, P. y Patiño-Gómez, C., 2012). La mayoría de estos modelos han sido desarrollados para países desarrollados, en cambio, los países en vías de desarrollo tienen capacidad limitada en modelación, debido a la escasa capacidad técnica para el desarrollo y mantenimiento de los modelos, así como por los costos computacionales para los cálculos. Por ello, la mayoría de los países en vías de desarrollo utilizan modelos hidrológicos a partir de los que han sido desarrollados para otras áreas, esto facilita el modelamiento y ayuda a disminuir las vulnerabilidades en la gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, esto implica tomar en cuenta parámetros físicos, climatológicos y geomorfológicos para la selección del modelo que se adecúe a las condiciones propias del sitio que se quiere emular. Según estudios previos la selección del modelo lo realizan en función de la practicidad, conveniencia, experiencia datos de entrada disponibles y costumbre (Paul et al. 2021).

Dadas las necesidades identificadas, el objetivo de éste artículo es proporcionar una guía que pueda servir como instrumento de selección de modelos hidrológicos que han sido aplicados en otros países y que, a su vez, puedan ser aplicados en Nicaragua. En el proceso, se suministra información básica que debe ser considerada por los modeladores para la selección del modelo, además se propone un protocolo a seguir durante el proceso de construcción del modelo en una zona de estudio específica. Así mismo, se presenta una descripción detallada de once distintos modelos hidrológicos, ocho de libre acceso. Los modelos incluidos corresponden al modelo de capacidad de infiltración variable (VIC), TOPMODEL, HBV, MIKE SHE, SWAT, HSPF, VELMA, PIHM, KINEROS, WEAP y HEC-HMS, analizándolos a escala de cuenca, identificando sus ventajas y desventajas en función de sus escalas espacio-temporal, la forma en como representan los complejos procesos hidrológicos, el número de parámetros y su disponibilidad. Finalmente se describen retos y desafíos para futuras investigaciones, de tal manera que los hidrólogos puedan disponer de información confiable al momento de seleccionar el modelo más apropiado.

## DESARROLLO

### *Selección del modelo hidrológico*

Un modelo puede ser definido como una representación simplificada de un fenómeno o un proceso del mundo real (Sorooshian et al., 2008, Devi et al. 2015, Zhang et al., 2019), es caracterizado por un conjunto de variables y ecuaciones que describen la relación entre estas variables (Solomatine y Wagener., 2011). En hidrología, el modelo busca representar los

diferentes procesos involucrados en el flujo de energía, humedad u otras materias a través del dominio (típicamente la cuenca hidrográfica), como la distribución de la precipitación y la generación de caudales en una cuenca determinada (entradas y salidas) (Jorquera et al. 2014), se utilizan ampliamente para predecir y comprender los procesos hidrológicos (Zhang et al., 2019). El rendimiento y la validez de los modelos hidrológicos pueden variar de una cuenca a otra, según el tamaño de la cuenca y los procesos físicos que gobiernan el sistema (Zhang et al., 2019). En regiones con datos escasos, los modelos más confiables son aquellos con resultados que representan fielmente la realidad con una complejidad de modelo limitada. (Bárdossy, 2007, Immerzeel et al., 2008, Graeff et al., 2012, Hassan et al., 2015, Tegegne et al., 2017).

En los últimos años, con el espectacular desarrollo de las capacidades computacionales y de los algoritmos, respaldado por las nuevas bases de datos distribuidas disponibles, como las precipitaciones por radar, los modelos digitales de elevación de alta resolución (DEM), los datos de satélite de teledetección y la tecnología espacial, se ha publicado un poderoso arsenal de modelos hidrológicos disponibles. Con el número creciente de modelos disponibles, la amplia gama de funciones y la usabilidad potencial, elegir un modelo en particular que mejor se adapte a un problema determinado se convierte en un desafío para los usuarios. Además, cada año se realizan modificaciones y actualizaciones a los algoritmos que permiten mejorar su capacidad de cálculo y objetivo que se plantea alcanzar. Por lo tanto, previo a la selección de un modelo, se sugiere realizar una revisión actualizada, consistente y completa de los modelos hidrológicos (Dhami y Pandey, 2013), a fin de asegurarse que está utilizando la versión más actualizada. Es importante desarrollar modelos que puedan hacer un mejor uso del contenido de información de los datos disponibles (Pechlivanidis et al., 2011). Wheeler (2002) afirmó que generalmente las actualizaciones se realizan con respecto a la estructura de modelado flexibles y económicas, principalmente en términos de número de parámetros, que se puedan adaptar al contenido del sitio en particular.

Para la selección del modelo hidrológico más apropiado, el primer paso consiste en establecer con claridad el propósito del estudio (Addor y Melsen, 2018) o la pregunta de investigación, por ejemplo; ¿Cuál es la interacción entre ciertos elementos químicos y el ciclo hidrológico?, ¿Cuál es la transferencia de agua y energía en una zona determinada?, diseño y ubicación de obras hidráulicas para la protección contra inundaciones, caracterización química del agua en ríos y/o lagos. El segundo paso consiste en identificar los procesos y flujos presentes en el sistema que se quiere modelar en cuanto a las condiciones climáticas y fisiográficas. Posteriormente identificar los modelos hidrológicos disponibles, datos de entrada requeridos y su resolución espaciotemporal. En esta etapa es crucial contar con todos los datos requeridos, por ejemplo, si se ha identificado un modelo de código abierto con un buen rendimiento y no se dispone de los datos necesarios (tipo de suelo, uso y cobertura de suelo, precipitaciones, temperatura, velocidad del viento, entre otros), puede generar un peor resultado al compararse con otro modelo más sencillo (Orth et al. 2015). Finalmente realizar un análisis de confiabilidad entre dos o tres, para determinar cuál es el más apropiado. Por todo lo antes expuesto, se puede concluir que el criterio definitivo para seleccionar un modelo hidrológico es la disponibilidad de datos, código, número de parámetros y la escala espaciotemporal.

#### *Protocolo de modelamiento*

El proceso para realizar el modelamiento ha sido dividido en dos partes. La primera parte corresponde al proceso de construcción del modelo, mientras que la segunda parte, corresponde al protocolo de modelamiento. El proceso de construcción del modelo está compuesto por la percepción que tiene el modelador del sistema que quiere modelar, lo que constituye la base del modelo conceptual, éste no debe confundirse con el término “modelo conceptual” que se discute más adelante. Una vez definido conceptualmente cómo funciona el sistema, se traduce matemáticamente (Solomatine y Wagener, 2011). El modelo matemático formula la percepción conceptual del modelador en ecuaciones de entrada-estado-salida, finalmente, este esquema matemático se implementa mediante un código informático para que el conjunto de ecuaciones pueda ser resueltas computacionalmente (Solomatine y Wagener, 2011).

Con respecto al protocolo de modelamiento, puede dividirse en la identificación y evaluación del modelo. La identificación se refiere a la selección de parámetros que gobiernan el sistema, y la evaluación, se refiere al proceso de comprender el comportamiento y el rendimiento del modelo. Una vez construido el modelo se debe realizar la estimación de los parámetros. Los parámetros describen las propiedades usualmente invariables en el tiempo del sistema específico en estudio (Wagener y Gupta, 2005), es decir, las características físicas locales del sistema. Ejemplo de parámetros son las (i) características del suelo como conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento del suelo o (ii) características de la vegetación. Para la calibración, es necesario evaluar el grado de coincidencia entre las series temporales de salida que fueron simuladas y las observadas, esto se realiza mediante el uso de una función objetivo, una medida basada en las diferencias entre la variable observada y la simulada. La calibración es un proceso de ajuste de parámetros, automático o manual, hasta que la cuenca y el comportamiento del flujo muestren un grado de similitud alto. El grado de similitud es proporcionado por una o más funciones objetivos acompañadas por inspección visual de los hidrogramas observados y simulados (Gupta et al., 2005).

Usualmente las funciones objetivas que han sido empleadas son las que están basadas en el error cuadrático medio (MSE) por ejemplos; la raíz del error cuadrático medio (RMSE) o la eficiencia de Nash-Sutcliff (NSE). Se estiman estos errores al cuadrado bajo el supuesto de normalidad (distribución gaussiana) de los errores del modelo, y el principio de verosimilitud para derivar la función de error. Este proceso consiste en encontrar un conjunto de parámetros que proporcionen el mínimo valor de RMSE o el máximo de NSE (Gupta et al., 2009). Luego de la estimación de parámetros o calibración, se debe realizar la evaluación del modelo, que incluye la validación (verificar el rendimiento del modelo utilizando un conjunto de datos no observados, imitando el funcionamiento del modelo), análisis de sensibilización y de incertidumbre. En Gupta et al., (2008) se presenta un análisis completo para evaluar modelos como evaluación de diagnóstico. El análisis de sensibilidad consiste en determinar como la variabilidad de los parámetros afecta el resultado del modelo. Por su parte, la incertidumbre se define como el estado que refleja la falta de certeza sobre un resultado de un proceso físico o sistema de interés, lo que genere una diferencia potencial entre el resultado y su valor real. La incertidumbre se debe a que el proceso o el sistema está incompleto o a que la información es incompleta o imperfecta, además de la naturaleza aleatoria de la ocurrencia de los eventos (Solomatine y Wagener., 2011). Cuando el modelo está operativo y los datos que continúen siendo recopilados, pueden ser utilizados para la actualizar el modelo, desde los parámetros, variables de estado y/o predicciones, a este proceso se le conoce como asimilación de datos.



Figura 1. Esquema del protocolo de modelamiento

### Clasificación de los modelos hidrológicos

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés), fue uno de los pioneros en introducir términos básicos para clasificar los tipos de modelos, luego una serie de investigadores han propuesto otras clasificaciones (Singh 1995; Singh y Frevert, 2006; Solomatine y Wagener., 2011; Devi et al., 2015; Abdulkareem et al., 2018; Paul et al. 2021), en función de sus parámetros de entrada en el espacio-tiempo y grado de aplicación de los principios físicos. La clasificación utilizada en este estudio ha sido adoptada de Jajarmizadeh et al., (2012) y se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Clasificación de los modelos hidrológicos

Las variables en estos modelos pueden ser la representación del espacio y el tiempo o variables probabilísticas y/o aleatorias, en este caso, el modelo puede clasificarse como estocástico o probabilístico. Un modelo determinístico es el que está gobernado por las leyes de la física y su dinámica observable, en cambio el estocástico está formulado por teorías de probabilidad, lo que genera un resultado aleatorio, en este sentido, los modelos determinísticos proporcionan pronósticos y los estocásticos predicciones (Jajarmizadeh et al. (2012). Los modelos conceptuales, a veces llamados "modelos de caja gris", suelen ser de naturaleza global dependen en gran medida de la calidad de los datos de entrada (Jaiswal et al., 2020), son modelos de precipitación y escorrentía construidos a partir de relaciones empíricas observadas o supuestas de las variables. Este tipo de modelo difiere de los distribuidos de base física, dado que la resolución de éstos, depende de ecuaciones diferenciales que describen las leyes físicas de conservación de la masa, la energía y el momento (Liu et al., 2017).

Los modelos de base física incorporan principios de los procesos físicos, utilizando variables de estado medibles en función del tiempo y el espacio, mediante aproximaciones de diferencias finitas. La calibración no requiere datos hidrológicos y meteorológicos extensos, pero requiere la evaluación de una gran cantidad de parámetros que describen las propiedades físicas de la cuenca. Algunos de los parámetros que requiere corresponden al

contenido de humedad del suelo, profundidad inicial, topografía, dimensiones de las redes fluviales, entre otros (Abbott et al., 1986). El modelo físico supera muchas de las deficiencias de los otros dos modelos mediante el uso de parámetros con interpretación física y se puede aplicar a diferentes situaciones. El modelo SHE/MIKE SHE es un ejemplo (Devi et al., 2015). Los modelos distribuidos pueden hacer predicciones distribuidas espacialmente al dividir toda la cuenca en unidades más pequeñas (generalmente celdas cuadradas o mallas triangulares irregulares), de modo que los parámetros de entrada y los parámetros de salida pueden variar espacialmente (Carvajal y Roldán, 2007). Los modelos continuos producen información continuamente por un periodo de tiempo dado por el modelador, mientras que el basado en eventos producen información solo por un período de tiempo específico (Carvajal y Roldán, 2007; Moradkhani, 2008; Sorooshian et al., 2008).

### Descripción de algunos enfoques de modelamiento

#### VIC (Variable Infiltration Capacity Model)

Es un modelo físico semi distribuido (Liang et al., 1994), los procesos asociados a la filtración, escorrentía y flujo del suelo se basan en relaciones empíricas. Asume heterogeneidad del suelo y la precipitación para simular una escorrentía de saturación excesiva. Está configurado en tres capas (Ver Figura 3), la superior permite la rápida evaporación del suelo, la intermedia representa la respuesta dinámica del suelo a los eventos de precipitación y la inferior se utiliza para caracterizar el comportamiento de la humedad del suelo, lo que permite conocer la dinámica de las interacciones de las aguas superficiales y subterráneas, permitiendo calcular las capas freáticas (Maurer, 2011).

Una característica clave del modelo VIC es la curva de infiltración variable (Gao, 2010). Representa la distribución estadística de la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo dentro de cada celda del modelo y determina la tasa máxima de infiltración y escorrentía de agua para cada cubierta vegetal en el suelo, dependiendo de la celda y la humedad del suelo. El modelo tiene un módulo de control de flujo. Este módulo calcula el tiempo de concentración para cada celda de la cuadrícula. A medida que el río ingresa a su cauce, el patrón de crecida diaria está determinado por la ecuación de continuidad como el balance por partes del agua que pasa por el cauce. (Lohmann et al., 1998).

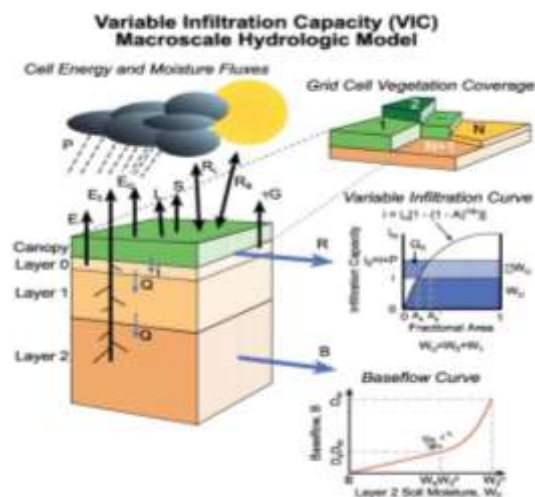


Figura 3. Configuración del VIC. Fuente: Manual de Usuario, 2018

#### TOPMODEL (Topography-Based Hydrological Model)

Este es un modelo semi distribuido de base física (Beven y Kirby, 1979). Utiliza la ecuación de continuidad para estimar la escorrentía a partir de datos geomorfológicos (pendiente, área y perímetro), edáficos (profundidad de perfil, profundidad de raíz, déficit inicial de calibración)

y climatológicos (precipitación diaria, evapotranspiración y caudales). El objetivo principal es calcular el déficit del embalse o la profundidad del nivel freático en punto dado (Franchini et al., 1996).

El área de contribución aguas arriba (Figura 4) representa el área que potencialmente podría generar escorrentía hacia la salida de la cuenca. Una representación de cuadrícula del terreno debe ser reemplazada por el área de drenaje inclinada por unidad de longitud de contorno, que es el tamaño de celda de la cuadrícula DEM. Las regiones asociadas con valores altos de TWI tienden a saturarse primero y, por lo tanto, representan regiones potenciales del subsuelo o la superficie para contribuir (Jeziorska y Niedzielski, 2018).

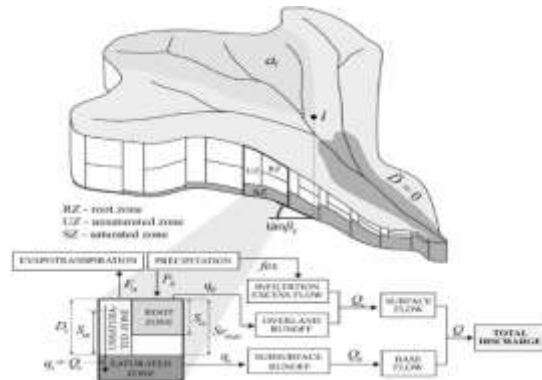


Figura 4. Un esquema de TOPMODEL. Fuente: Jeziorska y Niedzielski, 2018

#### MODELO HBV (Hydrologiska Byrans Vattenavdelning)

Es un modelo conceptual semi distribuido (Bergström, 1976). Toda la cuenca se divide en subcuencas, que a su vez se dividen en diferentes zonas de elevación y vegetación. Funciona con datos diarios y mensuales, la temperatura del aire y la evaporación. Se desarrolló originalmente para cuencas escandinavas, pero también ha demostrado su utilidad en las regiones tropicales y subtropicales.

Utiliza valores diarios de precipitación, temperatura y mensuales de evapotranspiración potencial. Divide la cuenca en subcuenca, y ésta se subdivide en zonas según la elevación, superficie de lago y vegetación. La Figura 5 muestra una versión simplificada del modelo HBV. HBV-light es la última versión y utiliza una fase de calentamiento en la que las variables de estado reciben valores correctos en función de los datos meteorológicos (Harlin, 1991).



Figura 5. Configuración del modelo HBV. Fuente: Shrestha et al., 2009

#### MODELO MIKE SHE (Systeme Hydrologique European)

MIKE SHE fue desarrollado en 1990 (Danish Hydraulic Institute (DHI), 2022), simula los componentes hidrológicos, incluido el flujo superficial, subsuperficial no saturado, evapotranspiración, flujo subterráneo en zona saturada y el intercambio entre aguas superficiales y las subterráneas.



Simula calidad del agua y aplicaciones para grandes cuencas fluviales, por ello, requiere extensos parámetros físicos (Kristensen y Jensen, 1975). Es un modelo dispersivo determinista basado en la física para simular varios procesos en las facies terrestres del ciclo del agua, utilizando ecuaciones diferenciales parciales para la conservación de la masa, el impulso y la energía (DHI, 2022). Además, simula las operaciones de uso y gestión del agua, tales como sistemas de riego, pozos de bombeo y diversas estructuras de control del agua. (Golmohammadi et al., 2014; Refsgaard y Storm, 1995).

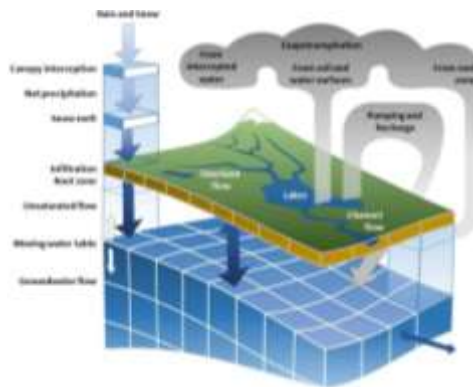


Figura 6. Procesos hidrológicos simulados por MIKE SHE. Fuente: DHI, 2022

#### MODELO SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

El SWAT es un modelo de cuencas hidrográficas diseñado para trabajar con datos de entrada fácilmente disponibles, como tipo y uso de suelo, precipitación, temperatura y radiación solar, lo que hace que la inicialización sea sencilla para la recopilación y calibración (Texas A&M University, 2012). Es un modelo distribuido con enfoque agrícola para predecir el impacto de las prácticas agrícolas en la calidad y cantidad del agua a escala de cuenca, modela escorrentía a largo plazo y la pérdida de nutrientes de las cuencas hidrográficas rurales. Existe una extensa base de datos sobre las investigaciones desarrolladas utilizando SWAT en [https://www.card.iastate.edu/swat\\_articles/](https://www.card.iastate.edu/swat_articles/). Aunque estos datos pueden ser espacialmente explícitos, SWAT agrupa los parámetros en unidades de respuesta hidrológica (HRU), ignorando la distribución espacial subyacente. HRU se define por la confluencia de la pendiente, el tipo y uso de la tierra (Arnold et al., 1998), para determinar el flujo superficial y subterráneo, la evapotranspiración, la filtración, la infiltración y la humedad del suelo para cada unidad hidrológica (Easton et al., 2010).

#### MODELO HSPF (Hydrological Simulation Program- FORTRAN)

El Programa de Simulación Hidrológica - FORTRAN (HSPF) (Bicknell et al., 1993) es un paquete integral para simular la hidrología de cuencas hidrográficas y la calidad del agua para contaminantes orgánicos tóxicos y convencionales (US EPA, 2015). HSPF integra el Modelo de Gestión de las Escorrentías Agrícolas (Agricultural Runoff Management Model o ARM) y el Modelo de Escorrentía No Puntual (Non Point Source Runoff Model o NPS) en un marco analítico a escala de cuenca hidrográfica que involucra el destino y el transporte de flujo unidimensionales. Este modelo permite la simulación integrada de los procesos de escorrentía, transporte de contaminantes en zona no saturada, y las interacciones hidrodinámicas y sedimento-químicas dentro de los cursos de agua, para estimar la escorrentía, carga de sedimentos, concentraciones de nutrientes y pesticidas por cada una de las unidades hidrológicas (Zhang et al., 2009). En <https://csdms.colorado.edu/wiki/HSPF-Publications> se puede revisar la base de datos de las investigaciones que han sido realizadas hasta la actualidad.

#### MODELO VELMA (Visualizing Ecosystems for Land Management Assessments)

El modelo Visualización de Ecosistemas para la Evaluación de la Gestión del Suelo (VELMA por sus siglas en inglés) (U.S. EPA, 2022) describe los procesos de cambio hidrológico y biogeoquímico dentro de las cuencas hidrográficas como el ciclo hidrológico, el carbono y el nitrógeno en plantas y suelos, y el transporte de formas disueltas de carbono y nitrógeno desde el paisaje terrestre hasta los ríos (Abdelnour et al. 2011). Simula la interacción entre el clima y el cambio de uso de la tierra interactúan para determinar la retención de agua del suelo, escorrentía de aguas superficiales y subterráneas, drenaje vertical, evapotranspiración, dinámica de la vegetación, carbono en el suelo, el transporte de nitrógeno orgánico, nitrato y amonio disuelto. Los submodelos hidrológicos y biogeoquímicos de VELMA se validaron para simular los impactos del cambio climático y el uso de la tierra en ríos, la química en ríos y la dinámica del carbono y el nitrógeno de los ecosistemas (Mckane et al., 2014).

#### MODELO PIHM (*Penn State Integrated Hydrological Modeling System*)

El modelo hidrológico integrado de Penn State (PIHM, por sus siglas en inglés) (Qu, 2005) es un modelo hidrológico orientado a múltiples niveles, escalas y procesos que acopla completamente los principales procesos hidrológicos utilizando un método de volumen finito semidiscreto. Incluye los procesos de aguas superficiales, subterráneas, evaporación, transpiración, infiltración, reabastecimiento, escorrentía superficial (Qu y Duffy, 2007).

El sistema de modelado no solo permite el despliegue rápido de sus parámetros, sino que también facilita su desarrollo colaborativo para aplicaciones en áreas de investigación (Shu et al., 2019). Los elementos triangulares de la superficie terrestre se proyectan hacia abajo hasta el lecho de roca o el regolito para formar un elemento prismático en tres dimensiones. Los elementos lineales representan ríos y se proyectan hacia abajo hasta el lecho del río (Kumar et al., 2009). El modelo está diseñado para capturar la "dinámica" en múltiples procesos, manteniendo la conservación de la masa en todas las celdas, como garantiza la formulación de volumen finito (Figura 7).

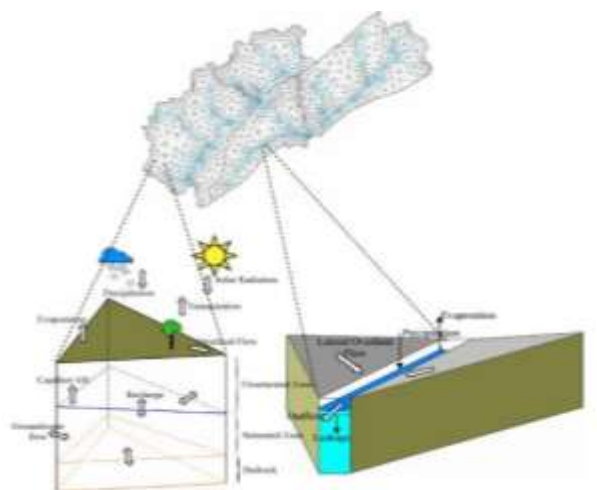


Figura 7. Procesos hidrológicos que interactúan en PIHM. Fuente: Kumar et al., 2009

#### KINEROS2 o K2 (*Kinematic Runoff and Erosion*)

K2 (Woolhiser et al., 1990) es un modelo de base física orientado a eventos que describe los procesos de interceptación, infiltración, escorrentía superficial, y erosión en pequeñas cuencas agrícola y urbanas. Utiliza ecuaciones de movimiento unidimensionales para simular flujos en planos rectangulares, canales abiertos trapezoidales, canales circulares y flujos a través de pequeños embalses. Ha sido utilizado para evaluar el impacto de represas, circuitos principales y canales revestidos en los hidrogramas de inundación y la formación de

sedimentos, dado que calcula los volúmenes de escorrentía y erosión a nivel de cuenca (Semmens et al. 2007, Tajbakhsh et al., 2018, USDA, 2022).

**MODELO WEAP (WATER EVALUATION AND PLANNING)**

Es una herramienta diseñada para la planificación integrada de recursos hídricos, proporciona un marco integral, flexible y fácil de usar para el análisis de políticas. Establece como condición la demanda de agua, patrones de uso del agua, eficiencia de los equipos, estrategias de reutilización, costos y esquemas de asignación de agua, en igualdad de condiciones con los aspectos de la oferta, como ríos, recursos de aguas subterráneas, embalses y las transferencias (Stockholm Environment Institute, 2020). Posee un enfoque integral para simular componentes tanto naturales como de infraestructura de los sistemas de agua, brindando a los planificadores, una visión más completa de los factores a considerar al administrar los recursos hídricos para el uso actual y futuro (Asghar et al., 2019, Sieber, 2022).

**MODELO HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)**

El HEC-HMS (Feldman, 2000) es una herramienta que integra todos los procesos hidrológicos en los sistemas de cuencas dendríticas, bajo condiciones naturales o controladas, basándose en el conjunto de datos meteorológicos, tipos y uso de suelo. Los datos espaciales son procesados con el HEC-GeoHMS y luego importados por HEC-HMS, para el modelo de flujo (Ver Figura 8). El HEC-HMS contiene cuatro componentes; 1) Un modelo analítico para calcular la escorrentía dl flujo superficial y el trazado de canales, 2) interfaz gráfica de usuario que muestra los componentes del sistema hidrológico, 3) sistema de almacenamiento y gestión de datos, especialmente los conjuntos de datos variables en el tiempo y 4) un sistema de visualización de los resultados (Halwatura y Najim, 2013). Puede ser aplicado para análisis de inundaciones, frecuencia de las inundaciones, planificación de la capacidad de vertederos, restauración de ríos, entre otros (US Army Corps of Engineers, 2018, Tassew et al., 2019).

El HEC-HMS ofrece un total de nueve métodos de pérdida, algunos de estos métodos están diseñados para simular eventos y otros para la simulación continua. El método del hidrograma unitario de Snyder (Yilma y Moges, 2007; Hunukumbura et al., 2008; Fang et al., 2005) y el de Clarck (Cunderlik y Simonovic, 2010; Straub et al., 2000; Banitt, 2010) han sido utilizados para simular flujos de corriente a largo plazo.

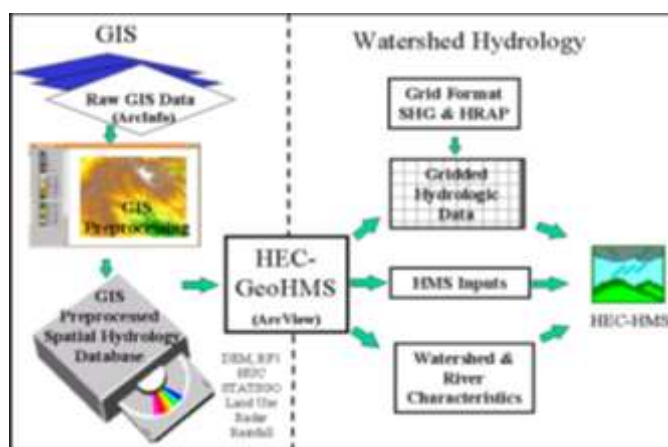


Figura 8. Esquema general entre el HEC-GeoHMS y HEC-HMS

En la Figura 9 se muestran el número de parámetros que son requeridos por cada uno de los modelos que han sido analizados. Se observa que los modelos que requieren mayor número de parámetros corresponden al SWAT, PIHM, seguido por el TOPMODEL y el HEC-HMS, mientras que el K2 corresponde al modelo que requiere menor cantidad de parámetros. En la

Tabla 1 se muestran las características básicas de los modelos, en la cual se indica, la disponibilidad del código, tipo de modelo, escala y resolución espacial, ecuación que gobiernan el sistema que están simulando y los datos de entrada.

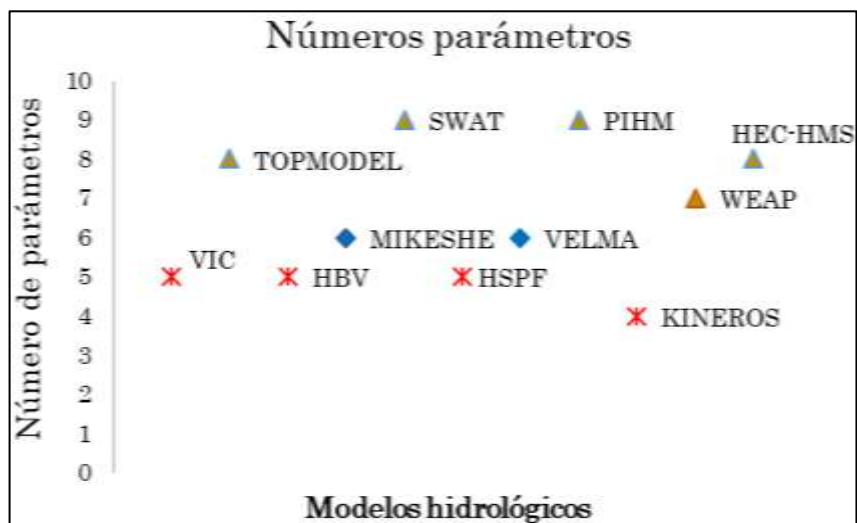


Figura 9. Números de parámetros requeridos por cada modelo hidrológico

Tabla N°1 Características básicas de los modelos hidrológicos estudiados

Modelo/ Refer	Tipo de modelo	Disp., código	Escala espacial	Ecuaciones gobiernan	Interfaz	Datos de entrada
VIC / Liang et al., 1994	Base física	○	Global /0.1°	Balance de masa de agua	No	hidrometeorológicos, tipo y uso de suelo, elevación
TOPMODEL / Beven y Kirby, 1979	Conceptual- Base física	○	Cuenca /0,045°	Distribución del índice topográfico	No	Caudal, infiltración, evaporación, déficit de saturación local, tasa de recarga, humedad inicial.
HBV / Bergström y Forsman, 1973	Conceptual	●	Continental /0,036°	Balance de masa de agua	Sí	Velocidad escorrentía, evapotranspiración, coeficiente de potencia de descarga subsuperficial, coeficiente de potencia de recarga y percolación.
MIKE SHE / Abbott et al., 1986	Base física	● (licencia perpetua)	Cuenca / 0,33"	Método Kristensen y Jensen, Ecuación de Richards, Método de	Sí	hidrometeorológicos, tipo y uso del suelo, elevación, calidad del agua

				Depósito Lineal		
SWAT / Neitsch et al., 2011	Base física	○	global cuenca/ HRU	Ecuaciones exponenciales	Sí	Elevación, tipo y uso del suelo, embalses, geometría de los canales, hidrometeorológicos, calidad del agua, prácticas de gestión agrícola.
HSPF / Bicknell et al., 1993	Conceptual	○	Cuenca /1"	Ecuación Chezy-Manning	No	elevación, tipo y uso del suelo, caudal, permeabilidad, área de umbral de la subcuenca
VELMA / Mckane et al., 2014	Base física	●	Cuenca /0,33"	Ecuación de Carslaw y Jaeger, Ecuación de Hooghoudt	No	Elevación, datos hidrometeorológicos, temperatura del aire, valores del índice de calor, coeficiente de precipitación, escorrentía
PIHM / Penn State University, 2019	Base física	○	Multi escala	Ecuación de St. Venant, Ecuación de Richard, Modelo Bucket, Método Pennman-Monteith	Sí	Datos hidrometeorológicos, temperatura, humedad, velocidad del viento, radiación solar neta, presión de vapor, conductividad hidráulica vertical y horizontal, porosidad
KINEROS / USDA 2022	Base física	○	Cuenca /0,33"	Ecuación cinemática unidimensional	No	Conductividad hidráulica del área efectiva saturada, el estímulo de los capilares y la porosidad
WEAP / Stockholm Environment Institute, 2020	Base física	● (Exepcoines)	Cuenca /0,5°	Modelo de Dos cubos	Sí	Mapa aéreo, datos de acuíferos, datos hidrometeorológicos, datos hidroeléctricos, mapa de suelo, mapa topográfico, datos de contaminación del agua

HEC-HMS / US Army Corps of Engineers, 2018	Base física	○	Cuenca /hidrograma	modelo de enrutamiento	Sí	Hidrometeorológicos, radiación solar, temperatura, tipos y usos del suelo, elevación, sedimentación
--	-------------	---	-----------------------	---------------------------	----	--

## CONCLUSIÓN

En esta investigación se ha realizado una revisión de once distintos modelos hidrológicos ampliamente utilizados alrededor del mundo, para diferentes aplicaciones, en función de su resolución espacial y cantidad de datos de entrada que permita compararlos entre sí, con el objetivo de proporcionar una base de referencia para la selección del modelo por parte de los investigadores y desarrolladores de proyectos. Las conclusiones y recomendaciones son las siguientes:

Ningún modelo ofrece un nivel de certidumbre equivalente al 100% y, por lo tanto, siempre están sujetos a actualizaciones. Sin embargo, un modelo recientemente actualizado para un área específica bajo condiciones específicas presenta mejores resultados que las versiones anteriores. El equilibrio entre la estructura del modelo y el número de parámetros de entrada siempre serán un reto.

La selección del modelo estará definida por la disponibilidad y formato de los datos de entrada, y de los requerimientos de la representación de los procesos hidrológicos. Dado que un modelo complejo no garantiza resultados óptimos, se recomienda utilizar un modelo sencillo si el objetivo del estudio no requiere una configuración detallada como la dinámica de riego y las aguas subterráneas.

Para evitar sesgos, se debe tener en cuenta las habilidades del modelador para la selección del modelo, por ejemplo; un principiante puede seleccionar considerando la interfaz de usuario, en cambio, un modelador experimentado, se concentrará en los procesos y parametrización del modelo.

Como academia se debe pensar en desarrollar modelos hidrológicos propios, según las condiciones climáticas, geomorfológicas, entre otros.

Se recomienda la configuración de una plataforma web que recopile los diferentes tipos de datos de entrada que requieren los modelos hidrológicos actualmente desarrollados, a diferentes escalas espaciales y temporales que facilite la selección del modelo. Esto podría ser efectivo, bajo la coordinación entre la academia y las instituciones del gobierno encargadas de la gestión de los recursos hídricos.

Promover el uso de los modelos hidrológicos a todos los niveles, desde nivel principiante hasta niveles avanzados, así como el desarrollo de simposios y conferencias que permitan compartir experiencias y lecciones aprendidas.

Al analizar las diferentes capacidades de los modelos investigados en este artículo, tales como estructura del modelo y asimilación de datos, así como la disponibilidad de datos, se concluye

que el modelo SWAT, seguido por los modelos HEC-HMS y WEAP, son los que presentan mejores oportunidades de aplicación en Nicaragua.

## REFERENCIAS

- Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., O'Connell, P., y Rasmussen, J., (1986). *An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen 'SHE'. 2: Structure of a physically based, distributed modelling system*. J. Hydrol. 87, 61–77.
- Abdelnour A., Stieglitz M., Pan F. y McKane R., (2011). *Catchment hydrological responses to forest harvest amount and spatial pattern*. Water Resources Research 47 (9), W09521. doi:10.1029/2010WR010165
- Abdulkareem, J., Pradhan, B., Sulaiman, W., y Jamil, N. R. (2018). *Review of studies on hydrological modelling in Malaysia*. Modeling Earth Systems and Environment, 4(4), 1577–1605. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0509-y>
- Addor, N., y Melsen, L., (2018). *Legacy, Rather Than Adequacy, Drives the Selection of Hydrological Models*. Water Resources Research, 55(1), 378–390. <https://doi.org/10.1029/2018wr022958>
- Alcamo, J., (2009). *Managing the global water system*. In: Levin, S. (Ed.), Princeton guide of ecology. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R., y Williams, J., (1998). *LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT*. Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Asghar, A., Iqbal, J., Amin, A., y Ribbe, L., (2019). *Integrated hydrological modeling for assessment of water demand and supply under socio-economic and IPCC climate change scenarios using WEAP in Central Indus Basin*. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 68(2), 136–148. <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.106>
- Bai, P., Liu, X., Zhang, Y., y Liu, C., (2020). *Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China*. Water Resour. Res.
- Banitt, M. (2010). *SIMULATING A CENTURY OF HYDROGRAPHS -MARK TWAIN RESERVOIR*. [https://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/8E\\_Banitt\\_03\\_02\\_10.pdf](https://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/8E_Banitt_03_02_10.pdf)
- Bárdossy, A., (2007). *Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments*. Hydrology and Earth System Sciences, 11(2), 703–710. <https://doi.org/10.5194/hess-11-703-2007>
- Bergström, S., y Forsman, A., (1973). *DEVELOPMENT OF A CONCEPTUAL DETERMINISTIC RAINFALL-RUNOFF MODEL*. Hydrology Research, 4(3), 147–170. <https://doi.org/10.2166/nh.1973.0012>
- Bergström, S., (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. SMHI RHO 7. Norrköping. 134.
- Beven, K. y Kirkby, M., (1979). *A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology*. Hydrological Sciences Bulletin 24, 43-69.

- Bicknell, B., Imhoff, J., Kittle, J., Donigian, A., y Johanson, R., (1993). *Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF): User's Manual for Release 10*. EPA-600/R-93/174.
- Burges, S. J. (1986). Trends and directions in hydrology. *Water Resources Research*, 22(9S), 1S-5S. <https://doi.org/10.1029/WR022i09Sp0001S>
- Carvajal, L., y Roldán, E., (2007). *Calibración del Modelo Lluvia-Escorrentia agregado GR4J Aplicación: Cuenca del río Aburrá*. 74, 73–87. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n152/a07v74n152.pdf>
- Chow, V., Maidment, D., y Mays, L., (1988) *Applied hydrology*, pp 12–34
- Cunderlik, J. y Simonovic, S., (2010). *Hydrologic models for inverse climate change impact modeling*. In: 18th Canadian Hydro-technical Conference, Manitoba, August 2007
- Danish Hydraulic Institute (DHI)., (2022). *MIKE SHE An Integrated Hydrological Modelling System- User Guide*. Edición 2022.
- Devi, G., Ganasri, B., y Dwarakish, G., (2015) *A Review on hydrological models*. In: *International conference on water resources, coastal and ocean engineering (ICWRCOE)*, pp 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Dhami, B., y Pandey, A. (2013). *COMPARATIVE REVIEW OF RECENTLY DEVELOPED HYDROLOGICAL MODELS*. *Journal of Indian Water Resources Society*, 33(3), 34-42.
- Dirmeyer, P., (2011). *The terrestrial segment of soil moisture-climate coupling*. *Geophysical Research Letters*, 38(16), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011gl048268>
- Easton, Z., Fuka, D., White, E., Collick, A., Biruk Ashagre, B., McCartney, M., Awulachew, S., Ahmed, A. y Steenhuis, T., (2010). *A multi basin SWAT model analysis of runoff and sedimentation in the Blue Nile, Ethiopia*. *Hydrology and earth system sciences* 14, 1827-1841.
- Estrada, V., y Pacheco, R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 71-80.
- Jorquera, E., Weber, J., y Reyna, S. (2014). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada*. [https://www.researchgate.net/publication/266885248\\_Revision\\_del\\_estado\\_del\\_arte\\_en\\_la\\_modelacion\\_hidrologica\\_distribuida\\_e\\_integrada](https://www.researchgate.net/publication/266885248_Revision_del_estado_del_arte_en_la_modelacion_hidrologica_distribuida_e_integrada)
- Fang, X., Cleveland, T., Garcia, C., Thompson, D., y Malla, R., (2005). *Literature Review on Timing Parameters for Hydrographs*. Department of Civil Engineering, Lamar University, Beaumont, Texas, p. 77.
- Feldman, A., (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, Davis, CA, USA.
- Franchini M, Wendling J, Obled C y Todini E., (1996). *Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL*. *Journal of Hydrology*, 175(1-4): 293-338. doi: 10.1016/S0022-1694(96)80015-1



- Freeman, M., Pringle, C., y Jackson, C., (2007). *Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales*. JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc. 43 (1), 5–14. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00002.x>
- Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T., Su, F., Sheffield, J., Pan, M., Lettenmaier, D., y Wood, E., (2010). *Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model*. In Algorithm Theoretical Basis Document for Terrestrial Water Cycle Data Records (in review).
- Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., y Rudra, R., (2014). *Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT*. Hydrology, 1(1), 20–39. <https://doi.org/10.3390/hydrology1010020>
- Graeff, T., Zehe, E., Blume, T., Francke, T., y Schröder, B., (2012). *Predicting event response in a nested catchment with generalized linear models and a distributed watershed model*. Hydrological Processes, 26(24), 3749–3769. <https://doi.org/10.1002/hyp.8463>
- Graham, B. (2010). *Hydrological Modelling: How and Why it is Used*. Department of Primary Industries, Parks, Water and Environment, Tasmania, 32.
- Gupta, H., Beven, K., y Wagener, T., (2005). *Model calibration and uncertainty estimation*. In: Andersen M (ed.) Encyclopedia of Hydrological Sciences, pp. 2015--2031. New York, NY: Wiley.
- Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., y Martinez, G. (2009). *Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling*. Journal of Hydrology 377: 80—91.
- Gupta, H., Wagener, T., y Liu, Y., (2008). *Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation*. Hydrological Processes, 22(18), 3802–3813. <https://doi.org/10.1002/hyp.6989>
- Halwatura D. y Najim M., (2013). *Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment*. Environmental Modelling & Software, Volume 46, Pages 155-162. ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- Harlin, J., (1991). *Development of a Process Oriented Calibration Scheme for the HBV Hydrological Model*. Hydrology Research, 22(1), 15–36. <https://doi.org/10.2166/nh.1991.0002>
- Hassan, Z., Shamsudin, S., Harun, S., Malek, M. A., y Hamidon, N., (2015). *Suitability of ANN applied as a hydrological model coupled with statistical downscaling model: a case study in the northern area of Peninsular Malaysia*. Environmental Earth Sciences, 74(1), 463–477. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4054-y>
- Hunukumbura, P., Weerakoon, S., y Herath, S., (2008). *Runoff modeling in the upper Kotmale Basin*. In: Hennayake, N., Rekha, N., Nawfhal, M., Alagan, R., Daskon, C. (Eds.), Traversing No Man's Land, Interdisciplinary Essays in Honor of Professor Madduma Bandara. University of Peradeniya, Sri Lanka, pp. 169e184.
- Immerzeel, W., Gaur, A., y Zwart, S., (2008). *Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment*. Agricultural Water Management, 95(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.08.006>

- Jaiswal, R., Ali, S., y Bharti, B., (2020). *Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall–runoff models*. Applied Water Science, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1122-6>
- Jeziorska, J., y Niedzielski, T., (2018). *Applicability of TOPMODEL in the mountainous catchments in the upper Nysa Kłodzka river basin (SW Poland)*. Acta Geophysica, 66(2), 203–222. <https://doi.org/10.1007/S11600-018-0121-6/FIGURES/8>
- Khalid, K., Ali, M., Rahman, N., y Mispan. M., (2016). *Application on one-at-a-time sensitivity analysis of semi-distributed hydrological model in tropical watershed*. IACSIT Int J Eng Technol 8:132–136. <https://doi.org/10.7763/IJET.2016.V8.872>
- Kristensen, K. y Jensen, S., (1975). *A model of estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration*. Nordic Hydrology. 6, 170-188.
- Kumar, M., Bhatt, G., y Duffy, C., (2009). *An efficient domain decomposition framework for accurate representation of geodata in distributed hydrologic models*. International Journal of Geographical Information Science. <https://doi.org/10.1080/13658810802344143>
- Liang, X., Lettenmaier, D., Wood, E., y Burges, S., (1994). *A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models*. Journal of Geophysical Research, 99(D7), 14415. <https://doi.org/10.1029/94jd00483>
- Liu, Z., Wang, Y., Xu, Z., y Duan, Q., (2017). *Conceptual Hydrological Models*. Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting, 1–23. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3\\_22-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_22-1)
- Lohmann, D., Raschke, E., Nijssen, B., y Lettenmaier, D., (1998). *Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model*. Hydrological Sciences Journal. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626669809492107>
- Marshall, S., (2013). *Hydrology*. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.05356-2>
- Martínez-Austira, P. y Patiño-Gómez, C., (2012). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México*. Ciencias del Agua, Vol. III, No. 1, pp. 5-20.
- Maurer, E., (2011). *VIC Hydrology Model Training Workshop-Part I: About the VIC Model, Presentation*, url: [http://www.engr.scu.edu/~emaurer/chile/vic\\_taller/01\\_vic\\_training\\_overview\\_processes.pdf](http://www.engr.scu.edu/~emaurer/chile/vic_taller/01_vic_training_overview_processes.pdf)
- Mckane, R., Brookes, A., Djang, K., Stieglitz, M., Abdelnour, A., Halama, J., Pettus, P., y Phillips, D., (2014). *VELMA Version 2.0 User Manual and Technical Documentation*. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-01/documents/velma\\_2.0\\_user\\_manual.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-01/documents/velma_2.0_user_manual.pdf)
- Jajarmizadeh, M., Harun, S. y Salarpour, M., (2012). *A Review on Theoretical Consideration and Types of Models in Hydrology*. Journal of Environmental Science and Technology 5(5): 249-261. ISSN 1994-7887 / DOI:10.3923/jest.2012.249.261
- Moradkhani, H. y Sorooshian, S., (2008). *General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis*. Hydrological modeling and the water cycle, s.l.: Springer.

- Nagdeve, M., Paul, P., Zhang, Y., y Singh, R., (2021). *Continuous Contour Trench (CCT): understandings of hydrological processes after standardization of dimensions and development of a user-friendly software*. Soil Tillage Res. 205 (C), 104792 <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104792>.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. y Williams, J., (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. College Station: Texas Water Resources Institute
- Ogden, F. L. (2021). Geohydrology: Hydrological Modeling. En *Encyclopedia of Geology* (Second Edition) (pp. 457-476). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00115-6>
- Orth, R., Staudinger, M., Seneviratne, S., Seibert, J., y Zappa, M., (2015). *Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models*. J. Hydrol. 523, 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.044>.
- Pandi, D, Kothandaraman S., y Kuppusamy M., (2021). *Hydrological models: a review*. International Journal of Hydrology Science and Technology 2021 12:3, 223-242
- Paul, P., Zhang, Y., Ma, N., Mishra, A., Panigrahy, N., y Singh, R., (2021). *Selecting hydrological models for developing countries: Perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models*. Journal of Hydrology 600 (2021) 126561. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126561>
- Pechlivanidis, I., Jackson, B., McIntyre, N., y Wheeler, 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. *GlobalNEST International Journal*, 13, 193-214.
- Qu, Y., (2005). *"An integrated hydrologic model for multi-process simulation using semi-discrete finite volume approach."* PhD diss., Pennsylvania State University. [http://www.pihm.psu.edu/Downloads/Articles/qu\\_thesis.pdf](http://www.pihm.psu.edu/Downloads/Articles/qu_thesis.pdf)
- Qu, Y., y Duffy, C., (2007). *"A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation."* Water Resour. Res. 43 (8): W08419. <https://doi.org/10.1029/2006WR005752>.
- Ray, K., (1975). *Hydrology for engineers*. McGraw Hill, Kogakusha
- Refsgaard, J., y Storm, B., (1995). *MIKE SHE*. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resource Publications, CO, USA, 806-846.
- Semmens, D., Goodrich, D., Unkrich, C., Smith, R., Woolhiser, D., y Miller, S., (2007). *KINEROS2 and the AGWA modeling Framework*. In H. Wheeler, S. Sorooshian, y K. Sharma (Eds.), *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas* (International Hydrology Series, pp. 49-68). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511535734.006
- Shaw, E., Beven, K., Chappell, N., y Lamb, R., (2010). *Hydrology in practice*. CRC Press, New York

- Shrestha, D., Kayastha, N., y Solomatine, D., (2009). *Encapsulation of Monte-Carlo Uncertainty Analysis Results in a Predictive Machine Learning Model*. Delft University of Technology.
- Shu, L., Ullrich, P., y Duffy, C., (2019). *A fast/automated watershed modeling workflow with the Penn State Integrated Hydrologic Model (PIHM): Essential data, simulation, applications and visualization*. AGU Fall Meeting Abstracts, H53K1918. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFM.H53K1918S/abstract>
- Sieber, J., (2022). *WEAP: Water Evaluation And Planning System*. Weap21.org. <https://www.weap21.org/index.asp?action=201>
- Singh, V., (1995). *Computer models of watershed hydrology*, vol 1130. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO
- Singh, V. y Frevert, D., (Eds.), (2006). *Watershed Models*. Taylor and Francis group, 3- 14 pp
- Singh, V. P. (2018). Hydrologic modeling: Progress and future directions. *Geoscience Letters*, 5(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>
- Solomatine, D. y Wagener, T., (2011). *Hydrological Modeling*. Vol. 2.16 (435-457). 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.
- Sorooshian, S., Sharma, K. y Wheeler, H., (2008). *Hydrological Modeling in Arid and Semi-Arid Areas*, New York: Cambridge University Press.
- Stockholm Environment Institute, (2020). *WEAP*. SEI. <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/weap/>
- Straub, T., Melching, C., y Kocher, K., (2000). *Equations for estimating Clark unit hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois*. In: Water-resources Investigations Report 00-4184. Illinois Department of Natural Resources, Office of Water Resources U.S. Geological Survey, Urbana, Illinois, pp. 4-6.
- Tajbakhsh, S., Memarian, H., Sobhani, M. y Afshar, A., (2018). *Kinematic runoff and erosion model efficiency assessment for hydrological simulation of semi-arid watersheds*. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 4. DOI: 10.22034/GJESM.2018.04.02.002
- Tassew, B., Belete, M., y Miegel, K., (2019). *Application of HEC-HMS Model for Flow Simulation in the Lake Tana Basin: The Case of Gilgel Abay Catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia*. *Hydrology*, 6(1), 21. <https://doi.org/10.3390/hydrology6010021>
- Tegegne, G., Park, D., y Kim, Y., (2017). *Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin*. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 14, 49–66. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.10.002>
- Texas A&M University., (2012). *SWAT | Soil & Water Assessment Tool*. Tamu.edu. <https://swat.tamu.edu/>
- U. S. Army Corps of Engineers, USACE, (2010). *HEC-GeoHMS geospatial hydrologic modeling extension, Version 5.0 - User's Manual*. Davis, CA, pp 3-1.

- U.S. EPA., (2022). *Visualizing Ecosystem Land Management Assessments (VELMA) 2.1 Modeling Tool*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recorddisplay.cfm?deid=354355>
- University of Washington Computational Hydrology Group., (2018). *Model Overview - VIC*. VIC User Guide. <https://vic.readthedocs.io/en/master/Overview/ModelOverview/>
- US Army Corps of Engineers, (2018). *HEC-HMS*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- US EPA, (2015). *Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF)*. US EPA. <https://www.epa.gov/ceam/hydrological-simulation-program-fortran-hspf>
- USDA Agricultural Research Service, (2022). *KINEROS2: A Kinematic Runoff and Erosion Model*. <https://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>
- Wagener, T. y Gupta, H., (2005) *Model identification for hydrological forecasting under uncertainty*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 19: 378--387 (doi:10.1007/s00477-005-0006-5).
- Wang, Y. y Yan, X., (2017). *Climate change induced by Southern Hemisphere desertification*. Phys. Chem. Earths, Parts A/B/C 102, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.03.009>
- Wheater H.S., (2002), Progress in and prospects for fluvial flood modelling. 360 (1796), Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences
- Woolhiser, D., Smith, R., y Goodrich, D., (1990). *KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.
- Yilma, H. y Moges, S., (2007). *Application of semi-distributed conceptual hydrological model for flow forecasting on upland catchments of Blue Nile River Basin, a case study of Gilgel Abbay catchment*. Catchment and Lake Research, 200.
- Zhang, J., Ross, M., Trout, K., y Zhou, D., (2009). *Calibration of the HSPF model with a new coupled FTABLE generation method*. Progress in Natural Science, 19(12), 1747–1755. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.07.006>
- Zhang, J., Zhang, Y., Song, J., Cheng, L., Kumar Paul, P., Gan, R., Shi, X., Luo, Z., y Zhao, P., (2020). *Large-scale baseflow index prediction using hydrological modelling, linear and multilevel regression approaches*. J. Hydrol. 585, 124780. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124780>
- Zhang, P., Zhang, J., y Song, Y., (2019). *Hydrological Simulation of Taizi River Basin with HSPF Model*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 330(3), 032014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/3/032014>
- Zhang, Y. y Chiew, F., (2009). *Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments*. Water Resour. Res. 45 (W07412) <https://doi.org/10.1029/2008WR007504>

## SEMBLANZA DE LOS AUTORES



**Orianna Sofía Travisany Rodríguez.** Estudiante de Ingeniería Ambiental en la Universidad Centroamericana (UCA), durante el desarrollo de este artículo se encontraba realizando prácticas profesionalizantes en el Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente, PIENSA en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).



**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.