

Performance evaluation of hydrological models GR4J, HBV and SOCONT for the forecast of average daily flows in the Ramis river basin, Peru

Efrain Lujano ^{*,a} , Jesús David Sosa ^b, Rene Lujano ^c , Apolinario Lujano ^d ,

^aEscuela profesional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

^bServicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, Lima, Perú

^cPrograma de Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

^dAutoridad Nacional del Agua (ANA), Administración Local de Agua Ilave, Puno, Perú.

Abstract.- Floods are natural phenomena that have occurred throughout history. The frequency with which it occurs has induced significant human losses, losses in agriculture, the socioeconomic system and damage to infrastructure. This phenomenon is likely to become more frequent with climate change. The objective of the research was to evaluate the performance of three hydrological models for the forecast of average daily flows in a basin of the Peruvian altiplano. The data set used are hydrometeorological measurements of total precipitation, average temperature and daily average flows that were used as input to the Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J) and Soil Contribution (SOCONT) hydrological models). The simulated discharges were evaluated using statistical techniques of efficiency and error. Satisfactory results are shown in the calibration and validation stage of the HBV, GR4J and SOCONT hydrological models. However, the statistical evaluation also showed that the GR4J model, despite using only four parameters, performs better in the simulation of avenue and drainage, followed by the HBV and SOCONT models. This finding indicates that the models evaluated can be integrated as an alternative for strengthening the daily hydrological forecast in the Ramis basin.

Keywords: Ramis basin; GR4J; HBV; hydrological modeling; RS-MINERVE; SOCONT.

Evaluación del desempeño de modelos hidrológicos GR4J, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, Perú

Resumen.- Las inundaciones son fenómenos naturales que han ocurrido a lo largo de la historia. La frecuencia con la que se presentan ha inducido importantes pérdidas humanas, pérdidas en la agricultura, el sistema socioeconómico y daños a la infraestructura. Probablemente, este fenómeno se vuelva más frecuente con el cambio climático. El objetivo de la investigación fue evaluar el desempeño de tres modelos hidrológicos para el pronóstico de caudales medios diarios en una cuenca del altiplano peruano. El conjunto de datos utilizados son mediciones hidrometeorológicas de precipitación total, temperatura media y caudales medios diarios que fueron utilizados como insumo de entrada a los modelos hidrológicos Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J) y Soil Contribution (SOCONT). Las descargas simuladas fueron evaluadas mediante técnicas estadísticas de eficiencia y error. Resultados satisfactorios, son mostrados en la etapa de calibración y validación de los modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT. Sin embargo, la evaluación estadística también mostró que el modelo GR4J a pesar de utilizar solo cuatro parámetros, se desempeña mejor en la simulación de caudales de avenida y estiaje, seguido de los modelos HBV y SOCONT. Este hallazgo indica que los modelos evaluados, puedan ser integrados como una alternativa para el fortalecimiento del pronóstico hidrológico diario en la cuenca Ramis.

Palabras clave: Cuenca Ramis; GR4J; HBV; modelación hidrológica; RS-MINERVE; SOCONT.

Recibido: 08 de junio, 2020.

Aceptado: 05 de agosto, 2020.

* Autor para correspondencia:

Correo-e: elujano28@gmail.com (E. Lujano)

1. Introducción

Las planicies, son las zonas más propensas a las inundaciones. Estos fenómenos naturales, han ocurrido a lo largo de la historia y la frecuencia con la que se presentan ha ocasionado importantes pérdidas de vidas humanas, en la agricultura, en el sistema socioeconómico y daños a la infraestructura.

Probablemente, este fenómeno se vuelva más frecuente con el cambio climático, y el uso apropiado de modelos para el pronóstico hidrológico contribuyan en minimizar los daños asociados con las inundaciones. El uso de modelos hidrológicos se ha convertido en herramientas esenciales para estudiar la respuesta de los regímenes hidrológicos [1], [2], motivo por el cual, se pueda realizar pronósticos hidrológicos con mayor grado de confianza para la toma de decisiones y mejor aún si se tiene operativo más de un modelo hidrológico.

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el pronóstico hidrológico, prevenir las inundaciones y alertar a la población. Los modelos hidrológicos utilizados en el presente trabajo son los de tipo conceptual, entre ellos el HBV [3], que fue aplicado bajo diversas condiciones climatológicas, mostrando resultados satisfactorios y son ejemplificados en [4, 5, 6, 2, 7], el modelo SOCONT (Soil Contribution) también fue estudiado en la predicción de crecidas operativas y la estimación de inundaciones [8, 9, 10, 11] y el modelo GR4J [12] con aplicaciones en la modelación y pronóstico hidrológico en cuencas de Francia y Suiza [13], en cuencas de Perú [14] y el impacto de cambio climático en Iraq [15].

En tal sentido, la modelación hidrológica depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos disponibles para el proceso de calibración y validación, asimismo el uso de varios modelos hidrológicos de lluvia escurriente, permiten disminuir las incertidumbres en la predicción hidrológica. Un rendimiento insatisfactorio podría atribuirse a datos meteorológicos insuficientes junto con una distribución espacial de lluvia muy heterogénea [2].

En la actualidad, existen escasas evidencias en la aplicación de modelos hidrológicos a paso de

tiempo diario que puedan dar mayor certidumbre en el pronóstico de caudales en cuencas del altiplano peruano. En este contexto, el principal objetivo de este trabajo, es evaluar el desempeño de tres modelos hidrológicos para el pronóstico de caudales medios diarios en una cuenca del altiplano peruano, con la finalidad de contribuir al fortalecimiento del pronóstico hidrológico.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La zona en la que se realizó este estudio, es la cuenca del río Ramis (14.769,62 km²), que se extiende desde la estación hidrológica puente Ramis hasta la cordillera oriental en el departamento de Puno, Perú (Figura 1) y es la unidad hidrográfica con mayor aporte de caudales al lago navegable más alto del mundo (Titicaca). Su altitud de la cuenca está comprendida entre 3812 y 5743 ms.n.m., con una pendiente promedio de 22 % y una longitud de río principal de 321 km aproximadamente. Según SENAMHI en su portal oficial (<https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>) en la cuenca en estudio se tiene un clima lluvioso – semiseco, con una precipitación promedio anual de 700 mm, los mayores acumulados de lluvia se concentran en verano, mientras que un otoño e invierno seco hacen la diferencia al periodo de estiaje. El tipo de cobertura actual de suelo, según la clasificación anual del programa internacional de geósfera-biosfera (IGBP) disponible en google earth engine (GEE), colección de imagen ID MODIS/006/MCD12Q1 [16], tiene un 0,01 % de cobertura de árboles, 96,86 % de pastizales dominados por plantas herbáceas (< 2m), 0,03 % de humedales permanentes, 1,68 % tierras de cultivo, 0,13 % tierras urbanas y urbanizadas, 0,01 % nieve y hielo permanente, 1,25 % áreas áridas y 0,02 % de cuerpos de agua.

2.2. Datos hidrometeorológicos y de terreno

Los datos utilizados se pueden agrupar en aquellos que fueron necesarios para caracterizar los parámetros morfométricos de la cuenca y los que se utilizaron para la modelación hidrológica.

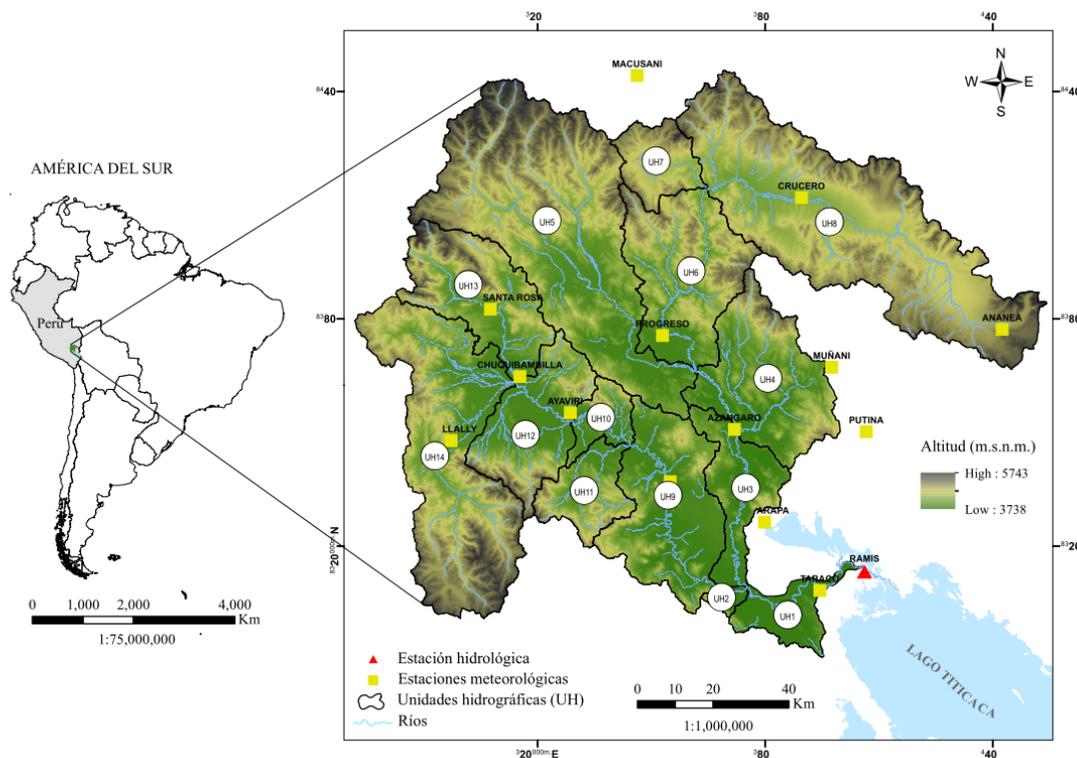


Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca Ramis y estaciones hidrometeorológicas

Para caracterizar los parámetros morfométricos, se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) global ASTER (ASTGTM – V002) con resolución espacial de ~30 m, desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón, obtenido del portal (<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>).

Para la modelación hidrológica, se utilizaron series temporales diarias de precipitación total (mm), temperatura media (°C) y caudales medios (m^3/s). Los registros de 14 estaciones meteorológicas y 01 estación hidrológica, corresponden al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (Figura 1) y cubren el periodo del 01 de septiembre de 2005 al 31 de agosto de 2016.

2.3. Descripción de modelos hidrológicos

Se evaluaron los modelos hidrológicos conceptuales HBV (Figura 2a), GR4J (Figura 2b) y SOCONT (Figura 2c). HBV fue desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para la simulación de escorrentía

y pronóstico hidrológico. La primera ejecución exitosa, con una primera versión del modelo hidrológico HBV, se llevó a cabo en 1972 [3, 17]. Las ideas básicas del modelo son discutidas con mayor detalle por [18].

Un segundo modelo utilizado es el GR4J, que pertenece a la familia de modelos de balance de humedad del suelo de cuatro parámetros [12], las ecuaciones básicas se pueden encontrar con mayor detalle en [19]. Por otro lado, el modelo hidrológico SOCONT, tiene dos niveles de discretización. El primer nivel corresponde a la separación entre la parte cubierta de hielo de la cuenca (cubierta por glaciares o hielo aislados) y la parte no cubierta de hielo [8].

En el esquema del modelo SOCONT (Figura 2c), el modelo Snow-GSM (Glacier Snow Melting) simula la evolución transitoria de la capa de nieve (fusión y acumulación) en función de la temperatura (T) y la precipitación (P), proporcionando así una precipitación equivalente (Peq) que se utiliza como entrada por el modelo GR3 (Génie Rural à 3 paramètres). El modelo GR3 también tiene

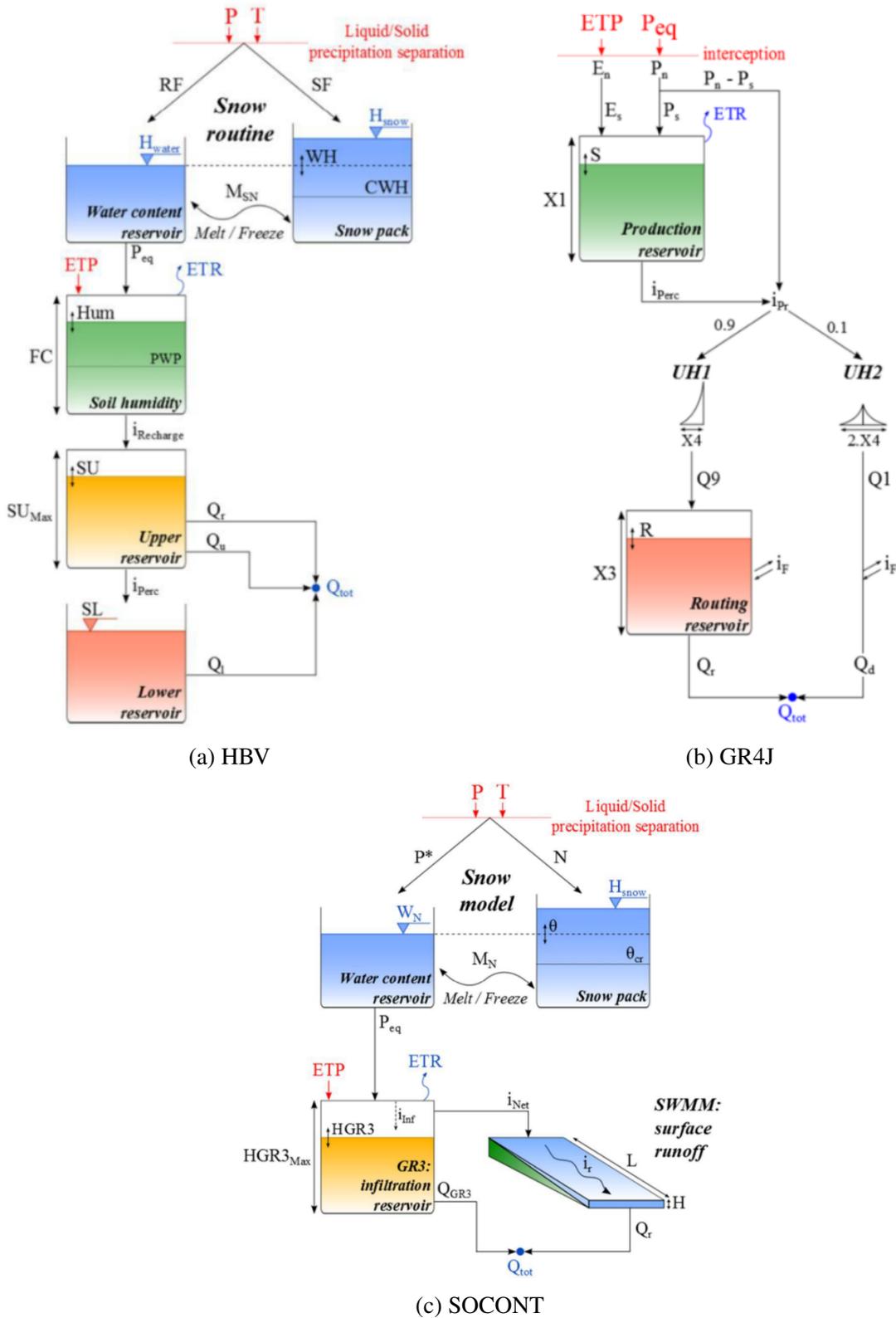


Figura 2: Estructura de los modelos hidrológicos [19]

en cuenta la evapotranspiración potencial (ETP) y (Storm Water Management Model) [19]. proporciona la intensidad neta al modelo SWMM

2.4. Modelación hidrológica

Antes de realizar la modelación hidrológica, los caudales medios diarios fueron evaluados a través de técnicas cualitativas de control de calidad recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [20] entre ellas, se realizaron representaciones gráficas del hidrograma de niveles y caudales en una misma escala, se identificaron la presencia de líneas rectas continuas, recesiones ascendentes inverosímiles, cambios abruptos, discontinuidades sucesivas, máximos y mínimos aislados, así como la presencia de escalones o picos en el registro. Sin embargo, para los datos diarios de precipitación y temperatura se verificó la coherencia espacial con estaciones vecinas, presencia de truncamiento en los registros y unidades incorrectas. Los valores atípicos para temperatura fueron asociados a los percentiles 10 y 90 mientras que las precipitaciones fueron asociados al percentil 95.

Para determinar los parámetros morfométricos necesarios, se delimitaron las unidades hidrográficas (UH) mediante el uso de sistema de información geográfica (SIG), siendo necesarios el modelo digital de elevación (DEM) y la estación hidrológica puente Ramis. Los parámetros determinados fueron; el área de la cuenca (m^2), las coordenadas (este y norte) y su respectiva altitud (ms.n.m.) del centro de gravedad (x e y). El centro de gravedad de la cuenca fue considerado como la estación virtual para la estimación de la precipitación media a partir de datos existentes de las estaciones meteorológicas. El método de interpolación Shepard [21, 22] permitió estimar las variables medias, considerando un radio mínimo de 40.000 metros. La evapotranspiración potencial (ETP), fue estimada mediante el uso de la metodología propuesta por [23], el cual depende de la radiación solar global media en el suelo ($cal/cm^2/día$), con un factor de corrección considerado de 0,37 para febrero y 0,40 para el resto de los meses.

La modelación hidrológica se implementó con una serie histórica de caudales diarios observados a través de 11 años (setiembre 2005–agosto 2016). El periodo de calibración, fue considerado aleatoriamente desde el 01 septiembre de 2005 al

31 de agosto 2013 (2922 días) que corresponde al 70 % de la información. La etapa de validación, se consideró desde el 01 de septiembre de 2013 al 31 de agosto 2016 (1096 días) correspondiente al 30 % del total de la información, Rusli [24] indica que la etapa de calibración se realiza para comprender la correlación que existe entre los parámetros del modelo y la respuesta hidrológica de la cuenca y asimismo lograr la mejor concordancia entre los caudales observados y simulados. Los parámetros de los modelos hidrológicos, fueron optimizados mediante calibración automática a través del método de optimización global Shuffled Complex Evolution, University of Arizona (SCE-UA) [25] incorporado en la plataforma RS MINERVE [19]. En la calibración automática, los parámetros se ajustan automáticamente de acuerdo con un esquema de búsqueda especificada y medidas numéricas de bondad de ajuste [1, 26].

2.5. Métricas de desempeño

Una primera evaluación del rendimiento de modelos, fue valorado mediante el diagrama de Taylor basado en la ley de los cosenos que proporciona en una sola gráfica la variación simultánea de tres estadísticos: la desviación estándar (DE), el coeficiente de correlación de Pearson (CC) y la raíz del error cuadrático medio centrado (RMSD). En general, el diagrama de Taylor caracteriza la relación estadística entre dos campos, uno de “prueba” (por lo general representa un modelo simulado) y el otro campo de “referencia”, que habitualmente representa un estado observado [27].

También se usaron una variedad de métricas de desempeño para la aceptación de la calidad de los modelos (Tabla 1), así tenemos la función de eficiencia de Nash propuesta por [28] caracterizada por su flexibilidad para evaluar la capacidad predictiva de diversos modelos hidrológicos [29, 30, 8, 31, 32, 33, 34]. Entre otros, el coeficiente adimensional de Nash para valores de logaritmo (Nash-ln) para caudales bajos [30, 8, 35], el coeficiente de correlación de Pearson [33], el coeficiente de Bias Score [36] para evaluar el sesgo y la raíz del error cuadrático medio relativo

RRMSE para medir el error de la capacidad predictiva [37].

Por otro lado, una evaluación cualitativa mediante superposición de hidrogramas y la curva de duración de caudales observados y simulados ayudaron a verificar la consistencia de las descargas simuladas por los modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT.

3. Resultados y discusión

El diagrama de Taylor (Figura 3), proporciona un gráfico de posición entre las estimaciones de los modelos y los datos observados de la estación hidrológica. El diagrama resume la relación que existe entre la desviación estándar (DE), el coeficiente de correlación de Pearson (CC) y la raíz del error cuadrático medio centrado (RMSD). La posición de cada modelo en el diagrama de Taylor (Figura 3a) se encuentra casi cercano a la línea de desviación estándar observada, no en tanto en el diagrama de Taylor (Figura 3b) se aleja de la línea de desviación estándar observada. Se deduce que los modelos HBV, GR4J y SOCONT presentan buenos resultados en la simulación de caudales para la etapa de calibración (Figura 3a) y validación (Figura 3b), aunque el rendimiento disminuye en la etapa de validación, los modelos son capaces de representar adecuadamente los caudales observados en el punto de salida de la cuenca.

En la Tabla 2 se resumen los parámetros calculados en la etapa de calibración de los modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT. En el proceso de calibración de parámetros (Tabla 2), en la función objetivo se consideraron 02 criterios estadísticos Nash y Nash-In, asignándole un mayor valor al coeficiente de Nash. El énfasis está en la inclusión de dos o más medidas de rendimiento para calibración automática del modelo, es decir, multi-objetivo [38]. Para mejorar el rendimiento en el proceso de calibración, se optimizaron también los coeficientes para las estaciones meteorológicas (Tabla 3), entre ellos el coeficiente de corrección multiplicativo para las variables de precipitación (Coeff P) y evapotranspiración (Coeff ETP) y el coeficiente de corrección aditivo para la

temperatura (Coeff T). Siendo la calibración, el proceso de modificación de los parámetros de un modelo hasta que la salida del modelo coincide con un conjunto de datos observados [39].

En la Figura 4 la comparación entre el hidrograma observado y simulado por los modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT, para el periodo de calibración y validación muestran valores simulados análogos a los valores observados. Aunque la inspección visual, es una medida subjetiva, nos da una idea de la precisión de los modelos hidrológicos. En la etapa de calibración, las métricas de desempeño (Tabla 4), muestran valores del coeficiente de Nash para los modelos HBV (0,88), GR4J (0,86) y SOCONT (0,86), con un rendimiento muy bueno según los criterios establecidos por [32] y un rendimiento bueno según las discreciones de [34]. Los coeficientes de Nash-In para caudales bajos es de 0,93 (HBV), 0,92 (GR4J) y 0,86 (SOCONT). Para la simulación de caudales diarios durante el periodo de validación, el coeficiente de eficiencia de Nash baja a 0,80; 0,84 y 0,83 para los modelos HBV, GR4J y SOCONT respectivamente, mientras que Nash-In muestran patrones similares a los del periodo de calibración con 0,93 y 0,86 para los modelos HBV y SOCONT respectivamente, no en tanto el rendimiento baja para el modelo GR4J (Nash-In = 0,90). Los resultados en la etapa de validación indican que los modelos son lo suficientemente flexibles para ser utilizados en la simulación de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis y ello es corroborado en caudales simulados fuera del periodo de calibración [40].

Las salidas de los modelos hidrológicos, muestran resultados alentadores y existe una coincidencia similar entre los valores simulados y observados, que sugieren ser incorporados como instrumento en el pronóstico de caudales y la gestión del recurso hídrico.

Una comparación de la curva de duración de caudales observados y simulados por los modelos HBV, GR4J y SOCONT, se muestra en la Figura 5. El umbral predeterminado de separación de caudales altos es el valor de 0,20 (20 %) hacia la izquierda, mientras que para caudales bajos es de 0,70 (70 %) hacia la derecha. Se deduce

Tabla 1: Métricas de desempeño utilizados para la comparación del rendimiento de modelos hidrológicos

Estadísticos	Ecuación	Valor óptimo
Desviación estándar (DE) ²	$DE_{Q_{sim}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2}$	0
Coefficiente de correlación de Pearson (CC)	$CC = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}}$	1
Bias Score (BS)	$BS = 1 - \left \max\left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{ref}}, \frac{\bar{Q}_{ref}}{\bar{Q}_{sim}}\right) - 1 \right $	1
Coefficiente de Nash (Nash)	$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}$	1
Coefficiente de Nash para valores logaritmo (Nash-ln)	$Nash-ln = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{sim,t}) - \ln(Q_{ref,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{ref,t}) - \ln(\bar{Q}_{ref}))^2}$	1
Raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE)	$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}}{\bar{Q}_{ref}}$	0
Raíz del error cuadrático medio centrado (RMSD)	$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_f} [(Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) - (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})]^2}$	0

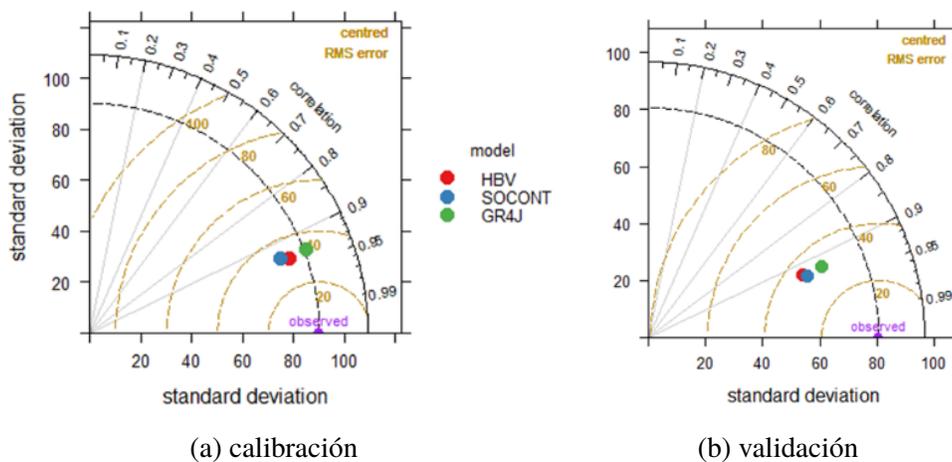


Figura 3: Diagrama de Taylor para HBV, GR4J y SOCONT

que, los modelos HBV y SOCONT subestiman los caudales con probabilidad de excedencia del

Tabla 2: Valores de parámetros optimizados (en negrita) de modelos HBV, GR4J y SOCONT mediante el proceso de calibración automática

Modelo	Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
HBV	CFMax	Coefficiente de deshielo	17.8745158	mm/°C/día
	CFR	Factor de congelación	0.2632264	-
	CWH	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	0.0838878	-
	TT	Temperatura umbral de lluvia/mezcla de nieve	2.0000000	°C
	TTInt	Intervalo de temperatura para lluvia nieve	2.0000000	°C
	TTSM	Temperatura umbral para el derretimiento de nieve	0.0000000	°C
	Beta	Coefficiente forma	2.5000000	-
	FC	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo	0.0631195	M
	PWP	Punto de marchitez permanente del suelo	0.1538436	-
	SUMax	Nivel umbral de agua del Reservorio superior	0.0539669	M
	Kr	Coefficiente de liberación del flujo superficial	0.0500484	1/d
	Ku	Coefficiente de liberación del interflujo	0.0178894	1/d
	Kl	Coefficiente de liberación del flujo base	0.0000691	1/d
	Kperc	Coefficiente de liberación de percolación	0.017696	1/d
GR4J	X1	Capacidad del depósito de producción	0.2223317	M
	X2	Coefficiente de intercambio de agua	-0.0049951	M
	X3	Capacidad de depósito de laminación	0.1765772	M
	X4	Tiempo base de los hidrogramas unitarios	2.8978348	D
SOCONT	Asn	Coefficiente de deshielo grado-día	9.3206044	mm/°C/día
	AsnInt	Intervalo de deshielo grado-día	2.278902	mm/°C/día
	AsnPh	Cambio de fase de la función sinusoidal	35.1478456	D
	ThetaCri	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	0.1000000	-
	Bp	Coefficiente de derretimiento debido a la precipitación líquida	0.0125000	d/mm
	Tcp1	Temperatura mínima crítica para la precipitación líquida	-0.1042677	°C
	Tcp2	Temperatura máxima crítica para la precipitación líquida	3.8369999	°C
	Tcf	Temperatura crítica de la nieve	0.5353516	°C
	HGR3Max	Altura máxima del reservorio de infiltración	0.21473	M
	KGR3	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración.	0.0002539	1/s
	L	Ancho del plano	1000.0000	M
J0	Pendiente del plano	0.0100000	-	
Kr	Coefficiente de Strickler	0.1012983	m ^{1/3} /s	

Tabla 3: Coeficientes optimizados para estaciones meteorológicas

Parámetros	Tipo	HBV	GR4J	SOCONT
Coeff P	M	0.7884314	0.9068498	0.7000282
Coeff T	A	-1.9976902	-1.9999497	-1.2583301
Coeff ETP	M	0.8411729	1.0394633	1.4998002

M: Coeficiente de corrección multiplicativo

A: Coeficiente de corrección multiplicativo

20 % hacia la izquierda, mientras que el modelo GR4J tiene una coincidencia casi similar a los observados. Para caudales bajos los modelos HBV y GR4J sobreestiman los caudales con probabilidad de excedencia de 70 % hacia la derecha, mientras que el modelo SOCONT subestima los caudales con probabilidad de excedencia entre 90 % a 100 % y sobreestima los caudales con probabilidad de

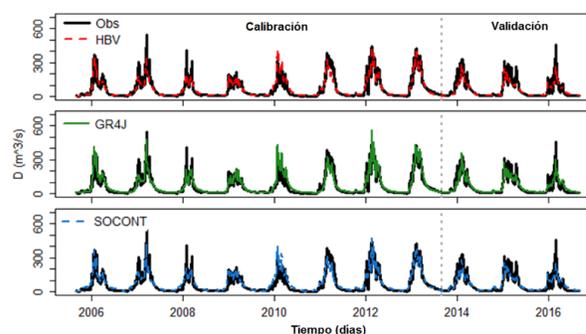


Figura 4: Caudales medios diarios observados y simulados, etapa de Calibración y Validación

excedencia del 70 % a 85 %.

4. Conclusiones

La evaluación del desempeño de modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT para el

Tabla 4: Valores de las métricas de desempeño para el periodo de calibración y validación

Estadísticos	Calibración			Validación		
	HBV	GR4J	SOCONT	HBV	GR4J	SOCONT
Nash	0,88	0,86	0,86	0,80	0,84	0,83
Nash-In	0,93	0,92	0,86	0,93	0,90	0,86
CC	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
BS	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99	0,99
RRMSE	0,45	0,48	0,48	0,55	0,49	0,50

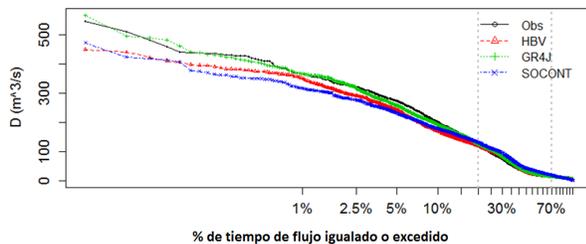


Figura 5: Curva de duración de descargas observadas y simuladas

pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, mostraron buenos estadísticos para el conjunto de datos de calibración y validación pudiendo ser considerados como herramientas robustas para el pronóstico de caudales. Sin embargo, el modelo GR4J a pesar de utilizar solo cuatro parámetros representa adecuadamente mejor las magnitudes y la variabilidad de caudales en periodos de avenida y estiaje, seguido del modelo HBV y luego del modelo hidrológico SOCONT.

Agradecimientos

Nuestro sincero agradecimiento al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SE-NAMHI) – Perú, por facilitar la información hidrometeorológica para la realización del presente estudio de investigación.

5. Referencias

[1] H. Madsen, “Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives,” *Journal of hydrology*, vol. 235, no. 3–4, pp. 276–288, 2000.

[2] M. Mendez and L. Calvo-Valverde, “Development of the HBV-TEC Hydrological Model,” in *12th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2016) - Smart Water for the Future*, J. H. Kim, H. S. Kim, D. G. Yoo, D. Jung, and C. G. Song, Eds., vol. 154, Incheon, South Korea, 2016, pp. 1116–1123.

[3] S. Bergström, *Utveckling och tillämpning av en digital avrinningsmodell. Notiser och preliminära rapporter*. Stockholm: SVERIGES METEOROLOGISKA OCH HYDROLOGISKA INSTITUT, 1972.

[4] M. G. Grillakis, I. K. Tsanis, and A. G. Koutroulis, “Application of the HBV hydrological model in a flash flood case in Slovenia,” *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 10, no. 12, pp. 2713–2725, 2010.

[5] Q. Y. Jia and F. H. Sun, “Modeling and forecasting process using the HBV model in Liao river delta,” *Procedia Environmental Sciences*, vol. 13, no. 2012, pp. 122–128, 2012.

[6] G. K. Devia, B. P. Ganasri, and G. S. Dwarakish, “A Review on Hydrological Models,” *Aquatic Procedia*, vol. 4, pp. 1001–1007, 2015.

[7] G. Zhu, Y. He, D. Qin, H. Gao, T. Pu, D. Chen, and K. Wang, “The impacts of climate change on hydrology in a typical glacier region - A case study in Hailuo Creek watershed of Mt. Gongga in China,” *Sciences in Cold and Arid Regions*, vol. 8, no. 3, pp. 0227–0240, 2016.

[8] B. Schaeffli, B. Hingray, M. Niggli, and A. Musy, “A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments,” *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2005.

[9] F. Jordan, “Modèle de prévision et de gestion des crues: optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques á accumulation pour la réduction des débits de crue,” Ph.D. dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.

[10] B. Hingray, B. Schaeffli, A. Mezghani, and Y. Hamdi, “Signature-based model calibration for hydrological prediction in mesoscale Alpine catchments,” *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 55, no. 6, pp. 1002–1016, 2010.

[11] C. Tobin, L. Nicotina, M. B. Parlange, A. Berne, and A. Rinaldo, “Improved interpolation of meteorological forcings for hydrologic applications in a Swiss Alpine region,” *Journal of Hydrology*, vol. 401, no. 1–2, pp.

- 77–89, 2011.
- [12] C. Perrin, C. Michel, and V. Andréassian, “Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation,” *Journal of Hydrology*, vol. 279, no. 1–4, pp. 275–289, 2003.
- [13] F. Jordan, J. García-Hernández, J. L. Boillat, M. P. Bieri, G. De Cesare, and A. Schleiss, “Prévision des crues sur le Yangtsé–Application du concept MINERVE,” *Wasser Energie Luft*, vol. 104, no. 4, pp. 282–287, 2012.
- [14] M. A. Astorayme, J. Garcia, W. Suares, O. Felipe, C. Huggel, y W. Molina, “Modelización Hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del rio Chillón, Perú,” *Revista Peruana Geo-Atmosférica (RPGA)*, vol. 4, pp. 109–124, 2015.
- [15] R. Mohammed and M. Scholz, “Climate change and anthropogenic intervention impact on the hydrologic anomalies in a semi-arid area: Lower Zab River Basin, Iraq,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, no. 10, pp. 1–19, 2018.
- [16] J. Gray, D. Sulla-Menashe, and M. Friedl, “MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set],” NASA EOSDIS Land Processes DAAC, Technical report, 2015.
- [17] S. Bergström and A. Forsman, “Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model,” *Nordic Hydrology*, vol. 4, no. 3, pp. 147–170, 1973.
- [18] S. Bergström, “Principles and confidence in hydrological modelling,” *Nordic Hydrology*, vol. 22, pp. 123–136, 1991.
- [19] J. García Hernández, J. Paredes Arquiola, A. Foehn, and B. Roquier, “RS MINERVE–Technical manual v2.7,” RS MINERVE Group, Switzerland, Tech. Rep., 2016.
- [20] Organización Meteorológica Mundial, “Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas,” in *Guía de prácticas hidrológicas*. Ginebra, Suiza: OMM, 2011, pp. 517–524.
- [21] D. Shepard, “A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data,” in *Proc. ACM National Conference*, 1968.
- [22] W. J. Gordon and J. A. Wixom, “Shepard’s method of “metric interpolation” to bivariate and multivariate interpolation,” *Mathematics of computation*, vol. 32, no. 141, pp. 253–264, 1978.
- [23] L. Turc, *Le bilan de l’eau des sols. Relations entre les précipitations, l’évaporation et l’écoulement*. Paris, France: Institut National de la Recherche Agronomique, 1955.
- [24] S. R. Rusli, D. Yudianto, and J. T. Liu, “Effects of temporal variability on HBV model calibration,” *Water Science and Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 291–300, 2015.
- [25] Q. Duan, S. Sorooshian, and V. Gupta, “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models,” *Water resources research*, vol. 28, no. 4, pp. 1015–1031, 1992.
- [26] Y. Liu, S. T. Khu, and D. A. Savic, “A Hybrid Optimization Method of Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA) and K-Nearest Neighbor (KNN) Classifier for Hydrological Model Calibration,” in *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2004*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2004.
- [27] K. E. Taylor, “Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 106, no. D7, pp. 7183–7192, 2001.
- [28] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, “River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles,” *Journal of Hydrology*, vol. 10, no. 3, pp. 282–290, 1970.
- [29] N. K. Ajami, H. Gupta, T. Wagener, and S. Sorooshian, “Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system,” *Journal of Hydrology*, vol. 298, no. 1–4, pp. 112–135, 2004.
- [30] P. Krause, D. P. Boyle, and F. Bäse, “Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment,” *Advances in Geosciences*, vol. 5, pp. 89–97, 2005.
- [31] R. H. McCuen, Z. Knight, and A. G. Cutter, “Evaluation of the Nash Sutcliffe Efficiency Index,” *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 11, pp. 597–602, 2006.
- [32] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations,” *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007.
- [33] A. AghaKouchak and E. Habib, “Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes,” *International Journal of Engineering Education*, vol. 26, no. 4, pp. 963–973, 2010.
- [34] A. Ritter and R. Muñoz-Carpena, “Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments,” *Journal of Hydrology*, vol. 480, no. 14, pp. 33–45, 2013.
- [35] M. T. Nóbrega, W. Collischonn, C. E. M. Tucci, and A. R. Paz, “Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 585–595, 2011.
- [36] Q. J. Wang, T. C. Pagano, S. L. Zhou, H. A. P. Hapuarachchi, L. Zhang, and D. E. Robertson, “Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff,” *Journal of Hydrology*, vol. 404, no. 3–4, pp. 166–175, 2011.
- [37] L. Feyen, R. Vázquez, K. Christiaens, O. Sels, and J. Feyen, “Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 47–63, 2000.
- [38] Y. P. O., G. H. V., and S. S., “Multi-objective global optimization for hydrologic models,” *Journal of*

Hydrology, vol. 181, pp. 23–48, 1998.

- [39] Y. Liu, “Automatic calibration of a rainfall–runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm,” *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 9533–9538, 2009.
- [40] J. Refsgaard and J. Knudsen, “Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models,” *Water Resources Research*, vol. 32, no. 7, pp. 2189–2202, 1996.