

Diversidad de enfoques y Motivaciones en la Modelación Hidrológica en el Perú: Una Revisión Basada en Investigaciones Recientes

Edgar R. Quiroz¹

Escuela de postgrado, Doctorado en Recursos Hídricos,
Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Correspondencia

Edgar Quiroz, Frame Limited, Gerencia de Recursos
Hídricos, Lima, Perú.
Correo electrónico: edgar.quiroz@frame.pe

Editado por: Alberto Sánchez, Editor en jefe

Resumen

En este trabajo, se presenta una revisión técnica sobre el estado actual y los desafíos futuros en el desarrollo y aplicación de modelos hidrológicos en el Perú. Dada la diversidad geográfica y climática del país (Costa árida, Andes complejos, Amazonía húmeda), la hidrología peruana enfrenta desafíos únicos como la escasez de datos históricos in-situ y la alta variabilidad espacio-temporal de los procesos hidrológicos. La investigación en el Perú ha evolucionado significativamente, adoptando modelos conceptuales (GR2M, GR4H, HBV-light, Shaman), semi-distribuidos (SWAT, WEAP, RS Minerve, PREVAH) y distribuidos (VIC, ARNO/VIC, TOPKAPI-ETH), así como fuentes de datos alternativas como productos satelitales (PISCO, IMERG, MSWEP, CHIRPS, TRMM, GSMaP-NRT) y datos de reanálisis (ERA-Interim). Se ha puesto un foco particular en la evaluación de la disponibilidad hídrica, los impactos del cambio climático, la modelación de eventos extremos (inundaciones y sequías) y la eco hidrología de biomas andinos como los bofedales. A pesar de los avances, la cuantificación y reducción de la incertidumbre estructural del modelo y la integración de enfoques multimodelos siguen siendo áreas críticas para la investigación futura en el contexto peruano, donde las limitaciones de datos y computacionales persisten.

Este artículo es categorizado como:

- Ciencia del Agua > Procesos Hidrológicos.
- Ciencia del Agua > Ciencia del Agua
- Ciencia del Agua > Métodos

PALABRAS CLAVE

Procesos altoandinos, diversidad, lluvia-escorrentía, modelos de caudal, Perú

1 | INTRODUCCIÓN

La hidrología constituye una ciencia fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos, dado su papel en la planificación, evaluación de riesgos y adaptación frente a escenarios de variabilidad y cambio climático. Sin embargo, la comunidad hidrológica enfrenta un reto persistente: la existencia de una gran diversidad de modelos hidrológicos, desde conceptuales hasta distribuidos físicamente, diseñados para diferentes escalas y objetivos. Esta “plétora de modelos” genera preguntas críticas: ¿responde esta diversidad a necesidades científicas y operativas específicas o revela una fragmentación innecesaria? ¿Hasta qué punto la heterogeneidad metodológica contribuye a mejorar la predicción y la gestión del recurso hídrico?

El Perú ofrece un laboratorio natural para estas reflexiones, al presentar una geografía heterogénea que combina vertientes contrastantes: la costa árida, dependiente de aguas reguladas y trasvases; la cordillera andina, donde el retroceso glaciar altera los caudales base y la disponibilidad hídrica; y la Amazonía húmeda, con dinámicas dominadas por la precipitación extrema y la conectividad hídrica. A ello se suman factores antrópicos y la presión del cambio climático, que intensifica los extremos hidrológicos y desafía la capacidad predictiva.

Este trabajo tiene como propósito analizar críticamente la diversidad, evolución y aplicaciones de los modelos hidrológicos en el contexto peruano, revisando 43 estudios científicos recientes. El análisis considera los impulsores que explican esta diversidad (procesos hidrológicos dominantes, disponibilidad de datos, escalas espaciales y temporales, y objetivos de gestión), así como las motivaciones detrás de la selección de modelos, las estrategias para gestionar la incertidumbre estructural y la adopción de enfoques multimodelo.

Inspirado en revisiones internacionales como la de Horton et al. (2022) para Suiza, este estudio adapta la metodología al contexto peruano, bajo el marco académico de la Universidad Nacional Agraria La Molina y la orientación del profesor Waldo Lavado.

2 | IMPULSORES DE LA DIVERSIDAD DE MODELOS

La diversidad de modelos hidrológicos no es un fenómeno aleatorio, sino que está fuertemente impulsada por el contexto de modelado y la singularidad de cada lugar. En el Perú, esta diversidad se manifiesta en la variedad de modelos aplicados y el desarrollo de metodologías específicas para abordar las características fisiográficas, climáticas e hidrológicas heterogéneas. A continuación, se exploran los factores clave que impulsan esta diversificación, basados en los procesos hidrológicos que se buscan representar y el contexto de aplicación de los estudios.

2.1 | Procesos

La representación precisa de los procesos hidrológicos dominantes es un motor fundamental para la selección y el desarrollo de modelos.

2.1.1 | Criósfera

En los Andes peruanos, la contribución de los glaciares y el deshielo de la nieve son componentes clave del régimen hidrológico, especialmente en las cuencas de cabecera. Estudios en el Perú han abordado esto mediante la comparación de modelos glacio-hidrológicos de diferente complejidad como Shaman (agrupado), HBV-light (semi-distribuido), y RS Minerve (semi-distribuido) en cuencas andinas con glaciares. Se ha encontrado que modelos de diferente complejidad pueden tener un rendimiento similar, e incluso modelos parsimoniosos pueden ser más robustos en un contexto de datos limitados, una observación que resuena con hallazgos en entornos alpinos suizos. La cuantificación de la contribución glaciar a la escorrentía ha sido un propósito de investigación, aunque la escasez de observaciones en regiones de alta montaña sigue siendo una limitación.

2.1.2 | Producción y transporte de sedimentos

Aunque la importancia de los sedimentos en el ciclo hidrológico de regiones montañosas es reconocida, los estudios específicos sobre la modelación de la producción y el transporte de sedimentos a escala de cuenca en el Perú no se detallan prominentemente en las fuentes proporcionadas. Las fuentes se centran más en la simulación de caudales y el balance hídrico. Este es un ámbito donde podría haber una futura diversificación de modelos, ya que requiere modelos complejos capaces de generar patrones espaciales fiables de los procesos hidrológicos.

2.1.3 | Eco hidrología

La eco hidrología, que estudia las interacciones entre los ecosistemas y el ciclo del agua, ha ganado atención en el Perú, especialmente en los páramos tropicales y humedales de bofedal andinos. Investigaciones como las de Monge-Salazar et al. (2022) y Ross et al. (2023) han analizado la eco hidrología y los servicios ecosistémicos de los bofedales. Aunque no siempre se utilizan modelos de simulación hidrológica complejos como enfoque principal, estos estudios contribuyen a la comprensión de las dinámicas de almacenamiento y liberación de agua de los humedales. Se ha destacado la influencia de propiedades únicas del suelo, como los Andosoles en los páramos, en la hidrología.

2.1.4 | Modificaciones antropogénicas del caudal y calidad del agua

Los impactos humanos en el caudal, como la generación hidroeléctrica, la agricultura y el riego, son relevantes en el Perú. Estudios como el de Canales Orozco & González (2022) han utilizado modelos de balance hídrico para estimar el potencial hidroeléctrico de cuencas como la del río Chancay. El modelo WEAP es comúnmente utilizado para la evaluación de escenarios de oferta y demanda de agua en contextos agrícolas, urbanos e hidroenergéticos. Sin embargo, al igual que en otros contextos, la simulación de la calidad del agua a escala de cuenca y la retroalimentación del uso agrícola del agua en la respuesta hidrológica aún reciben limitada atención en términos de desarrollo de modelos específicos.

2.2 | Contexto del estudio

Más allá de la representación de procesos, el contexto de la aplicación del modelo, incluyendo la disponibilidad de datos y los objetivos de investigación, es un factor determinante en la elección y desarrollo de modelos.

La Tabla 1 presenta los modelos hidrológicos identificados en las investigaciones revisadas en el Perú. Su objetivo es proporcionar una visión integral que sintetice las características principales, aplicaciones, ventajas, limitaciones y relevancia de cada modelo en el contexto hidrológico nacional y en la cuenca amazónica-andina. La información se ha estructurado de manera que facilite la comprensión del funcionamiento de cada modelo y su contribución a los estudios relacionados con los recursos hídricos.

Puntos clave para comprender la tabla:

- **Diversidad de Modelos:** La tabla muestra una variedad de modelos, desde conceptuales y agrupados (lumped) hasta semi-distribuidos y basados en física. Esta diversidad refleja la complejidad de los sistemas hidrológicos y las diferentes necesidades de los estudios.
- **Resolución Temporal y Espacial:** Se observa que los modelos operan en diversas escalas temporales, desde horaria (GR4H) para pronóstico de inundaciones, hasta diaria (PREVAH, SWAT, ARNO/VIC, RAPID) para estudios de recursos hídricos y procesos detallados, y mensual (GR2M, MWB3, Shaman, HBV-light, RS Minerve) para evaluaciones a más largo plazo del balance hídrico e impacto del cambio climático. La resolución espacial también varía, desde modelos agrupados (GR2M, Shaman) que tratan la cuenca como una unidad, hasta semi-distribuidos (PREVAH, SWAT, HBV-light, RS Minerve, ARNO/VIC) que dividen la cuenca en unidades de respuesta hidrológica (HRUs) o bandas de elevación para una representación más detallada de la heterogeneidad.
- **Contexto de Datos Escasos:** Un tema recurrente en las fuentes es la escasez de datos hidrometeorológicos en las regiones montañosas andinas de Perú y la Amazonía. Muchos modelos, como SWAT, PREVAH y GR2M, se han aplicado y adaptado específicamente para funcionar en estas condiciones. Esto ha llevado al desarrollo de metodologías como la regionalización de parámetros y el uso de productos de precipitación satelital (SPPs) como TRMM, GPM-IMERG, CHIRPS, CMORPH y PISCO como entradas esenciales.
- **Aplicaciones Principales:** Los modelos se utilizan para una amplia gama de propósitos críticos:
 - **Evaluación del Impacto del Cambio Climático:** Modelos como GR2M, MWB3, PREVAH y WEAP son fundamentales para predecir cómo las modificaciones en la precipitación y evapotranspiración afectarán los caudales futuros.
 - **Gestión de Recursos Hídricos:** La simulación de la disponibilidad de agua y la gestión de la demanda es un uso principal para WEAP y SWAT.
 - **Pronóstico y Monitoreo de Inundaciones:** GR4H es un ejemplo claro de modelo adaptado para pronósticos de inundaciones a corto plazo en tiempo casi real.
 - **Estudios de Cambio de Uso de Suelo:** SWAT se aplica para entender cómo la deforestación o la reforestación impactan el ciclo hidrológico.
 - **Modelado Glacio-Hidrológico:** Modelos como Shaman, HBV-light y RS Minerve se especializan en cuencas con glaciares para comprender su contribución al caudal.
- **Evaluación de Rendimiento:** La tabla menciona métricas comunes para evaluar el rendimiento de los modelos, como el Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), Porcentaje de Sesgo (PBIAS), Error Cuadrático Medio (RMSE), Eficiencia de Kling-Gupta (KGE), y Curvas de Duración de Flujo (FDC). Estas métricas ayudan a cuantificar la fiabilidad de las simulaciones.
- **Balance Hídrico:** Muchos estudios utilizan estos modelos para cuantificar los componentes del balance hídrico, como la precipitación, la evapotranspiración (ET) y la escorrentía. Se destaca la importancia de la ET como un componente clave y su variabilidad.

En resumen, la tabla 1 ilustra cómo los modelos hidrológicos son herramientas indispensables para comprender y predecir los complejos sistemas hídricos en el Perú, especialmente en las desafiantes regiones andinas y amazónicas, caracterizadas por su heterogeneidad y la limitación de datos. La adaptación y el desarrollo de metodologías específicas para estas condiciones son fundamentales para una gestión hídrica efectiva y la adaptación al cambio climático.

2.2.1 | Mejora del modelo y análisis de incertidumbre

La escasez de datos es una limitación recurrente y significativa en la calibración y validación de modelos hidrológicos en el Perú, especialmente en zonas de alta montaña. Esto ha impulsado el uso de fuentes de datos alternativas, como productos de precipitación satelital y datos de reanálisis, y la exploración de nuevas metodologías de calibración y análisis de incertidumbre. Estudios como

TABLA 1 Lista de modelos (orden alfabético) aplicados en Perú

Nombre del modelo	Nombre completo	Estructura espacial	Tipo de Uso
ARNO/VIC	Variable Infiltration Capacity (ARNO/VIC) model	Conceptual de escorrentía-precipitación. Tiene una variable de estado única para la capa superior del suelo y la capa inferior del suelo definida por un único reservorio de flujo base no lineal de tamaño fijo. Es una estructura de modelo FUSE.	Proporciona una representación relativamente completa de los flujos hidrológicos dominantes. Utilizado en un marco hidrológico híbrido con RAPID para generar simulaciones de flujo.
GR1A	Modelo GR1A	Estructura semiempírica y agrupada.	Simula el flujo medio a largo plazo. Sirve como modelo de referencia para comparación.
GR2M	Modelo GR2M (modelo de balance hídrico mensual de dos parámetros)	Lumped (agrupado) y mensual.	Simula la escorrentía mensual. Utilizado para calibración y validación. Aplicado para la evaluación del impacto del cambio climático y estudios de sequía. Utilizado para generar flujos medios anuales.
GR4j / GR4H	Modelo hidrológico agrupado GR4j / GR4H (adaptación horaria de GR4j)	Agrupado (lumped). GR4H utiliza el método Muskingum–Cunge para la transferencia de escorrentía entre subcuencas, lo que lo hace semi-distribuido en este contexto.	Analiza la sensibilidad de las simulaciones de flujo a los productos de precipitación por satélite (SPPs). Simula la escorrentía mensual u horaria. Utilizado para la predicción de inundaciones, evaluación de eventos extremos y operación de embalses. Genera flujos diarios.
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning - HBV-light model	Semi-distribuido. Capaz de representar diversas condiciones de cuenca.	Modelado hidrológico. Estudios de impactos del cambio climático y gestión del agua. Simula la escorrentía total (componentes de flujo rápido, intermedio y lento).
JULES	Joint UK Land Environment Simulator	Las superficies terrestres se modelan como "tiles" (baldosas) de superficies vegetadas y no vegetadas. Calcula intercambios de calor y humedad tierra-atmósfera para cada cuadrícula mediante promediado ponderado por área de los flujos de baldosas, intercambiados con una columna de suelo compartida. Incorpora un "probability distributed model (PDM)" para el flujo por exceso de saturación.	Modelo de superficie terrestre. Utilizado para la simulación hidrológica en entornos tropicales húmedos. Simula flujos de agua: intercepción de precipitación, flujo superficial, infiltración y flujo subsuperficial.
Lutz Scholz	Modelo Lutz Scholz	No se especifica la estructura espacial.	Modelo hidrológico para la generación de flujo.
MGB-IPH	The MGB-IPH model for large-scale rainfall–runoff modelling	Utiliza el enfoque HRU (unidad de respuesta hidrológica), dividiendo la cuenca en elementos regulares (celdas) interconectados por canales.	Simula el comportamiento hidrológico. Calcula el balance hídrico del suelo, la evapotranspiración, la propagación del flujo dentro de una celda y el enrutamiento del flujo a través de la red de drenaje. Usado para modelado de precipitación-escorrentía a gran escala.
MWB3	Modelo MWB3 (basado en Vandewiele)	Basado en la ecuación de balance hídrico con tres parámetros. Conceptual/Lumped (implícito por la descripción).	Estimar la evapotranspiración real, el flujo lento y el flujo rápido. Utilizado en procedimientos de calibración y validación.
PREVAH	Precipitation-Runoff-EVApotranspiration Hydrotope	Semi-distribuido.	Modelado hidrológico para estimar recursos hídricos. Utilizado para escenarios de impacto climático. Se centra en simulaciones a escala diaria.
RAPID	No se proporciona un nombre completo, es un "modelo de enrutamiento fluvial"	Enrutamiento de flujo a través de una red fluvial. Utilizado en miles de tramos de río.	Modelo de enrutamiento fluvial para generar simulaciones de flujo.
RS Minerve	Routing System MINERVE	Semi-distribuido. Simula la escorrentía total basada en un conjunto de diferentes modelos conceptuales semi-distribuidos. La escorrentía se estima para cada banda de elevación y la salida de la cuenca.	Simula la escorrentía total. Incluye un Modelo Glaciar-Nieve (GSM) para simular la contribución de los glaciares al flujo de los ríos. Utilizado para estudios de impactos del cambio climático y gestión del agua.
SACRAMENTO	SACRAMENTO	Uno de los modelos conceptuales padres para FUSE.	Modelado hidrológico. Una de las decisiones para la construcción de modelos FUSE. También se usa para representar la contribución no glaciar en RS Minerve.
Shaman model	Simple Hydrological Model for the Andes – Shaman model	Agrupado (lumped) conceptual. Requiere una única serie de datos de entrada para toda la cuenca. Parsimonioso.	Modela el balance hídrico completo, incluyendo la fusión de glaciares tropicales, un reservorio subsuperficial y la demanda de agua sectorial. Diseñado para cuencas andinas tropicales con estacionalidad de precipitación fuerte y escasez de datos. Realiza simulaciones de escorrentía.
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	Semi-distribuido, subdivide una cuenca en subcuencas, que se dividen aún más en unidades de respuesta hidrológica (HRUs).	Simula procesos hidrológicos. Estima la disponibilidad de agua, cuantifica el agua azul (rendimiento hídrico, recarga de acuíferos profundos), el flujo de agua verde (evapotranspiración real) y el almacenamiento de agua verde (humedad del suelo). Utilizado para simulación de escorrentía, estudios de cambio climático, y gestión del riesgo de inundaciones. Útil en regiones con escasez de datos.
SWIM	Soil and Water Integrated Model	Modelo ecohidrológico para simulaciones de escorrentía a macroscala. La estructura espacial detallada no se especifica.	Simulaciones de escorrentía.
Temez	Modelo Temez	No se especifica la estructura espacial.	Modelo hidrológico para la generación de flujo.
TOPMODEL	TOPMODEL	Implícitamente semi-distribuido al describir la distribución subcuadrícula de la humedad del suelo.	Modelado hidrológico. Una de las decisiones para la construcción de modelos FUSE.
WaterGAP3	WaterGAP3	No se especifica la estructura espacial.	Modelado hidrológico.
WEAP	Water Evaluation And Planning	Puede desarrollarse con pasos de tiempo diarios o mensuales. Representa la infraestructura y gestión del agua del sistema. Las unidades de cuenca se dividen en diferentes clases de cobertura vegetal.	Simula los procesos hidrológicos de los ecosistemas de páramo. Sistema de apoyo a la decisión para la simulación hidrológica integrada, incluyendo las demandas de agua de todos los sectores. Implementa los impactos de diferentes prioridades de gestión para elementos de infraestructura. Utilizado para la predicción de la seguridad hídrica bajo diferentes escenarios.

los de Daneshvar et al. (2021) y Fernández-Palomino et al. (2021) han desarrollado estrategias para el modelado con SWAT en regiones con escasez de datos, utilizando datos locales y satelitales para entradas y validación, y logrando predicciones fiables con incertidumbre cuantificada. Se ha implementado la calibración multiobjetivo, integrando datos de descarga, datos satelitales de vegetación (LAI) y firmas hidrológicas (FDC, Baseflow Index), lo que ha superado los métodos tradicionales y proporcionado nuevas perspectivas sobre los procesos internos de la cuenca. La regionalización de parámetros basada en similitud física y *clustering* también ha sido clave para simular flujos a nivel regional con datos limitados, cuantificando la incertidumbre asociada. Además, la asimilación de datos secuencial se ha demostrado beneficiosa para reducir las incertidumbres del caudal en cuencas con datos dispersos.

2.2.2 | Caracterización y cuantificación de inundaciones y sequías

El análisis de eventos extremos es una aplicación crucial de los modelos hidrológicos. En el Perú, se ha investigado la **frecuencia de sequías bajo escenarios de cambio climático utilizando modelos como GR2M**. Para las inundaciones, estudios recientes como el de Llauca et al. (2023) en la cuenca del río Vilcanota han utilizado **modelos horarios como GR4H para evaluar productos de precipitación satelital (IMERG-E, GSMaP-NRT) para la simulación de escorrentía sub-diaria y su potencial en sistemas de alerta temprana de inundaciones**. La implementación de la asimilación de datos ha mejorado el rendimiento en estos contextos.

2.2.3 | Análisis del impacto del cambio climático y del uso del suelo

La **evaluación de los impactos hidrológicos del cambio climático y del uso del suelo** es uno de los propósitos principales de la modelación hidrológica en el Perú. Se han utilizado modelos como GR2M, SWAT, y el marco FUSE para evaluar la disponibilidad hídrica futura y la respuesta hidrológica bajo diferentes escenarios climáticos. Por ejemplo, el trabajo de Lavado Casimiro et al. (2011) investigó las modificaciones de la respuesta hidrológica en cuencas Amazonas-Andes en relación con las proyecciones climáticas del IPCC. La **pérdida de bosques** en regiones como Madre de Dios es un problema significativo con implicaciones hidrológicas.

2.2.4 | Previsión operativa

La necesidad de pronósticos de caudales fiables en tiempo real es creciente. En el Perú, los **productos de precipitación satelital han demostrado ser viables para el modelado horario y tienen alto potencial para sistemas de alerta temprana de inundaciones**, como se investigó en la cuenca del río Vilcanota. Esto refleja una tendencia internacional hacia sistemas de predicción por conjuntos y el uso de la asimilación de datos.

2.2.5 | Modelado a gran escala

A diferencia de la situación en Suiza donde los estudios a gran escala son escasos a nivel nacional, en el Perú, se han realizado esfuerzos considerables para desarrollar modelos hidrológicos a escala nacional. Llauca et al. (2021) evaluaron el rendimiento del modelo GR2M a nivel nacional, definiendo regiones de calibración y desarrollando un producto de caudales simulados mensuales (PISCO_HyM_GR2M) que cubre 3594 subcuencas/ríos. Más recientemente, Llauca et al. (2023) desarrollaron un **marco de modelado hidrológico híbrido (ARNO/VIC y RAPID) para 11,913 subcuencas en Perú y cuencas transfronterizas**, creando simulaciones diarias de series de flujo para toda la red fluvial peruana. Esto demuestra una **capacidad creciente para la cuantificación de flujos a gran escala**, a pesar de la heterogeneidad fisiográfica y climática del país.



FIGURA 1 Distribución de estudios por región

TABLA 2 Distribución de estudios por región

Región	Cantidad estudios
Cuenca del Titicaca	6
Cuenca del rio Amazonas	23
Cuenca del océano pacifico	14
TOTAL	43

La figura 1 presenta la distribución espacial de los 43 estudios hidrológicos revisados en el presente trabajo, organizados por principales zonas hidrográficas del Perú. En el mapa se observan las ubicaciones geográficas donde se han aplicado modelos hidrológicos, destacándose tres regiones clave:

- **Cuenca del río Amazonas:** Concentra la mayor cantidad de investigaciones (23 estudios), reflejando la importancia estratégica de esta macrocuenca para la disponibilidad hídrica y la regulación de caudales en la región amazónica.
- **Cuenca del océano Pacífico:** Registra 14 estudios, enfocados principalmente en la gestión del recurso hídrico en contextos áridos y

semiáridos, característicos de la costa peruana, donde el agua es un factor crítico para la agricultura y el abastecimiento urbano.

- **Cuenca del Titicaca:** Incluye 6 estudios orientados a la modelación hidrológica en sistemas lacustres y altoandinos, con énfasis en la influencia del retroceso glaciar, la regulación natural y los impactos del cambio climático.

En el mapa, cada punto rojo representa la localización aproximada de un estudio, evidenciando la concentración en la vertiente amazónica y las zonas altoandinas. Esta distribución pone de manifiesto la diversidad geográfica y los desafíos asociados a la modelación hidrológica en un país con marcadas heterogeneidades climáticas y topográficas.

3 | LAS MOTIVACIONES DETRÁS DE LA ELECCIÓN DEL MODELO

La elección de un modelo hidrológico a menudo se basa en una combinación de factores teóricos y prácticos, no siempre explícitamente detallados en las publicaciones. En el Perú, las motivaciones detrás de la elección del modelo están fuertemente influenciadas por los desafíos inherentes a la disponibilidad de datos y la necesidad de abordar procesos específicos en un entorno complejo:

- **Adecuación al contexto de escasez de datos:** La falta de datos históricos y la limitada red de estaciones en muchas cuencas peruanas son factores decisivos. Esto impulsa la selección de modelos que puedan funcionar con datos limitados, como los modelos parsimoniosos (ej. GR2M, GR4H, Shaman) o aquellos que pueden integrar y validar datos satelitales y de reanálisis. La capacidad de regionalización de parámetros también es un criterio clave para la aplicabilidad en cuencas no aforadas.
- **Experiencia y know-how institucional/grupal:** Si bien las fuentes no proporcionan una encuesta explícita para Perú como en el caso de Suiza, es plausible inferir que la disponibilidad de experiencia interna y el conocimiento de modelos específicos dentro de los grupos de investigación y organismos como SENAMHI y ANA influyen en la elección. La familiaridad con un modelo reduce el esfuerzo de configuración y calibración.
- **Colaboraciones y proyectos específicos:** La elección de modelos también puede estar dictada por la naturaleza de las colaboraciones internacionales o nacionales que financian los proyectos. Esto puede llevar a la adopción de modelos ya establecidos por los socios del proyecto.
- **Necesidad de representar procesos específicos:** Los estudios peruanos seleccionan modelos que son adecuados para los procesos dominantes de sus áreas de estudio. Por ejemplo, SWAT es dominante para estudios de disponibilidad hídrica y cambio de uso de suelo, mientras que GR2M y GR4H son útiles para simulaciones mensuales y subdiarias en cuencas grandes y medianas y para eventos extremos. La capacidad de los modelos para manejar la hidrología de glaciares, nieve o bofedales es un factor clave en las cuencas andinas.

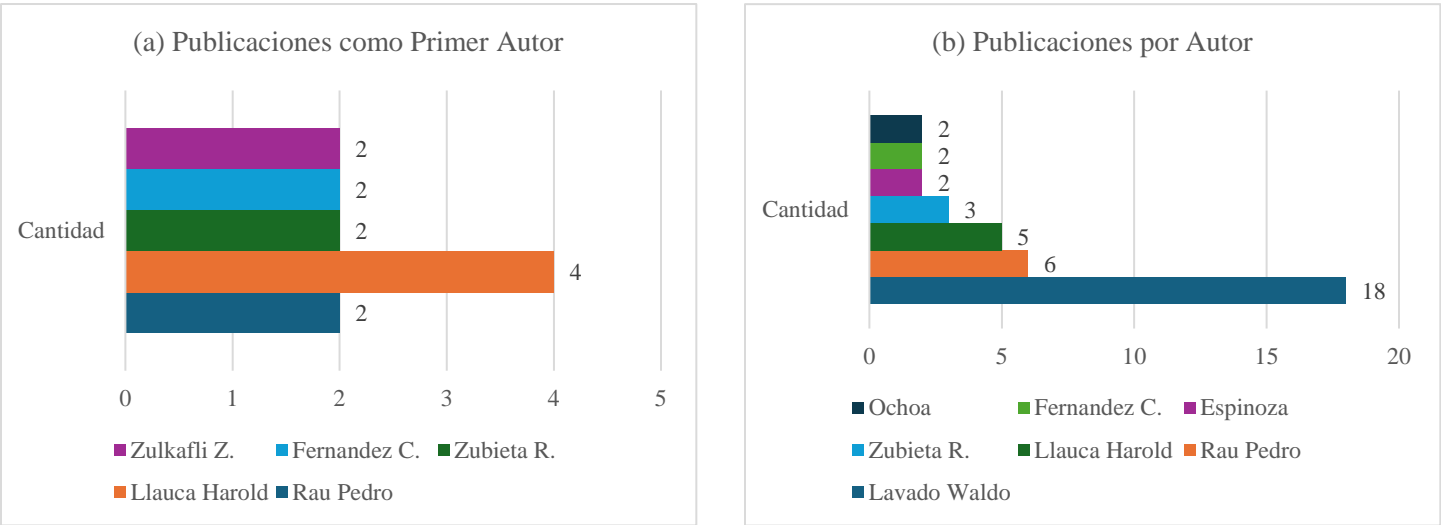


FIGURA 2 Involucramiento en desarrollo de modelos: (a) Publicaciones como primer autor, (b) Publicaciones por autor.

La figura 2 muestra la distribución de la participación de los autores de forma individual y como primer autor, el autor que tiene mayor participación es Waldo Lavado (18) seguido de Pedro Rau (6) ambos trabajan como investigadores en prestigiosas instituciones como SENHAMI y la Universidad Tecnológica del Perú, respectivamente.

4 | SOBRE LA INCERTIDUMBRE ESTRUCTURAL DEL MODELO Y LOS ENFOQUES MULTIMODELO

La incertidumbre es una consideración fundamental en la modelación hidrológica, especialmente en contextos con datos dispersos como el Perú. Se reconoce que existen múltiples fuentes de incertidumbre, incluyendo la incertidumbre paramétrica, la de los datos de entrada y la estructural del modelo.

Mientras que en el caso suizo se observaba una baja adopción de enfoques multimodelos a pesar del reconocimiento de su importancia, en el Perú, hay indicios de una creciente incorporación de estos enfoques:

- **Comparación de modelos:** Dangles et al. (2021) compararon el rendimiento de tres modelos conceptuales (Shaman, HBV-light, RS Minerve) de diferente complejidad en cuencas glaciares con escasez de datos, concluyendo que no hay diferencias significativas en las simulaciones de escorrentía entre modelos simples y complejos, y que los modelos parsimoniosos pueden ser robustos.
- **Marcos de modelado con múltiples estructuras:** Saavedra et al. (2022) utilizaron un marco FUSE (Framework for Understanding Structural Errors) con múltiples modelos hidrológicos (incluyendo Noah-MP como referencia) para probar estructuras de modelos, reducir la incertidumbre de la elección del modelo y proporcionar simulaciones consistentes bajo condiciones climáticas contrastantes en cuencas representativas del Perú. Esto es un ejemplo de la aplicación de un marco modular que, en teoría, ayuda a contrarrestar la diversificación desordenada de modelos y facilita la prueba de hipótesis sobre procesos hidrológicos.
- **Modelos híbridos:** Llauca et al. (2023) desarrollaron un marco de modelado hidrológico híbrido combinando un modelo conceptual lluvia-escorrentía (ARNO/VIC) con un modelo de encauzamiento (RAPID) para simulaciones diarias a escala nacional.

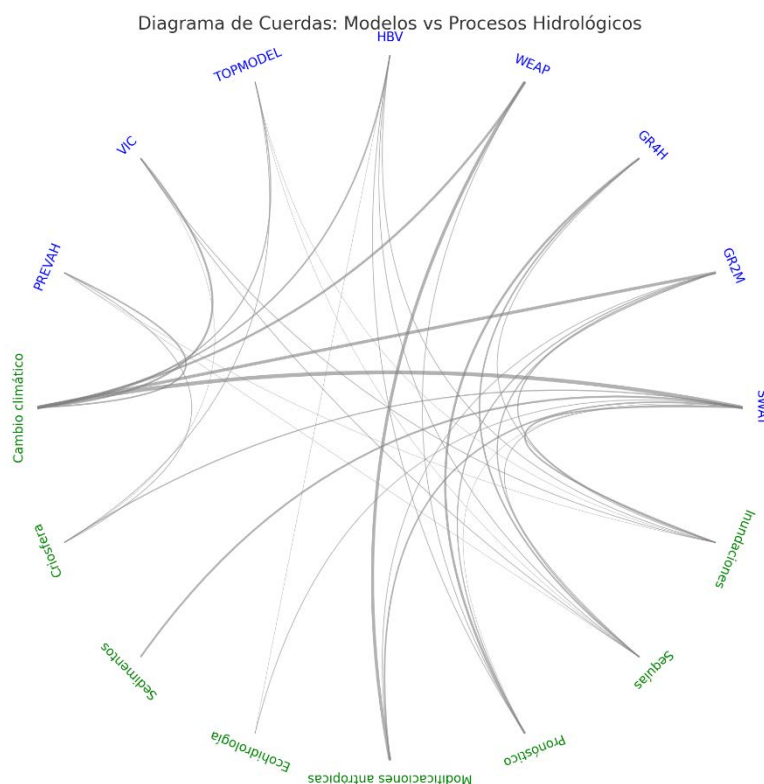


FIGURA 3 Diagrama de cuerdas: Representa la relación entre modelos hidrológicos (en azul) y procesos/temáticas (en verde) a partir de la revisión de los 43 artículos. El grosor de las líneas indica la frecuencia de uso en cada contexto.

A pesar de estos avances, aún existe una necesidad clara de mayor estandarización en los protocolos de validación y análisis de incertidumbre en los estudios hidrológicos peruanos. La integración de la humedad del suelo de teledetección para reducir la incertidumbre también se ha identificado como una dirección de investigación futura.

El análisis de la relación entre modelos hidrológicos y procesos investigados revela patrones significativos en el uso de herramientas de modelación en el Perú mostrado en la figura 3:

- SWAT (Soil and Water Assessment Tool) destaca por su alta versatilidad, evidenciada en su aplicación en múltiples contextos como cambio climático, transporte de sedimentos y ecohidrología. Esto confirma su preferencia en estudios que requieren un enfoque integral de procesos hidrológicos y de gestión de cuencas.
- GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) se encuentra fuertemente vinculado a estudios de cambio climático e inundaciones, lo que refleja su idoneidad para simulaciones de balance hídrico en contextos de proyección climática y análisis de caudales extremos a nivel mensual.
- GR4H se asocia principalmente con la prevención y pronóstico de eventos hidrológicos extremos, especialmente inundaciones y sequías, debido a su estructura orientada a escalas horarias y su integración con sistemas de alerta temprana.
- WEAP (Water Evaluation and Planning System) muestra predominio en modificaciones antrópicas, vinculadas a la gestión y planificación de recursos hídricos en escenarios de desarrollo socioeconómico, lo que evidencia su utilidad para la toma de decisiones en políticas de agua.
- Modelos como TOPMODEL, VIC y PREVAH, aunque menos frecuentes, se aplican en estudios especializados de criósfera y escenarios hidrológicos complejos, donde se requiere una representación detallada de procesos físicos como la fusión nival y el almacenamiento subterráneo.

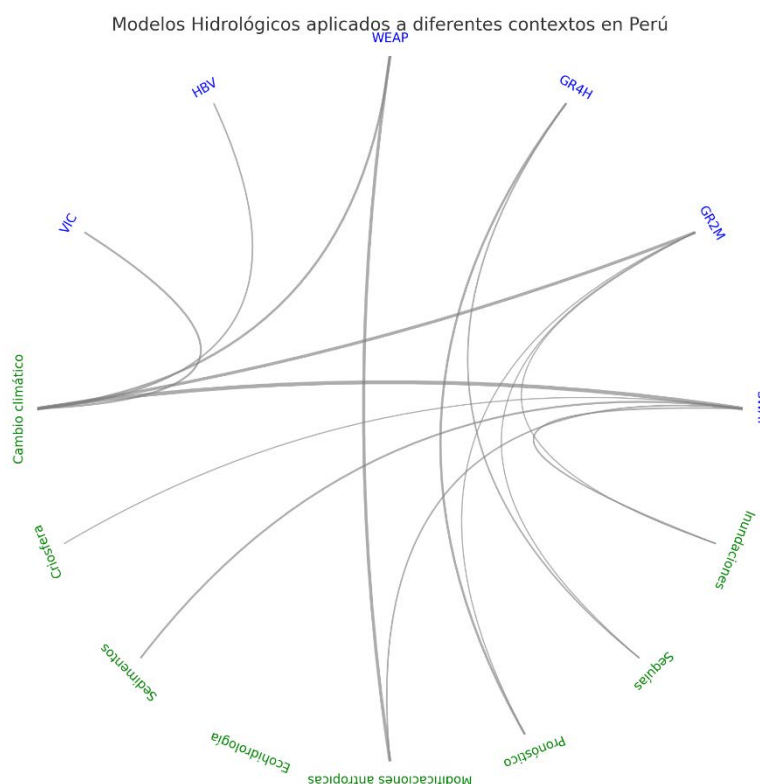


FIGURA 4 Diagrama actualizado (resumen): Muestra solo los modelos hidrológicos con ≥ 3 casos de uso (SWAT, GR2M, GR4H, WEAP, HBV y VIC). Los enlaces son proporcionales al número de artículos (más grueso = mayor frecuencia). Se eliminaron modelos con menos de 3 casos para mayor claridad, siguiendo la indicación.

El diagrama de cuerdas de la figura 4 muestra la relación entre modelos hidrológicos y los contextos de aplicación más relevantes en el Perú, con el grosor de los enlaces representando la frecuencia de uso en los 43 estudios analizados:

- SWAT evidencia un rol predominante debido a su aplicación en múltiples contextos, destacando en estudios sobre cambio climático e inundaciones. Esta versatilidad se explica por su estructura semi-distribuida y su capacidad para integrar procesos físicos y de uso del suelo a distintas escalas.
- GR2M se concentra principalmente en análisis de cambio climático y pronóstico hidrológico, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para simulaciones a nivel mensual en cuencas con datos limitados.
- GR4H se focaliza en el pronóstico operativo y la caracterización de sequías, aprovechando su resolución horaria y capacidad para ser calibrado en contextos de alerta temprana.
- WEAP se asocia estrechamente con modificaciones antrópicas y gestión del agua, dado que integra componentes de planificación, asignación de recursos y escenarios socioeconómicos, siendo ampliamente usado en estudios de políticas hídricas.
- Los modelos VIC y HBV muestran vínculos significativos con cambio climático, debido a su capacidad para representar procesos distribuidos y balances hídricos bajo escenarios proyectados.

5 | DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La revisión sistemática de 43 artículos sobre modelación hidrológica en el Perú muestra una comunidad científica activa que avanza en la superación de limitaciones históricas de datos y heterogeneidad geográfica. La diversidad de modelos (conceptuales, semi-distribuidos y distribuidos físicamente) no refleja dispersión metodológica, sino una adaptación pragmática a la complejidad del territorio y a la singularidad de procesos hidrológicos en cada región hidro climática (vertientes del Pacífico, Amazonas y Títicaca).

Hallazgos relevantes

- Versatilidad de SWAT: domina aplicaciones integradas, desde balance hídrico y sedimentos hasta eco hidrología, especialmente en estudios sobre cambio climático y eventos extremos (ver Figura 3 y 4).
- GR2M y GR4H: modelos parsimoniosos y robustos para análisis de escenarios climáticos y pronósticos operativos, respectivamente.
- WEAP: ampliamente adoptado para gestión y planificación de recursos hídricos bajo escenarios socioeconómicos.
- Modelos distribuidos (VIC, TOPMODEL): reservados para estudios de gran escala y de procesos críticos (criósfera, eco hidrología).
- El uso extendido de datasets satelitales y productos grillados (PISCO, IMERG, MSWEP) ha permitido suplir la escasez de observaciones in-situ, especialmente en cuencas altoandinas.

Innovaciones metodológicas

- Calibración multiobjetivo, regionalización de parámetros y asimilación de datos en tiempo real para reducir la incertidumbre en contextos con datos limitados.
- Avances en modelación multimodelo y uso de marcos como FUSE para caracterizar la incertidumbre estructural.
- Desarrollo de modelos a escala nacional (GR2M-PISCO) sobre más de 11,900 subcuencas, representando un salto cualitativo en la modelación hidrológica para el Perú.

Limitaciones persistentes

- Escasez crítica de datos en zonas glaciares y altoandinas, que limita la calibración y validación.
- Baja estandarización en protocolos de análisis de incertidumbre y escaso uso de modelos completamente distribuidos debido a restricciones computacionales.
- Débil interoperabilidad entre modelos hidrológicos e hidrodinámicos y falta de integración con modelos socioeconómicos.

Perspectivas futuras

- Integración de datos multifuente y observaciones ciudadanas para mejorar el monitoreo.
- Profundizar en la reducción de incertidumbre con técnicas bayesianas y enfoques de inteligencia artificial.
- Modelos acoplados (hidrología-hidráulica y socio hidrología) para sistemas complejos.
- Escalas temporales finas (subhorarias) en sistemas de alerta temprana ante inundaciones y sequías.
- Priorizar la investigación sobre procesos criosféricos, hidrología subterránea y eco hidrología en bofedales andinos, claves para la seguridad hídrica.

Finalmente, la consolidación de la modelación hidrológica en el Perú exige inversión sostenida en redes hidrometeorológicas, capacidades computacionales y formación avanzada en modelación climática e hidrológica. Los modelos no son un fin, sino herramientas esenciales para respaldar la toma de decisiones y la gestión adaptativa del agua en un país marcado por su diversidad y vulnerabilidad hídrica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a diversos colegas peruanos e internacionales por su ayuda en la historia de la modelización hidrológica en Perú (véase la información complementaria) y a Waldo Lavado por sus conocimientos sobre modelización hidrológica en la Dirección de Investigación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima (SENAMHI). También agradecemos a los dos revisores que ayudaron a mejorar el artículo, así como mis compañeros del curso de Modelamiento Matemático en Hidrología.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores han declarado no tener ningún conflicto de intereses en relación con este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Pascal Horton: Conceptualización (igual); curación de datos (líder); análisis formal (líder); investigación (líder); redacción del borrador original (líder); redacción, revisión y edición (igual).

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

No se cuenta con datos disponibles, solo las publicaciones utilizadas en el presente artículo.

¹ *Ingeniero Civil por la Universidad Nacional de Ingeniería, Mg. Sc. Ingeniería Civil mención en Hidráulica, Especialista en gestión de recursos hídricos en minería y energía.*

REFERENCIAS

- Asurza, A., et al. (2020). Estimación de la disponibilidad hídrica mediante SWAT y regionalización de parámetros en cuencas peruanas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. [Referencia incompleta].
- Baltazar, R., et al. (2023). Modelación hidrológica con SWAT en la cuenca del río Chichlarazo usando datos satelitales IMERG. *Water Resources Management*. [Referencia incompleta].
- Buytaert, W., et al. (2017). Propagación espacial de la contribución del derretimiento glaciar en los Andes. *Hydrological Processes*. [Referencia incompleta].
- Canales Orozco, M., & González, F. (2022). Estimación del potencial hidroeléctrico de la cuenca del río Chancay mediante balance hídrico. *Revista Peruana de Recursos Hídricos*. [Referencia incompleta].
- Chou, W., et al. (2022). Parametrización del modelo JULES para ecosistemas andinos. *Hydrology and Earth System Sciences*. [Referencia incompleta].
- Clark, J., et al. (2014). Mixing models for hydrological partitioning in Andean catchments using isotopes. *Hydrological Sciences Journal*. [Referencia incompleta].
- Correa, A., et al. (2020). Revisión de la ecohidrología en páramos tropicales. *Ecohydrology*. [Referencia incompleta].
- Daneshvar, M., et al. (2021). Implementación de SWAT en cuencas semiáridas del sur del Perú. *Environmental Modelling & Software*. [Referencia incompleta].
- Dangles, O., et al. (2021). Evaluación de modelos conceptuales y semi-distribuidos en cuencas andinas englazadas. *Journal of Hydrology*. [Referencia incompleta].
- Fernandez-Palomino, C., et al. (2021). Calibración multiobjetivo en SWAT para cuencas andinas del Perú. *Hydrological Sciences Journal*. [Referencia incompleta].
- Fernandez-Palomino, C., et al. (2022). Comparación de datos satelitales para modelación hidrológica en Perú. *Journal of Hydrology*. [Referencia incompleta].
- Guzmán, L., et al. (2023). Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en el río Vilcanota-Urubamba. *Water International*. [Referencia incompleta].

- Lavado Casimiro, W., et al. (2011). Impacts of climate change on hydrology in Peruvian Amazon and Andean basins. *Hydrological Sciences Journal*, 56(6), 1004–1021. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.592909>
- Llauca, H., et al. (2021). Evaluación nacional del modelo GR2M con PISCO. *Hydrological Sciences Journal*. [Referencia incompleta].
- Llauca, H., et al. (2023). Implementación del modelo GR4H y asimilación de datos para pronósticos de inundación en Vilcanota. *Journal of Hydrology*. [Referencia incompleta].
- Llauca, H., et al. (2023). Modelación hidrológica a escala nacional en Perú con ARNO/VIC y RAPID. *Water Resources Research*. [Referencia incompleta].
- Mendoza, C., et al. (2021). Análisis de incertidumbre en SWAT+ en la cuenca del río Tambo. *Water International*. [Referencia incompleta].
- Monge-Salazar, J., et al. (2022). Ecohidrología y servicios ecosistémicos en bofedales altoandinos. *Ecohydrology*. [Referencia incompleta].
- Olsson, J., et al. (2017). Escenarios de cambio climático y recursos hídricos en la cuenca Chancay-Huaral. *Climatic Change*. [Referencia incompleta].
- Ochoa-Tocachi, B. F., et al. (2016). Impacts of land use on the hydrology of Andean páramo catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 4543–4563. <https://doi.org/10.5194/hess-20-4543-2016>
- Paiva, R., et al. (2023). Evaluación de datasets satelitales para modelación con SWAT en Madre de Dios. *Hydrological Processes*. [Referencia incompleta].
- Rau, P., et al. (2018). Regionalización de parámetros en GR2M en cuencas costeras peruanas. *Hydrological Sciences Journal*. [Referencia incompleta].
- Ross, A., et al. (2023). Dinámica ecohidrológica en bofedales andinos. *Journal of Arid Environments*. [Referencia incompleta].
- Saavedra, A., et al. (2022). Reducción de incertidumbre estructural con el framework FUSE en cuencas peruanas. *Hydrology and Earth System Sciences*. [Referencia incompleta].
- Satgé, F., et al. (2020). Evaluación de datasets satelitales SM2RAIN para modelación hidrológica en el Altiplano. *Remote Sensing of Environment*. [Referencia incompleta].
- Zubieta, R., et al. (2015). Evaluation of satellite rainfall estimates for streamflow simulation in the Western Amazon Basin. *Journal of Hydrology*, 528, 599–612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.064>
- Zubieta, R., et al. (2017). Impacts of climate change on the streamflow in the Peruvian Amazon basin. *Hydrological Sciences Journal*, 62(8), 1355–1368. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1319063>
- Saavedra, A., Buytaert, W., & Lavado-Casimiro, W. (2020). Climate change impacts on glacier-fed hydrological extremes in the tropical Andes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 30, 100697. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100697>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Clark, M. P., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2011). Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 47(9), W09301. <https://doi.org/10.1029/2010WR009827>
- Lavado-Casimiro, W., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J. C., & Guyot, J. L. (2013). Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965–2007). *Hydrological Processes*, 27(20), 2944–2957. <https://doi.org/10.1002/hyp.9418>

- Lavado-Casimiro, W., & Ronchail, J. (2020). Climate change projections for rainfall and temperature in the Peruvian Andes: A multi-model ensemble approach. *Climatic Change*, 162(3), 1273–1291. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02881-1>
- Fernández-Palomino, C., Lavado-Casimiro, W., & Buytaert, W. (2022). Performance of conceptual models for flood forecasting in data-scarce Peruvian Andes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101069. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101069>
- Fernández-Palomino, C., Lavado-Casimiro, W., & Zubieta, R. (2021). Regionalization of parameters for GR2M in Peruvian basins. *Hydrological Sciences Journal*, 66(6), 888–903. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1914380>
- Llauca, H., Lavado-Casimiro, W., & Rau, P. (2021). Implementation of GR4H for real-time flood forecasting in the Vilcanota river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100834>
- Ross, A. C., Martínez Mendoza, M., Drenkhan, F., Montoya, N., Baiker, J. R., Mackay, J. D., Hannah, D. M., & Buytaert, W. (2023). Seasonal water storage and release dynamics of bofedal wetlands in the Central Andes. *Hydrological Processes*, 37(12), e14940. <https://doi.org/10.1002/hyp.14940>
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Vega-Jácome, F., & Bronstert, A. (2020). Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: A case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1846740>
- Baltazar, R., Fernandez-Palomino, C., & Llauca, H. (2023). Evaluating satellite-based precipitation products (IMERG, GSMaP) for hydrological modeling in Peru. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 43, 101256. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101256>
- Monge-Salazar, J., Buytaert, W., & Ross, A. (2022). Hydrological functioning of Andean peatlands under land use and climate change. *Ecohydrology*, 15(7), e2488. <https://doi.org/10.1002/eco.2488>
- Saavedra, A., Lavado-Casimiro, W., & Buytaert, W. (2022). Multi-model ensemble strategies for hydrological projections in glacier-fed Andean catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(9), 2415–2431. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2415-2022>
- Ross, A. C., Drenkhan, F., & Buytaert, W. (2023). Seasonal water regulation services of high-Andean bofedales: Implications for water security. *Journal of Arid Environments*, 214, 104718. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104718>