



## Selección de modelo hidrológico incluyendo la temperatura ambiental para infraestructuras de siembra y cosecha de agua

Selection of a hydrological model including ambient temperature for water harvesting and storage infrastructures

Carlos Alberto Cabanillas Agreda<sup>1\*</sup>; Josue Wilder Moises Hoyos Aguilar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

Carlos Alberto Cabanillas Agreda



<https://orcid.org/0000-0003-4269-949X>

Josue Wilder Moises Hoyos Aguilar



<https://orcid.org/0009-0009-1402-5587>

### Artículo Original

Recibido: 23 de julio de 2024

Aceptado: 30 de octubre de 2024

#### Resumen

El propósito de este estudio es investigar acerca de modelos hidrológicos, que permita seleccionar el modelo más adecuado que incluya la temperatura ambiental para obtener un caudal de diseño para el predimensionamiento correcto de infraestructuras de siembra y cosecha de agua. Es fundamental que los modelos reflejen con precisión las condiciones locales; aunque la falta de recursos y datos específicos puede dificultar el desarrollo de modelos propios, estos suelen ser más útiles y efectivos que aquellos creados en contextos distintos. Muchos modelos hidrológicos actuales se desarrollaron en otros países y para condiciones hidrológicas que no siempre coinciden con el área de aplicación. Por ejemplo, algunos modelos simulan la escorrentía superficial a partir del exceso de infiltración, apropiados para suelos de alta infiltración y lluvias de baja intensidad. En otras zonas, sería más adecuado un modelo basado en el exceso de saturación. Esta revisión de literatura, centrada principalmente en estudios publicados entre 2019 y 2023, cubre temas como la modelación de cuencas, sistemas hidrológicos, objetivos de la modelación y criterios de selección del modelo más adecuado. Se presentan fuentes actualizadas y recursos que sirven de base para seleccionar el modelo ideal para infraestructuras de siembra y cosecha de agua.

Palabras clave: Escorrentía, precipitación, ciclo hidrológico, cambio climático

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate hydrological models to select the most suitable one that includes ambient temperature, allowing for the design flow estimation necessary for the proper preliminary sizing of water harvesting and storage infrastructure. It is essential that models accurately reflect local conditions; although limited resources and specific data may hinder the development of tailored models, these are often more useful and effective than those created in different contexts. Many of today's hydrological models were developed in other countries and for hydrological conditions that do not always match the application area. For instance, some models simulate surface runoff based on infiltration excess, appropriate for soils with high infiltration capacity and low-intensity rainfall. In other areas, a model based on saturation excess would be more suitable. This literature review, primarily focused on studies published between 2019 and 2023, covers topics such as watershed modeling, hydrological systems, modeling objectives, and criteria for selecting the most appropriate model. Updated sources and resources are presented, providing a basis for choosing the ideal model for water harvesting and storage infrastructure.

Keywords: Runoff, Precipitation, Hydrological cycle, Climate change

\*Autor para correspondencia: E. mail: [ccabanillas@unitru.edu.pe](mailto:ccabanillas@unitru.edu.pe)

DOI:<http://dx.doi.org/10.17268/rebiol.2024.44.02.03>

Citar como:

Cabanillas-Agreda, C., & Hoyos-Aguilar, J. (2024). Selección de Modelo Hidrológico incluyendo la temperatura ambiental para Infraestructuras de Siembra y Cosecha de Agua. *REBIOL*, 44(2), 10-29

#### 1. Introducción

La alteración del ciclo de las lluvias en las cuencas alto

andinas provoca que las tormentas y sequías sean más prolongadas debido al aumento de la temperatura y una reducción de la precipitación, produciendo que el caudal



se reduzca considerablemente (Oliveira et al., 2021), y al no existir datos de aforos que permitan obtener el caudal de los cursos de agua por ser un proceso costoso (Fernández-Soto, 2016) surge la necesidad de aplicar un modelo hidrológico que tome en cuenta la temperatura para la previsión de escorrentías (Uliana, 2019) que aseguren la disponibilidad de agua para su siembra y cosecha.

Existe una amplia variedad de modelos hidrológicos, cada uno con estructura y ecuaciones propias (Oliveira et al., 2021) que permitan obtener información de fenómenos hidrológicos y su comportamiento de una cuenca, que sirvan de apoyo para la planificación de los recursos hídricos que considere la demanda de agua, variabilidad hídrica y uso de la tierra (Herrera-Franco et al., 2020).

De acuerdo a ello, se evidencia en los diferentes estudios publicados en los últimos años donde consideran el análisis de los fundamentos de cada modelo e identifican sus potencialidades y limitaciones, de acuerdo a las necesidades de su aplicación, de ahí el modelo físico distribuido que toma en cuenta distintos escenarios climáticos futuros para evaluar el efecto de la temperatura y precipitaciones en la disponibilidad del agua de una cuenca (Stehr, 2010), a diferencia de otros modelos que no lo hacen (Agregados y semidistribuidos). Para seleccionar el modelo más adecuado se consigue a lo recomendado por hidrológico (Ochoa-Tocachi, y otros, 2022) que se muestra en la figura 1

**Figura 1**

*Esquema recomendado por hidrológico (Ochoa-Tocachi, y otros, 2022)*



La investigación de revisión, tiene por objetivo obtener información de un modelo hidrológico que incluya la temperatura ambiental que permita obtener un caudal de diseño para el predimensionamiento correcto de infraestructuras de siembra y cosecha de agua, mencionando primero la importancia de un modelo hidrológico y detallando los tipos de los modelos hidrológicos y selección del modelo hidrológico para su aplicación a infraestructuras de siembra y cosecha de agua.

## 2. Materiales y Métodos

Para localizar los trabajos de investigación ya realizados sobre modelos hidrológicos, y para responder a nuestras interrogantes de investigación, llevamos a cabo un examen exhaustivo de la literatura mediante un enfoque sistemático de revisión, utilizando una taxonomía de literatura crítica, para ello, efectuamos una búsqueda organizada de términos clave en la base de datos Scopus de Elsevier, la cual es reconocida y ampliamente empleada para el análisis exhaustivo de la literatura (Fahimnia et al., 2019). Aunque existen diversas bases de datos en línea, optamos por Scopus como la alternativa más adecuada debido a sus métricas de citas confiables y su capacidad para identificar con precisión a autores e instituciones. La base de datos también se destaca por ofrecer una amplia gama de artículos relacionados con el campo de la hidrología (Martín-Martín et al., 2018).

La pauta establecida para elegir los documentos potencialmente pertinentes consistió en una serie de términos clave enlazados en una cadena de búsqueda: (runoff AND precipitation AND hydrological AND cycle AND climate AND change) y en español: (escorrentía AND precipitación AND ciclo hidrológico AND clima AND cambio). Título del artículo, Resumen. Nos centramos únicamente en las publicaciones de revistas escritas en inglés durante el proceso de búsqueda.

Se realizaron búsquedas de estas palabras clave en el título, resumen y palabras clave de cada artículo. Se recopiló información publicada desde el año 2019 hasta 2023, obteniendo un total de 340 documentos, los cuales fueron sometidos a un análisis bibliométrico

Los 340 registros fueron sometidos a un análisis de co-ocurrencia usando el Software VOSviewer para análisis bibliométrico

artículos de investigación, los cuáles fueron sometidos a un análisis bibliométrico o temático.

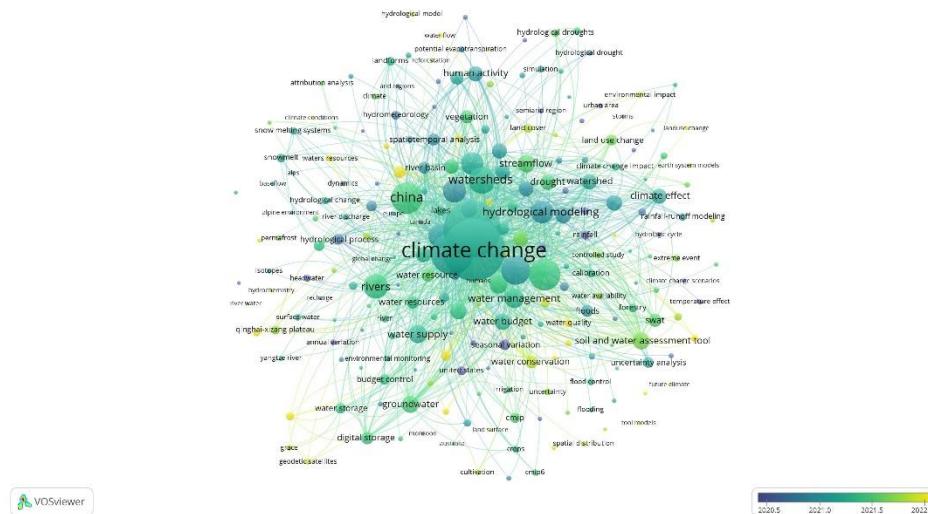
Seguidamente se revisó los 340 registros, de ellos se seleccionaron artículos (Consistieron trabajos de investigación completos, publicados y revisados por pares) obteniéndose 150 artículos de investigación, los cuales se realizó una revisión manual y aplicó criterios de inclusión y exclusión abordando solamente las palabras claves e integración de ciclo hidrológico y escorrentía en la cadena de suministro, resultando 97

Los criterios aplicados para obtener información relevante se han dejado deliberadamente amplia, para que podamos tener una idea de lo que les interesa a los investigadores en este momento y en futuro.

La aplicación de los criterios anteriores para identificar material relevante se ha dejado deliberadamente amplia, para que podamos tener una idea de lo que interesa a los investigadores en el campo ahora y en el futuro. Se obtuvo un número bajo de información 340 resultados.

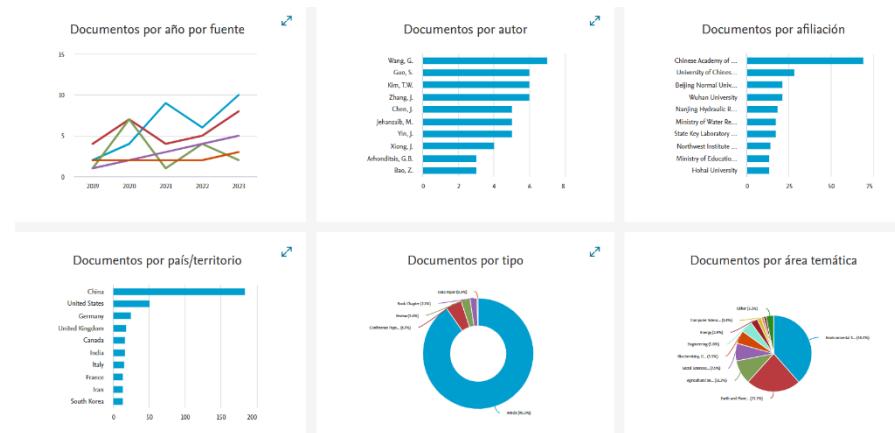
**Figura 2**

Base de datos Scopus, Red de co-ocurrencias con palabras claves (340 registro)



**Figura 3**

*Gráficos trabajos de investigación completos, publicados y revisados mostrando registros por autor, por afiliación, por país, por tipo y área temática.*



### 3. Resultados

#### Modelación de cuencas

El pronóstico de disponibilidad de recursos hídricos requiere conocimientos detallados sobre los procesos hidrológicos de la cuenca. Sin embargo, evaluar la complejidad de los procesos hidrológicos, necesarios para el agua sostenible gestión de recursos, basada en la comprensión de las precipitaciones y otras propiedades hidrológicas de la cuenca (Redfern et al. 2016). Por lo tanto, se debe modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca para diseñar y satisfacer las demandas de agua presentes y futuras (Galata, 2022).

Un modelo es una abstracción de la realidad, en la que se establecen relaciones para tratar de entender el comportamiento de un fenómeno. Los modelos son también una representación simplificada de un proceso o un sistema, bajo una forma diferente en relación con el sistema mismo. (Hidrología & IDEAM, 2018), son solo aproximaciones del sistema natural y, por tanto, están sujetos a diversos tipos de errores. (Lavado-Casimiro, 2020)

La estimación de los flujos de agua en una cuenca implica la utilización de modelos que necesitan ser analizados bajo diversas condiciones ambientales. (climáticas, topográficas, suelos y cobertura vegetal) (Ocampo & Vélez, 2013)

El ciclo del agua, se encuentra alterado por los cambios en el uso de la tierra y los cambios de las interacciones entre el agua superficial y subterránea (Weatherl, Henao Salgado, Ramgraber, Moeck, & Schirmer, 2021), la morfometría de éstos dos cuerpos de agua se ve afectada por la variabilidad de las precipitaciones (Brendel, Ferrelli, Piccolo, & Perillo, 2021)

Los componentes del ciclo del agua conforman un modelo de cuenca que es usado en evaluación, gestión y diseño de infraestructuras referentes a recursos hídricos. . (Kratzert, Klotz, Brenner, Schulz, & Herrnegger, 2018) (Hidrología & IDEAM, 2018) La producción de agua es un importante servicio ecosistémico hidrológico que resulta del balance de evaporación-precipitación y también depende de la cubierta terrestre y las características del suelo (Pessacg, y otros, 2018)

El modelado de precipitaciones y escorrentías es uno de los desafíos clave en el campo de la hidrología. Existen varios enfoques, que van desde los modelos basados en la física, pasando por los conceptuales, hasta los totalmente basados en datos. (Kratzert, Klotz, Brenner, Schulz, & Herrnegger, 2018)

Los modelos de cuenca representan nuestra comprensión del sistema de la cuenca y su respuesta. La capacidad predictiva de estos modelos está determinada por la forma en que los diseñamos y aplicamos, siendo la calidad de las predicciones generalmente proporcional a nuestra comprensión del sistema y del modelo que lo simula. Esto implica que no existe un modelo perfecto que se pueda aplicar a todas las cuencas del mundo; cada cuenca presenta características específicas de clima, geografía, geología, entre otros factores, que elevan la relevancia de ciertos procesos y condicionan la estructura del modelo. Mukundan et al. (2023) aplicaron una modelación a escala de cuencas del carbono orgánico disuelto en áreas de fuente variable, destacando la importancia de la parametrización específica para lograr simulaciones precisas en diversos sitios de la cuenca. Asimismo, He et al. (2023) evaluaron alteraciones hidrológicas en la cuenca del río Yalong, aplicando un modelo hidrológico que proyectó variaciones de precipitación y almacenamiento de agua bajo condiciones climáticas cambiantes.

Se han utilizado modelos para predecir eventos futuros potencialmente dañinos a la sociedad, relacionados con el régimen hídrico y para ayudar en los procesos en la formulación de políticas públicas.. Una vez que los modelos se pueden utilizar para predecir condiciones futuras a través de la simulación, son herramientas muy útiles para tratar los problemas ambientales y posibles alternativas para mitigar los impactos. (Ali & Valdés, 2017) (Almeida & Valdés, 2017)

Si una cuenca hidrográfica se mapea como un sistema distribuido, entonces la delineación de su subunidad puede basarse en consideraciones geomorfológicas, conceptuales, de terreno digital, de elevación digital, de segmentación o de unidad de respuesta hidrológica (Arnold & Fohrer 2005; Boru et al. 2019).

Los datos meteorológicos son un factor clave en la investigación de procesos hidrológicos, y el desarrollo de datos de reanálisis proporciona una

### El Sistema Hidrológico (Cuenca)

En muchos países los procesos hidrológicos de una cuenca son afectados debido al cambio climático y uso de la tierra originando escasez de agua ocasionando un impacto grave especialmente en zonas semiáridas y áridas que se reflejan en la evapotranspiración, precipitaciones y temperatura afectando la producción, suministro y consumo de agua (Rafiei-Sardooi, Azareh, Joorabian Shooshtari, & Parteli, 2022). Los variaciones en la temperatura y la precipitación alteran algunos componentes de los sistemas hidrológicos, explícitamente los extremos de precipitación, la evaporación y las variaciones del caudal (Avtar Singh, Deepika, Retinder, Suhail, & Kuljit, 2021)

La respuesta hidrológica es un proceso complejo y está controlado por varios factores, como la precipitación, la topografía, el uso y la cobertura del suelo y las propiedades de suelo. La precipitación proporciona la fuente de agua de entrada en este proceso y el vínculo entre la variabilidad de la lluvia y la generación de escorrentía sigue siendo un tema activo en los estudios de hidrología. (Zhao, Nearing, & Guertin, 2022)

El cambio climático y la actividad humana influyen en los procesos hidrológicos, generando efectos tanto en la dinámica de los ecosistemas como en la sociedad, y afectan los sistemas urbanos de abastecimiento de agua, agricultura de regadío y producción hidroeléctrica (Viola et al., 2014; Oliveira et al., 2017; Byun et al., 2019). (Vinícius Siqueira, Lívia Alves, Conceição de Maria, Javier Tomasella, & Pâmela Aparecida, 2021)

Las variaciones causadas por el cambio climático son importantes para la administración de los recursos hídricos, la agricultura y producción de energía, disponibilidad de agua y pronóstico de inundaciones y sequías (Byun et al., 2019). (Vinícius Siqueira, Lívia Alves, Conceição de Maria, Javier Tomasella, & Pâmela Aparecida, 2021)

(Vinícius Siqueira, Lívia Alves, Conceição de Maria, Javier Tomasella, & Pâmela Aparecida, 2021) sugiere

nueva solución para la simulación de escorrentía en regiones con escasez de datos. (Tang, y otros, 2022)

que un incremento en la temperatura y una disminución de la precipitación, se produce una reducción considerable del caudal

Los regímenes hidrológicos están sufriendo cambios y sufrirán más cambios en el futuro bajo escenarios climáticos cambiantes (Brunner et al., 2019) Los futuros cambios en el régimen hidrológico pueden estar relacionados con cambios en las características de inundaciones y sequías y recarga de aguas subterráneas (Middelkoop et al., 2001) (Mehlath & Lone, 2022)

El cambio climático es una preocupación importante en todo el mundo con efectos significativos en los procesos hidrológicos. El cambio climático ya ha producido y producirá efectos pronunciados sobre el régimen hidrológico (Mehlath & Lone, 2022)

La escasez de agua es un problema grave en muchas naciones. En los últimos años, la escasez de agua ha aumentado debido a la utilización del suelo y al cambio climático, particularmente en áreas áridas o semiáridas, Si bien las modificaciones en el uso del suelo afectan a los procesos hidrológicos a escala de cuenca, los impactos causados por el cambio climático se reflejan en la dinámica de la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración (ET) a escala regional y mundial. Sin embargo, los impactos respectivos del cambio en el uso de la tierra y el cambio climático, actuando en conjunto, sobre la producción de agua, el suministro de agua y el consumo de agua, aún no se comprenden bien (Rafiei-Sardooi, Azareh, Joorabian Shooshtari, & Parteli, 2022) los escenarios que combinan el uso de la tierra y los cambios climáticos producen el impacto más significativo en la producción de agua y el suministro de agua, destacando que la temperatura y la precipitación juegan un papel decisivo en los procesos hidrológicos (Guo, Huang, Wang, & Lin, 2022)

Además, comprender los procesos hidrológicos dentro de una cuenca es crucial para una gestión

efectiva de los recursos hídricos, especialmente en regiones que enfrentan los desafíos del cambio climático y las actividades humanas (Barresi Armoa et al., 2023).

Por último, el sistema hidrológico de una cuenca está influenciado por varios factores, incluyendo la precipitación, el uso del suelo y las características del suelo, que en conjunto determinan el flujo de agua y su distribución a través del paisaje (Zhu et al., 2023).

### Modelación Hidrológica

Las interacciones que existe entre el agua, el relieve, la vegetación y energía, es representado por la modelación hidrológica (Fernandez-Soto & Peña-Cortés, 2016)(Oliveira et al., 2021). Son técnicas avanzadas que son aplicados ampliamente para predicción de inundaciones, monitoreo de sequías, gestión de recursos hídricos y diseño de infraestructuras (Wang, y otros, 2018) (Li. J. & y Wang, 2018) (Mai, Craig, Tolson, & Arsenault, 2022) (Abdullah, Wanchang, Muhammad, & Ahmed, 2022) haciendo que el funcionamiento del sistema natural se simplifique (Fernandez-Soto & Peña-Cortés, 2016) (Uliana, y otros, 2019). Los modelos hidrológicos son ecuaciones matemáticas, herramientas esenciales y técnicas avanzadas que representan el comportamiento de los fenómenos hidrológicos, permitiendo obtener información de una cuenca fluvial para la toma de decisiones en la planificación, desarrollo y gestión ambiental de los recursos hídricos (Uliana, y otros, 2019) (Abdullah, Wanchang, Muhammad, & Ahmed, 2022) (Kumar, y otros, 2022).

La **modelación hidrológica** consiste en representar el ciclo del agua a través de simplificaciones y aproximaciones de los procesos reales que ocurren en el sistema hidrológico (Ochoa-Tocachi, y otros, 2022), relacionando la precipitación y la escorrentía (caudal) producida en una cuenca (Lavado-Casimiro, 2020), , utilizando datos metereológicos y parámetros del los procesos del ciclo hidrológicos (Beck et al, 2010)para simularlos con un modelo calibrado de manera confiable, sin tener datos de caudal (Lavado-Casimiro, 2020)

Los escenarios climáticos cambiantes, genera

efectos sobre los regímenes hidrológicos, relacionados directamente con los cambios en las características de recarga de agua subterránea , sequía e inundaciones (Middelkoop et al., 2001) (Mehlath & Lone, 2022),los factores que controlan la respuesta hidrológica son las propiedades del suelo, cobertura vegetal, topografía, la temperatura que tiene influencia en la precipitación que es la principal fuente de agua de entrada generando escorrentía (Zhao, Nearing, & Guertin, 2022). Los componentes de los sistemas hidrológicos pueden ser alterados por los cambios en la temperatura y precipitación, alterando los niveles de escorrentía y variaciones de caudal (Avtar Singh, Deepika, Retinder, Suhail, & Kuljit, 2021), por lo tanto el comportamiento hidrológico se debe modelar para predecir inundaciones, sequías, disponibilidad de agua para las actividades económicas, (Vinícius Siqueira, Lívia Alves, Conceição de Maria, Javier Tomasella, & Pâmela Aparecida, 2021) que permitan satisfacer las demandas de agua en el presente y futuro (Galata, 2022), en los pronósticos de tiempo la predicción es una de las tareas difíciles y desafiantes, debido a las variaciones climáticas extremas (Atta-ur, y otros, 2022), en el estudio de (Vinícius Siqueira, Lívia Alves, Conceição de Maria, Javier Tomasella, & Pâmela Aparecida, 2021) indica que al aumentar la temperatura y la reducción de la precipitación en la región central y sureste de Brasil, se produce una reducción considerable del caudal. Debido a los cambios climáticos y a la heterogeneidad del suelo, una técnica de modelado hidrológico no asegura una buena evaluación del comportamiento del caudal (Kumar, y otros, 2022), pero para la gestión de los recursos hídricos es importante predecir las precipitaciones que aseguren la protección ecológica (Zhang, y otros, 2022). La variabilidad del cambio climático podrían estar asociado a los eventos hidrometeorológicos extremos causando impactos (Lavado-Casimiro, 2020)

La estimación de los flujos de agua en una cuenca demanda la utilización de modelos, los cuales deben ser analizados en función de diversas condiciones ambientales, como el clima, la

topografía, los tipos de suelo y la cobertura vegetal.. (Ocampo & Vélez, 2013)

Un modelo hidrológico puede ser eficaz para simular flujos lentos y dentro de un rango específico de valores de precipitación y caudal. Sin embargo, este mismo modelo podría ofrecer resultados insatisfactorios al intentar simular caudales durante inundaciones (Ochoa-Tocachi, y otros, 2022)

Los modelos hidrológicos emplean datos meteorológicos y parámetros calibrados que se relaciona con el ciclo del agua para entender y simular la relación entre la precipitación y la escorrentía (caudal) generada a la salida de una cuenca (SENAMHI, 2020).

Uno de los desafíos en la modelación hidrológica es lograr simulaciones precisas en cuencas donde no se dispone de datos de caudales. En la mayoría de los casos, esto se lleva a cabo transfiriendo parámetros de un modelo ya calibrado desde una cuenca donadora a una receptora, utilizando criterios de similitud hidrológica. (SENAMHI, 2020) En este sentido, el modelado hidrológico desempeña un papel crítico en la predicción del flujo y la calidad del agua en las cuencas, lo que permite una mejor gestión de los recursos hídricos y una comprensión de las respuestas hidrológicas a la variabilidad climática (Qiu et al., 2023). Además, la integración de modelos hidrológicos avanzados, como SWAT y modelos HD, mejora nuestra capacidad para simular procesos hidrológicos complejos y evaluar los impactos del uso del suelo y el cambio climático en los recursos hídricos (Chen et al., 2023).

### Desarrollo de Modelos hidrológicos

Un proceso hidrológico lo podemos dividir en cinco pasos de acuerdo a la figura

(Beven, 2011) El **modelo perceptual** facilita la identificación de los procesos que son fundamentales para representar, aquellos que pueden ser omitidos y el nivel de detalle necesario para simular la dinámica de un sistema. Es decir, refleja la comprensión que se tiene sobre un sistema específico, incluyendo los flujos, la complejidad y las interacciones entre los procesos. Por otro lado, el **modelo conceptual** es una abstracción matemática que implica la representación

de los procesos hidrológicos mediante ecuaciones que simplifican las percepciones. Esta simplificación tendrá un impacto en el costo computacional y en la capacidad predictiva del sistema.

En el caso del río Essequibo, por ejemplo, el innovador modelo hidrológico desarrollado para su cuenca integra datos meteorológicos globales con observaciones locales, proporcionando una herramienta integral para evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos (Hughes et al., 2023). **modelo procedimental**, Esta fase implica la creación del código para resolver ecuaciones y su ejecución con el fin de obtener resultados numéricos. Esto incluye un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales, que a menudo son no lineales y requieren el uso de métodos numéricos para su resolución. Con la **Calibración**, se evalúa la capacidad del modelo empleando datos e información proesada (Hidrología & IDEAM, 2018). Es un proceso de causa y efecto que permite que los datos y valores de parámetros de entrada reproduzcan el sistema natural adecuadamente (Morgan Uliana, Da Silva, Castro Moreira, Bueno Pereira, & Reis Pereira, 2020), es decir los parámetros del modelo describen y sintetizan las características del área o de los flujos en una cuenca o sistema hidrológico. Estos parámetros deben ser ajustados para optimizar el rendimiento del modelo en relación con los datos observados. **Validación** evalúa el desempeño del modelo. Una vez que el modelo ha sido calibrado, se llevan a cabo una o varias simulaciones, las cuales se comparan con las observaciones de precipitación y caudal, es decir permite confirmar la exactitud del modelo destinado a la simulación de procesos estacionario en la cuenca.

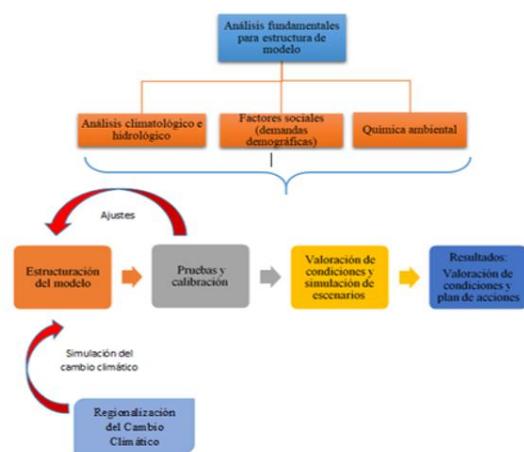
### Objetivos de la modelación hidrológica

Tomando en cuenta infraestructuras de siembra y cosecha de agua, los objetivos de la modelación hidrológicas es realizar predicciones hidrológicas en diferentes escenarios, generar y procesar información y datos históricos y comprender el funcionamiento de los procesos hidrológicos (Beven, 2019) por otro lado, permiten simular la respuesta del sistema ante escenarios específicos, como el cambio climático, la modificación de los usos del suelo o la implementación de

intervenciones en la infraestructura natural (Ochoa-Tocachi, y otros, 2022) Además, el modelado hidrológico tiene como objetivo proporcionar información sobre las interacciones entre los componentes hidrológicos, el uso del suelo y el

cambio climático, facilitando la toma de decisiones informadas para la gestión sostenible de los recursos hídricos (Eccles et al., 2023) finalmente, necesitan datos y observaciones de campo para ser calibrados y validados.

**Figura 4**  
Diagrama metodológico



Nota. Adaptado de (Vázquez – Ochoa, 2021)

### Clases de modelos hidrológicos

Muchos son los modelos hidrológicos que existen en la actualidad, cada uno con su estructura propia según la característica de la cuenca (Yang, Zhou, Fang, & Wang, 2022), existen varios enfoques, desde los modelos basados en la física, conceptuales, hasta los basados solo en datos (Kratzert, Klotz, Brenner, Schulz, & Herrnegger, 2018)

Existen diversos tipos y clasificaciones de modelos hidrológicos que se encuentran disponibles en la literatura, para nuestro caso lo dividiremos de acuerdo a lo descrito por (Ochoa-Tocachi, y otros, 2022) a) **Por el nivel de descripción de procesos hidrológicos**, lo clasificamos en **empíricos** (caja negra) Se dice que son empíricos cuando su formulación no tiene una representación explícita de los procesos físicos de la cuenca, y puede tener un rasgo regionalista. (Almeida & Valdés, 2017) , **conceptuales** cuyo objetivo radica en la representación del sistema físico natural (es decir, los procesos del ciclo hidrológico), de forma que, utilizando datos de entrada como la cantidad de precipitación y evaporación, las condiciones iniciales de humedad del suelo, la vegetación presente, entre otros. Se pueden proporcionar series de flujo. Tal Los modelos

suelen denominarse modelos de flujo de lluvia (Almeida & Valdés, 2017) basan en las ecuaciones que describen el proceso físico conceptual o hipotético, no necesariamente basado en la verdadero proceso (Almeida & Valdés, 2017) y de **base física** simplificados todavía se aplican de forma rutinaria con fines operativos (Adams y Pagaon, 2016; Herrnegger et al., 2018; Lindström et al., 2010; Stanzel et al., 2008; Thielen et al., 2009; Wesemann et al., 2018). (Kratzert, Klotz, Brenner, Schulz, & Herrnegger, 2018) éstos describen procesos hidrológicos a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales basadas en una combinación de suposiciones simplificadas que impulsan el comportamiento hidráulico del sistema e integrados en ecuaciones algebraicas empíricas (Baioni, Porta, Cattaneo, & Guadagnini, 2022) (Baioni, Porta, Cattaneo, & Guadagnini, 2022), utiliza ecuaciones diferenciales en base a suposiciones simplificadas (Baioni, Porta, Cattaneo, & Guadagnini, 2022) que se aplican con fines operativos de forma rutinaria (Kratzert, Klotz, Brenner, Schulz, & Herrnegger, 2018) describen los procesos hidrológicos impulsando el comportamiento hidráulico (Baioni, Porta, Cattaneo, & Guadagnini, 2022), éstos representan la hidrología del subsuelo como una serie de reservorios lineales correspondientes a las capas del suelo (tierra vegetal, zona no saturada y saturada) (Kumar R., 2022), éste modelo representa lluvia-escorrentía característico de la zona y para su uso deben estar calibrados y validados (Morgan Uliana, Da Silva, Castro Moreira, Bueno Pereira, & Reis Pereira, 2020) para representar el comportamiento de fenómenos hidrológicos y estimar la corriente de los cursos de agua y **físicos** denominado modelo de tránsito de caudales, que estima cómo varían la magnitud, la velocidad y la forma de una onda de flujo a lo largo del tiempo (hidrograma) en uno o varios puntos a lo largo de un cauce o canal de agua.(Agudelo-Otálora, Moscoso-

Barrera, Paipa-Galeano, & Mesa-Sciarrotta, 2018) Otro inconveniente de los modelos físicos es la gran cantidad de información que necesitan, en términos de variables hidrometeorológicas (como caudal, nivel de agua y precipitación, entre otras), así como las consideraciones sobre aspectos geológicos y topográficos del cauce, incluyendo la batimetría del terreno, los tipos de suelo, las curvas de gasto y los parámetros de escorrentimiento (Merwade, Cook, & Coonrod, 2008; Kia *et al.*, 2011). rara vez se utilizan en la predicción operativa de lluvia y escorrentía (Kratzert, Klotz, Brenner, Schulz, & Herrnegger, 2018); b) **por la discretización espacial**, se clasifican en **modelos agregados, semidistribuido** éste es creado para determinar la generación y el transporte de escorrentía, sedimentos y contaminantes desde unidades individuales de drenaje (subcuencas) hasta la desembocadura de una cuenca. (Stehr A., 2010) es una herramienta de evaluación de suelos y agua que emplea una escala de tiempo continua (Adeogun *et al.* 2019). (Galata, 2022) y **modelo distribuido** evalúa el impacto que tienen los cambios en las precipitaciones y temperaturas sobre la disponibilidad de agua en una cuenca. Una vez calibrado y validado, el modelo se perturba con variaciones porcentuales en la precipitación y en la temperatura, obtenidas de diferentes escenarios climáticos futuros. (Stehr A., 2010) son útiles para comprender la dinámica del balance hídrico de las cuencas bajo condiciones cambiantes, proporcionando así información importante para la gestión de los recursos hídricos y la toma de decisiones. Sin embargo, en cuencas mal calibradas, la ausencia de datos hidrometeorológicos in situ confiables y superpuestos hace que la calibración y la evaluación de tales modelos sean bastante desafiantes. (Alemayehu, Gupta, Van Griensven, & Bauwens, 2022) Los modelos hidrológicos distribuidos espacialmente son útiles para comprender la dinámica del balance hídrico de las cuencas bajo condiciones cambiantes, proporcionando así información importante para la gestión de los recursos hídricos y la toma de decisiones. Sin embargo, en cuencas mal calibradas, la ausencia de datos hidrometeorológicos in situ

confiables y superpuestos hace que la calibración y la evaluación de tales modelos sean bastante desafiantes. (Alemayehu, Gupta, Van Griensven, & Bauwens, 2022) espacialmente simulan la variabilidad en los procesos hidrológicos al tener en cuenta explícitamente la heterogeneidad espacial en una cuenca [1-3]. (Alemayehu, Gupta, Van Griensven, & Bauwens, 2022) Estos modelos permiten dividir toda la zona en unidades irregulares o regulares, consideradas como homogéneo, reconociendo así la distribución espacial de variables y parámetros consideró. Este tipo de modelo permite la manipulación de los datos de lluvia que conducen a en cuenta su variabilidad espacial, siendo, por lo tanto, más representativa que real. (Almeida & Valdés, 2017); y c) **Por la introducción de aleatoriedad**, lo clasificamos como **determinísticos** es aquel donde las mismas entradas generarán invariablemente las mismas salidas, sin tener en cuenta la presencia del azar o el principio de incertidumbre. Sin embargo, si se alteran los datos de entrada o se modifican ligeramente los parámetros, los resultados serán diferentes y **estocástico** introducen aleatoriedad o incertidumbre en los resultados, lo que puede reflejarse en las variables de entrada, las condiciones de frontera o los parámetros del modelo. Esto es especialmente relevante para procesos que son inherentemente aleatorios o inciertos, como la ocurrencia de precipitaciones o las predicciones meteorológicas (Ochoa-Tocachi, y otros, 2022) hacen uso de la serie observada caudales en determinados puntos y, a partir de ciertas hipótesis sobre su comportamiento, permitirles ser representados por uno de varios tipos de modelos en serie tiempos normalmente utilizados (Almeida & Valdés, 2017) Estos son aquellos modelos cuando una o más variables involucrados en el modelado tienen un comportamiento aleatorio, que tiene una distribución de probabilidad. (Almeida & Valdés, 2017) Asignar significado físico a la calibración de un modelo hidrológico es arriesgado debido a la equifinalidad, que permite múltiples parametrizaciones igualmente válida. (Casado-Rodríguez, 2022)

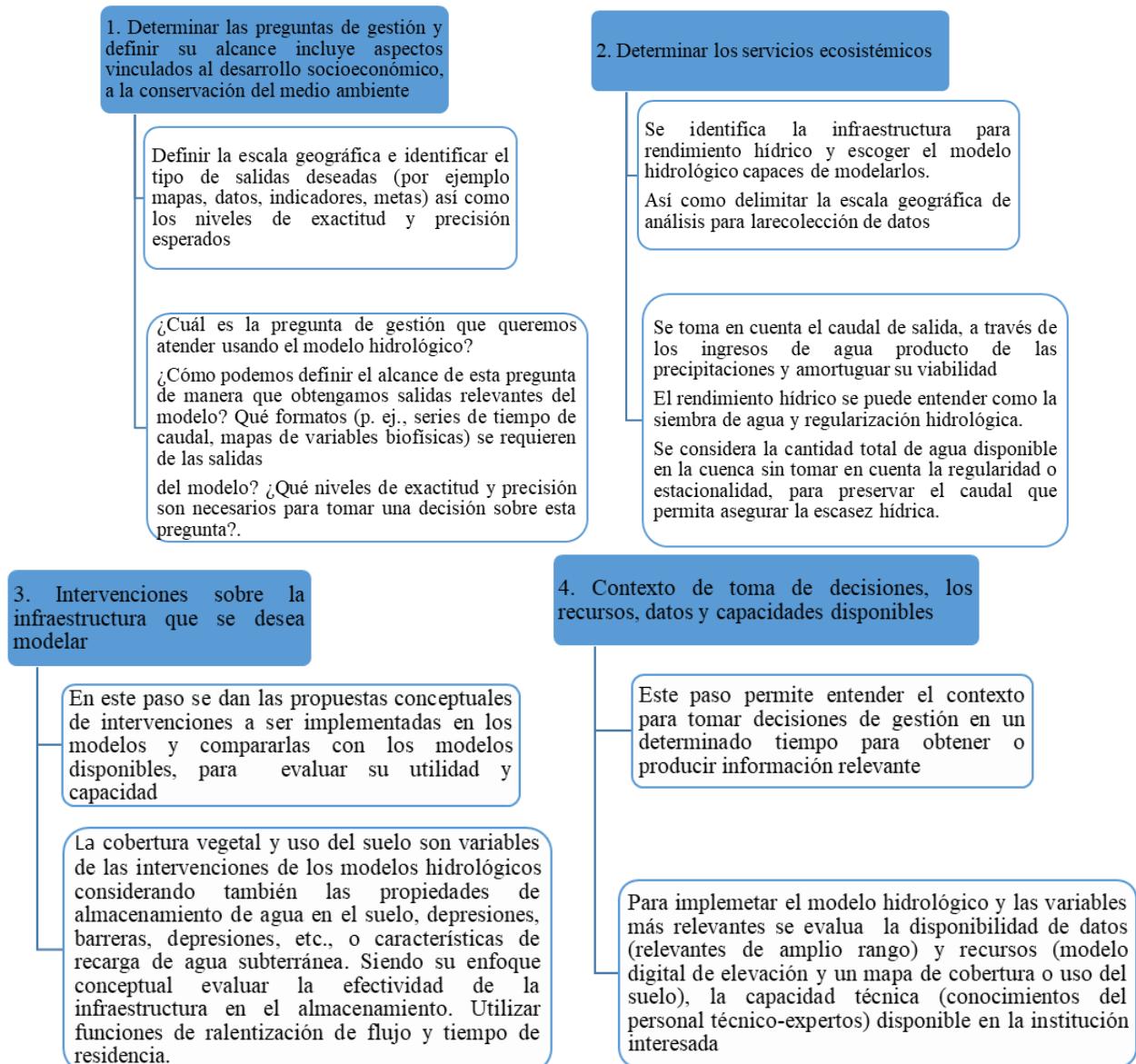
## Definición de modelos para toma de decisiones

Para tomar decisiones en la selección del modelo se deben tomar en cuenta cinco pasos que lo mencionamos en las figuras

5 y 6

Figura 5

*Características de la selección de modelos hidrológicos para infraestructura de siembra y cosecha de agua.*



5. Evaluación de modelos hidrológicos disponibles o caja de herramientas de modelación

Esta etapa garantiza la capacidad técnica, disponibilidad de datos y recursos, con el objeto de obtener resultados dentro del tiempo disponible para tomar decisiones. La variabilidad climática, la diversidad de ecosistemas y la variedad de preguntas por contestar a diferentes escalas espaciales y temporales, fomentan el desarrollo de diversos enfoques y modelos hidrológicos para responder a problemas específicos

para realizar una selección objetiva y válida se deben reconocer los objetivos del estudio, identificar correctamente los procesos críticos que serán representados en las modelaciones y considerar la información disponible y las capacidades técnicas en el momento de modelar

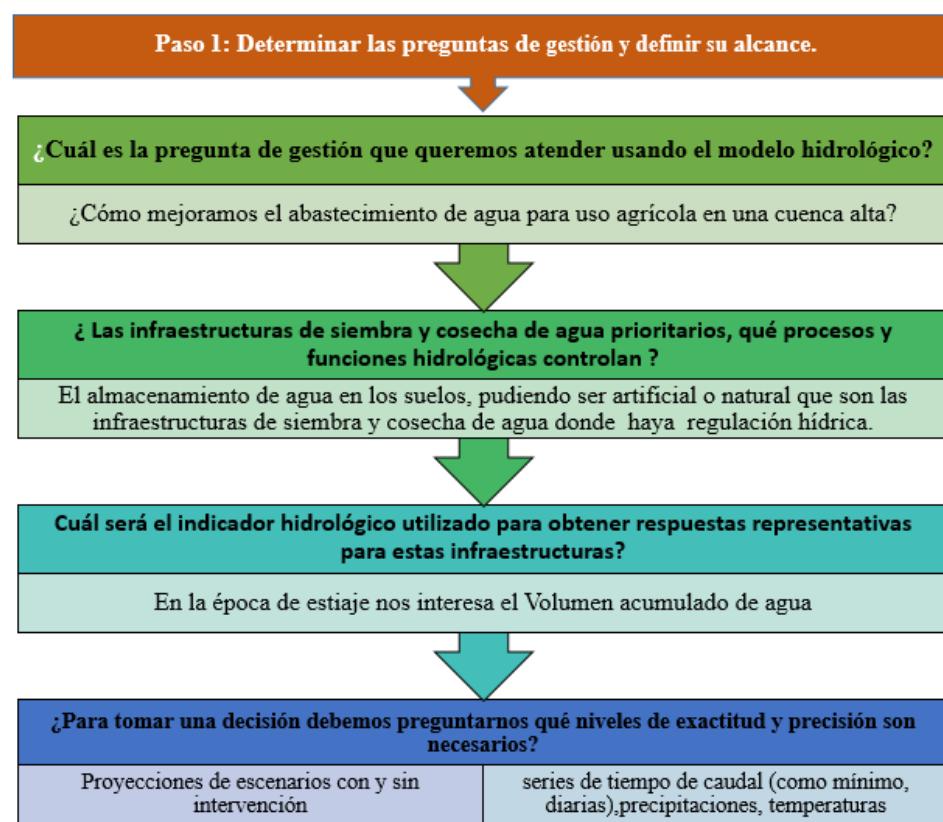
#### Selección del modelo más apropiado

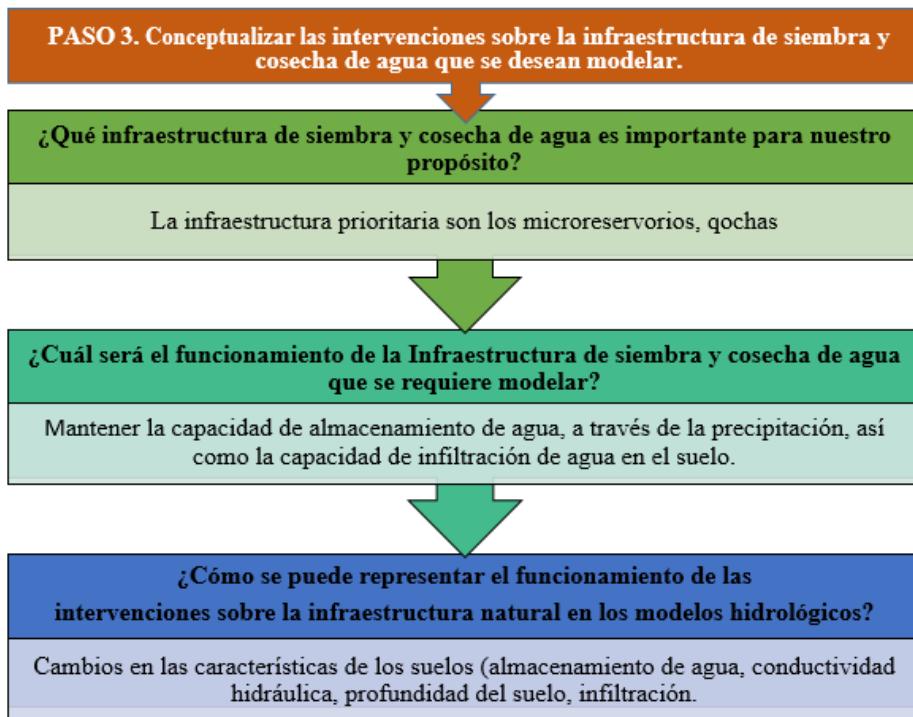
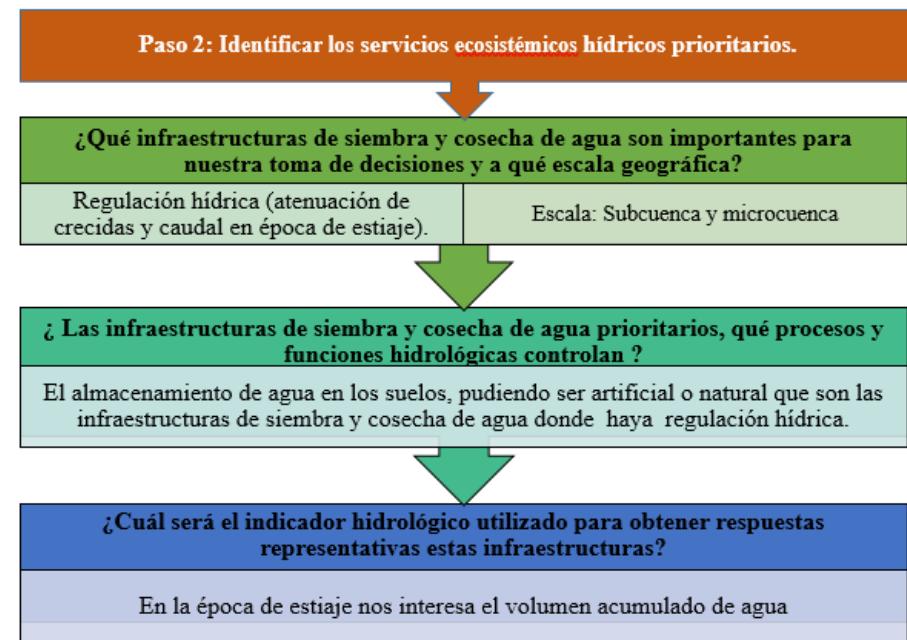
En la figura 6 se presenta guías de preguntas y respuestas que permita la selección del modelo más

adequado para infraestructuras de siembra y cosecha de agua. Estas guías son herramientas esenciales que ayudan a los responsables de la toma de decisiones.

Figura 6

*Selección de modelos hidrológicos para infraestructura natural (Preguntas y respuestas de los 5 pasos)*





**PASO 4. Reconocer el contexto de toma de decisiones, los recursos, datos y capacidades disponibles.**

**¿Cuál es la pregunta de gestión que queremos atender usando el modelo hidrológico?**

Permite decidir si disponemos del recurso hídrico para dimensionar la infraestructura y se asigne un presupuesto de inversión.

**¿Cuánto tiempo demandará realizar la modelación hidrológica?**

En un máximo de tres semanas se puede realizar la modelación

**¿Qué datos están disponibles para la modelación hidrológica?**

Imágenes satelitales, mapa de cobertura y uso de suelo comisionado, a resolución de 30 m; mapas de suelo globales (FAO); datos climáticos PISCO (precipitación y temperatura) diarios; datos climáticos de SENAMHI *in situ* diarios; datos climáticos de la Nasa, datos de caudal para calibración (ANA) diarios

**¿Para aplicar los modelos hidrológicos, la calidad de los datos son adecuados?**

La calidad de datos disponibles es adecuada

**Paso 5. Evaluar los modelos hidrológicos en este contexto y seleccionar el más apropiado**

**¿Cuál es el modelo hidrológico que responde en forma positiva a la mayor cantidad de criterios y cómo?**

El modelo semidistribuido SWAT, requiere información específica sobre topografía, propiedades del suelo, uso de la tierra y clima del área de captación para modelar efectivamente los procesos físicos asociados con movimiento del agua y transporte de sedimentos (Elisa Baioni, 2022) es capaz de simular caudales diarios y cargas de sedimentos en el mismo ejercicio

**¿Qué limitaciones y desventajas existen para el modelo hidrológico seleccionado?**

SWAT utiliza el método MUSLE para modelar la erosión. No es posible simular otros tipos de erosión, en particular, movimientos en masa y cárcavas.

**¿Qué otros modelos son alternativas factibles para el ejercicio de modelación?**

TVSA identifica procesos de generación de escorrentía de fuente variable y el mecanismo físico asociado bajo control de temperatura en cuencas de permafrost; además, el modelo reproduce con precisión los procesos hidrológicos y la respuesta asociada al cambio climático (Guo L., 2022)

KINEROS es una alternativa factible, con la desventaja de que las modelaciones se harían a escala de evento de precipitación y no continuo.

### Descarga y disponibilidad de información secundaria

Para poder operar los modelos hidrológicos se requiere información primaria y secundaria, cuando no se dispone con datos primarios, se debe recurrir a datos secundarios disponibles, incluyendo mapas de uso y cobertura de suelo, tipos de suelo, topografía en MDE (Modelo Digital de Elevación) a escala regional, base de datos meteorológicos que se encuentran disponibles en la web de instituciones nacionales e internacionales, siendo muchas de ellas de forma gratuita, por ejemplo en muchos casos los MDE, son generados por instituciones como el United States Geological Survey (USGS), datos de usos y cobertura de suelo podemos encontrar

**Tabla 1**

Páginas Web de descarga de datos secundarios para la aplicación en los modelos hidrológicos

Tipos de datos	Fuente de datos
Modelos digitales de elevación, usos de suelo, otros datos globales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USGS Earth-Explorer, SRTM: <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a></li> <li>• ASTER: <a href="https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp">https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp</a></li> <li>• ALOS-PALSAR: <a href="https://earth.esa.int/eogateway/missions/atos">https://earth.esa.int/eogateway/missions/atos</a></li> <li>• NASADEM: <a href="https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem">https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem</a></li> <li>• MERIT DEM: <a href="http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM">http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM</a></li> </ul>
Datos climáticos de estaciones <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SENAMHI: <a href="https://www.senamhi.gob.pe">https://www.senamhi.gob.pe</a></li> <li>• NOAA NCDC: <a href="https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/">https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/</a></li> <li>• SO-HYBAM: <a href="https://hybam.obs-mip.fr">https://hybam.obs-mip.fr</a></li> </ul>
Datos hidrometeorológicos de ecosistemas andinos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• iMHEA: <a href="http://imhea.org">http://imhea.org</a> <a href="https://figshare.com/collections/High-resolution_hydrometeorological_data_from_a_network_of_headwater_catchments_in_the_tropical_Andes/3943774">https://figshare.com/collections/High-resolution_hydrometeorological_data_from_a_network_of_headwater_catchments_in_the_tropical_Andes/3943774</a></li> <li>• SEDC FONAG: <a href="http://sedc.fonag.org.ec">http://sedc.fonag.org.ec</a></li> </ul>

información en extensión shapefile, disponible en páginas web de instituciones estatales.....

Así como indica Ochoa-Tocachi (2022), que en ocasiones no se puede contar con información por la falta de datos, pero se pueden usar variantes dependiendo su acceso y disponibilidad en diferentes escalas, resoluciones y calidad. Por ejemplo en la Web (USGS EarthExplorer) podemos encontrar imágenes satelitales DEM en formato raster, para tener un mejor alcance de fuentes de datos secundarios para que se apliquen en modelos hidrológicos se presentan en la tabla 1.

Tipos de datos	Fuente de datos
Datos climáticos de reanálisis, temperatura, precipitación, variables meteorológicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>WorlClim,</b>  <a href="https://www.worldclim.org/data/index.html">https://www.worldclim.org/data/index.html</a></li> <li>• <b>PISCO</b>  <a href="https://www.senamhi.gob.pe">https://www.senamhi.gob.pe</a>  <a href="https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/?Set-Language=es">https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/?Set-Language=es</a></li> <li>• <b>CHIRPS</b>  <a href="https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps">https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps</a>  <a href="https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/">https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/</a></li> <li>• <b>ERA5:</b>  <a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels</a>  <b>NASA</b>  <a href="https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/">https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/</a></li> </ul>
Productos satelitales de precipitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>TRMM:</b>  <a href="https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/trmm-tropical-rainfall-measuring-mission">https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/trmm-tropical-rainfall-measuring-mission</a></li> <li>• <b>GPM</b>  <a href="https://gpm.nasa.gov/data/directory">https://gpm.nasa.gov/data/directory</a></li> <li>• <b>Precipitation Processing System</b>  <a href="https://arthurhou.pps.eosdis.nasa.gov">https://arthurhou.pps.eosdis.nasa.gov</a></li> </ul>

#### **4. Conclusiones**

Cuando los datos hidrológicos observados son escasos, los modelos hidrológicos se convierten en una herramienta útil para gestionar la disponibilidad del recurso hídrico en una determinada cuenca, pero seleccionar un modelo apropiado no es tan sencillo debido a la complejidad de los modelos existentes, disponibilidad de recursos, capacidades técnicas entre otros, debido a esto se debe definir, y analizar las características particulares de cada modelo y ser aplicados para cada realidad, y tener los objetivos claros que permita definir y seleccionar el modelo más adecuado.

La generación, monitoreo, medición y calidad de datos de entrada están directamente relacionadas y repercute en los resultados de la modelación hidrológica. La disponibilidad de datos y la experiencia en modelación permite resultados que puedan ser aprovechados para la elección y complejidad del modelo y la toma de decisiones sea la más adecuada en la aplicación para infraestructuras de siembra y cosecha de agua y adaptar sus necesidades en el momento de diseñar y evaluar intervenciones.

La utilización de un conjunto diverso de modelos podría fortalecer la fiabilidad de los resultados de simulación en comparación con el uso de un único modelo, ante la incertidumbre sobre qué modelo representa mejor la realidad local. Es posible implementar varios modelos y analizarlos en conjunto para proporcionar un mayor rango de posibilidades.

Los modelos sirven como apoyo en la toma de decisiones, pero es crucial reconocer que son herramientas valiosas y, al mismo tiempo, inciertas. Disponer de otros insumos que faciliten la toma de decisiones informadas contribuye a reforzar la solidez de las conclusiones que guían las decisiones.

La modelación no sustituye la necesidad de recopilar más datos *in situ*, especialmente en áreas remotas, regiones con escaso presupuesto o ante limitaciones en las capacidades técnicas locales.

Es esencial desarrollar modelos que reflejen las realidades locales. Aunque no siempre se disponga de

los recursos, datos y capacidad técnica necesarios para construir modelos, los modelos propios pueden ser más eficientes y útiles que los existentes.

Muchos modelos populares en uso actualmente han sido creados en otros países para representar condiciones hidrológicas que no se encuentran en el lugar de aplicación. Un ejemplo común es el de los modelos que simulan la escorrentía superficial por exceso de infiltración (como el uso del número de curva) y que se aplican en zonas donde los suelos tienen una alta capacidad de infiltración y las lluvias son de baja intensidad. En tales casos, sería más representativo utilizar modelos que simulen la escorrentía por exceso de saturación.

Por último, las aplicaciones de la modelación son diversas. Uno de los campos más prometedores está relacionado con el análisis de los beneficios hidro-socioeconómicos de los proyectos de infraestructura para la siembra y cosecha de agua. La modelación hidrológica desempeña un papel crucial en varias etapas del proceso. Para muchas aplicaciones, es necesario ir más allá de la simple cuantificación de los beneficios hídricos; esto implica medir los beneficios sociales y económicos, considerar co-beneficios, externalidades, compromisos y costos, y realizar el balance de todos estos elementos para respaldar inversiones que sean sostenibles y rentables.

#### **5. Contribución de los autores**

Ambos autores participaron en la Concepción y el diseño del estudio, Tabulación de datos con los resultados obtenidos tras la recopilación de datos, El análisis y la interpretación de los datos, Discusión y conclusiones. Aprobación definitiva de la investigación realizada.

#### **6. Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

#### **7. Referencias Bibliográficas**

Abdullah, A., Wanchang, Z., Muhammad, A., & Ahmed, E. (2022). Application of hydrological model to assess river flow in the transboundary cryosphere and data-scarce watershed, a case study: Chitral-Kabul

- River Basin (C-KRB) in Pakistan. *Water Supply*, 22(4), 3842-3862.
- Agudelo-Otalora, L., Moscoso-Barrera, W., Paipa-Galeano, L., & Mesa-Sciarotta, C. (2018). Comparison of physical models and artificial intelligence for prediction of flood levels. (10.24850/j-tyca-2018-04-09, Ed.) *TAMTw5doYsPnRMpQfVUNziLW98oBwRqwAL*, 9, 79-91.
- Alemayehu, T., Gupta, H., Van Griensven, A., & Bauwens, W. (2022). On the Calibration of Spatially Distributed Hydrologic Models for Poorly Gauged Basins: Exploiting Information from Streamflow Signatures and Remote Sensing-Based Evapotranspiration Data. *Water (Switzerland)*, 14(8). doi:<https://doi.org/10.3390/w14081252>
- Ali, L., & Valdés, J. (2017). Modelos hidrológicos, tipos e aplicações. *FAE, Curitiba*, 20(1), 129-137.
- Almeida, J., & Valdés, L. (2017). Modelos hidrológicos, tipos e aplicações. *FAE,Curitiba*, 20(1), 129-137. Obtenido de <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/13/435>
- Atta-ur, R., Sagheer, A., Mohammed, G., Rashad, A., Shabib, A., & y. M. (2022). Rainfall Prediction System Using Machine Learning Fusion for Smart Cities. *Sensor*, 22(3504). doi:<https://doi.org/10.3390/s22093504>
- Avtar Singh, J., Deepika, B., Retinder, K., Suhail, A., & Kuljit, K. (2021). Hydrological modeling to simulate stream flow under changing climate conditions in Jhelum catchment, western Himalaya. *Journal of Hydrology*(593). doi:doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125887>
- Baioni, E., Porta, G., Cattaneo, N., & Guadagnini, A. (2022). Assessment of Hydrological Processes in an Ungauged Catchment in Eritrea. *Hidrology*, 9(68). doi:<https://doi.org/10.3390/hydrology9050068>
- Balcázar, L. B.-D.-L. (2022). Daily discharges modelling in a basin in southern Ecuador with precipitation and temperature estimated by satellite. *Agrociencia*, 53(4), 465-486.
- Barresi Armoa, O. L., Sauvage, S., Houska, T., Bieger, K., Schürz, C., & Sánchez Pérez, J. M. (2023). Representation of hydrological components under a changing climate—A case study of the Uruguay River Basin using the new version of the Soil and Water Assessment Tool Model (SWAT+). *Water Resources Management*, 37(5), 1123-1140. <https://doi.org/10.3390/w15142604>
- Beven, K. J. (2019). Towards a methodology for testing models as hypotheses in the inexact sciences. *Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 475(2224). doi:<https://doi.org/10.1098/rspa.2018.0862>
- Brendel, A., Ferrelli, F., Piccolo, M., & Perillo, G. (2021). Effects of rainfall variability on the morphometry of water resources in a hydrographic basin located in pampas, Argentina. *Revista Geografica Venezolana*, 62(1), 92 - 106.
- Casado-Rodríguez, J. y. (2022). Hydrograph separation for tackling equifinality in conceptual hydrological models. *Journal of Hydrology*, 610. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127816>
- Chen, Y., Wang, L., Shi, X., Zeng, C., Wang, Y., Wang, G., Qiangba, C., Yue, C., Sun, Z., Renzeng, O., & Zhang, F. (2023). Impact of climate change on the hydrological regimes of the midstream section of the Yarlung Tsangpo River Basin based on SWAT model. *Water Resources Research*, 59(3), 234-250. <https://doi.org/10.3390/w15040685>
- Eccles, R., Zhang, H., Hamilton, D., Trancoso, R., & Syktus, J. (2023). Impacts of climate change on nutrient and sediment loads from a subtropical catchment. *Water Resources Research*, 59(4), 456-470. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118738>
- Fahimnia, B., Pournader, M., Siemsen, E., Bendoly, E., &

- Wang, C. (2019). Behavioral operations and supply chain management—A review and literature mapping. *Decision Sciences*, 50(6), 1127–1183.
- Fernandez-Soto, E., & Peña-Cortés, F. (2016). Aplicación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido en dos cuencas costeras de la Región de La Araucanía (Chile). *Estudios Geográficos*(77), 35-56.
- Galata, A. W. (2022). Modeling the hydrological characteristics of Hangar Watershed, Ethiopia. *Water Supply*, 22(4), 3896–3907.
- Guo, L., Huang, K., Wang, G., & Lin, S. (2022). Development and evaluation of temperature-induced variable source area runoff generation model. *Journal of Hydrology*, 610.
- He, Y., Xiong, J., Guo, S., Zhong, S., Yu, C., & Ma, S. (2023). Using Multi-Source Data to Assess the Hydrologic Alteration and Extremes under a Changing Environment in the Yalong River Basin. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.3390/w15071357>
- Herrera-Franco G., et. al. (2020). Water Sowing and Harvesting (SyCA), ancestral techniques that solve problems of the XXI century . *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 27-31.
- Hughes, D., Birkinshaw, S., Parkin, G., Bovolo, C. I., Ó Dochartaigh, B., MacDonald, A., Franklin, A. L., Cummings, G., & Pereira, R. (2023). An innovative hydrological model for the sparsely-gauged Essequibo River basin, northern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 123, 45-67. <https://doi.org/10.1080/15715124.2023.2278678>
- Instituto de Hidrología (IDEAM)(s.f.). Protocolo de Modelación hidrológica e hidráulica. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38314>
- Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K., & Herrnegger, M. (2018). Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. *European Geosciences Union*, 22(11), 6005–6022.
- Kumar R., H. M. (2022). Rainfall runoff modeling using MIKE 11 NAM of the Jhelum riverin Kashmir Valley, India. *Mausam*, 73(2), 365-372.
- Kumar, M., Elbeltagi, A., Pande, C., Ahmed, A., Chow, M., Pham, Q., . . . Kumar, D. (2022). Applications of Data-driven Models for Daily Discharge Estimation Based on Different Input combinations. *Water Resources Management*, 2201-2221. doi:<https://10.1007/s11269-022-03136-x>
- Lavado-Casimiro, W. (2020). *Estudios Hidrológicos del SENAMHI (Resúmenes ejecutivos-2020)*. ISBN: 978-612-48315-0-8. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/load/>
- Li, J., D. Q., & y Wang, C. (2018). Parameter optimization for carbon and water fluxes in two global land surface models based on surrogate modelling. *International Journal of Climatology*, 38, 1016-1031. Obtenido de <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5428>
- Mai, J., Craig, J., Tolson, B., & Arsenault, R. (2022). The sensitivity of simulated streamflow to individual hydrologic processes across North America. *Nature Communications*, 13(455).
- Martín-Martín, A., Orduna-Malea, E., Thelwall, M., & Delgado López-Cózar, E. (2018). Google scholar, web of science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories. *Journal of Informetrics*, 12(4), 1160–1177. 123 46 Annals of Operations Research (2023) 327:7–47
- Mehlath, S., & Lone, M. (2022). Hydrological modeling to simulate stream flow in the Sindh Valley

- watershed, northwest Himalayas. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2461–2470).
- Morgan Uliana, M., Da Silva, D., Castro Moreira, M., Bueno Pereira, S., & Reis Pereira, D. (2020). Modelos Hidrológicos Sac-Sma E Iph II: Calibração e Avaliação Do Desempenho na Estimativa de Vazões Na Bacia do Rio Piracicaba (Mg). *Irriga, Botucatu*, 25(2). doi:<http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2020v25n2p202-222>
- Mukundan, R., Gelda, R. K., Moknatian, M., Zhang, X., & Steenhuis, T. S. (2023). Watershed-scale modeling of dissolved organic carbon in variable source areas. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130052>
- Ocampo, J., & Vélez, Q. (2013). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24).
- Ochoa-Tocachi, B., Cuadros Adriazola, E., Arapa Guzmán, E., Aste Cannock, N., Ochoa-Tocachi, E., & Vivien, B. (2022). Guía de Modelación Hidrológica para la Infraestructura Natural.
- Pessacq, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Rechencq, M., Asorey, M., Castiñeira, L., & Solman, S. (2018). Water yield in the Limay River Basin: Modelling and calibration. *Meteorologica*, 43(2), 3-23.
- Qiu, J., Shen, Z., & Xie, H. (2023). Drought impacts on hydrology and water quality under climate change. *Journal of Hydrology*, 123, 45-60. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159854>
- Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Joorabian Shooshtari, S., & Parteli, E. J. (2022). Long-term assessment of land-use and climate change on water scarcity in an arid basin in Iran. *Ecological Modelling*, 467. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109934>
- Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Joorabian, S. S., & Parteli, E. J. (2022). Long-term assessment of land-use and climate change on water scarcity in an arid basin in Iran. *Ecological Modelling*, 467. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109934>
- SENAMHI. (2020). Estudios Hidrológicos del SENAMHI. *Resúmenes Ejecutivos*. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1307757/Estudios-hidrol%C3%B3gicos-SENAMHI-set-2020.pdf>
- Silveira A., Cavalcanti A., Filho E. y Severino M. (2022). Calibration of SWMM's hydrological model for the watershed vai e volta stream — Poços de Caldas, Minas Gerais [Calibração do modelo hidrológico SWMM para a bacia do ribeirão vai e volta — Poços de Caldas, Minas Gerais]. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27, 55-65.
- Stehr, A. (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 37-58.
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 37-58.
- Tang, H., Wang, X., Chen, F., Jiang, L., He, C., & Long, A. (2022). Simulation of manas Rives Runoff bases om ERA5-Land Dataset. *Earth Science Frontiers*, 29(3), 271-283. doi:<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2022.1.50>
- Uliana, E., Almeida, D., F.T., De Souza, A., Da Cruz, I., Lisboa, L., & De Sousa, J. M. (2019). Application of SAC-SMA and IPH II hydrological models in the teles pires river basin, Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24.
- Uliana E., et. al (2020). Sac-sma and iph ii hydrological models: Calibration and performance assessment for water flow estimate in piracicaba river basin (mg). *IRRIGA*, 25(2), 202-222.

**Revista de Investigación Científica REBIOL**

- Vázquez-Ochoa, L., Correa-Sandoval, A., Vargas-Castilleja, R., Vázquez-Sauceda, M., & Rodríguez-Castro, J. (2021). Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina. *CienciaUAT*, 16(1).  
doi:<https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1498>
- Vinícius Siqueira, O. C., Lívia Alves, A., Conceição de Maria, M. d., Javier Tomasella, A. C., & Pâmela Aparecida, M. (2021). Impact of climate change on monthly streamflow in the Verde. *Revista Ambiente y Agua*, 16(4).
- Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., Zeng, Z., Lian, Y., & Bai, X. (2018). Climate Change enhances the severity and variability of drought in the Pearl River Basin in South China in the 21 st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 149-162. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192317304872>
- Weatherl, R., Henao Salgado, M., Ramgraber, M., Moeck, C., & Schirmer, M. (2021). Estimating surface runoff and groundwater recharge in an urban catchment using a water balance approach. *Hydrogeology Journal*, 29(7), 2411 - 2428.  
doi:<https://doi.org/10.1007/s10040-021-02385-1>
- Yang, M., Xu, J., Sang, L., & Liu, Q. (2022). Development and application of the distributed water resources allocation and regulation model based on hydrological cycle. *Shuili Xuebao/Journal of Hydraulic Engineering*, 53(4), 456-470.  
doi:<https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20210759>
- Yang, X., Zhou, J., Fang, W., & Wang, Y. (2022). Applicability Analysis of Hydrological Models in the Middle and Upper Reaches of Yangtze River. *Ciencias Ambientales e Ingeniería*, 2, 155-162.  
doi:DOI: 10.1007/978-981-19-1704-2\_14
- Zhang, X., Zhao, D., Wang, T., Wu, X., & Duan, B. (2022). A novel rainfall prediction model based on CEEMDAN-PSO-ELM coupled model. *Water Supply*, 22(4), 4531-4543.
- Zhao, Y., Nearing, M., & Guertin, D. (2022). Modeling hydrologic responses using multi-site and single-site rainfall generators in a semi-arid watershed. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 177-187.
- Zhu, Z., Fu, C., Wu, H., Wu, H., Cao, Y., & Xia, Y. (2023). Decoding the hundred-year water level changes of the largest saline lake in China: A joint lake-basin modeling study based on a revised SWAT+. *Journal of Hydrology*, 123, 78-90.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101521>