

DOI: 10.24850/j-tyca-15-01-01

Artículos

Evaluación de la respuesta hidrológica a cambios de precipitación y temperatura en el altiplano peruano
Assessment of the hydrological response to precipitation and temperature changes in the Peruvian Altiplano

Wilber Laqui¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6236-8773>

Ricardo Zubieta², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4315-7695>

Yony Laqui-Vilca³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8567-4543>

Roberto Alfaro⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1672-9026>

César Laqui-Vilca⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1553-0410>

Luis Aragón⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9014-5515>

¹Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, Puno, Perú, wlaqui@unap.edu.pe

²Instituto Geofísico del Perú (IGP), Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera (SCAH), Lima, Perú, rzubieta@igp.gob.pe

³Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, Puno, Perú, ylaqui@unap.edu.pe



⁴Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, Puno, Perú, ralfaro@unap.edu.pe

⁵Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Puno, Perú, cesarlaqui@unap.edu.pe

⁶Universidad Nacional Agraria La Molina, Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Lima, Perú, aragonluis@hotmail.com

Autor para correspondencia: Wilber Laqui, wlaqui@unap.edu.pe

Resumen

Las cuencas de montaña son consideradas como los sistemas hidrológicos de mayor afectación por el cambio climático, estimándose impactos significativos en los recursos hídricos y las demandas de agua. Este estudio evalúa la respuesta hidrológica de una cuenca del altiplano peruano frente a cambios de los patrones de precipitación y temperatura. El conocer con anticipación el efecto del cambio climático sobre la oferta hídrica toma relevante importancia para la toma de decisiones en la planificación a corto, mediano y largo plazos del uso del agua y la gestión de los recursos hídricos. A partir de la implementación del Modelo Integrado de Cambio Climático y Recursos Hídricos (HydroBID) se evaluaron 30 escenarios climáticos que consideraron cambios en la precipitación entre -20 y +20 %, temperatura entre 0 y 6 °C, y combinaciones de éstos formulados según las proyecciones para el área de estudio disponibles en la literatura. Los resultados mostraron que por cada 10 % de incremento de la precipitación se produjo un aumento

promedio de 23.4 % en el caudal; mientras que por cada 10 % de disminución de la precipitación se generó una reducción promedio del caudal de 16 %. Asimismo, se evidenció que por cada 1 °C de subida de la temperatura se generó en promedio un 5 % de reducción del caudal. Se determinó que la variación de las tasas de precipitación, temperatura y su interacción entre ellas generarían cambios en los caudales futuros, mostrando efectos en la variación temporal y espacial de la cuenca.

Palabras clave: respuesta hidrológica, cambio climático, patrones climáticos, modelización hidrológica, HydroBID.

Abstract

Mountain basins are considered the hydrologic systems most affected by climate change, estimating significant impacts on water resources and water demands. This study evaluates the hydrological response of a Peruvian Altiplano basin to changes in precipitation and temperature patterns. Knowing in advance the effect of climate change on water supply takes on relevant importance for decision-making in short, medium and long-term planning of water use and management of water resources. From the implementation of the Integrated Model of Climate Change and Water Resources (HydroBID), 30 climate scenarios were evaluated that considered changes in precipitation between -20 and +20 %, temperature between 0 and 6 °C, and combinations of these were formulated according to the projections for the study area available in the literature. The results showed that for every 10 % increase in precipitation there was an average increase of 23.4 % in flow; while for every 10 % decrease

in precipitation, an average reduction in flow of 16 % was generated. Likewise, it was evidenced that for every 1 °C increase in temperature, an average 5 % reduction in flow was generated. It was determined that the variation of the precipitation rates, temperature and their interaction between them generate changes in the flows, showing effects on the temporal and spatial variation of the basin.

Keywords: Hydrological response, climate change, climate patterns, hydrological modeling, HydroBID.

Recibido: 17/02/2022

Aceptado: 06/06/2022

Publicado online: 15/07/2022

Introducción

El cambio climático se ha tornado en un tema decisivo y uno de los mayores desafíos a enfrentar por la vulnerabilidad que genera en los ecosistemas naturales y con mayor incidencia en las zonas de montañas, al ser reconocidos como entornos físicos especialmente sensibles, donde el cambio climático podría tener repercusiones considerables en la disponibilidad de agua (Abdulla & Al-Shurafat, 2020; Beniston, 2012; Guo, Ma, Wang, & Lin, 2021; Mengistu, Bewket, Dosio, & Panitz, 2021; Budhathoki, Babel, Shrestha, Meon, & Kamalamma, 2021; Valdivia,

Thibeault, Gilles, García, & Seth, 2013; Lozano-Povis, Alvarez-Montalván, & Moggiano, 2021). La incertidumbre de los posibles impactos del cambio climático —analizado a partir de modelos de circulación global (MCG)— puede ser amplia y su evaluación depende principalmente de la resolución temporal y la representatividad de los escenarios climáticos examinados (Ndhlovu & Woyessa, 2020).

Numerosos estudios han mostrado los impactos del futuro cambio climático en los recursos hídricos y su aprovechamiento debido a la alteración que generan en los procesos del ciclo hidrológico (Modi, Fuka, & Easton, 2021); en la agricultura (Masia *et al.*, 2021); en el abastecimiento poblacional (Olabanji, Ndarana, Davis, & Archer, 2020); en la seguridad alimentaria (Omar, Moussa, & Hinkelmann, 2021); en la generación de energía hidroeléctrica (Hidalgo *et al.*, 2020), así como en indicadores socioeconómicos (Aghapour-Sabbaghi, Nazari, Araghinejad, & Soufizadeh, 2020), entre otros (Funes *et al.*, 2021).

Sanabria, Marengo y Valverde (2009) analizaron el impacto del cambio en el departamento de Puno, localizado en el extremo sureste del Perú, a partir de modelos climáticos regionales (HadRM3 y ETA CSS), definiendo probables escenarios climáticos para el periodo 2010-2100. En un escenario extremo A2 determinaron incrementos de la precipitación de hasta 2 mm/día en la época lluviosa y en un escenario moderado B2 condiciones similares al patrón actual. Proyectaron para los escenarios A2 y B2 aumentos de temperatura entre 2 y 4 °C, respectivamente, y en el extremo norte del lago Titicaca de hasta 6 °C, constituyendo una primera aproximación del cambio climático futuro en el altiplano peruano.

Llacza *et al.* (2021) proyectaron escenarios climáticos al 2050 en el Perú, de donde se extrae que para la cuenca del río Huancané (CRH) se presentarían alzas de la precipitación de hasta 15 % en relación con el periodo base (1981-2005). En las estaciones de verano y primavera se observaron incrementos en la precipitación similares al periodo anual, mientras que para la estación de invierno reducciones de hasta -15 %, y en primavera incrementos mayores a 15 %. Asimismo, proyectaron aumentos de temperatura media entre +2.4 y +2.8 °C. A nivel estacional, los mayores incrementos se observaron en invierno, con valores entre +3.2 y 3.6 °C. El rango térmico al 2050 mostró cambios significativos de +0.2 a 0.4 °C. Finalmente, determinaron que la región Puno es una de las áreas con mayores cambios en los patrones de precipitación y temperatura.

Zubieta, Molina-Carpio, Laqui, Sulca e Ilbay (2021) encontraron que para el periodo 2034-2064 la temperatura media se incrementará en el rango de 0.5 a 3.5 °C en relación con el periodo base (1984-2014), con mayor incidencia en el extremo sur del Sistema Hídrico Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (TDPS). También observaron incrementos entre 3 y 6 % de la precipitación total anual futura en el extremo norte y central del TDPS; mientras en el extremo sur se pronosticó una reducción de la precipitación de hasta 3 %.

GIRH-TDPS (2021) encontró que la distribución espacial de cambios de la precipitación centrados al 2050 a escala anual está entre -15 y +15 % en gran parte del TDPS. Para la CRH se observaron bajas de la precipitación de hasta -15 % en escala anual y similar comportamiento para el periodo húmedo. Asimismo, se observaron incrementos de la

temperatura máxima y mínima de hasta 3.5 y 2.5 °C, respectivamente, con comportamientos similares para el periodo lluvioso e intensificaciones del incremento para el periodo seco.

El posible impacto del cambio climático en los recursos hídricos y procesos hidrológicos en cuencas se ha estudiado ampliamente a través del uso de modelos hidrológicos debidamente calibrados y validados, ya que permiten obtener información cuantitativa para las posibles condiciones futuras (Sha *et al.*, 2014; Didovets *et al.*, 2020; Her *et al.*, 2019; Kour, Patel, & Krishna, 2016; Hakala *et al.*, 2019; Bai, Liu, Liang, & Liu, 2015). Una adecuada estimación del proceso hidrológico es esencial para la toma de decisiones y la gestión del agua, así como la planificación de las cuencas debido a la complejidad de los procesos hidrológicos e hidráulicos operativos (Zhang, Wang, Wang, Li, & Wang, 2013).

En la CRH, como en otras cuencas del Altiplano Peruano, el uso agrario constituye la mayor demanda de agua, por ser la agricultura la principal actividad económica de la población (ANA, 2010). Los otros usos de agua importantes son el abastecimiento poblacional, acuicultura, industria y minería (ALT, 2020). En periodos de déficit hídrico, donde la insuficiencia integral de agua imposibilita la satisfacción de todos los tipos de demanda de agua, como en los eventos ocurridos en 2015 y 2016, donde se declaró a la CRH en estado de emergencia por peligro inminente de déficit hídrico (D. S. No. 045-2015-PCM, 2015; D. S. No. 089-2016-PCM, 2016), es frecuente la ocurrencia de conflictos por el acceso al agua en cantidad y calidad suficientes entre los distintos usos y usuarios de agua de la cuenca, al igual que pérdidas económicas en las actividades productivas y afectación a la salud por el consumo de agua no segura.

Por tanto, mejorar el conocimiento de los impactos del cambio climático en la respuesta hidrológica de la CRH es de fundamental importancia para el planeamiento del uso del agua, el manejo de los sistemas de recursos hídricos, y la prevención de la ocurrencia de conflictos sociales vinculados con los recursos hídricos (Laqui, 2010; Defensoría del Pueblo, 2015). En razón de ello, este estudio plantea como principal objetivo evaluar la respuesta hidrológica de la CRH frente a cambios de los patrones de la precipitación y temperatura, y la combinación de ellos, estimados a partir de la implementación del Modelo Integrado de Cambio Climático y Recursos Hídricos (HydroBID).

Materiales y métodos

Área de estudio

La CRH está localizada entre las coordenadas 69.28° a 70.17° O y 14.48° a 15.37° S en el extremo sur este de Perú. El área de drenaje delimitada hasta la estación Puente Carretera Huancané, próxima a la desembocadura en el lago Titicaca, cubre un área aproximada de 3 522 km² (Figura 1). El curso principal es de 125 km de longitud y los rangos de elevación entre 3 820 y 5 162 msnm. La CRH se localiza en la zona climática lluviosa, caracterizada por veranos húmedos y cálidos, e inviernos secos y fríos (SENAMHI, 2020).

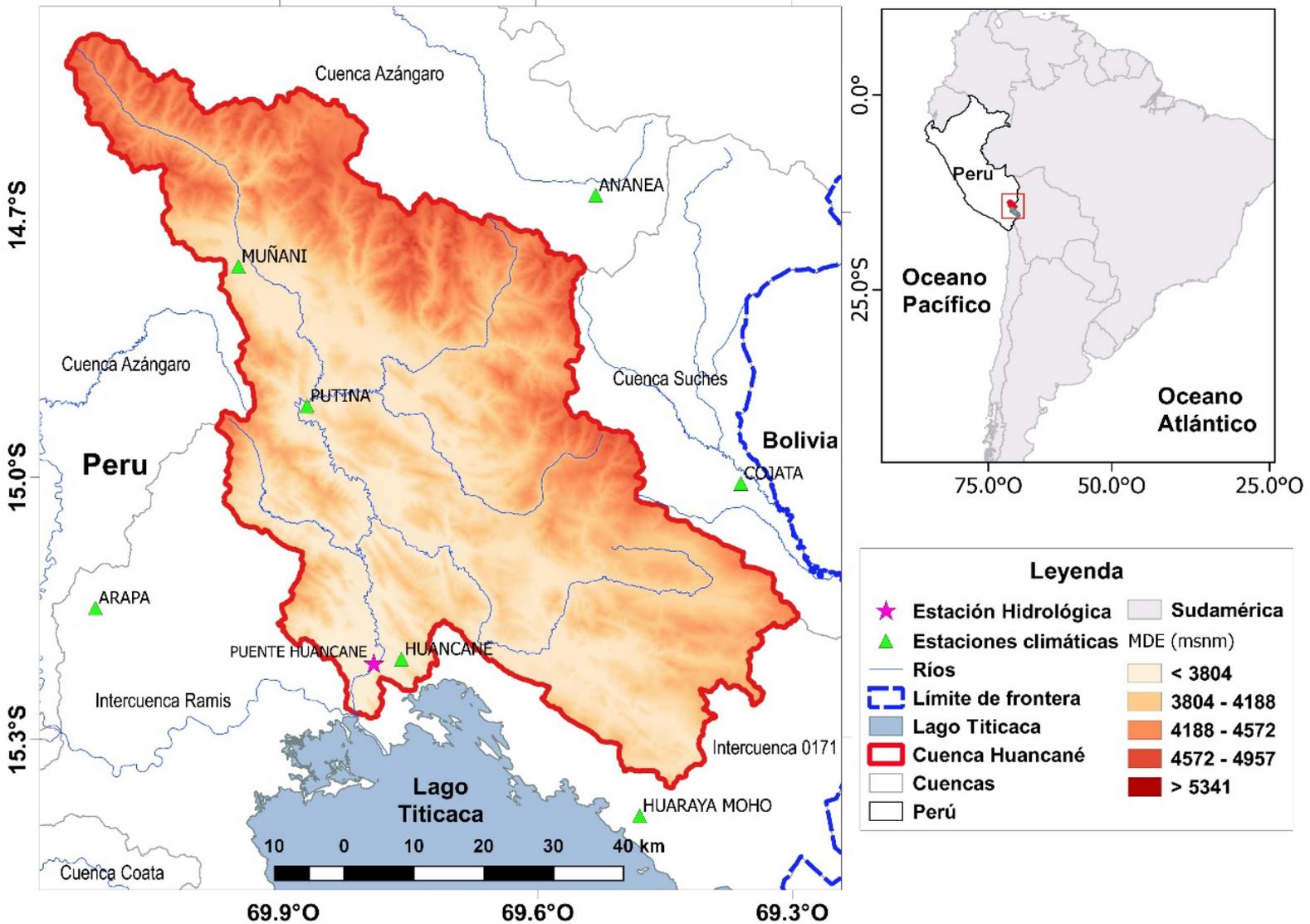


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Huancané y estaciones hidroclimáticas empleadas.

La precipitación promedio anual es de 699.5 mm. La estación lluviosa está comprendida entre noviembre a abril y concentra aproximadamente el 80 % del total de la precipitación anual. En el periodo seco, que es entre mayo a octubre, se presenta el 20 % restante del total de la precipitación (Andrade, 2018). La temperatura media multianual es de 7.71 °C. La temperatura máxima promedio anual alcanza valores entre 9.0 y 16.5 °C. La temperatura mínima promedio anual muestra valores entre -9.0 y 3.0 °C. Los mayores valores de la temperatura se registran en la temporada de transición de seca a húmeda (primavera), y los valores más bajos se presentan en la temporada seca (invierno). La evapotranspiración potencial total anual es de 1 160 mm; los mayores valores se observan en el periodo seco y los valores más bajos en la estación lluviosa (Laqui *et al.*, 2019).

El caudal promedio anual es de 19.3 m³/s. En la estación lluviosa se registra un caudal máximo de 59.1 m³/s y en la estación seca se presenta un caudal mínimo de 2.8 m³/s. Los principales cultivos de la CRH son los pastos naturales, pastos cultivados, papa, avena forrajera y habas, lo que evidencia el gran potencial agropecuario del altiplano peruano (ANA, 2010).

Estaciones hidrometeorológicas en la CRH

Se recopilieron datos diarios de precipitación y temperatura de siete estaciones climáticas y registros diarios de caudales de la estación Puente Carretera Huancané, todos administrados por el Servicio Nacional de

Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI); el periodo de datos seleccionado para el análisis hidrológico fue entre 1977 y 2013 (Figura 1, Tabla 1). Estos registros fueron sometidos a análisis, crítica y tratamiento de datos a través de la Prueba de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT) disponible en el paquete CLIMATOL de R (Guijarro *et al.*, 2017; Guijarro, 2018); los datos faltantes de precipitación y temperatura fueron completados utilizando datos de estaciones vecinas con el empleo de este mismo paquete y la experiencia de estudios anteriores (Montero-Martínez, Santana-Sepúlveda, Pérez-Ortiz, Pita-Díaz, & Castillo-Liñan, 2018; Domonkos *et al.*, 2020).

Tabla 1. Ubicación de la cuenca del río Huancané y estaciones hidroclimáticas empleadas.

Estación	Ubicación			Variable
	Latitud	Longitud	Altitud	
	(°)	(°)	(msnm)	
Huaraya Moho	-15.39	-69.48	3 890	<i>P, T</i>
Huancané	-15.20	-69.75	3 890	<i>P, T</i>
Cojata	-15.03	-69.36	4 380	<i>P</i>
Putina	-14.91	-69.87	4 878	<i>P</i>
Muñani	-14.77	-69.95	3 948	<i>P, T</i>
Ananea	-14.68	-69.53	4 660	<i>P</i>
Crucero	-14.36	-70.03	4 183	<i>P</i>
Puente Huancané	-15.12	-69.47	3 860	<i>Q</i>

P = es precipitación total diaria

T = temperatura media diaria

Q = es caudal medio diario

Escenarios climáticos futuros

El cambio climático, como lo señala el IPCC, es originado por el incremento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), lo que está induciendo a alteraciones climáticas significativas (IPCC, 2013), como lo evidencian los resultados de los modelos climáticos globales que analizan distintos escenarios de cambio climático. En esta investigación los escenarios climáticos futuros fueron propuestos teniendo en consideración las predicciones de cambio climático analizados a partir de datos de los modelos climáticos globales y publicados en Sanabria *et al.* (2009), Zubieta *et al.* (2021), Llacza *et al.* (2021) y GIRH-TDPS (2021), que se resumen en la Tabla 2. Los escenarios consideran variaciones anuales y estacionales en la precipitación y temperatura entre máximos y mínimos extremos, con lo que se generaron escenarios lluviosos y secos, como también proponen Hidalgo *et al.* (2020); mientras que las condiciones físicas y ambientales de la CRH definidos para el escenario actual permanecieron constantes para los escenarios futuros.

Tabla 2. Resumen de los escenarios de cambio climático para la zona de estudio disponible en la literatura.

Modelos climáticos	Escenarios	Precipitación	Temperatura	Referencia
ETA CCS HadRM3 REgCM3	A2	+2 mm/día	+2 a +4 °C	Sanabria <i>et al.</i> (2009)
	B2	Sin cambios	+1 a +2 °C	
ACCESS1-0HadGEM2-ES MPI-ESM-LR	RCP 8.5	Hasta 15 %	+2.4 a +2.8 °C	Llacza <i>et al.</i> (2021)
EC-EARTH HadGEM2-ES IPSL-CM5B-LR MIROC5 MPI-ESM-LR	RCP 8.5	3 a 6 %	+0.5 a +3.5 °C	Zubieta <i>et al.</i> (2021)
MPI-ESM-MR MPI-ESM-LR MIROC-ESM HadGEM2-ES GFDL-CM3 CCSM4 ACCESS1-0 Era-Interim	RCP 8.5	-6 %	+3.3 °C (máxima) +2.5 °C (mínima)	GIRH-TDPS (2021)
	RCP 4.5	-2 %	+2.5 °C (máxima) +2.0°C (mínima)	

GIRH-TDPS (2021) encontró que la distribución espacial de cambios de la precipitación centrados al 2050 a escala anual está entre -15 y +15 % en gran parte del TDPS. Para la CRH se observaron reducciones de la precipitación de hasta -15 % en escala anual y similar comportamiento para el periodo húmedo. Asimismo, se observaron incrementos de la temperatura máxima y mínima de hasta 3.5 y 2.5 °C, respectivamente,

con comportamientos similares para el periodo lluvioso e intensificaciones del incremento para el periodo seco.

Las predicciones mayoritariamente refieren un incremento de las tasas de precipitación, sin embargo, con la finalidad de evaluar la respuesta hidrológica de la CRH a reducciones de la precipitación, se consideró un rango de variación de -20 a +20 %, con intervalos de incremento y decremento de ± 10 %, resultando en variaciones de la precipitación de -20, -10, +10 y +20 %. En cuanto a la variación de la temperatura, los escenarios consideraron un incremento máximo de 6 °C con alzas de 1 °C. En la Tabla 3 se presentan los escenarios de cambio climático que resultan de la combinación de los cuatro escenarios para la precipitación y los siete escenarios para la temperatura. En total se plantearon 28 escenarios, que consideran cambios proporcionales a nivel mensual, divididos en 14 escenarios húmedos del 1 al 14, y 14 escenarios secos del 15 al 28. Asimismo, se tomaron en cuenta los escenarios 28 y 29 que incluyen cambios estacionales en la precipitación (desplazamiento), con incrementos de +20 % para el trimestre enero, febrero y marzo (EFM) (escenario 29), y de +20 % para el semestre octubre-marzo (O-M) (escenario 30).

Tabla 3. Características de los escenarios de cambio de precipitación y temperatura.

Escenario		Precipitación	Temperatura	Referencia
Número	Condición			
1 a 7	Húmeda	+10 %	0 °C a 6 °C	Zubieta <i>et al.</i> (2021)
8 a 14		+20 %		Llacza <i>et al.</i> (2021)
15 a 21	Seca	-10 %		
22 a 28		-20 %		GIRH-TDPS (2021)
29	Desplazamiento	+20 % EFM	0 °C	Llacza <i>et al.</i> (2021)
30		+20 % O-M		

Nota: EFM corresponde al trimestre enero-marzo y O-M al semestre octubre-marzo. La condición húmeda está referida a los escenarios que consideran incremento de la precipitación, mientras que la condición seca a los escenarios que incluyen reducción de la precipitación.

Modelización hidrológica

Se implementó el Modelo Integrado de Cambio Climático y Recursos Hídricos (HydroBID), que se basa en el conocido modelo Generalized Watershed Loading Functions (GWLF) (Haith, 1985; Haith, Mandel, & Wu, 1996). GWLF ha sido probado y utilizado en cuencas hidrográficas de todo el mundo (Mukundan, Acharya, Gelda, Frei, & Owens, 2019; Qi *et al.*, 2017; Qi, Kang, Shen, Wang, & Chu, 2019). En HydroBID, la cuenca es

dividida en varias subcuencas (41 subcuencas para la CRH), que se encuentran predefinidas, conjuntamente con las redes de corriente, y los usos y tipos de suelo en la Base de Datos Hidrológica Analítica (AHD). Los impactos del cambio climático en los recursos hídricos pueden simularse a escalas tan pequeñas como una cuenca hidrográfica individual o en todas las cuencas dentro de una cuenca hidrográfica completa (Moreda, Miralles-Wilhelm, Muñoz, & Coli, 2014a; Moreda, Miralles-Wilhelm, & Muñoz, 2014b).

La cuenca hidrográfica en HydroBID se representa de forma conceptual en capas de suelo saturadas e insaturadas, tal como se utiliza en el modelo GWLF (Figura 2). El modelo calcula la escorrentía y los flujos base por captación. La escorrentía se genera en forma de infiltración excesiva y el flujo base es una liberación gradual de la capa saturada. Después de tener en cuenta la escorrentía de los eventos de precipitación, cualquier volumen de agua que exceda al volumen de evaporación calculado se infiltra en la capa no saturada. Con el tiempo, el agua infiltrada se filtra desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el almacenamiento saturado. El agua dentro de la capa saturada ingresa al canal de la corriente como flujo base, donde se combina con la escorrentía de la cuenca y cualquier entrada de las cuencas aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de la corriente para el día. Debe tenerse en cuenta que la capa saturada, o el agua disponible como flujo base, puede agotarse mediante la filtración a un acuífero subterráneo más profundo (Moreda *et al.*, 2014a; Moreda *et al.*, 2014b).

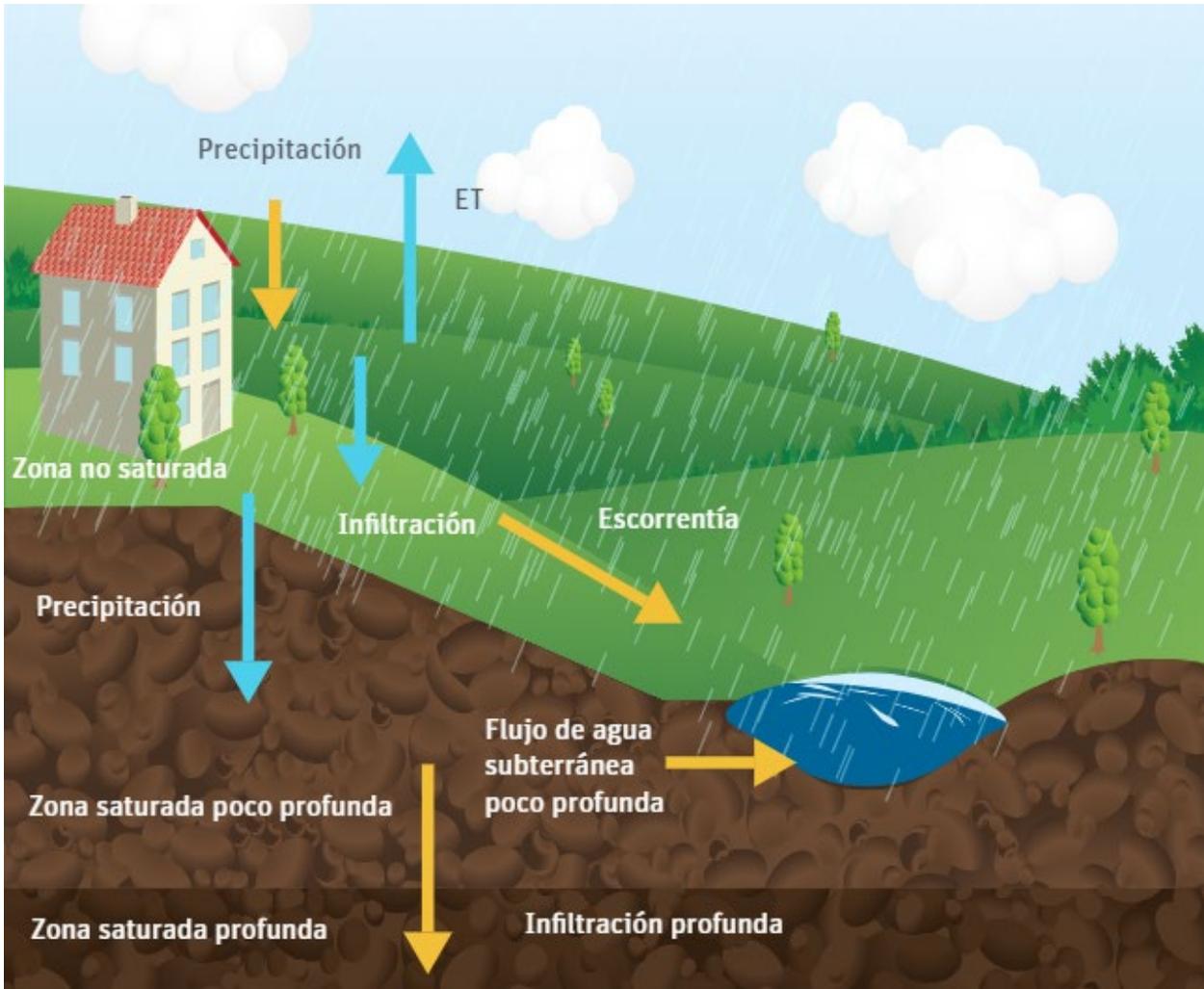


Figura 2. Esquema conceptual del modelo GWLF implementado en HydroBID (Moreda *et al.*, 2014a).

Los parámetros principales de HydroBID recomendados por Moreda *et al.* (2014b) como resultado de la implementación del modelo en diferentes cuencas de Latinoamérica y El caribe se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales parámetros de calibración de HydroBID.

Parámetro	Descripción	Valor sugerido
Velocidad de la corriente	Velocidad promedio estimada de la corriente	0.5 m/s
Latitud	Ubicación del centroide de la cuenca	
Inicio de estación de cultivo	Fecha juliana del día de inicio de la estación de cultivo	
Fin de la estación de cultivo	Fecha juliana del último día de la estación de cultivo de la región	
AWC	Contenido de agua disponible (AWC)	10 cm
CN	Número de curva. Controla la cantidad de la abstracción inicial y es utilizada para calcular la retención de agua en la cuenca	
Coeficiente R (R)	Coeficiente de recesión	0.01
Permeabilidad (S)	Coeficiente de permeabilidad para determinar la infiltración profunda desde la capa saturada	0.005
Factor de ET de la estación de cultivo ($ET-EC$)	Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo	1.0
Factor de ET de la estación de latencia ($ET-EL$)	Factor de evapotranspiración durante la estación de latencia (cuando no se está cultivando)	1.0
Porcentaje de la cobertura impermeable (ICP)	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca en porcentaje	2 %

Se seleccionaron dos periodos distintos de datos hidroclimáticos. Para el proceso de calibración se utilizó el 75 % de los datos que corresponden al periodo de marzo de 1977 a diciembre de 1990, y el 25 % de los datos restantes se emplearon para la etapa de validación (de enero de 1991 a noviembre de 1998). Asimismo, para minimizar la incertidumbre de las condiciones iniciales de los modelos, el primer año de los registros hidroclimáticos se consideraron como periodo de calentamiento (*warm up*), como lo recomiendan Niraula, Kalin, Srivastava y Anderson (2013), y Kim, Kwon y Han (2018). Para la simulación de los escenarios futuros de cambio de precipitación y temperatura se utilizaron los parámetros calibrados y validados en el periodo de marzo de 1977 a noviembre de 1998.

Los registros de caudales medios diarios de la estación Puente Huanané se utilizaron para evaluar el desempeño de HydroBID para estimar caudales, a través del uso del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*) (Nash & Sutcliffe, 1970), el coeficiente de correlación (*R*) y el error de volumen general (*OVE*), que se compararon con los criterios de Moriasi *et al.* (2007) para determinar su desempeño, como también sugieren Sheikh-Goodarzi, Jabbarian-Amiri, Azarnivand y Waltner (2021), así como Stephens, Marshall y Johnson (2019):

$$NSE = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right) \quad (1)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 (P_i - \bar{P})^2}} \quad (2)$$

$$ove = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

Donde O_i y P_i son el caudal observado y simulado en el tiempo i ; \bar{O} y \bar{P} son los promedios de los caudales observados y simulados, respectivamente; NSE varía entre $-\infty$ y 1.0 siendo 1.0 el óptimo; R varía desde 0 a 1.0. Valores de OVE por debajo de 10 % se consideran como muy bueno.

Para analizar el efecto de la precipitación y temperatura en la respuesta hidrológica de la CRH se utilizó el análisis de varianza (ANOVA), para ello se establecieron como factores (variables independientes) al porcentaje de cambio de la precipitación y la tasa de cambio de la temperatura, mientras que el porcentaje de cambio de los caudales de los escenarios futuros en relación con el periodo base se definió como la variable dependiente correspondiente a los escenarios 1 al 28. Para la determinación del efecto de los factores y su interacción en la respuesta hidrológica se tomaron en consideración los p -valores ($Pr(>F)$), comparados con un nivel de significancia de 0.01. Los p -valores menores al nivel de significancia mostrarán evidencia del efecto de los parámetros y su interacción en la variable dependiente.

Resultados

Desempeño del modelo

La calibración manual efectuada a través del cambio de los valores iniciales de los parámetros del modelo HydroBID para el periodo del 1 marzo 1977 a 31 de diciembre 1990 (Tabla 5) muestra la buena capacidad de HydroBID en simular los caudales medios en la CRH. Los estadísticos de desempeño en la calibración y validación (Tabla 6) muestran valores de *NSE* mayores a 0.75 y *OVE* menores a -10 %. El modelo presenta un mejor desempeño en la etapa de validación alcanzando valores de desempeño mayores a los obtenidos en la etapa de calibración.

Tabla 5. Parámetros calibrados del modelo HydroBID para el periodo marzo 1977-diciembre 1990.

Parámetro	Valor
<i>CN</i>	0.95
<i>AWC</i>	0.5
<i>R</i>	0.025
<i>S</i>	0.025
<i>ET-EC</i>	1
<i>ET-EL</i>	1
<i>ICP</i>	1.0

CN = curva número

AWC = contenido de agua disponible (*AWC*)

R = coeficiente de recesión

S = coeficiente de permeabilidad

ET-EC = factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo

ET-EL = factor de evapotranspiración durante la estación de latencia

ICP = porcentaje de la cobertura impermeable

Tabla 6. Medidas de desempeño de HydroBID durante los periodos de calibración y validación.

Etapa	Valores diarios			Valores mensuales		
	<i>NSE</i>	<i>R</i>	<i>OVE</i> (%)	<i>NSE</i>	<i>R</i>	<i>OVE</i> (%)
Calibración	0.76	0.87	2.16	0.86	0.93	2.12
Validación	0.76	0.88	8.77	0.88	0.95	8.76

Se observaron ligeras diferencias (subestimación) entre los valores simulados y observados, principalmente en la época de estiaje (Figura 3). Se generaron caudales medios diarios y mensuales para el periodo base comprendido entre enero de 1984 y diciembre de 2013, observándose una marcada estacionalidad de los periodos lluvioso y seco, con valor máximo de 56.96 m³/s en febrero y mínimo de 0.26 m³/s en agosto.

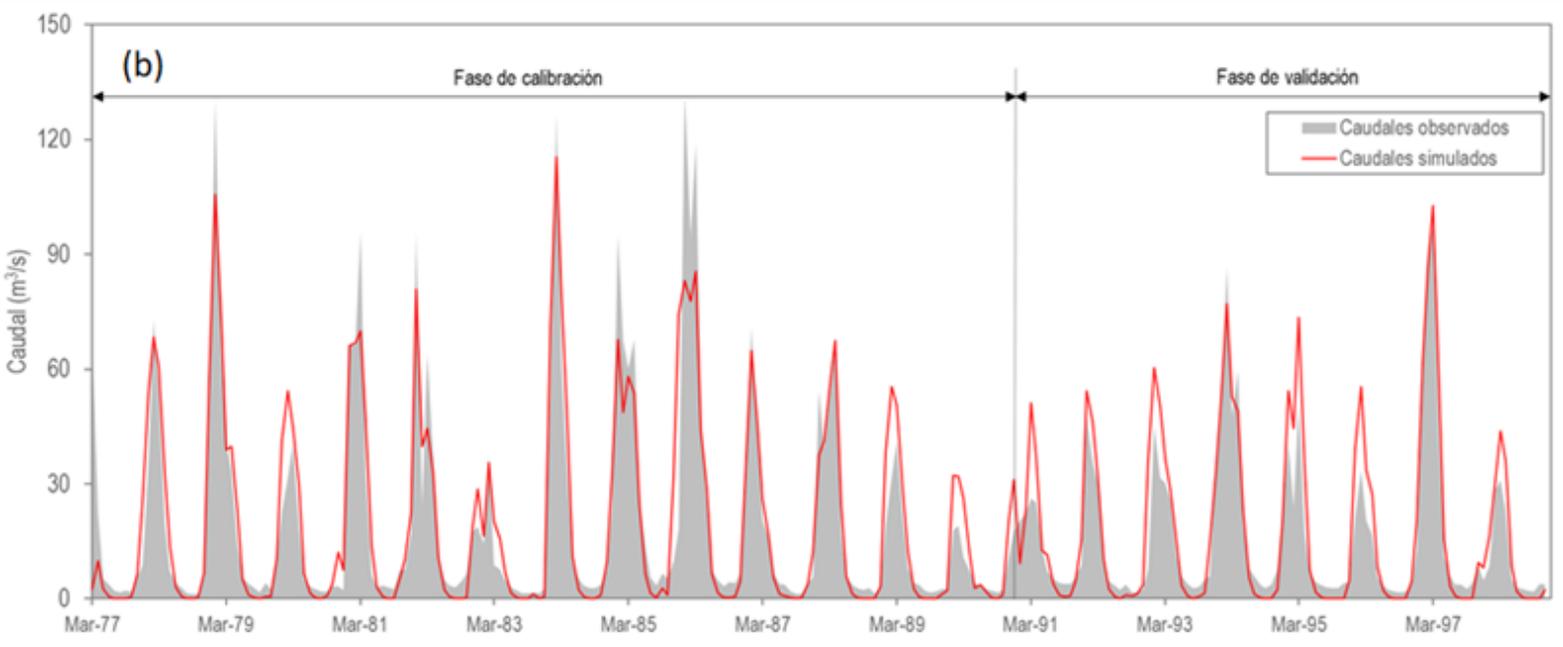
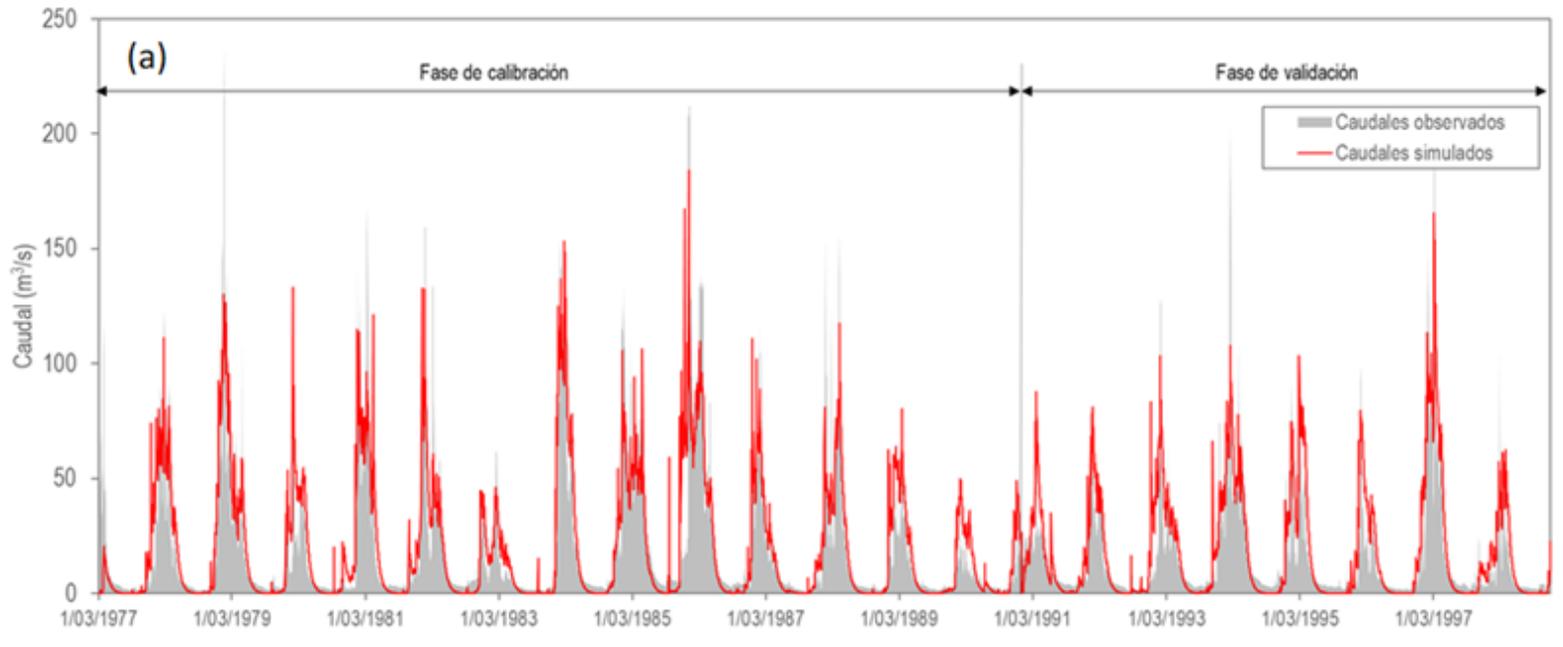


Figura 3. Caudales observados y simulados en la estación Puente Huancané para el periodo de calibración y validación (a) diario (b) mensual.

Respuesta hidrológica ante escenarios de cambio climático

En relación con los escenarios húmedos (1 a 7), la Figura 4 muestra que solo en dos de ellos (1 y 2) se observaron incrementos de caudal para todo el periodo (enero-diciembre), con valores promedios anuales de 26 y 20 %, respectivamente (1 y 2), en relación con el periodo base. Mientras que en el resto de escenarios (3 a 7) se registraron incrementos solo en el periodo de lluvias, y disminución de los caudales en épocas de estiaje, con un máximo de hasta -37 % para el periodo julio-setiembre (JAS) en el escenario 7. Los promedios de cambio anual de los caudales para los escenarios 3, 4, 5 y 6 alcanzaron valores de 14, 9, 3, -2 y -7 %, respectivamente, en relación con el periodo base (Tabla 7). Para los escenarios húmedos con incrementos del +20 % de la precipitación, los siete escenarios registraron incrementos de los caudales en el rango de 12 a 47 % en cuanto al periodo base. En cinco de ellos (escenarios 8, 9, 10, 11 y 12) se observaron incrementos para todos los meses en el periodo lluvioso, mientras que en dos (escenarios 13 y 14) se registraron reducciones de los caudales en JAS de -7 y -15 %, respectivamente. El escenario 8 muestra un alza significativa de los caudales en todos los meses, con un promedio anual de 47 % y aumentos > 100 % para los periodos de julio-agosto-septiembre y octubre-noviembre-diciembre. Esto sugiere que bajo el escenario 8 se presentaría en la CRH una mayor oferta hídrica para el periodo de lluvias y de estiaje.

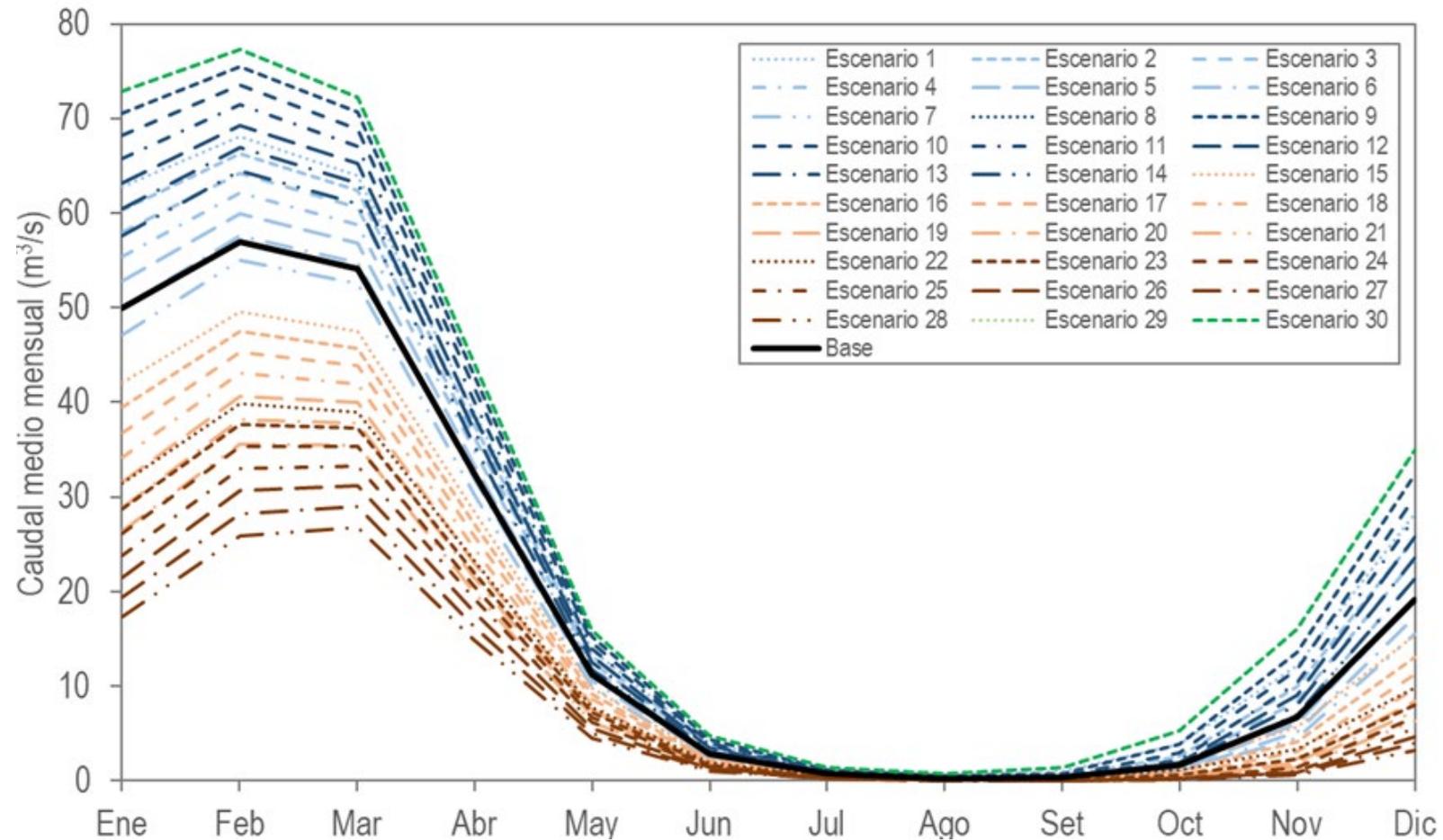


Figura 4. Hidrograma de caudales medios mensuales (promedio multianual) de la CRH para distintos escenarios de cambio climático.

Tabla 7. Cambios porcentuales estacionales de los caudales en la CRH bajo distintos escenarios de cambio climático.

Variable	Escenario	Meses				Anual
		EFM	AMJ	JAS	OND	
Caudal (m ³ /s)	Base	53.68	15.52	0.45	6.99	19.71
Cambio estacional (%)	Escenario 1	21 %	22 %	>100 %	60 %	26 %
	Escenario 2	17 %	17 %	38 %	39 %	20 %
	Escenario 3	14 %	12 %	-2 %	22 %	14 %
	Escenario 4	9 %	7 %	-16 %	8 %	9 %
	Escenario 5	5 %	2 %	-24 %	-4 %	3 %
	Escenario 6	1 %	-3 %	-31 %	-14 %	-2 %
	Escenario 7	-4 %	-9 %	-37 %	-24 %	-7 %
	Escenario 8	38 %	39 %	>100 %	>100 %	47 %
	Escenario 9	35 %	34 %	84 %	81 %	40 %
	Escenario 10	31 %	29 %	34 %	62 %	34 %
	Escenario 11	27 %	24 %	13 %	47 %	29 %
	Escenario 12	23 %	19 %	2 %	33 %	23 %
	Escenario 13	18 %	13 %	-7 %	20 %	17 %
	Escenario 14	14 %	8 %	-15 %	8 %	12 %
	Escenario 15	-14 %	-12 %	15 %	-17 %	-14 %
	Escenario 16	-18 %	-17 %	-30 %	-34 %	-19 %
	Escenario 17	-22 %	-21 %	-50 %	-46 %	-25 %
	Escenario 18	-26 %	-26 %	-56 %	-54 %	-29 %
	Escenario 19	-30 %	-31 %	-60 %	-61 %	-34 %
	Escenario 20	-35 %	-36 %	-63 %	-66 %	-39 %
	Escenario 21	-39 %	-41 %	-66 %	-70 %	-43 %
	Escenario 22	-31 %	-29 %	-22 %	-48 %	-33 %
	Escenario 23	-36 %	-34 %	-55 %	-61 %	-38 %
	Escenario 24	-40 %	-38 %	-65 %	-69 %	-43 %
	Escenario 25	-44 %	-43 %	-69 %	-75 %	-48 %
	Escenario 26	-48 %	-47 %	-71 %	-79 %	-52 %
	Escenario 27	-52 %	-52 %	-74 %	-82 %	-56 %
	Escenario 28	-57 %	-56 %	-76 %	-85 %	-60 %
	Escenario 29	38 %	39 %	>100 %	>100 %	47 %
	Escenario 30	38 %	39 %	>100 %	>100 %	47 %

Para el caso de los escenarios secos (de 15 a 21), se observaron reducciones de los caudales, presentando valores promedios en el rango de -14 a -43 %; la mayor baja se presentó en el escenario 21, que considera el máximo de incremento de la temperatura. Asimismo, se observó disminución de los caudales en todos los meses, con mayor incidencia en el periodo de estiaje (AMJ y JAS), alcanzando valores de hasta -70 %. En los escenarios 22 a 28 se encontró una reducción generalizada de los caudales (mensual y anual); los valores de baja promedio están en el rango de -33 a -60 %, con mayor incidencia en el periodo de estiaje (-85 %). El escenario extremo seco (28) proyectó reducciones estacionales de los caudales en el rango de -56 a -85 %, con mayor incidencia en el periodo seco.

Los escenarios que consideran cambios estacionales en la precipitación en +20 % en los periodos EFM (29) y EFM-OND (30) muestran comportamientos de incremento de los caudales; en ambos escenarios alcanzan valores de cambio promedios de 47 %, y en los periodos de JAS y OND cambios mayores a 100 %.

Impacto en la contribución hídrica

La contribución hídrica constituye la representación gráfica de la esorrentía anual promedio, lo que permite identificar las cuencas de mayor contribución al caudal. A nivel de las 41 subcuencas de la CRH para el escenario base se encontró que la contribución hídrica máxima alcanzó

2.94 cm/año en el extremo sureste de la cuenca, esto debido principalmente a las condiciones climáticas de dicha zona, como mayor precipitación y menores tasas de evapotranspiración por su proximidad al lago Titicaca, ya que las condiciones geomorfológicas, suelo, vegetación y topográficas son similares al resto de la CRH (Figura 5). Los cambios en la precipitación y temperatura no generaron cambios en el comportamiento espacial de la contribución hídrica, pues para los escenarios extremo húmedo y seco, las mayores contribuciones hídricas también se presentaron en esta área. Sin embargo, para el escenario extremo húmedo (8) hubo cambios importantes en la magnitud de la contribución hídrica, alcanzando valores de hasta 4.59 cm/año; mientras que para el escenario extremo seco (28) se observó una reducción importante de la contribución hídrica con valor máximo de 1.60 cm/año.

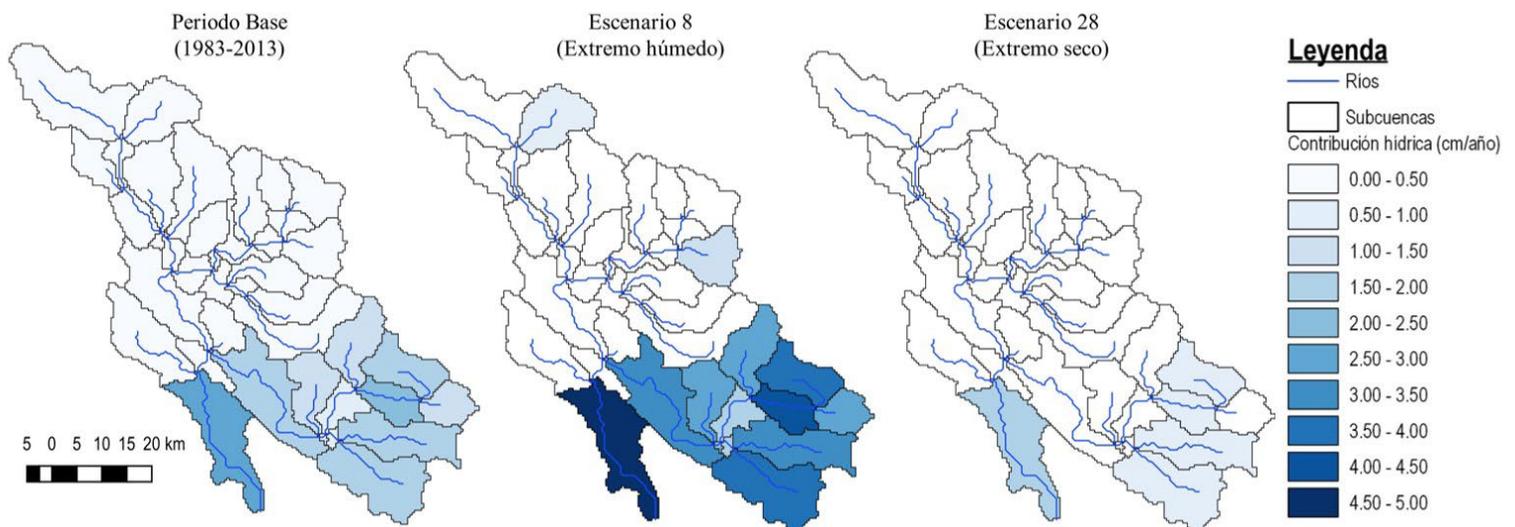


Figura 5. Variación espacial de la contribución hídrica en la CRH para los periodos actual y proyectado.

Contribución de los factores en el cambio de la respuesta hidrológica

El análisis de varianza (ANOVA) para cuantificar la contribución relativa de la precipitación y temperatura en el cambio de la respuesta hidrológica en la CRH determinó que existe una influencia significativa ($p < 0.01$) de los cambios de la precipitación y la temperatura en la respuesta hidrológica en 28 escenarios de cambio climático analizados (Tabla 8). Asimismo, se evidenció la existencia de interacción significativa entre la precipitación y temperatura, así como su influencia en la respuesta hidrológica.

Tabla 8. Significancia de los factores en el cambio de la respuesta hidrológica.

Respuesta: cambio	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor de F	$Pr (> F)$	Significancia
Precipitación	25 226.7	1	56 525.602	< 2.2e-16	***
Temperatura	3 001.2	1	6 724.782	< 2.2e-16	***
Precipitación: temperatura	29.7	1	66.604	2.213e-08	***
Residuales	10.7	24			

Significado de códigos:

0

'***' = 0.001

'**' = 0.01

'*' = 0.05

'\ ' = 0.1

' ' = 1

Discusión

El modelo HydroBID, tanto a paso de tiempo diario como mensual, presenta valores de NSE y R mayores a 0.75 y 0.87, respectivamente, mientras que OVE registra valores menores a 8.77, con lo que el desempeño del modelo puede calificarse como muy bueno (Moriasi *et al.*, 2007). El alto desempeño presentado por HydroBID en la CRH es coherente con los resultados obtenidos con otros modelos hidrológicos como GR2m, GR4j y SWAT, que también evidenciaron un muy buen desempeño en la modelización de caudales (Llauca, Lavado-Casimiro, Montesinos, Santini, & Rau, 2021; Asurza, Ramos, & Lavado-Casimiro, 2018; Fernández, 2017; Asurza *et al.*, 2020). El modelo muestra una buena capacidad para reproducir el comportamiento de la estacionalidad, así como adecuada estimación de los caudales máximos y mínimos; esto se ve reflejado en el reducido valor de OVE . La ligera diferencia de los estadísticos de desempeño, 2.3 % para NSE y 2.1 % para R , en las etapas de calibración y validación del modelo, sugieren la existencia de una reducida variabilidad de los caudales entre ambos periodos.

Asimismo, se observó que los valores de los parámetros R y S calibrados son superiores a los valores sugeridos por Moreda *et al.* (2014b), lo que puede atribuirse a las diferentes condiciones existentes en las cuencas del altiplano en comparación con otras regiones hidrográficas, tales como su localización en la puna seca de altura, la

predominancia de montañas y colinas, la escasa cobertura vegetal, y una marcada estacionalidad de la precipitación y temperatura que controlan el comportamiento hidrológico (Ochoa-Tocachi *et al.*, 2016). A pesar de ello, el muy buen desempeño obtenido en la modelización hidrológica de la CRH para representar registros diarios de caudales constituye un buen ejemplo de que un modelo con enfoque semidistribuido, como HydroBID, puede implementarse con bastante éxito para la simulación de caudales, como también se demostró en distintos estudios realizados por Moreda *et al.* (2014a); Wyatt, Moreda, Miralles-Wilhelm y Muñoz, 2014; Moreda, Coli, Lord y Corrales (2016a); Moreda y Coli (2016b); Moreda y Coli (2017), y Arbuet *et al.* (2021).

Es de esperarse que los cambios en la respuesta hidrológica en los escenarios húmedos (1 a 14) resulten en incrementos de los caudales. Sin embargo, los resultados de esta investigación muestran que no en todos los escenarios húmedos se presentaron aumentos de los caudales. Este es el caso de los escenarios 6 y 7, donde a pesar de haberse considerado un alza de la precipitación en +10 % se observó una reducción de los caudales en relación con el periodo base, lo que se podría atribuir al impacto que genera el aumento de la temperatura en 5 y 6 °C, respectivamente. Estos son escenarios posibles de ocurrir de acuerdo con las predicciones de Sanabria *et al.* (2009), Zubieta *et al.* (2021), Llacza *et al.* (2021) y GIRH-TDPS (2021). Estos resultados se explican desde el efecto directo que tiene el incremento de la temperatura en las tasas de evapotranspiración (Laqui *et al.*, 2019) y, por consiguiente, en la respuesta hidrológica de la cuenca, más aún en regiones donde las

cantidades anuales de evapotranspiración (1 160 mm/año) son superiores a la precipitación (699.5 mm/año).

De la Figura 6 puede describirse que en la CRH un incremento de la precipitación de +10 % generaría en promedio un alza del caudal en 23.4 %, mientras que una reducción de la precipitación en -10 % se traduciría en una disminución promedio del 16 % del caudal. Asimismo, se evidenció que por cada 1 °C de aumento de la temperatura se generó en promedio un 5 % de reducción del caudal, lo que sugiere que la variación de las tasas de precipitación, temperatura y su interacción son las generadoras de los cambios en los caudales de la CRH. Lo mismo ocurre con otras variables del proceso del ciclo hidrológico, como la evapotranspiración, donde la temperatura es una de las variables de mayor incidencia para su estimación en el altiplano (Zubieta *et al.*, 2021; Shi *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2018; Laqui *et al.*, 2019), más aún cuando el método de estimación de estas variables es principalmente dependiente de la temperatura, como en HydroBID, que emplea el método de Hamon (Hamon, 1961).

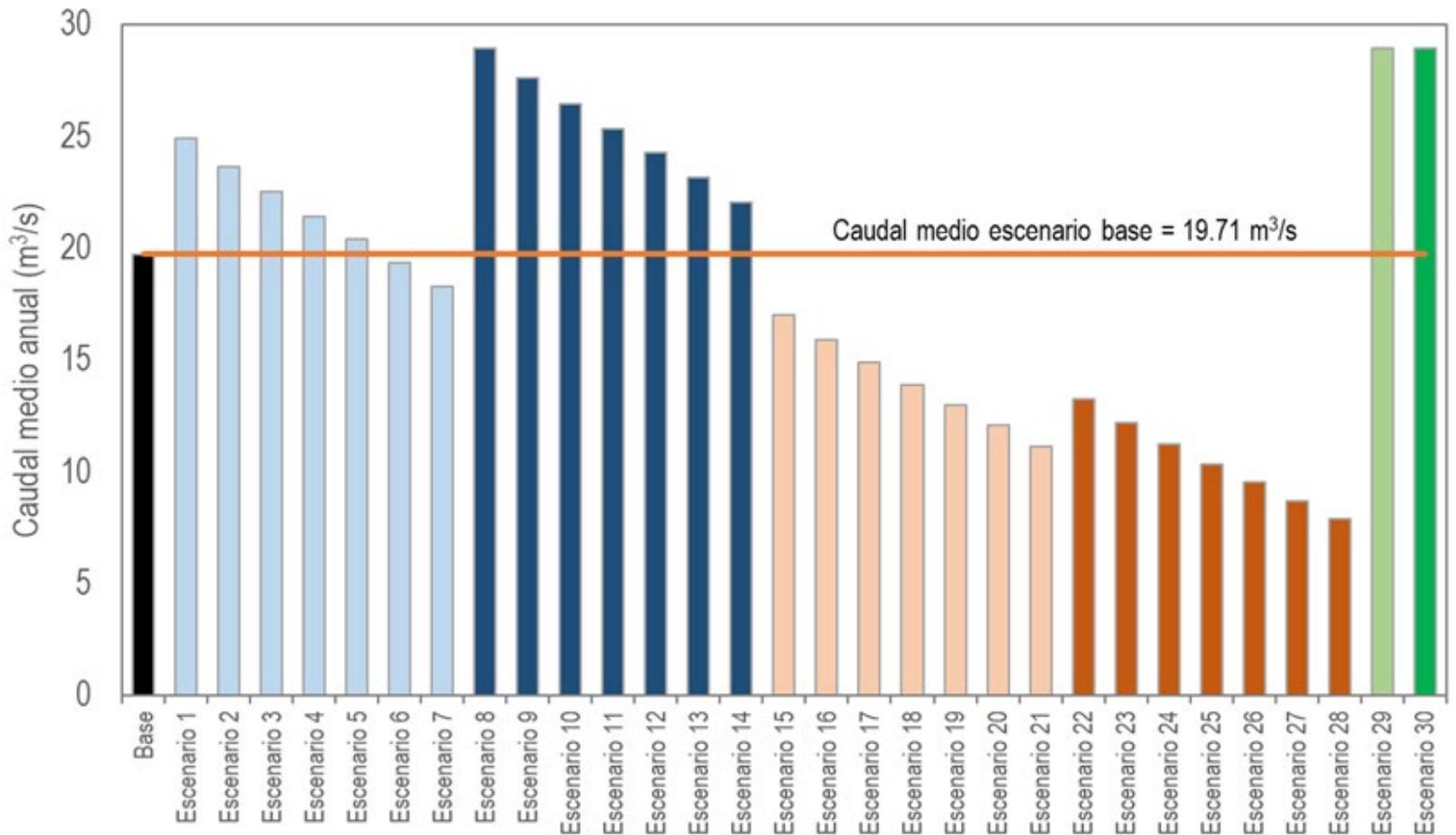


Figura 6. Caudales medios anuales (promedio multianual) para distintos escenarios de cambio climático.

Los mayores incrementos de los caudales se registran en el periodo lluvioso que está estrechamente vinculado con el incremento de la precipitación y la disminución de las tasas de evapotranspiración debido a los altos valores de la humedad relativa y la reducción de la energía disponible por la presencia de nubosidad (Núñez-González, Velázquez-Pérez, Pelayo-Cortés, & Barboza-Jiménez, 2019). En el periodo de estiaje,

la disminución de los caudales sería debida a la ausencia de precipitación y el incremento de las tasas de evapotranspiración producto del incremento de la temperatura (Zeng *et al.*, 2021). Si bien las predicciones mayoritariamente apuntan al alza de las tasas de precipitación y temperatura en la región de Puno y el TDPS (Sanabria *et al.*, 2009; Zubieta *et al.*, 2021; Llacza *et al.*, 2021; GIRH-TDPS, 2021), éstos todavía encierran un alto grado de incertidumbre. Huerta y Lavado-Casimiro (2021) determinaron que el cambio del escurrimiento evaluado a partir de proyecciones climáticas de los modelos climáticos globales ACCESS 1.0, HadGEM2-ES y MPI-ESM-LR mostró diferencias importantes. Es así que para el modelo ACCESS 1.0 se observó una reducción del escurrimiento de hasta -10 % y para los otros dos modelos incrementos del escurrimiento entre 15 y 25 %. Por tanto, fue conveniente incluir en la evaluación escenarios de reducción de las tasas de precipitación, a fin de mostrar sus impactos y mejorar el conocimiento de la interacción de dichos factores en la respuesta hidrológica de la CRH.

Por otra parte, también se observó la existencia de una relativa similitud en los cambios de los caudales en escenarios diferentes (escenarios 1-12, 2-13, 3-14, 19-22, 20-23 y 21-24) que, a pesar de tener cambios en la precipitación y temperatura diferentes, muestran cambios aproximados en los caudales. Esto sugiere que la interacción de los cambios de la precipitación y temperatura también genera cambios en la respuesta hidrológica, al igual que la precipitación y temperatura al ser analizadas de forma individual. En cuanto a los escenarios 29 y 30, que consideran cambios estacionales e inicio del periodo de lluvias, no se observaron cambios en la magnitud de los caudales estacionales, lo que

puede atribuirse a que dichos cambios de la precipitación fueron realizados solo para el periodo lluvioso.

Evaluado HydroBID con las variaciones de la precipitación y temperatura según los escenarios climáticos propuestos, los caudales y contribución hídrica resultantes muestran coherencia, pues para los escenarios de incremento de la precipitación se observan mayores cantidades de caudal y contribución hídrica en comparación con el periodo base (1993-2013); mientras que para los escenarios de reducción de la precipitación se observa disminución de los caudales y las tasas de contribución hídrica en relación con el periodo base. La coherencia de los resultados de la modelización hidrológica también se ve representada en los evidentes cambios de la pendiente de los hidrogramas de caudales medios mensuales (Figura 4), donde los escenarios húmedos presentan mayor pendiente al periodo base y menores pendientes para los escenarios secos.

El alto nivel de significancia ($p < 0.01$) obtenido en el ANOVA muestra evidencia de la existencia de un alto grado de influencia de la precipitación y temperatura en los caudales de la CRH, sin embargo, debe tenerse en consideración que la interacción de ambas variables climáticas también genera cambios importantes en los caudales, lo que se evidencia en la comparación de algunos escenarios, que a pesar de incluir tasas de cambio de precipitación y temperatura diferentes ofrecen resultados aproximados.

La respuesta hidrológica de la mayoría de escenarios climáticos analizados evidencia que no se vislumbran problemas de disponibilidad hídrica importantes en la CRH debido a los efectos del cambio climático,

sin embargo, ésta podría verse afectada de producirse incrementos importantes en las demandas hídricas, por lo que se hace necesario establecer estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Si bien esto es urgente, también constituye una tarea bastante compleja debido a la gran incertidumbre del impacto del cambio climático, y la efectividad de las medidas y acciones de adaptación (Pearce-Higgins *et al.*, 2022).

Las propuestas de potenciales intervenciones de adaptación al cambio climático en un sistema hídrico deben partir de la identificación de todas las combinaciones de forzantes hidroclimáticas, típicamente los cambios en la temperatura y precipitación que generan la falla del sistema hídrico, como lo señalan Sant'Anna, Tilmant y Pulido-Velazquez (2022). Por lo que habiéndose determinado el impacto de los cambios de la precipitación y temperatura en la respuesta hidrológica de la CRH puede sugerirse que las intervenciones denominadas como soluciones basadas en la naturaleza (SbN) constituyen una buena alternativa para la adaptación al cambio climático debido a la capacidad de reducción y compensación de los impactos experimentados por la influencia antrópica en el sistema climático (Holden *et al.*, 2022). Entre dichas intervenciones puede mencionarse la restauración y protección de las riberas de los ríos, los humedales y las cabeceras de cuencas, a fin de reducir la erosión y propiciar el incremento de la producción de agua en la cuenca.

Conclusiones

El desempeño del modelo HydroBID en la simulación de caudales en la CRH puede calificarse como muy bueno al reproducir el régimen de caudales. El cambio en +10 % de la precipitación generó en promedio un incremento del caudal en 23.4 %, mientras que una reducción de la precipitación en -10 % se tradujo en una disminución promedio de 16 % del caudal. No obstante, también se evidenció que por cada 1 °C de alza de la temperatura se generó en promedio un 5 % de reducción del caudal, lo que sugiere que la variación de las tasas de precipitación, temperatura y su interacción conduciría a cambios en los caudales de la CRH.

El impacto del cambio de patrones de precipitación y temperatura en los recursos hídricos de la CRH es significativo para los 30 escenarios propuestos, mostrando efectos en la variación temporal y espacial, generando incrementos en la magnitud de los caudales en la época de lluvias y disminución en épocas de estiaje. Asimismo, se esperaría el aumento de la contribución hídrica en las 41 subcuencas de la CRH para los escenarios húmedos y reducción de la contribución hídrica para los escenarios secos.

En general, para la mayoría de los escenarios húmedos, en los de mayor probabilidad de ocurrencia de acuerdo con las predicciones efectuadas en anteriores investigaciones no se vislumbra problemas de disponibilidad hídrica en la CRH debido a los efectos del cambio climático, sin embargo debe tenerse en consideración el alto grado de incertidumbre que involucra el uso de modelos climáticos globales para las condiciones

del altiplano peruano, lo que puede ser mejorado a partir del uso de modelos climáticos regionales. No obstante, esta situación podría cambiar de producirse incrementos importantes en las demandas hídricas de la CRH que actualmente alcanzan los 33.83 hm³ (ANA, 2010), tal situación no fue analizada en la investigación, y debe ser abordada en futuras investigaciones que además consideren escenarios de intervención con medidas y acciones comprendidas en SbN.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno por el financiamiento de esta investigación a través del Fondo Especial de Desarrollo Universitario (FEDU), Proyecto N° 840-2020.

Referencias

- Abdulla, F., & Al-Shurafat, A. W. (2020). Assessment of the impact of potential climate change on the surface water of a trans-boundary basin: Case study Yarmouk River. *Procedia Manufacturing*, 44, 172-179. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.219>
- Aghapour-Sabbaghi, M., Nazari, M., Araghinejad, S., & Soufizadeh, S. (2020). Economic impacts of climate change on water resources and agriculture in Zayandehroud river basin in Iran. *Agricultural Water Management*, 241, 106323. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106323>

- ALT, Autoridad Autónoma del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó, Salar de Coipasa. (2020). *Caracterización general e hidrológica de la cuenca Titicaca (Perú). Informe Final*. Puno, Perú: Autoridad Autónoma del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó, Salar de Coipasa.
- ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Estudio de evaluación de recursos hídricos en la cuenca de los ríos Huancané y Suches. Informe Final*. Puno, Perú: Autoridad Nacional del Agua. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1736>
- Andrade, M. F. (ed.). (2018). Atlas - Clima y eventos extremos del Altiplano Central de Perú y Bolivia / Climate and extreme events from the Central Altiplano of Peru and Bolivia 1981-2010. *Geographica Bernensia*. Recuperado de <https://doi.org/DOI:10.4480/GB2018.N01>
- Arbuet, A., Pusineri, G., Mazzón, R., Bianchi, H., Scioli, C., Paris, M., Corrales, J., & Nalesso, M. (2021). Implementación del modelo HydroBID en la Cuenca Los Padres-Santa Fe-Argentina. *Aqua-LAC*, 13(1), 81-96. Recuperado de <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-06>
- Asurza, F., Ramos, C., & Lavado-Casimiro, W. (2018). Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 53-62. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2018.01.06

- Asurza, F., Traverso-Yucra, K., Lavado-Casimiro, W., Felipe-Obando, O., Montesinos-Cáceres, C., & Llauca-Soto, H. (2020). Surface water resources assessment in Peru through SWAT hydrological model. *EGU General Assembly 2020*. Recuperado de <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-6308>, 2020
- Bai, P., Liu, X., Liang, K., & Liu, C. (2015). Comparison of performance of twelve monthly water balance models in different climatic catchments of China. *Journal of Hydrology*, 529, 1030-1040. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.015>
- Beniston, M. (2012). Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 412-413, 291-296. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.046>
- Budhathoki, A., Babel, M. S., Shrestha, S., Meon, G., & Kamalamma, A. G. (2021). Climate change impact on water balance and hydrological extremes in different physiographic regions of the West Seti River Basin, Nepal. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(1), 79-95. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.07.001>

- D. S. No. 045-2015-PCM. (2015). Que declara el Estado de Emergencia en algunos distritos y provincias comprendidos en los departamentos de Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca, Amazonas, San Martín, Ancash, Lima, Ica, Arequipa, Cusco, Puno y Junín, por Peligro Inminente ante el periodo de lluvias 2015-2016 y posible ocurrencia del Fenómeno El Niño. *Diario Oficial el Peruano*. Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-declara-el-estado-de-emergencia-en-algun-decreto-supremo-n-045-2015-pcm-1259075-1/>
- D. S. No. 089-2016-PCM. (2016). Que declara el Estado de Emergencia por peligro inminente por déficit hídrico en los departamentos de Apurímac, Ancash, Ayacucho, Cajamarca, Cusco, Huancavelica, Ica, Junín, Lambayeque, La Libertad, Pasco, Piura, Puno, Tacna y Tumbes, así como en siete (07) provincias del departamento de Lima, y en cuatro (04) provincias del departamento de Arequipa. *Diario Oficial el Peruano*. Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/declaran-el-estado-de-emergencia-por-peligro-inminente-por-d-decreto-supremo-n-089-2016-pcm-1461423-2/>
- Defensoría del Pueblo. (2015). *Conflictos sociales y recursos hídricos. Serie Informes de Adjuntía - Informe N° 001-2015-DP/APCSG*. Lima, Perú: Defensoría del Pueblo. Recuperado de <https://bit.ly/3qxTVP7>

- Didovets, I., Krysanova, V., Hattermann, F. F., Del-Rocío-Rivas-López, M., Snizhko, S., & Müller-Schmied, H. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100761. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761>
- Domonkos, P., Coll, J., Guijarro, J., Curley, M., Rustemeier, E., Aguilar, E., Walsh, S., & Sweeney, J. (2020). Precipitation trends in the island of Ireland using a dense, homogenized, observational dataset. *International Journal of Climatology*, 40. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/joc.6592>
- Fernández, C. (2017). *Modelamiento hidrológico de la Región Hidrográfica del Titicaca*. Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Dirección de Hidrología. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-44.pdf>
- Funes, I., Savé, R., De-Herralde, F., Biel, C., Pla, E., Pascual, D., Zabalza, J., Cantos, G., Borràs, G., Vayreda, J., & Aranda, X. (2021). Modeling impacts of climate change on the water needs and growing cycle of crops in three Mediterranean basins. *Agricultural Water Management*, 249, 106797. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106797>

GIRH-TDPS, Proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Sistema TDPS. (2021). *Escenarios climáticos en el sistema Hídrico del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y salar de Coipasa*. Puno, Perú: Proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Sistema TDPS. Recuperado de <https://girh-tdps.com/cambio-climatico/>

Guijarro, J. A., López, J. A., Aguilar, E., Domonkos, P., Venema, V. K. C., Sigró, J., & Brunet, M. (2017). Comparison of homogenization packages applied to monthly series of temperature and precipitation: The MULTITEST project. In: *Proceedings of the 9th Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases* (pp. 46-62). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), WCDMP-85. Recuperado de <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/8392>

Guijarro, J. A. (2018). *Homogenization of climatic series with Climatol, Versión 3.1.1, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), D. T. en Islas Baleares, España*. Recuperado de http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf

Guo, M., Ma, S., Wang, L.-J., & Lin, C. (2021). Impacts of future climate change and different management scenarios on water-related ecosystem services: A case study in the Jianghuai ecological economic Zone, China. *Ecological Indicators*, 127, 107732. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107732>

Haith, D.A. (1985). An event-based procedure for estimating monthly sediment yields. *Transactions of the ASAE*, 28(6), 1916-1920.

- Haith, D. A., Mandel, R., & Wu, R. S. (1996). *Generalized watershed loading functions, Version 2.0. User's Manual*. New York, USA: Cornell University, Ithaca. Recuperado de <https://owl.cwp.org/mdocs-posts/generalized-watershed-loading-functions-version-2-0-users-manual/>
- Hakala, K., Addor, N., Teutschbein, C., Vis, M., Dakhlaoui, H., & Seibert, J. (2019). Hydrological modeling of climate change impacts. In: Maurice, P. A. (ed.). *Encyclopedia of water: Science, technology, and society* (pp. 1.-20). Hoboken, USA: John Wiley & Sons. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0062>
- Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(3), 107-120. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000599
- Her, Y., Yoo, S.-H., Cho, J., Hwang, S., Jeong, J., & Seong, C. (2019). Uncertainty in hydrological analysis of climate change: Multi-parameter vs. multi-GCM ensemble predictions. *Scientific Reports*, 9(1), 4974. Recuperado de <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41334-7>
- Hidalgo, I. G., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., Lerma-Elvira, N., Lopes, J. E. G., & Cioffi, F. (2020). Hydropower generation in future climate scenarios. *Energy for Sustainable Development*, 59, 180-188. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.10.007>

- Holden, P. B., Rebelo, A. J., Wolski, P., Odoulami, R. C., Lawal, K. A., Kimutai, J., Nkemelang, T., & New, M. G. (2022). Nature-based solutions in mountain catchments reduce impact of anthropogenic climate change on drought streamflow. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 51. DOI: 10.1038/s43247-022-00379-9
- Huerta, A., & Lavado-Casimiro, W. (2021). *Atlas de producción de agua en el Perú: una evaluación presente y futura con énfasis en las cuencas de aporte de las EPS*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1610>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley (eds.)]*. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9781107415324
- Kim, K. B., Kwon, H.-H., & Han, D. (2018). Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 556, 194-210. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.015
- Kour, R., Patel, N., & Krishna, A. P. (2016). Climate and hydrological models to assess the impact of climate change on hydrological regime: A review. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(9), 544. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2561-0>

- Lin, P., He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X., & Li, J. (2018). Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: Historical trends and projected changes. *International Journal of Climatology*, 38(7), 2980-2993. DOI: 10.1002/joc.5477
- Laqui, W. (2010). Aplicación de redes neuronales artificiales a la modelización y previsión de caudales medios mensuales del río Huancané. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA* (2), 30-44. Recuperado de https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2010_vol02/art3.pdf
- Laqui, W., Zubieta, R., Rau, P., Mejía, A., Lavado, W., & Ingol, E. (2019). Can artificial neural networks estimate potential evapotranspiration in Peruvian highlands? *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1911-1924. DOI: 10.1007/s40808-019-00647-2
- Llacza, A., Acuña, D., Jácome, G., De-la-Cruz, G., Paredes, J., Bruno, J., Alvarez, E., Flores, W., Urdanivia F., & Sulca B. (2021). *Escenarios climáticos al 2050 en el Perú: cambios en el clima promedio*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1470>
- Llauca, H., Lavado-Casimiro, W., Montesinos, C., Santini, W., & Rau, P. (2021). PISCO_HyM_GR2M: A Model of Monthly Water Balance in Peru (1981–2020). *Water* 2021, 13, 1048. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/w13081048>

- Lozano-Povis, A., Alvarez-Montalván, C. E., & Moggiano, N. (2021). Climate change in the Andes and its impact on agriculture: A systematic review. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108. Recuperado de <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Masia, S., Trabucco, A., Spano, D., Snyder, R. L., Sušnik, J., & Marras, S. (2021). A modelling platform for climate change impact on local and regional crop water requirements. *Agricultural Water Management*, 255, 107005. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107005>
- Mengistu, D., Bewket, W., Dosio, A., & Panitz, H.-J. (2021). Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 592, 125614. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125614>
- Modi, P. A., Fuka, D. R., & Easton, Z. M. (2021). Impacts of climate change on terrestrial hydrological components and crop water use in the Chesapeake Bay watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100830. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100830>
- Montero-Martínez, M. J., Santana-Sepúlveda, J. S., Pérez-Ortiz, N. I., Pita-Díaz, Ó., & Castillo-Liñan, S. (2018). Comparing climate change indices between a northern (arid) and a southern (humid) basin in Mexico during the last decades. *Advances in Science and Research*, 15, 231-237. Recuperado de <https://doi.org/10.5194/asr-15-231-2018>

- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., Muñoz, R., & Coli, P. (2014a). *Technical Note N°. IDB-TN-1362, Hydro-BID case study N° 2: Modeling the impact of climate change on flows of the Río Piura using Hidro-BID*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.18235/0001125>
- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz, R. (2014b). *Technical Note 2. Hydro-BID: An integrated system for modeling impacts of climate change on water resources*. Research Triangle Park, NC. Recuperado de <https://bit.ly/3BbfYO5>
- Moreda, F., Coli, P., Lord, B., & Corrales, J. (2016a). *Technical Note N°. IDB-TN-1364, Hydro-BID case study N° 4: Application of Hydro-BID in Bermejo River Basin to quantify sediment loads, Argentina*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.18235/0001123>
- Moreda, F., & Coli, P. (2016b). *Technical Note N°. IDB-TN-1363, Hydro-BID case study N°3: Impact of El Niño events on sediment loading in the Chancay-Lambayeque Basin, Peru*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.18235/0001124>
- Moreda, F., & Coli, P. (2017). *Technical Note N°. IDB-TN-1365, Hydro-BID case study N° 5: Impact of climate change on proposed water investments in Chalpi basin, Ecuador*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.18235/0001121>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153

- Mukundan, R., Acharya, N., Gelda, R. K., Frei, A., & Owens, E. M. (2019). Modeling streamflow sensitivity to climate change in New York City water supply streams using a stochastic weather generator. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 147-158. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.01.001
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Ndhlovu, G., & Woyessa, Y. (2020). Modelling impact of climate change on catchment water balance, Kabompo River in Zambezi River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100650. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100650>
- Niraula, R., Kalin, L., Srivastava, P., & Anderson, C. J. (2013). Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. *Ecological Modelling*, 268, 123-133. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.007>
- Núñez-González, G., Velázquez-Pérez, D., Pelayo-Cortés, F., & Barboza-Jiménez, P. (2019). Analysis of reference evapotranspiration behavior during the rainy season at five weather stations in the Lerma-Chapala basin. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(2), 147-159. Recuperado de <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.06.014>

- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074-4089. DOI: 10.1002/hyp.10980
- Olabanji, M. F., Ndarana, T., Davis, N., & Archer, E. (2020). Climate change impact on water availability in the olifants catchment (South Africa) with potential adaptation strategies. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 120, 102939. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102939>
- Omar, M. E. D. M., Moussa, A. M. A., & Hinkelmann, R. (2021). Impacts of climate change on water quantity, water salinity, food security, and socioeconomy in Egypt. *Water Science and Engineering*, 14(1), 17-27. DOI: 10.1016/j.wse.2020.08.001
- Pearce-Higgins, J. W., Antão, L. H., Bates, R. E., Bowgen, K. M., Bradshaw, C. D., Duffield, S. J., Ffoulkes, C., Franco, A. M. A., Geschke, J., Gregory, R. D., Harley, M. J., Hodgson, J. A., Jenkins, R. L. M., Kapos, V., Maltby, K. M., Watts, O., Willis, S. G., & Morecroft, M. D. (2022). A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment. *Ecological Indicators*, 136, 108690. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108690>

- Qi, Z., Kang, G., Chu, C., Qiu, Y., Xu, Z., & Wang, Y. (2017). Comparison of SWAT and GWLF Model Simulation Performance in Humid South and Semi-Arid North of China. *Water*, 9(8), 567. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/w9080567>
- Qi, Z., Kang, G., Shen, M., Wang, Y., & Chu, C. (2019). The improvement in GWLF model simulation performance in watershed hydrology by changing the transport framework. *Water Resources Management*, 33(3), 923-937. DOI: 10.1007/s11269-018-2149-4
- Sanabria, J., Marengo, J., & Valverde, M. (2009). Escenarios de cambio climático con modelos regionales sobre el altiplano peruano (departamento de Puno). *Revista Peruana Geo-Atmosférica*. 2009, (1), 134-149. Recuperado de <https://bit.ly/36ALCai>
- Sant'Anna, C., Tilmant, A., & Pulido-Velazquez, M. (2022). A hydrologically-driven approach to climate change adaptation for multipurpose multireservoir systems. *Climate Risk Management*, 36, 100427. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100427>
- SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). *Mapa de clasificación climática del Perú*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>

- Sha, J., Swaney, D. P., Hong, B., Wang, J., Wang, Y., & Wang, Z.-L. (2014). Estimation of watershed hydrologic processes in arid conditions with a modified watershed model. *Journal of Hydrology*, 519, 3550-3556. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.063>
- Sheikh-Goodarzi, M., Jabbarian-Amiri, B., Azarnivand, H., & Waltner, I. (2021). Watershed hydrological modelling in data scarce regions; integrating ecohydrology and regionalization for the southern Caspian Sea basin, Iran. *Heliyon*, 7(4), e06833. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06833>
- Shi, L., Feng, P., Wang, B., Li-Liu, D., Cleverly, J., Fang, Q. & Yu, Q. (2020). Projecting potential evapotranspiration change and quantifying its uncertainty under future climate scenarios: A case study in southeastern Australia. *Journal of Hydrology*, 584, 124756. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124756>
- Stephens, C. M., Marshall, L. A., & Johnson, F. M. (2019). Investigating strategies to improve hydrologic model performance in a changing climate. *Journal of Hydrology*, 579, 124219. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124219>
- Valdivia, C., Thibeault, J., Gilles, J. L., García, M., & Seth, A. (2013). Climate trends and projections for the Andean Altiplano and strategies for adaptation. *Advances in Geosciences*, 33, 69-77. DOI: 10.5194/adgeo-33-69-2013

- Wyatt, A., Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz, R. (2014). *Nota Técnica N°. IDB-TN-1361, caso de estudio Hydro-BID N° 1: modelo de gestión del recursos hídrico en la cuenca del río Grande en Argentina*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.18235/0001158>
- Zeng, P., Sun, F., Liu, Y., Feng, H., Zhang, R., & Che, Y. (2021). Changes of potential evapotranspiration and its sensitivity across China under future climate scenarios. *Atmospheric Research*, 261, 105763. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105763>
- Zhang, H., Wang, Y., Wang, Y., Li, D., & Wang, X. (2013). Quantitative comparison of semi- and fully-distributed hydrologic models in simulating flood hydrographs on a mountain watershed in southwest China. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 25(6), 877-885. DOI: 10.1016/S1001-6058(13)60436-9
- Zubieta, R., Molina-Carpio, J., Laqui, W., Sulca, J., & Ilbay, M. (2021). Comparative analysis of climate change impacts on meteorological, hydrological, and agricultural droughts in the Lake Titicaca basin. *Water*, 13 (2), 175. DOI: 10.3390/w13020175