



MODELIZACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE INUNDACIONES EN LA CUENCA HUALLAGA



Dirección de Hidrología

Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

Octubre 2024

Modelización espacio temporal de inundaciones en la cuenca Huallaga

2024

MODELIZACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE INUNDACIONES EN LA CUENCA HUALLAGA

MINISTRO DEL AMBIENTE

Juan Castro Vargas

PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Gabriela Teófila Rosas Benancio

DIRECTOR DE HIDROLOGÍA

Oscar Gustavo Felipe Obando

AUTORES

Jonathan Giovanni Qquenta Chambi

Waldo Sven Lavado Casimiro

Cristian Albert Montesinos Cáceres

Oscar Gustavo Felipe Obando

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Cristian Montesinos Cáceres

Primera edición: octubre de 2024

Depósito Legal N° 2024-10501

Estudio disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3682>

© Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Jr. Cahuide N°785, Jesús María, Lima – Perú.

Teléfono: (01) 614-1414

www.gob.pe/senamhi

Publicación realizada por el Proyecto de “Mejora de la capacidad adaptativa de las comunidades andinas a través de los servicios climáticos” (ENANDES), que busca fortalecer la capacidad de la sociedad y las comunidades de Chile, Colombia y Perú para adaptarse a la variabilidad y el cambio climático. Esta intervención del 2021 al 2025, está financiada por el Fondo de Adaptación e implementada por la OMM en asociación con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú – SENAMHI, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM, la Dirección Meteorológica de Chile – DMC y el Centro Internacional de Investigación del Fenómeno de El Niño – CIIFEN.

Referencia sugerida:

Qquenta, J.G., Lavado, W. S., Montesinos, C.A & Felipe, O.G. (2024). *Modelización espacio temporal de inundaciones en la cuenca del río Huallaga*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3682>

Todos los derechos reservados

Prohibida la reproducción de este estudio por cualquier medio, total o parcialmente sin permiso expreso.

CONTENIDO

I.	ANTECEDENTES.....	1
II.	INTRODUCCIÓN.....	2
III.	METODOLOGÍA.....	5
3.1.	Área de estudio	5
3.2.	Modelado hidrodinámico.....	6
3.3.	Datos de ingreso.....	8
3.3.1.	Datos topográficos	8
3.3.2.	Datos meteorológicos	11
3.3.3.	Cobertura vegetal y uso de suelo.....	13
3.3.4.	Hidrometría.....	14
3.4.	Configuraciones	15
3.4.1.	Parámetros geométricos	15
3.4.2.	Condiciones previas.....	16
3.5.	Aplicación del modelo a escala reducida	17
3.6.	Eventos históricos registrados.....	18
IV.	ANÁLISIS Y DESARROLLO.....	19
4.1.	Modelado hidrológico-hidráulico	19
4.2.	Calibración y validación del modelo hidrológico	19
4.3.	Modelado hidráulico	21
4.4.	Validación del modelo hidráulico	22
V.	CONCLUSIONES Y DISCUSIONES	24
VI.	REFERENCIAS.....	26

PRESENTACIÓN

La identificación de zonas potencialmente impactadas por eventos de inundación resulta relevante para gestionarla y tener acciones de alerta frente a estos eventos. Los desastres por eventos de inundación engloban impactos en todo el Perú, incluyendo a cuencas relevantes como la cuenca del río Huallaga. Los impactos afectan el sector economía, infraestructura, ambiente, entre otros.

Los estudios e investigaciones sobre la temática evalúan la generación de información hidrológica (series hidrometeorológicas) e hidráulicas (manchas de inundación) que contribuyan a la comprensión y vigilancia del evento. El presente estudio se centró en la evaluación de la capacidad de predicción del modelo hidrológico - hidráulico japonés denominado "Rainfall-Runoff-Inundation" (RRI), empleando datos observados y teledetección satelital con el fin de evaluar las inundaciones en la cuenca del río Huallaga en Perú.

El modelo RRI requirió como datos de entrada, principalmente, el DEM (Modelo numérico de terreno topográfico) de la región en formato ráster, información sobre cobertura vegetal y uso del suelo y datos meteorológicos. El modelo RRI fue evaluado para el periodo 2014-2019, en el cual los parámetros geométricos del modelo RRI fueron cuantificados utilizando información de altimetría satelital y teledetección.

La parte hidrológica del modelo se comparó con 7 estaciones hidrológicas localizadas en la cuenca del río Huallaga, obteniendo resultados Satisfactorios con coeficientes de Kling-Gupta (KGE) superiores a 0.5 durante el período de calibración y validación del modelo.

Adicionalmente, se emplearon series de niveles de inundación registrados en 3 estaciones hidrométricas para validar los niveles de inundación simulados, además los mapas de inundación generados con RRI fueron comparados con manchas de productos satelitales; obteniéndose resultados satisfactorios.

Este estudio, forma parte de los resultados del proyecto ENANDES (Mejorando la capacidad adaptativa de las comunidades andinas a través de Servicios Climáticos) implementado en Perú que busca mejorar los servicios climáticos en el Perú con énfasis en la gestión de riesgos de desastres y la relación agua-energía para el tema hidrológico.

I. ANTECEDENTES

Las ciudades ubicadas en el ámbito de la cuenca del Huallaga están bajo riesgo constante a causa de los desbordes del río; lo cual, sumado a lluvias torrenciales e inundaciones, pone en situación vulnerable a los habitantes de dichas ciudades. Es así como, en el año 2018, el Gobierno Regional de Huánuco clasificó a 47 zonas del departamento con nivel de riesgo de inundación, entre las cuales 25 presentan un riesgo alto y 22 un riesgo muy alto de inundarse según registros del Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación (SINPAD) del INDECI, en el 2018. En el Compendio Estadístico de Prevención y Atención de Desastres 2010 se registra la inundación ocurrida en San Martín el 28 de diciembre del 2006, la cual según los registros dejó 2154 damnificados, 424 viviendas destruidas, puentes y carreteras destruidas y un total de 36 966 personas afectadas según registros del Instituto Nacional de Defensa Civil del Perú (INDECI) en el 2010. Tomando como referencia el periodo disponible de datos, y el periodo común entre los registros de las estaciones hidrométricas, se procedió con la recopilación de eventos históricos de inundaciones ocurridas en el área de interés, dicha revisión incluyó fuentes primarias y secundarias. Los resultados de la recopilación de información se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Recopilación de eventos históricos de inundaciones en el río Huallaga

Fecha	Evento	Lugar
2006	Desborde del río Huallaga – Tingo María	Tingo María, Huánuco
2013	Huánuco: dos mil pobladores damnificados por nuevo desborde del río Huallaga	Tingo María, Huánuco
2013	Inundación en la provincia de Leoncio Prado	Tingo María, Huánuco
2013	Fuertes lluvias generan emergencia en Tingo María	Tingo María, Huánuco
2015	Perú declara en emergencia a 13 distritos selváticos por lluvias	San Martín
2015	Desbordados seis ríos de la Amazonía peruana por las lluvias de El Niño	San Martín
2016	Fenómeno El Niño: río Huallaga está al borde de provocar inundación	Tocache, San Martín
2017	Río Huallaga se acerca a un nivel crítico de inundación	Loreto
2018	Huánuco: desborde del río Huallaga deja un desaparecido	Huánuco, Ambo
2019	Poblados en provincia de Tocache afectados por desborde de ríos	San Martín
2019	Río Huallaga se desborda en San Martín por lluvias intensas	San Martín

II. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones se presentan como un fenómeno natural recurrente y devastador en todo el mundo, provocadas predominantemente por extremos de precipitaciones (Amarnath et al., 2017; Tanaka et al., 2020). Además, en las últimas décadas se prevé un aumento progresivo de eventos de inundación (Jongman et al., 2012) provocados por fenómenos meteorológicos extremos asociados al cambio climático (IPCC, 2023), representando de esa manera un tercio de la cantidad anual de desastres naturales. De esta manera, aquellos países en vías de desarrollo y que no cuenten con sistemas de identificación de zonas inundables, o no hayan adoptado medidas de mitigación y/o alerta temprana o pronósticos hidrológicos, se verán afectados en diversos sectores tales como el sector económico, ambiental, entre otros (IPCC, 2004).

Es por ese motivo que, con la finalidad de mejorar los estándares de calidad de vida de múltiples sociedades en el mundo se implementaron políticas y medidas de control de inundaciones (Douben et al., 2006). Asimismo, en los últimos años, el daño causado por inundaciones ha sido extremadamente severo. En términos económicos, por ejemplo, las inundaciones fueron la causa de un tercio de las pérdidas totales entre 1986 y 1995, siendo un monto de aproximadamente \$630 billones de dólares. Según registros históricos internacionales como la base de datos de sucesos de emergencia (EM-DAT y DesInventar) las pérdidas se materializan en cantidad de ocurrencias, población fallecida, población afectada y pérdidas humanas (Panwar & Sen et al., 2019). Para el periodo 2000 y 2022 se han registrado entre 45 eventos de inundación en el Perú, con 823 personas fallecidas, 4 521 901 de personas afectadas y pérdidas de hasta \$ 3 861 313 (<https://public.emdat.be/mapping>).

El Perú es un país expuesto a peligros constantes a causa de sus características geográficas, climáticas, entre otras. Estos desastres naturales, entre los cuales se encuentran las inundaciones generan no solo pérdidas económicas, sino también son causa de grandes pérdidas humanas y de infraestructura de los distintos sectores económicos (Santos, 2020). Los eventos de inundación se presentan en los periodos de avenida, con presencia de fuertes o constantes precipitaciones. En Perú, el año hidrológico inicia en setiembre, y por lo general los picos de caudal máximo son alcanzados entre los meses de noviembre a mayo. Además de la onda de avenida, los eventos de inundación también se encuentran asociados a la producción de sedimentos y erosión en determinadas zonas del cauce, lo cual trae como consecuencia daños en campos de cultivo y vías de comunicación. Las inundaciones, además de destruir con facilidad viviendas, pueden provocar el colapso de redes de alcantarillado, pozos y captaciones de agua; consecuentemente, se ha registrado aumento de la reproducción de insectos transmisores de enfermedades tropicales como la malaria y el dengue a causa del estancamiento de las aguas. En la región hidrográfica del Amazonas, la cual ocupa más de la mitad del territorio peruano, se han registrado precipitaciones anuales entre 3000-5000 mm. Asimismo, la población de la

región se ha visto incrementada debido a la migración proveniente de zonas andinas, lo cual impulsó el surgimiento de centros poblados de gran extensión en Huánuco y San Martín, a través de los cuales transita el río Huallaga. Los constantes desbordes del río Huallaga suponen una amenaza para ciudades ubicadas en el ámbito de la cuenca, en donde los habitantes han sido víctimas en más de una ocasión de lluvias torrenciales e inundaciones.

El diseño de entornos urbanos sostenibles utiliza el mapeo de inundaciones como una herramienta importante, con la finalidad de mitigar los riesgos de desastres y proteger vidas humanas (Tanaka et al., 2020). Es también un paso clave para el desarrollo de mapas de peligros de inundaciones, el cual permite realizar las evaluaciones necesarias. Generalmente, se requieren observaciones repetidas del área y de la inundación, que se obtienen a través de sistemas de teledetección (Khaing et al., 2019 b; Seneviratne et al., 2012). La eficacia de la teledetección satelital ha sido corroborada en varios proyectos realizados en Japón, país que cuenta con bases de datos de imágenes satelitales. Sin embargo, en áreas con información insuficiente, los modelos hidrológicos-hidráulicos juegan un papel importante en el modelado de inundaciones.

De la literatura se puede desprender el uso de modelos numéricos como LISFLOOD, HEC RAS, IBER, RRI para simular inundaciones (Donnelly et al., 2022; Salazar-Briones et al., 2018). Sin embargo, RRI, incluye ventajas, las cuales comprenden la capacidad de calcular simultáneamente la hidrología (series de caudales y niveles) e hidráulica (manchas de inundación) en todo el ámbito de la cuenca. Sumado a ello, RRI también simula el flujo subterráneo (subsuperficie lateral e infiltración vertical) para representaciones físicas de los procesos de lluvia y escorrentía. Adicionalmente, RRI presenta un proceso de enrutamiento unidimensional de ondas difusivas y su interacción con el modelo de pendiente (Sayama et al., 2012). Otra de las ventajas de RRI, se centra en la resolución temporal a la que puede simular el modelo (diario, horario, minuto, etc.). También, RRI cuenta con herramientas capaces de disminuir la resolución de la topografía, a fin de agilizar el tiempo de cálculo. Adicionalmente, puede reajustar la topografía con el objetivo de mejorar la definición de los elementos como la red hídrica (Ly et al., 2023; Yoshimoto & Amarnath et al., 2018). RRI puede descargar directamente la cobertura vegetal y el uso de suelo para cualquier parte del mundo (Shrestha et al., 2019). RRI cuenta con una interfaz gráfica para el preprocesamiento y post-procesamiento, además de que puede ser ejecutado totalmente desde una GUI (Graphical User Interface), una CUI (Character User Interface) o desde el lenguaje de programación R. Al tener la posibilidad de ejecutarse mediante lenguaje R, cuenta con la posibilidad de incluir métodos de calibración automática (Kakinuma et al., 2020). En adición, RRI es capaz de generar resultados para cada paso de resolución al que se esté trabajando. Por otro lado, la principal limitación es la resolución de los resultados y el costo computacional que conlleva realizar los procesos de hidrología e hidráulica simultáneamente. Es de esta manera que, en general, la bibliografía presenta casos de estudio en los que se trabajó con resoluciones de 1 km x 1 km a más, lo que conlleva a realizar evaluaciones a escalas regionales, mas no, focalizadas

(Try et al., 2018b; Yoshimoto & Amarnath et al., 2018). RRI cuenta con bases de datos de precipitación y topografía, sin embargo, estas se encuentran limitadas al continente asiático. La GUI cuenta con un límite de celdas a procesar, por lo que no es posible simular grandes cuencas a resoluciones finas. RRI solo trabaja con un mallado tipo estructurado, por lo que adopta las celdas del DEM ingresado, mas no permite el ingreso de mallas no estructuradas o el refinamiento de zonas de interés.

De las aplicaciones de RRI en cuencas de todo el mundo, se describe que el modelo pudo ser calibrado y validado en su parte hidrológica con estaciones observadas, comparando de esta manera las series simuladas de caudal versus las series de registros históricos (Abdel-Fattah et al., 2018; Tam et al., 2021). Para este proceso de comparación, diversos autores emplearon métricas de eficiencia como NSE, KGE, PBIAS, entre otros. Mientras que la parte hidráulica, se validó comparando las manchas de inundación con imágenes satelitales de diversas fuentes (Ly et al., 2023; Try et al., 2022).

Es de esta manera, que los desafíos a la comunidad científica sobre la adecuación de RRI se centran en el costo computacional que conlleva el proceso de simulación de largos registros de tiempo, y la resolución límite con la que cuenta RRI. También, para su aplicación, es indispensable contar principalmente con registros de precipitación para la generación de caudales, niveles y manchas de inundación. Otro de los grandes desafíos es la mejora por conseguir resultados de alta resolución, con el fin de poder identificar de forma más focalizada las zonas potencialmente impactadas.

Bajo ese contexto, el presente estudio tiene como objetivo ejecutar el modelo hidrológico-hidráulico denominado Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) en la cuenca del río Huallaga, donde se buscó generar caudales, niveles y manchas de inundación para la evaluación de diversos eventos de inundación con el propósito de entender los procesos hidrológicos con énfasis en extremos (inundaciones).

III. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El río Huallaga, localizado en la región hidrográfica del Amazonas, es uno de los principales ríos de Perú (Figura 1). El área de estudio comprende un área total de aproximadamente 80 000 km². Se encuentra bajo la jurisdicción de la Autoridad Administrativa del Agua VIII Huallaga. Su ubicación política comprende a los departamentos de Huánuco, San Martín, así como parte de Pasco y Loreto.

En la cuenca se encuentran estaciones meteorológicas e hidrométricas dentro de las cuales podemos señalar a: La Unión, Tarapoto, Shanao, Tulumayo, Aucayacu, Campanilla, Saposoa, Shanusi, San Ramón, Picota y Sauce, Langa (meteorológicas); Cumbaza, Tioyacu, Higuera, Picota y Shaboyacu (hidrométricas), entre otras. Sin embargo, para el presente estudio se empleó información de precipitación y evapotranspiración PISCO y 7 estaciones hidrométricas (Chalca, Tingo María, Tocache, Campanilla, Picota, Shanao, Chazuta). Además, esta cuenca resulta relevante por contener unidades generadoras de energía eléctrica de tipo hidráulica, las mismas que aprovechan las aguas del curso principal del río Huallaga. Dentro de sus características físicas, la cuenca del río Huallaga, presenta diversas Unidades Geológicas (U.G), de las cuales predomina la unidad geológica Cuaternario holoceno-continental, abarcando una superficie que representa el 35.9% del área total, mientras que la de menor superficie es la U.G. Neógeno, granodiorita-tonalita, la cual ocupa un 0.006% del área total. Por otro lado, según la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN), en cuanto a la capacidad de uso mayor de tierras, el uso mayoritario se da para la denominada "Asociación de protección forestal", la cual presenta limitada erosión, calidad agrológica baja y cubre una superficie del 34,89% del área total. También, el uso menor de tierras presenta una menor extensión, con una ocupación del 0,044% del área total.

Esta cuenca se encuentra dividida en 5 tipos de zonas, que representan más del 60% de la cuenca; área agrícola, alrededor de 20%; área de pradera/arbustos, alrededor de 15%; nevados y cuerpos de agua. A lo largo del año, la humedad relativa varía entre 75 y 91%, siendo el periodo entre diciembre y marzo, en donde se presentan máximos de humedad relativa. La precipitación media areal anual estimada para la zona de estudio presentó registros de 2500mm, siendo la zona de Tingo María el lugar que presentó los mayores registros de precipitación, mientras que en el Bajo Huallaga y en la zona sierra de Huánuco se presentaron las precipitaciones más bajas. Por otro lado, la evapotranspiración media areal anual estimada para la zona de estudio presentó registros de 1500 mm, siendo la zona del Bajo Huallaga la que presentó los registros de evapotranspiración más altos.

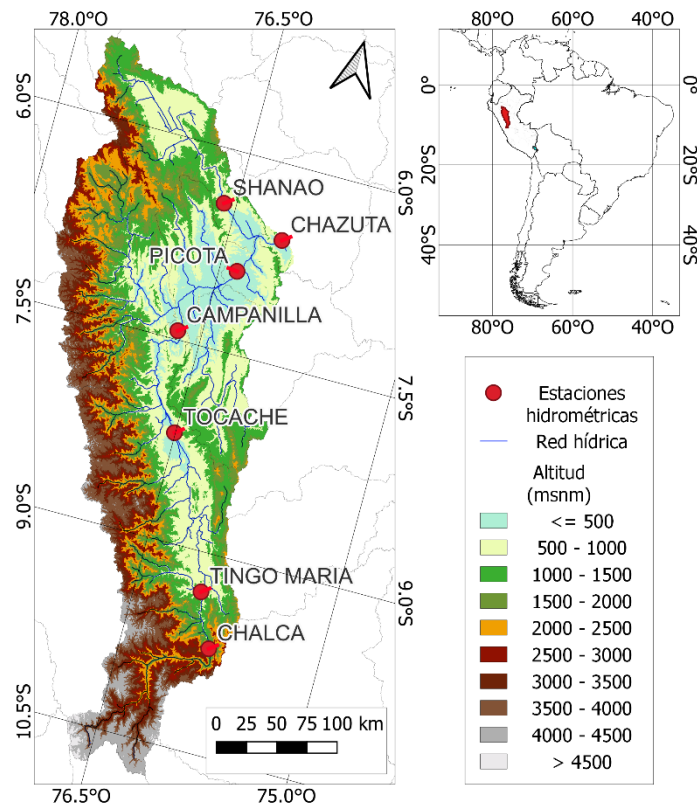


Figura 1. Mapa de ubicación y elevación de la cuenca hidrográfica del río Huallaga, conteniendo la ubicación de las estaciones hidrométricas en la cuenca del río Huallaga.

3.2. Modelado hidrodinámico

El modelo Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) es un modelo de dos dimensiones en el cual se pueden simular procesos hidrológicos e hidráulicos de forma simultánea (Sayama et al., 2012; Tam et al., 2021). El análisis hidrológico consiste en generar hidrogramas de caudal lo largo de todo el dominio, mientras el análisis hidráulico incluirá niveles de inundación y manchas de inundación simuladas (Try et al., 2018a). El enfoque adoptado en el modelo considera de manera individual las laderas y los cauces fluviales. Cuando se posiciona el canal de un río en una celda de la cuadrícula, se presupone que tanto la pendiente como el río están contenidos dentro de esa misma celda. La discretización del canal se realiza como una única línea a lo largo del eje central de la celda de la cuadrícula que contiene la pendiente correspondiente. El cálculo del flujo en las celdas de la cuadrícula de pendiente se realiza utilizando el modelo de onda difusiva 2D, mientras que el flujo en el canal se determina mediante el modelo de onda difusiva 1D. Con el objetivo de mejorar las representaciones de los procesos relacionados con la precipitación, la escorrentía y las inundaciones, el modelo RRI también simula el flujo subterráneo lateral, la infiltración vertical y el flujo superficial. La contribución del flujo subterráneo lateral, especialmente relevante en áreas montañosas, se aborda considerando la relación de gradiente hidráulico de descarga, que incorpora tanto flujos subterráneos saturados como superficiales. Por otro lado, la estimación del flujo de infiltración vertical se realiza utilizando el modelo Green-Ampt. La interacción entre el flujo en el cauce del río y la pendiente se evalúa mediante diversas fórmulas de

desbordamiento, las cuales varían según las condiciones de nivel de agua y altura del dique (Sayama et al., 2012).

El modelo RRI fue desarrollado por el Centro Internacional de Peligro de Agua y Administración de Riesgos (ICHARM, por las siglas en inglés International Center for Water Hazard and Risk Management), auspiciado por la UNESCO (Khaing et al., 2019b). El modelado en RRI se detalla esquemáticamente en la Figura 2.

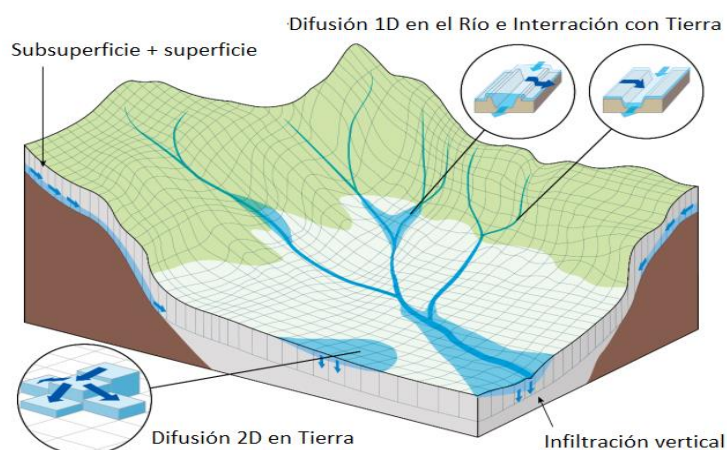


Figura 2. Diagrama esquemático de funcionamiento del modelo RRI

Entre las bondades del modelado hidráulico-hidrológico con RRI es que el modelo distingue características topográficas, tales como pendientes y canales de río, en los cuales se calcula el flujo de agua (Kakinuma et al., 2020). Asimismo, también representa (1) flujo subsuperficial lateral (que toma en cuenta flujo saturado y no saturado); (2) flujo de infiltración vertical (estimado a partir del modelo Green-Ampt) y (3) flujo superficial. El cálculo numérico para estimaciones de flujo utiliza ecuaciones de balance de masa y momentos para un flujo gradualmente variado e inestable (Sayama et al., 2012). Debido a los análisis numéricos de RRI, se calcula el flujo de agua en los canales de río mediante el uso de un modelo unidimensional de onda difusiva (Yoshimoto & Amarnath, 2018). Para realizar dichos cálculos, asume que la geometría de las cuadrículas de río son rectángulos definidos por el ancho W , profundidad D y altura de la rivera H_e . Los parámetros geométricos de RRI (C_W , S_W , C_D , S_D) se pueden estimar a partir de las siguientes ecuaciones:

$$w = C_W * A^{S_W} \quad (1)$$

$$D = C_D * A^{S_D} \quad (2)$$

Donde

A : Área de drenaje aguas arriba del punto de captación [km^2].

C_W, S_W : Parámetros geométricos de ancho del río.

S_W, S_D : Parámetros geométricos de profundidad del río.

Por otro lado, el modelo ha sido desarrollado en el lenguaje computacional Fortran 90, y presenta originalmente dos modos de uso: Interfaz de comandos

(CUI), que opera en la consola Símbolo del Sistema de Windows; y la Interfaz gráfica (GUI). Sin embargo, debido a los avances computacionales, RRI puede ser ejecutado adicionalmente desde el lenguaje de programación R, y de plataformas de modelado hidráulico como iRIC (Abdel-Fattah et al., 2018).

3.3. Datos de ingreso

El modelo RRI requiere como datos de entrada, datos topográficos, meteorológicos y, opcionalmente, datos como la cobertura vegetal y uso de suelos. Estos datos fueron obtenidos a partir de fuentes de libre acceso y de amplio uso en temas relacionados al modelamiento hidráulico e hidrológico. Además, es necesario considerar un periodo de calentamiento y condiciones iniciales, con el objetivo de estabilizar el modelo.

3.3.1. Datos topográficos

Los datos topográficos requeridos por RRI, fueron obtenidos a partir del procesamiento del producto Forest And Buildings removed Copernicus DEM (FABDEM) descargado a partir de su fuente oficial <https://www.fathom.global/product/fabdem/>. FABDEM se describe como el primer modelo de elevación digital global con bosques y edificios removidos. Este producto presenta una resolución de 30 m y toma como base a Copernicus-GLO 30 (un modelo digital de superficie, que incluye edificios, infraestructura y vegetación). Este producto emplea un algoritmo de corrección para eliminar el sesgo del modelo digital de superficie Copernicus GLO 30 que se genera por la existencia de objetos en la superficie terrestre. La Figura 3 muestra el método utilizado para la creación de FABDEM (Hawker et al., 2022). El proceso para producir FABDEM consiste en tres etapas: (1) Etapa de preparación de datos, que implica procesar los DEM's de referencia y la información predictiva tal como la altura de vegetación y la huella de asentamiento mundial, entre otros. (2) Etapa de corrección de vegetación e infraestructura, realizada por separado para remover tanto bosques como edificios. (3) Etapa de post-procesamiento, en donde se fusionan los DEM's que se obtuvieron después de la corrección, se realiza un llenado de los espacios no realistas y se aplican filtros de suavizado, obteniendo como resultado una base de datos mejorada. Además, este producto presenta cobertura global, y es capaz de identificar satisfactoriamente características topográficas específicas, como rutas de flujo angostas lo que se traduce en un modelamiento más detallado aun teniendo 30m de resolución. Este producto ha sido validado en comparación con otros DEM globales (Brasington & Richards et al., 1998), obteniendo como resultados que FABDEM presenta una resolución espacial más fina, lo que lo convierte en un modelo de elevación digital idóneo para representar la dinámica de flujo de ríos de una manera más realista.

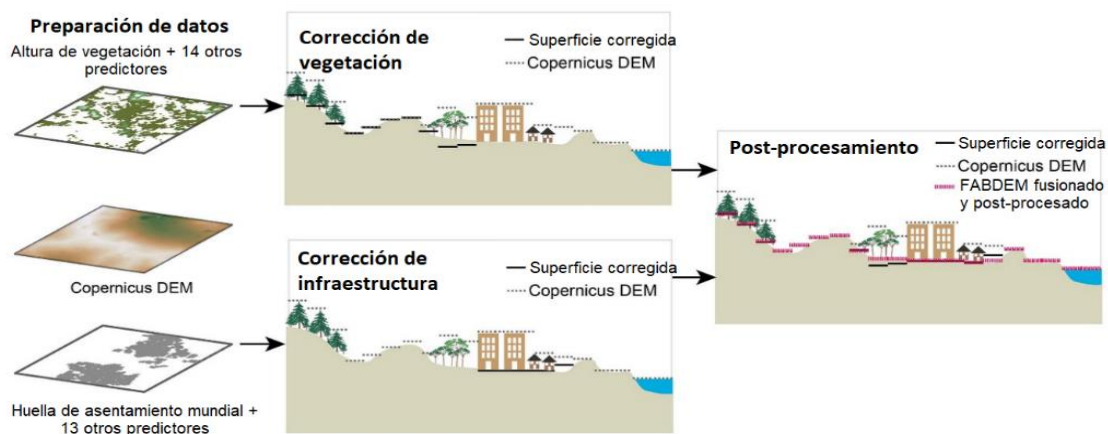


Figura 3. Esquema metodológico para la construcción del modelo digital de elevación FABDEM

De la literatura, autores como (Hawker et al., 2022) muestran que, estadísticamente FABDEM es el DEM global más preciso en comparación con otros productos derivados de la base de datos SRTM (LiDAR, MERIT DEM, NASA DEM, entre otros), con un error medio que varía entre -0.11 y 0.45m, menor que el error obtenido de los otros DEM (Pakoksung & Takagi et al., 2021). Es así como la Figura 4, muestra visualmente como la red hídrica de las zonas cercanas a 2 estaciones hidrométricas denotan una mejor definición y por ende mejor performance de FABDEM en comparación con ASTER-GDEM al momento de representar la topografía del terreno y el curso del río principal. Debido al costo computacional del modelado hidráulico con RRI, fue necesario el reescalado del DEM a resoluciones más gruesas. Para el estudio, se delimitó la cuenca del río Huallaga con respecto a la estación hidrométrica de Chazuta.

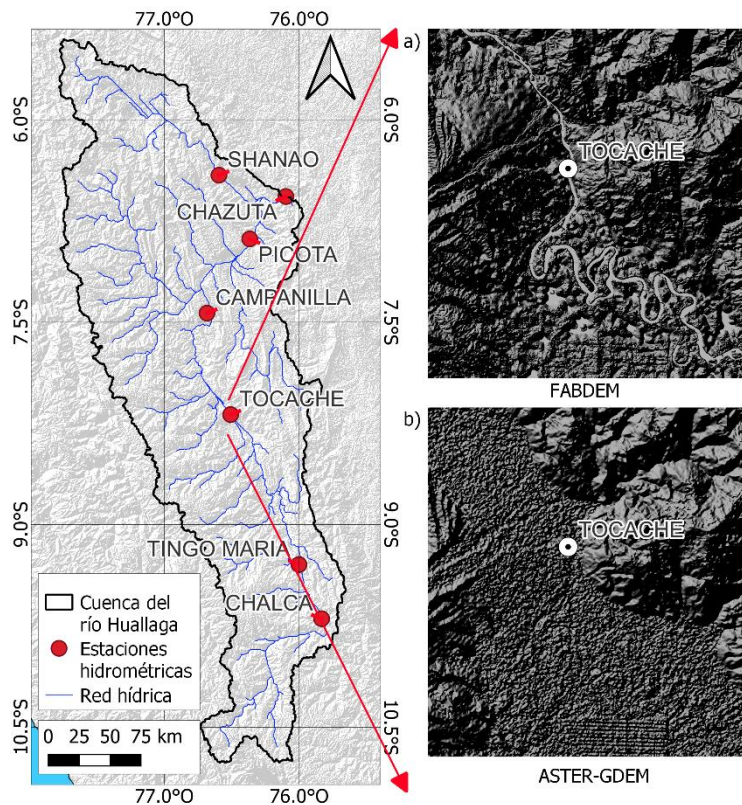


Figura 4. Comparación de archivos digitales de elevación FABDEM y ASTER-GDEM, ambos a 30m

El modelado con RRI requiere tres tipos de datos topográficos principalmente: (1) elevación de la zona de interés (DEM), (2) dirección de flujo (dir) y (3) acumulación de flujo (acc). Dichos datos geográficos fueron procesados y obtenidos a partir de la topografía inicial descargada de FABDEM (Tam et al., 2021). Para este proceso fue necesario el procesamiento con herramientas GIS, donde estos datos topográficos resultantes fueron empleados en formato ASCII, por lo cual se realizó la transformación de ráster a ASCII para cada uno de los archivos. En el formato ASCII se debe garantizar la inclusión del número de columnas, filas, tamaño de celda y coordenada en el eje x e y. En la Figura 5 se describen los datos topográficos iniciales para el modelamiento con RRI (DEM, dir y acc) obtenidos a partir del procesamiento de FABDEM (Yoshimoto & Amarnath et al., 2018).

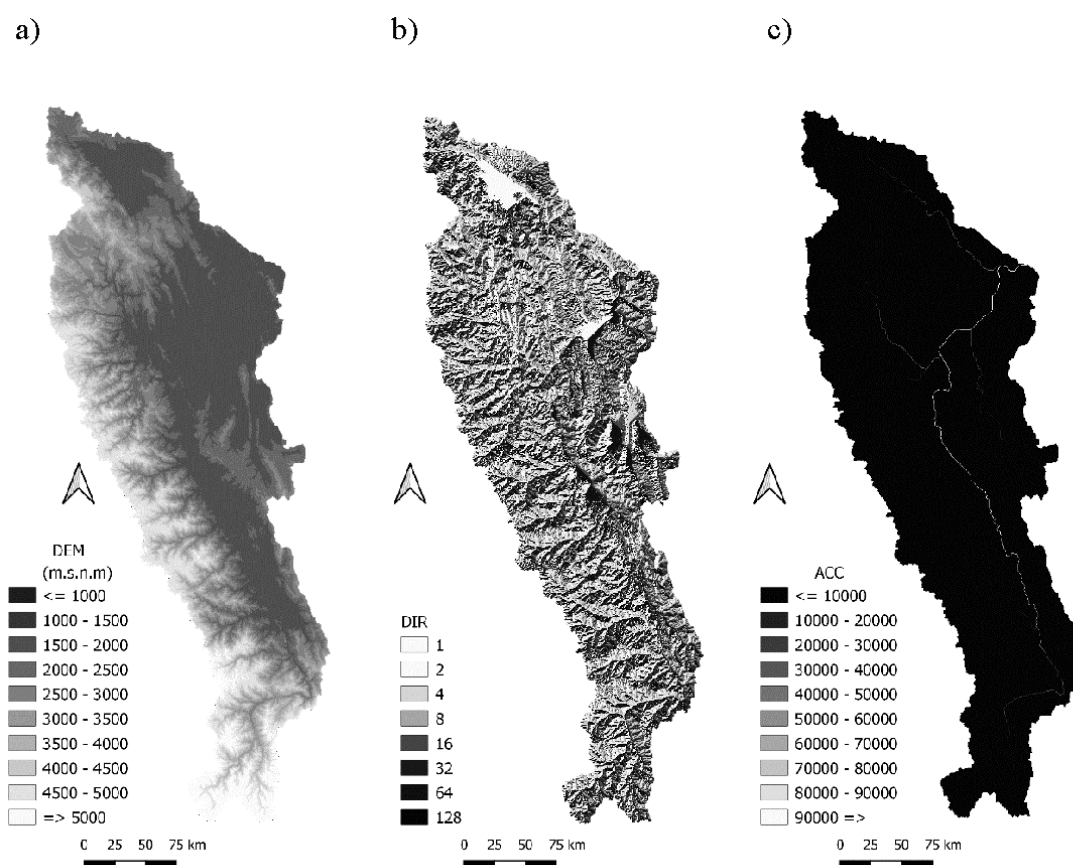


Figura 5. Inputs topográficos para el modelo RRI generados a partir de FABDEM, a) Modelo Digital de Elevación, b) Flow Direction, c) Flow Accumulation.

Asimismo, para una mejora en el modelamiento, RRI contempla herramientas propias de auto escalado (aumento de la escala), con el objetivo de disminuir el costo computacional en áreas extensas y reajuste de la topografía (afinar la red hídrica).

3.3.2. Datos meteorológicos

Los datos de precipitación diaria u horaria son el principal input meteorológico de entrada para el modelo RRI. Para el presente estudio se descargaron datos de precipitación y evapotranspiración del producto grillado Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations (PISCO), desarrollado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). El producto grillado PISCO es de libre acceso y se pueden descargar a partir de fuentes oficiales como (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/?Set-Language=es>). El producto PISCO (Aybar et al., 2017), empleado en este estudio presenta una resolución de grilla de 0.05° (~ 5km) y resolución temporal diaria, para un periodo de datos desde 2014 - 2019 y fueron descargados puntualmente en 509 puntos alrededor de la cuenca Huallaga. Por otro lado, con el propósito de obtener una simulación más detallada, se utilizaron datos de evapotranspiración, los cuales también se descargaron del producto PISCO, para el mismo periodo de tiempo (Figura 6). Dichas variables

meteorológicas fueron estructuradas en formato .csv para su reconocimiento por el modelado con RRI.

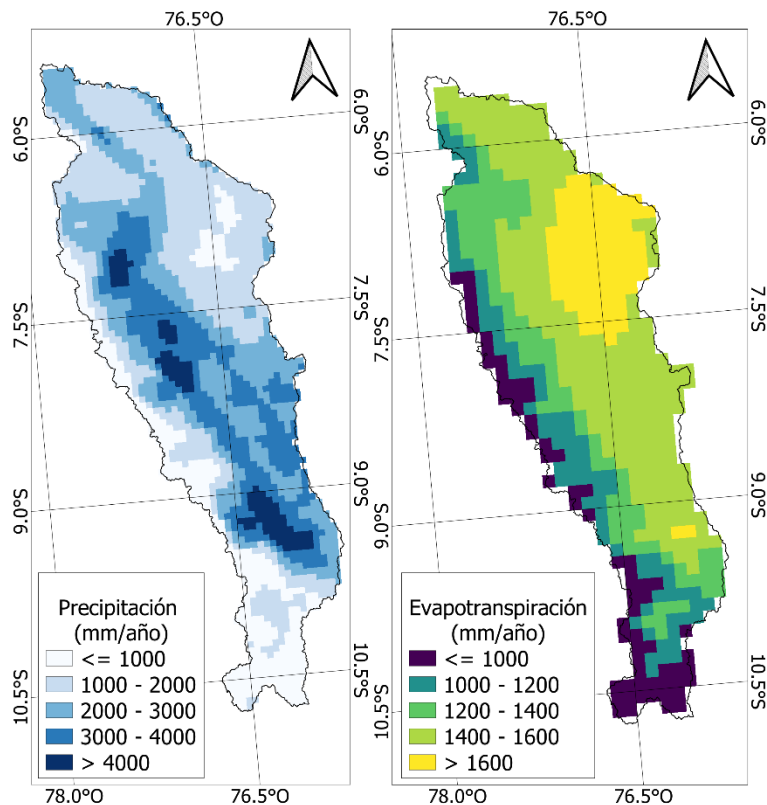


Figura 6. Datos de entrada meteorológicos para el modelo RRI generados a partir del producto PISCO, a la izquierda se presenta la precipitación y a la derecha la evapotranspiración en la cuenca Huallaga.

Para una mejor representación de la climatología de la cuenca del río del Huallaga, se procedió con la discretización en subcuencas, de las cuales se tomaron aquellas pertenecientes a la delimitación hasta la estación hidrométrica Chazuta. Consecuentemente, se descargó información de precipitación y evapotranspiración en los centroides de las subcuencas delimitadas anteriormente (Figura 7a, Figura 7c). Estas descargas generaron 509 series de precipitación y evapotranspiración, los cuáles se adecuaron al formato para su ingreso al modelado RRI definiendo su área de influencia mediante polígonos de Thiessen (Figura 7b, Figura 7d).

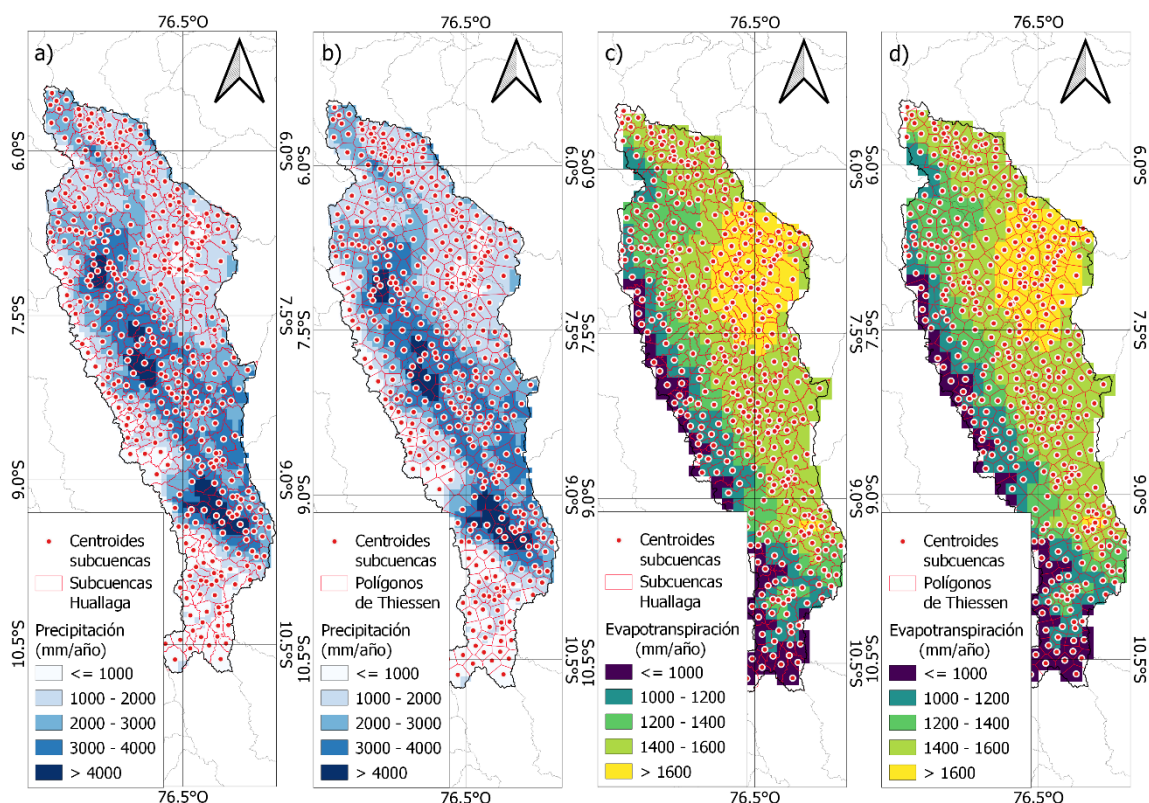


Figura 7. Distribución de los centroides de las subcuencas (puntos rojos) donde se extrajo la precipitación y evapotranspiración en la cuenca Huallaga. Delimitación por subcuencas y polígonos de Thiessen generados a partir de los centroides.

3.3.3. Cobertura vegetal y uso de suelo

De la revisión bibliográfica se desprende al uso de suelo como un parámetro complementario importante para la descripción de sistemas hidrológicos de una cuenca (Shahid et al., 2022). La cobertura vegetal y uso de suelo generan impactos en la evapotranspiración, infiltración, escorrentía, erosión y sedimentación; y por consiguiente provocan cambios en las manchas de inundación previstas en los modelamientos hidráulicos. Los datos del uso de suelo empleados para la presente investigación se obtuvieron del producto MODIS Land Cover Type (MCD12Q1) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>) (Friedl et al., 2010). Este producto identifica 17 diferentes usos de suelo clasificados según el International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), los cuales fueron reclasificados en diferentes tipos de acuerdo con el manual de uso del modelo RRI (Figura 8). Además, se agregó un polígono en el cauce del río (el cual fue rasterizado y adicionado al ráster de suelos) que corresponde a la clasificación de cuerpos de agua para una mejor representación de los procesos hidrológicos-hidráulicos.

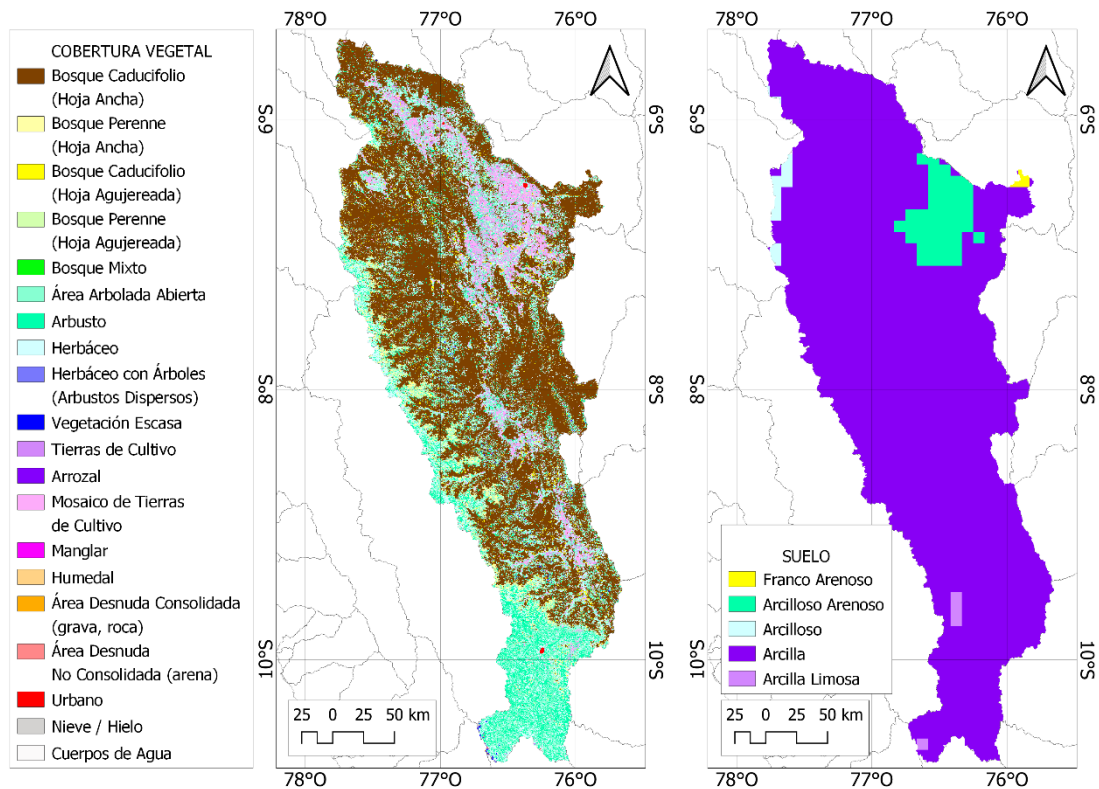


Figura 8. Inputs topográficos complementarios, a) Mapa de uso de suelos y b) cobertura vegetal de la cuenca del río Huallaga

3.3.4. Hidrometría

Debido a la necesidad de evaluar los recursos hídricos del país, SENAMHI realiza el monitoreo constante de ríos de importancia nacional, entre los cuales se encuentra el río Huallaga. Este monitoreo se traduce en el registro histórico de los valores diarios históricos de caudal en estaciones como (1) Chalca; (2) Puente Tingo María; (3) Puente Tocache; (4) Campanilla; (5) Picota; (6) Shanao; (7) Chazuta. La Figura 9 describe observa el régimen de caudales mensuales de cada estación, asimismo, se describe que los registros de caudal no tienen la misma longitud de registro de datos. Debido a esto, se tomó el periodo común de 2014-2019 para la simulación con RRI.

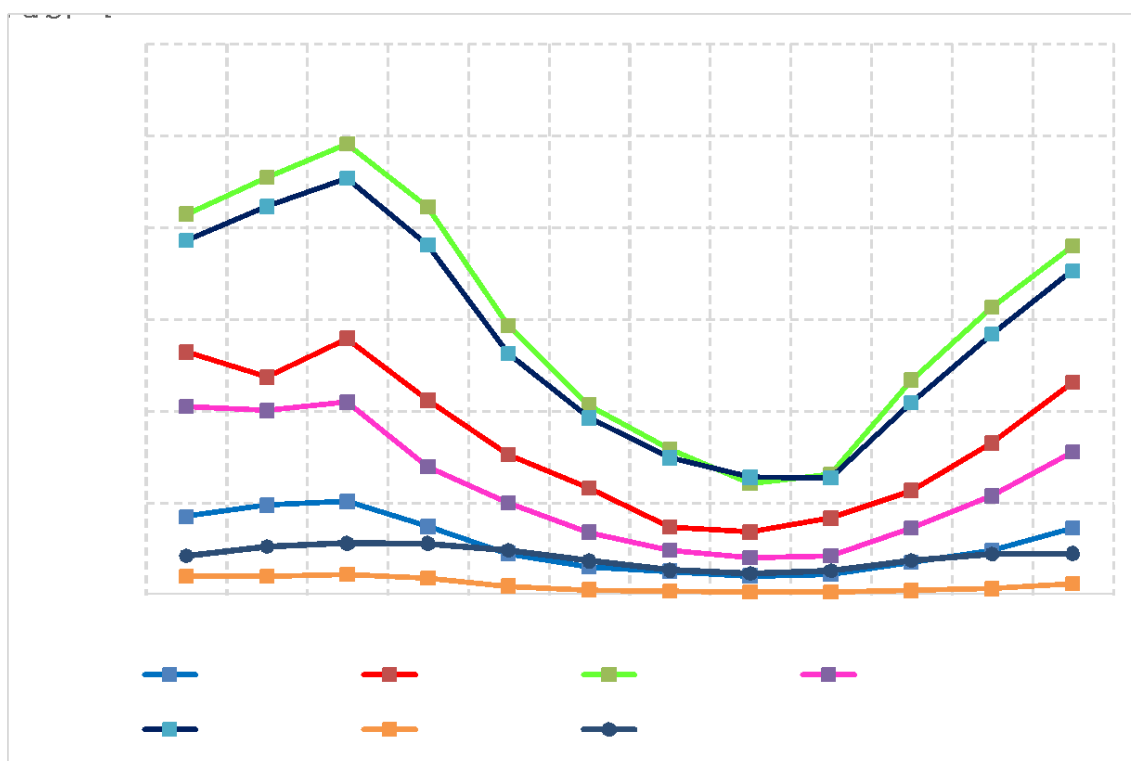


Figura 9. Régimen hídrico de las estaciones hidrométricas inscritas en el río Huallaga empleadas para la etapa de calibración y validación.

3.4. Configuraciones

3.4.1. Parámetros geométricos

El modelado con RRI, requiere el ajuste de parámetros geométricos (Wang et al., 2021), los cuales se denominan C_W , S_W (Ancho) y C_D , S_D (Profundidad). Estos parámetros son estimados en base a puntos de control, donde se analizan secciones transversales del río y se relacionan las variables de ancho, profundidad y área de drenaje (Khaing et al., 2019a; Try et al., 2022) (Ver ecuación 1 y 2).

El proceso metodológico para la estimación de los parámetros C_W , S_W (Ancho) consistió en identificar puntos de control a lo largo del río Huallaga (Figura 10a), medir el ancho del río en el punto de control y estimar el área de drenaje hasta el punto de control determinado (Tam et al., 2021; Try et al., 2020). De este modo, se identificaron 10 puntos de control, espaciados entre sí a una distancia de 20 km. Consecuentemente, se estimó los valores de C_W , S_W con una aproximación lineal en base a la ecuación (3) que se deriva de la ecuación (1), obteniendo como resultado un $S_W=1.399$, $C_W=0.00038$ y un coeficiente de determinación $r^2=0.76$.

$$\log(W) = S_W * \log(A) + \log(C_W)... (3)$$

Por otro lado, para la estimación de los parámetros geométricos de profundidad C_D , S_D (Profundidad), se necesitó estimar una profundidad de río en la cuenca del río Huallaga, por lo que se aproximó estas medidas en base a series temporales de niveles de agua identificadas en puntos de control (<https://hydroweb.theia-land.fr/>). Estos puntos de control se describen como

estaciones virtuales satelitales generadas por la intersección del río Huallaga y el "track" de Envisat; Jason 2/ Jason 3; /Sentinel 6A; Sentinel 3A o Sentinel 3B (Figura 10b). De este modo, se identificaron 5 puntos de control pertenecientes a la cuenca del río Huallaga en los cuáles se obtuvieron valores de profundidad, y el área de drenaje aportante hasta el punto de control fue cuantificado en GIS. Consecuentemente, se estimó los valores de C_D , S_D con una aproximación lineal en base a la ecuación (4) que se derivó de la ecuación (2), obteniendo como resultado un $S_D=1.424$, $C_D=0.000008$ y un coeficiente de determinación $r^2=0.73$.

$$\log(D) = S_D * \log(A) + \log(C_D) \dots (4)$$

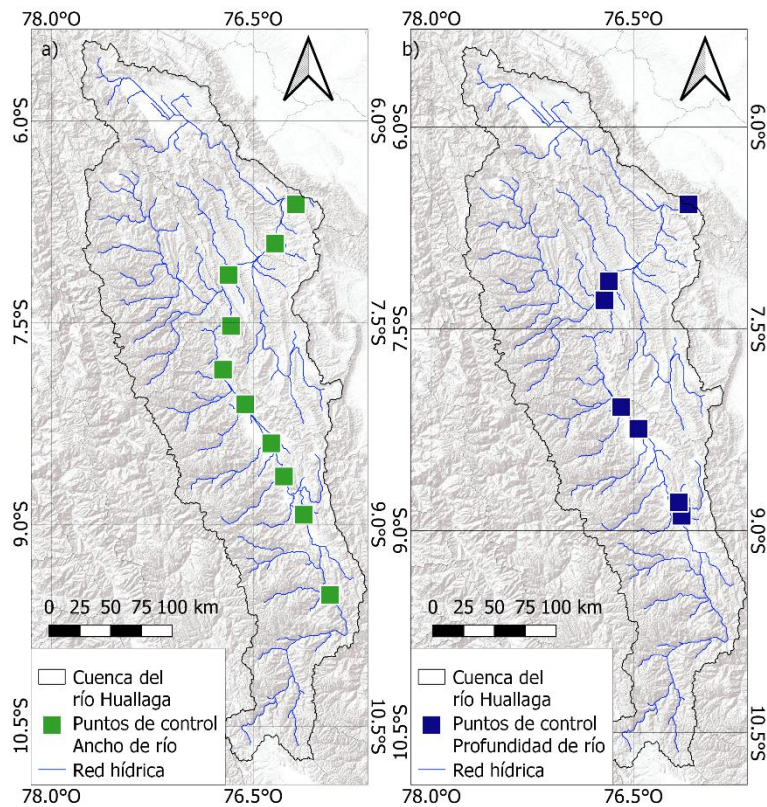


Figura 10. Puntos de control y aproximación logarítmica de los parámetros de ancho C_W , S_W (Izquierda) y de profundidad C_D , S_D (derecha).

3.4.2. Condiciones previas

El periodo de calentamiento en la simulación se refiere a un período inicial en el que el sistema simulado se deja desarrollar antes de que se realice el análisis principal. Durante este periodo, se aplican condiciones específicas para permitir que el sistema alcance un estado estable o una distribución de equilibrio. En RRI, durante el periodo de calentamiento, cuya duración varía dependiendo de cuántos días se van a simular (en promedio varía entre 5 y 10 días cuando se analicen eventos de inundación) los resultados de caudal y profundidad tienden a cero, por lo que al analizar los resultados es recomendable no considerarlos.

Por otro lado, también es necesaria la configuración de condiciones iniciales, por lo que es posible realizar simulaciones continuas a largo plazo desde RRI.

Las variables que pueden configurarse como condiciones iniciales son: (1) la profundidad del agua en la pendiente (hs); (2) el río (hr), así como la profundidad acumulada del agua en el modelo de Green-Ampt (Rawls et al., 1983).

El formato de los archivos de condiciones iniciales es idéntico al formato generado como archivos de salida de la simulación. Si se ha realizado una simulación previa, los archivos de salida se pueden utilizar directamente como entrada en una nueva simulación. Esta característica facilita la continuidad y reutilización de los resultados de simulaciones anteriores, evitando así el error que podría generarse al tener un periodo de calentamiento.

Optimización automática

El método SCE-UA es una herramienta utilizada para calibrar simulaciones de modelos hidrológicos no lineales. Este algoritmo desarrollado por la Universidad de Arizona ha sido utilizado en numerosos artículos científicos, probándose así su eficiencia para maximizar o minimizar una función objetivo, para de esta manera encontrar los parámetros óptimos para una simulación (Kakinuma et al., 2020; Khakbaz et al., 2012; Try et al., 2018a). El método se basa en tres conceptos: la combinación de procedimientos sencillos, mediante la aplicación de un enfoque de búsqueda aleatoria controlada, la evolución competitiva y "complex shuffling". El proceso de calibración automático consistió en elegir cinco parámetros del modelo RRI, estos parámetros fueron seleccionados debido a que según la literatura son los más sensibles: coeficiente de Manning en el canal del río, porosidad no saturada, porosidad de la clase de suelo, conductividad saturada hidráulica y el coeficiente de conductividad hidráulica no saturada. Para calibrar estos parámetros utilizando el algoritmo del método SCE-UA se definieron intervalos para el valor mínimo y el valor máximo de cada variable. Gracias a esta herramienta, se encontraron los valores que permiten una simulación de caudal que se aproxima al caudal observado en las estaciones hidrológicas. Este proceso fue posible adecuando un código libre al modelamiento hidráulico con RRI (<https://github.com/bgeorgios/RRlr>).

Para calificar el desempeño del modelo hidrológico se utilizaron los siguientes parámetros estadísticos: KGE (Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta), r^2 y r debido a ser métricas estadísticas de amplio uso y de aceptación mundial.

El coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta combina los componentes del NSE en una manera más holística, debido a contemplar en su formulación el coeficiente de correlación, razón de sesgo y razón de variabilidad, y es frecuentemente utilizado para evaluar la calibración de los modelos hidrológicos. Está definido por la siguiente fórmula:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (5)$$

Donde r es el coeficiente de correlación de Pearson entre los datos modelados y los datos obtenidos, β es la razón de sesgo y γ la razón de variabilidad.

3.5. Aplicación del modelo a escala reducida

Los datos topográficos FABDEM tienen una resolución de 30m, lo cual representaría una sobrecarga para el ordenador al momento de calcular

simulaciones de periodos extensos e inclusive cortos. Por este motivo, para las simulaciones se empleó una resolución espacial de 450 m, para la simulación de 5 años en el periodo de estudio, en donde el número de celdas de los mapas fue de 343 x 633. Es con esta resolución que se realizó la calibración y validación del modelo. En el caso de los eventos de avenida, se utilizaron los mismos parámetros que se utilizaron en la calibración del modelo, y las condiciones iniciales obtenidas en la simulación de 5 años. Sin embargo, la resolución espacial del modelo pasó a 360m, debido a que los eventos tienen una duración menor, y por ende, un menor costo computacional.

3.6. Eventos históricos registrados

En la tabla 1 se presentaron los eventos históricos registrados en la cuenca del río Huallaga. Estos eventos fueron seleccionados por los impactos que provocaron a las comunidades, y por haber sido documentados en algún aviso hidrológico o fuentes secundarias. Se eligieron eventos independientes de crecidas del periodo total estudiado, dichos eventos fueron seleccionados de los registros de caudales de las estaciones hidrométricas. La simulación inicial utilizó los datos topográficos a una resolución de 450m, teniendo en cuenta el tiempo computacional que tomaría calcular una simulación de 5 años a una resolución más fina. Se seleccionaron cinco eventos, uno en cada año, donde los picos máximos de caudal fueron observados. La simulación de cada uno de los eventos pudo ser realizada con una resolución de 450m, ya que cada evento tuvo una duración de aproximadamente 30 días.

El 2015 tuvo un periodo de simulación de 28 días, entre el 03 de mayo y el 31 de mayo. El 2016 tuvo un periodo de simulación de 23 días, entre el 08 de diciembre y el 31 de diciembre. El 2017 tuvo un periodo de simulación de 17 días, entre el 6 de septiembre y el 22 de septiembre. El 2018 tuvo un periodo de simulación de 22 días, entre el 14 de mayo y el 06 de junio. El 2019 tuvo un periodo de simulación de 21 días, entre el 07 de abril y el 28 de abril.

Muchos de estos eventos han sido documentados, entre ellos, por ejemplo, se detalla que, en el 2018, se reportaron eventos de inundación, así como avisos de crecidas inminentes, estos registros fueron documentados en la página de avisos hidrológicos del SENAMHI, el cual fue calificado como un aviso de nivel naranja, nivel que prevé la ocurrencia de un evento hidrológico peligroso. De la misma manera, en el 2019, este evento describe el desborde de los ríos Huallaga y Aspuzana, provocado por las lluvias intensas del sur de la región San Martín. Según el Comité de Defensa Civil de Tocache, los afectados fueron un promedio de 15 viviendas en Sitully y 20 familias en Nuevo San Martín, el corte de servicio eléctrico, y pérdida de sembríos de arroz y cacao entre otros.

IV. ANÁLISIS Y DESARROLLO

4.1. Modelado hidrológico-hidráulico

El modelado en RRI da la posibilidad de generar hidrogramas en cualquier coordenada elegida por el usuario. Para este proyecto se generaron 7 hidrogramas, cada uno de ellos en la ubicación de una estación hidrométrica para su comparación. La extracción de los hidrogramas en estas estaciones se debió a que estas estaciones presentan datos históricos de caudal. Luego de la extracción de los hidrogramas simulados, estos fueron comparados con los datos de caudales observados. La Figura 11, muestra el hidrograma obtenido luego de la simulación con RRI, la cual presenta un periodo desde 2014-2019 en las estaciones hidrométricas (1) Chalca; (2) Puente Tingo María; (3) Puente Tocache; (4) Campanilla; (5) Picota; (6) Shanao; (7) Chazuta. Adicionalmente, también se extrajeron las series de nivel de agua (m) en la ubicación de tres estaciones, (1) Shanao, (2) Tocache, (3) Tingo María, por lo que también fue posible su comparación y validación.

4.2. Calibración y validación del modelo hidrológico

En la Figura 11 se describe el hidrograma para un periodo desde 2014-2019 en las 7 estaciones hidrométricas. Estos hidrogramas a su vez describen el periodo empleado para el proceso de calibración (01/09/2014-31/08/2017) y el periodo de validación (01/09/2017-31/08/2019). El periodo de calibración automática consistió en la adecuación del algoritmo SCE-UA, esta metodología presentó una rutina de proceso iterativo para encontrar los mejores parámetros en la cuenca del río Huallaga. Los resultados del proceso de calibración automática presentaron métricas de eficiencias satisfactorias en 6 estaciones hidrométricas ($KGE > 0.5$), mientras que solo la estación de Shanao presentó un KGE Insatisfactorio ($KGE = 0.46$). Por otro lado, terminado el proceso iterativo de la calibración, se procedió a utilizar los parámetros optimizados e introducirlos en el periodo restante que representa la validación (01/09/2017-31/08/2019). El proceso de validación evidenció una mejor adecuación que la calibración, denotándose en métricas de eficiencia con un leve aumento en sus valores de KGE.

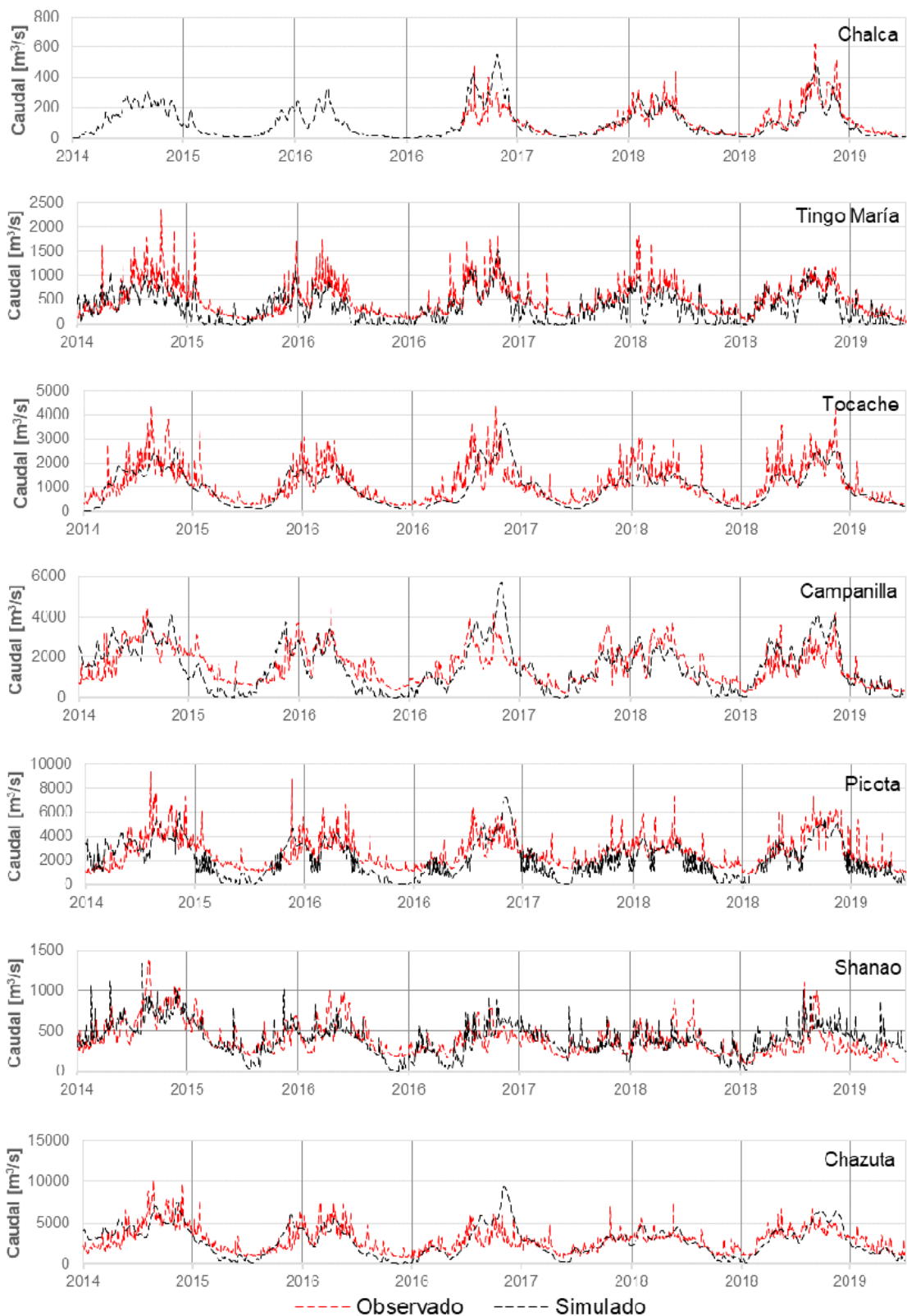


Figura 11. Comparación de hidrogramas observados (rojo) y simulados (negro) en las 7 estaciones hidrométricas localizadas en la cuenca del río Huallaga, distribuidas de Sur a Norte.

La tabla 2 describe los resultados obtenidos en las métricas r , KGE y r^2 , donde se observa que es la serie de caudal simulada en la estación hidrométrica Chalca la que mejor se adecuó a la serie observada. Por otro lado, la serie de caudal simulada en la estación hidrométrica Shanao es la que presentó el performance más bajo en su adecuación a la serie observada.

Tabla 2. Índices de eficiencia r , KGE, r^2 en los periodos de calibración y validación en las 7 estaciones hidrométricas inscritas en la cuenca del río Huallaga.

Índice de eficiencia	Chazuta	Shanao	Picota	Campanilla	Tocache	Tingo María	Chalca
r	0.70	0.64	0.70	0.74	0.74	0.79	0.79
KGE	0.60	0.46	0.61	0.64	0.71	0.70	0.73
r^2	0.49	0.41	0.49	0.55	0.55	0.62	0.62

4.3. Modelado hidráulico

Como resultado de la simulación en RRI se obtuvieron las manchas de inundación para cada día simulado, de los cuáles se tomaron las manchas máximas. Estas manchas simuladas se encuentran a una resolución de 450 m, debido a la adaptación de la resolución del modelo digital reescalado (FABDEM). Adicionalmente, se utilizó la plataforma Google Earth Engine, para el procesamiento de imágenes del satélite Sentinel-1. Este procesamiento tuvo como objetivo identificar manchas de inundación históricas para cada fecha de los eventos seleccionados anteriormente, y poder validar los resultados hidráulicos (Figura 12).

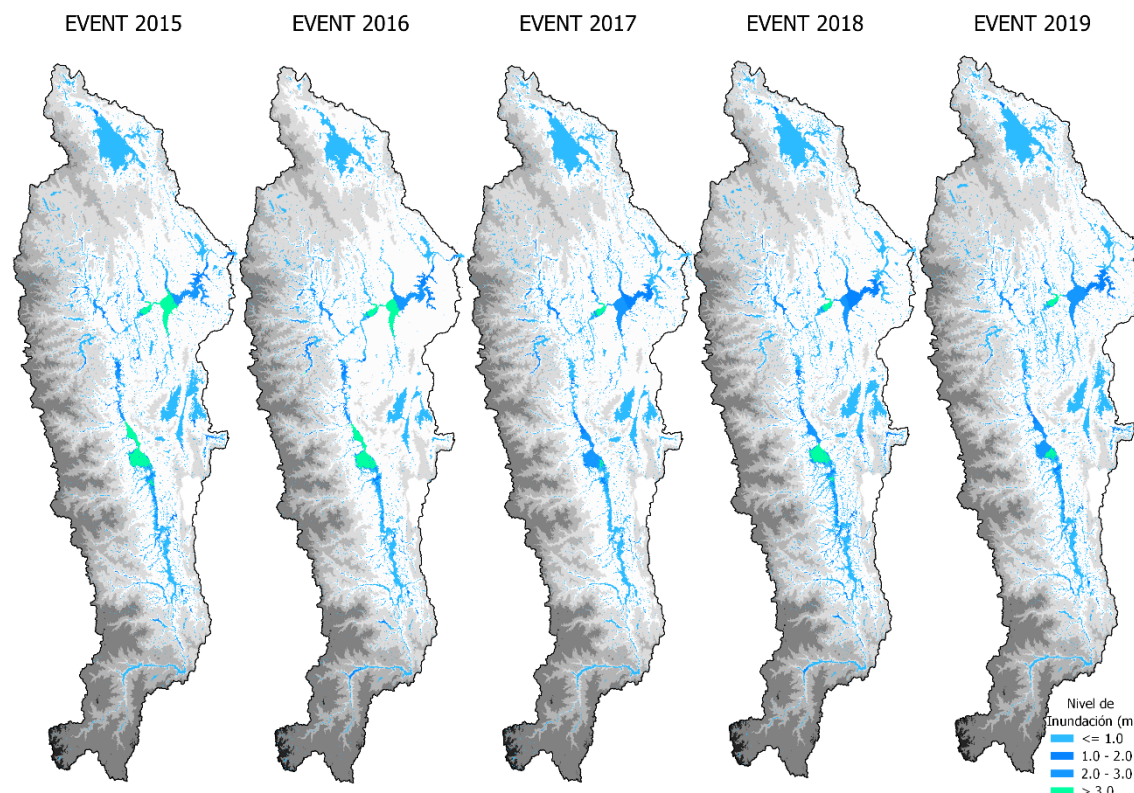


Figura 12. Manchas de inundación simuladas por RRI para cada evento anual seleccionado en la cuenca del río Huallaga. Asimismo, se describe el nivel de inundación alcanzado en metros.

4.4. Validación del modelo hidráulico

La parte hidrológica del modelo RRI fue calibrada y validada con registros históricos de caudal y la parte hidráulica fue validada mediante una métrica de eficiencia denominada Fracción Skill Score (FSS) y mediante la comparación de los niveles simulados por RRI versus niveles registrados en 3 estaciones hidrométricas con datos disponibles. De este modo se describe al FSS como una métrica utilizada para evaluar la habilidad predictiva de un modelo de pronóstico en la detección de patrones espaciales, como inundaciones. Calculado para diferentes tamaños de vecindario, representa la fracción de áreas correctas dentro de esos vecindarios en comparación con las áreas observadas, donde un puntaje de 1 indica habilidad perfecta y 0 significa ninguna habilidad (Hooker et al., 2022). Para el cálculo del FSS se comparó la mancha máxima de RRI versus el producto GFPLAIN250m, siendo esta última una fuente de datos secundaria que es capaz de identificar las zonas inundables en todo el mundo. Se extrajo la mancha de GFPLAIN250m y se comparó con la mancha máxima histórica del modelo RRI para periodo del 2014-2019. De la comparación visual se desprende que coinciden en zonas inundables, pero que, sin embargo, RRI presenta una sobrestimación en el cauce principal y sobre todo en zonas aportantes o cursos secundarios. De la comparación de las manchas se obtuvo una métrica $FSS=0.67$, lo que indicaría un resultado Bueno. En la Figura 13, se muestra la sobrestimación de RRI sobre GFPLAIN250m en 4 estaciones hidrométricas ubicadas en el curso principal del río Huallaga.

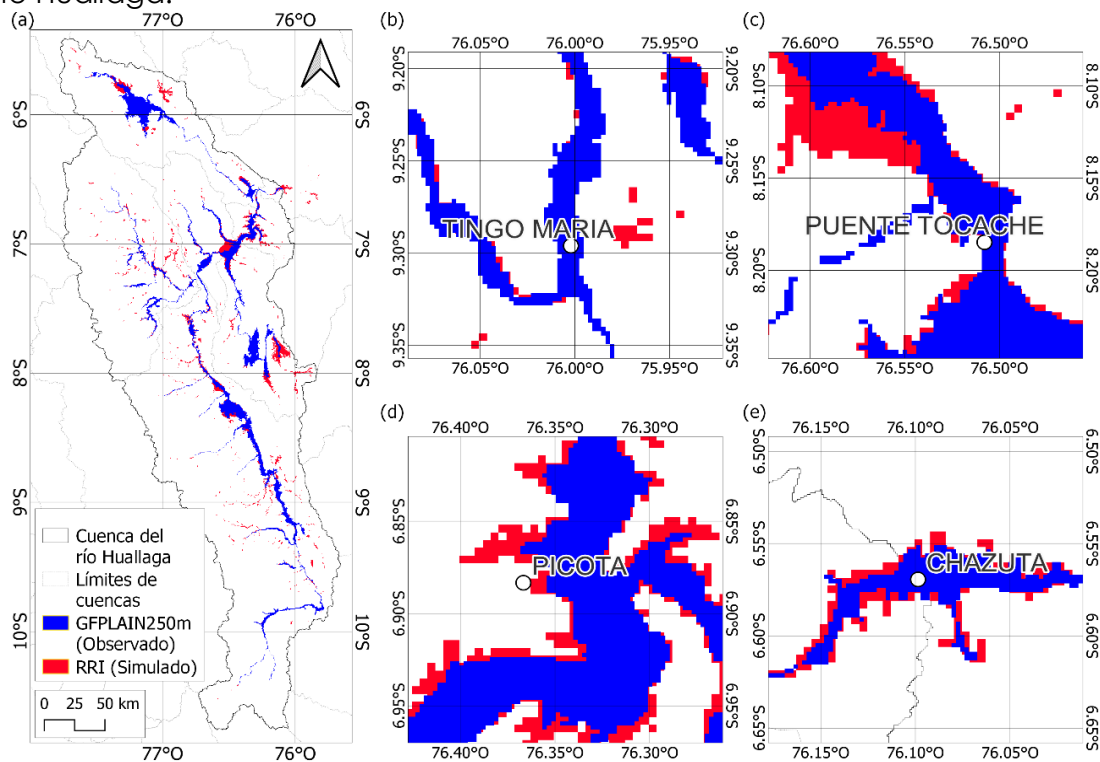


Figura 13. Comparación de manchas de inundación máximas: (izquierda) mancha de inundación máxima identificada a partir del producto GFPLAIN 250m; (derecha) mancha de inundación máxima simulada a partir de RRI.

Adicionalmente, se comparó los registros de niveles de agua (m) de las estaciones hidrométricas Tingo María, Tocache y Shanao versus las series de

niveles simuladas por RRI (Figura 14). La Figura 14 describe la comparación entre las series de niveles, esta comparación permitió validar los tirantes alcanzados en el periodo de análisis, validando de esta manera la parte hidráulica, debido a que los tirantes se encuentran asociados a la extensión de la mancha de inundación.

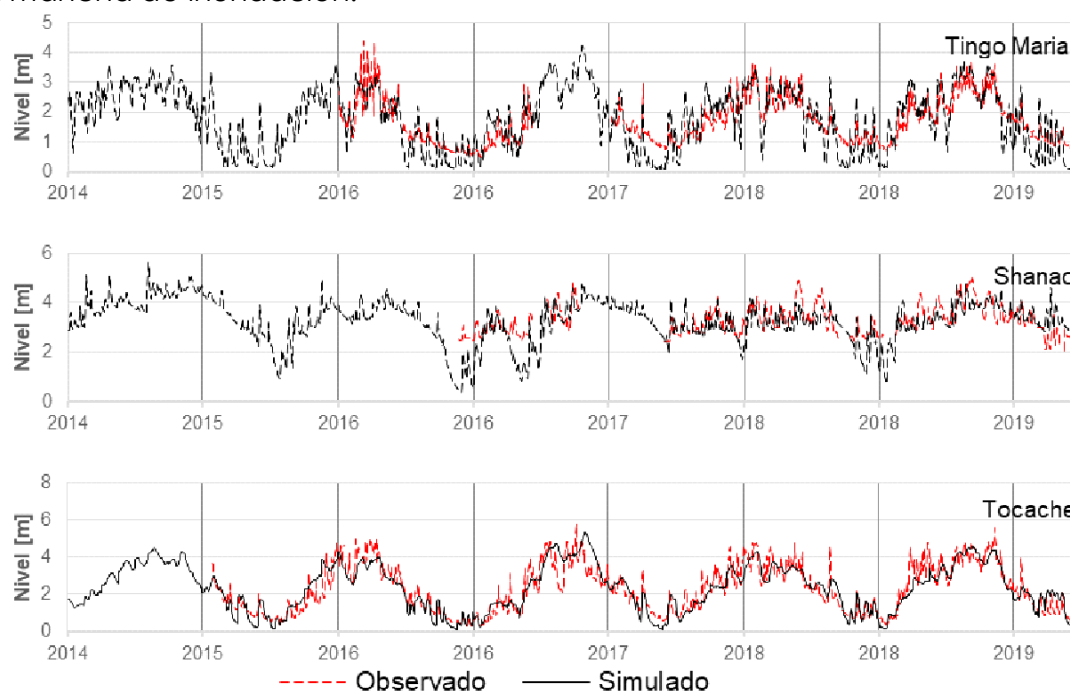


Figura 14. Comparación de niveles observados (rojos) y simulados (negro) en 3 estaciones hidrométricas con disponibilidad de datos de niveles.

La tabla 3 describe los resultados obtenidos en las 3 métricas de eficiencias empleadas en este estudio, las cuales muestran un alto performance en las estaciones de Tocache y Tingo María e insatisfactorios en Shanao al comparar niveles en metros.

Tabla 3. Índices de eficiencia r , KGE, r^2 en la comparación de niveles observados y simulados en 3 estaciones hidrométricas inscritas en la cuenca del río Huallaga.

Índice de eficiencia	Shanao	Tocache	Tingo María
r :	0.59	0.89	0.83
KGE	0.47	0.88	0.63
r^2	0.35	0.79	0.69

V. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

El presente estudio, adecuó y evaluó el modelo hidrológico-hidráulico RRI en la cuenca del río Huallaga. Se realizó un proceso de calibración del modelo RRI en un periodo de 3 años y la validación los 2 años restantes, adicionalmente, se consideró un periodo de calentamiento. Previamente se realizó un análisis de sensibilidad a los parámetros debido a que un aumento en la cantidad de parámetros a calibrar incrementaba significativamente el proceso de calibración en R. Para ello se realizaron 100 simulaciones utilizando un código escrito en el lenguaje de programación R.

La aplicación de datos de precipitación y evapotranspiración PISCO fue eficaz para simular las series de caudales y niveles, esto podría deberse a la cantidad de registros descargados (509 series de precipitación). De esta manera, se pudo cubrir de forma homogénea el ámbito de la cuenca del río Huallaga, con lo que fue posible representar de mejor manera la climatología de la cuenca.

La parte hidrológica del modelo se calibró de tal forma que las series del caudal coincidieran estrechamente con los registros históricos de las 7 estaciones hidrométricas. Teniendo métricas de eficiencia en su mayoría Satisfactorias ($KGE > 0.5$) y Buenas ($KGE > 0.65$), siendo la estación Chalca la que mejor ajuste presentó ($KGE = 0.73$) mientras que solo la estación de Shanao presentó un KGE Insatisfactorio ($KGE = 0.46$).

La parte hidráulica del modelo se validó comparando los niveles de inundación (m) simulados versus los registros de 3 estaciones hidrométricas que contaron con esos datos. Las métricas de eficiencia arrojaron resultados Muy Buenos para la estación de Tocache ($KGE > 0.75$), Satisfactorios para Tingo María ($KGE > 0.5$) e Insatisfactorios para Shanao ($KGE < 0.5$). Dicho resultado insatisfactorio podría estar asociado a la ubicación de la estación y al ancho del río aportante, ya que esta estación registra el aporte de un río aportante, y no de la red principal del río Huallaga. También, de la comparación con el producto GFPLAIN250m se concluye que RRI fue capaz de replicar el alcance máximo de la inundación registrada históricamente por este producto.

RRI demostró ser sensible a la topografía de ingreso, por lo que el uso de diferentes resoluciones del DEM puede generar variaciones en las series generadas. Se determinó que debido a los límites computacionales del ordenador, la cuenca del río Huallaga no pudo ser simulada por RRI a menos de 360m de resolución espacial. De los resultados obtenidos en la parte hidrológica e hidráulica se puede concluir que FABDEM representó de forma aceptable la topografía de la cuenca del río Huallaga, por lo que se recomienda su mayor exploración y aplicación en otras cuencas.

Si bien el modelo generado en RRI tiene la capacidad de capturar la variabilidad del caudal, aún presenta incertidumbres en algunos periodos del análisis como se ha descrito en algunas estaciones hidrométricas. En el flujo simulado se observan valores sobreestimados, por ejemplo, los picos presentados en el año 2017, así como valores subestimados, en los periodos de 2015 y 2016. Sin embargo, el resultado general de la calibración es considerado satisfactorio, y se procedió a utilizar los valores propuestos para las siguientes simulaciones.

Se eligió un evento de avenida para cada año de estudio, en mayo del 2015, diciembre del 2016, septiembre del 2017, mayo-junio del 2018 y mayo del 2019 a fin de medir el alcance de impacto por inundación. Si bien las manchas no difieren en extensión, estas sí difieren en valores de niveles de inundación, demostrando que, en zonas como Tocache, Tingo María y Chazuta estos niveles varían de evento a evento. Lo cual podría ser el resultado de modificaciones en el cauce por asentamientos humanos cercanas a las laderas del río Huallaga.

Los picos obtenidos en los resultados simulados son similares a los datos observados a pesar de que la simulación tienda a subestimar dichos valores. Se observa que los resultados obtenidos para el evento de los años 2018 y 2019 son mejores que los obtenidos en los otros eventos. Dichas diferencias pueden ser causadas por la inexactitud de las condiciones iniciales del modelo. Sin embargo, los resultados de la validación tienen un nivel de rendimiento similar a los resultados obtenidos en la calibración, lo que demuestra que el modelo generado en RRI es capaz de predecir con cierto grado de certeza los caudales para el periodo estudiado.

El modelo emerge como una herramienta crucial en la evaluación de riesgos de inundaciones y en la cartografía de los peligros asociados a las mismas. Finalmente, este estudio no solo ofrece una evaluación significativa del modelo RRI en una cuenca peruana, sino que también presenta un caso de estudio relevante para la aplicación conjunta de modelos hidrológico-hidráulico en la cartografía de peligros de inundaciones del país.

VI. REFERENCIAS

- Abdel-Fattah, M., Kantoush, S. A., Saber, M., & Sumi, T. (2018). Rainfall-Runoff Modeling for Extreme Flash Floods in Wadi Samail, Oman. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 74(5), 1_691-1_696. https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.5_i_691
- Amarath, G., Alahacoon, N., Smakhtin, V., & Aggarwal, P. (2017). Mapping multiple climate-related hazards in South Asia. Colombo, Sri Lanka: *International Water Management Institute (IWMI)*. 41p. (IWMI Research Report 170). <https://doi.org/10.5337/2017.207>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Brasington, J., & Richards, K. (1998). Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL. *Computers and Geosciences*, 24(4), 299–314. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(97\)00081-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00081-2)
- Donnelly, J., Abolfathi, S., Pearson, J., Chatrabgoun, O., & Daneshkhah, A. (2022). Gaussian process emulation of spatio-temporal outputs of a 2D inland flood model. *Water Research*, 225, 119100. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2022.119100>
- Douben, K. J. (2006). Characteristics of river floods and flooding: a global overview, 1985–2003. *Irrigation and Drainage*, 55(S1), S9–S21. <https://doi.org/10.1002/IRD.239>
- Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 168–182. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2009.08.016>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Hooker, H., Dance, S. L., Mason, D. C., Bevington, J., & Shelton, K. (2022). Spatial scale evaluation of forecast flood inundation maps. *Journal of Hydrology*, 612(PB), 128170. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128170>
- IPCC. (n.d.). *Summary for Policymakers*. In: Lee and J. Romero (eds.). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (pp.1-34). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- IPCC, 2004. (2004). Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards*, 31(1),

111–128. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000020257.09228.7B/METRICS>

- Jongman, B., Ward, P. J., & Aerts, J. C. J. H. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change*, 22(4), 823–835. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2012.07.004>
- Kakinuma, T., Nakamura, Y., Ito, H., Ikeuchi, K., (2020) Study on Optimisation Methodology of RRI Model Parameters Suitable for Flood Prediction by Combining Multiple Flood Events, *Journal of River Engineering*, 26, 199-204. https://doi.org/10.11532/river.26.0_199
- Khaing, Z. M., Zhang, K., Sawano, H., Shrestha, B. B., Sayama, T., & Nakamura, K. (2019a). Flood hazard mapping and assessment in data-scarce Nyaungdon area, Myanmar. *PLoS ONE*, 14(11), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224558>
- Khaing, Z. M., Zhang, K., Sawano, H., Shrestha, B. B., Sayama, T., & Nakamura, K. (2019b). Flood hazard mapping and assessment in data-scarce Nyaungdon area, Myanmar. *PLOS ONE*, 14(11), e0224558. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0224558>
- Khakbaz, B., Imam, B., Hsu, K., & Sorooshian, S. (2012). From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 418–419, 61–77. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.02.021>
- Ly, S., Sayama, T., & Try, S. (2023). Integrated impact assessment of climate change and hydropower operation on streamflow and inundation in the lower Mekong Basin. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00586-8>
- Pakoksung, K., & Takagi, M. (2021). Effect of DEM sources on distributed hydrological model to results of runoff and inundation area. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(3), 1891–1905. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00914-7>
- Panwar, V., & Sen, S. (2019). Disaster Damage Records of EM-DAT and Desinventar: A Systematic Comparison. *Economics of Disasters and Climate Change*, 4(2), 295–317. <https://doi.org/10.1007/S41885-019-00052-0>
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Greenampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), 62–70. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62))
- Santos, C. (2020). Impactos de los desastres naturales en el crecimiento económico de Perú durante el periodo 1960–2017: el caso del agregado de todos los desastres naturales y de los relacionados con el clima. *PUCP*, 1,75. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19370>
- Salazar-Briones, C., Hallack-Alegria, M., Mungaray-Moctezuma, A., Lomeli, M. A., Lopez-Lambraño, A., & Salcedo-Peredia, A. (2018). Hydrological and hydraulic modeling of an intra-urban river in a transboundary basin

- using a regional frequency analysis. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(4), 48–74. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-03>
- Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., & Fukami, K. (2012). Rainfall–runoff–inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 298–312. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644245>
- Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., Mc Innes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L. V., Allen, S., Benito, G., ... Zwiers, F. W. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 9781107025, 109–230. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.006>
- Shahid, H., Toyoda, M., & Kato, S. (2022). Impact Assessment of Changing Landcover on Flood Risk in the Indus River Basin Using the Rainfall–Runoff–Inundation (RRI). *Sustainability (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127021>
- Shrestha, B. B. (2019). Approach for analysis of land-cover changes and their impact on flooding regime. *Quaternary*, 2(3). <https://doi.org/10.3390/quat2030027>
- Tam, T. H., Zulkarnain, M., Rahman, A., Harun, S., Shahid, S., Jamal, M. H., Razak, K. A., Ghani, M. K., Faiz, Y., & Wahab, A. (2021). *Flood Hazard Assessment Under Climate Change Scenarios in Kelantan River Basin, Malaysia*. 1–20. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-858810/v1>
- Tanaka, T., Kiyohara, K., & Tachikawa, Y. (2020). Comparison of fluvial and pluvial flood risk curves in urban cities derived from a large ensemble climate simulation dataset: A case study in Nagoya, Japan. *Journal of Hydrology*, 584, 124706. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.124706>
- Try, S., Lee, G., Yu, W., Oeurng, C., & Jang, C. (2018a). Large-Scale Flood-Inundation Modeling in the Mekong River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(7), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001664](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001664)
- Try, S., Lee, G., Yu, W., Oeurng, C., & Jang, C. (2018b). Large-Scale Flood-Inundation Modeling in the Mekong River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(7), 05018011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001664](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001664)
- Try, S., Sayama, T., Oeurng, C., Sok, T., Ly, S., & Uk, S. (2022). Identification of the spatio-temporal and fluvial-pluvial sources of flood inundation in the Lower Mekong Basin. *Geoscience Letters*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00215-0>
- Try, S., Tanaka, S., Tanaka, K., Sayama, T., Oeurng, C., Uk, S., Takara, K., Hu, M., & Han, D. (2020). Comparison of gridded precipitation datasets for

rainfall-runoff and inundation modeling in the Mekong River Basin. *PLoS ONE*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226814>

Wang, J., Yun, X., Pokhrel, Y., Yamazaki, D., Zhao, Q., Chen, A., & Tang, Q. (2021). Modeling Daily Floods in the Lancang-Mekong River Basin Using an Improved Hydrological-Hydrodynamic Model. *Water Resources Research*, 57(8), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2021WR029734>

Yoshimoto, S., & Amarnath, G. (2018). Application of a flood inundation model to analyze the potential impacts of a flood control plan in mundeni aru river basin, Sri Lanka. *Natural Hazards*, 91(2), 491–513. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3143-5>