

## Evaluación del rendimiento hidrológico del producto TerraClimate para la modelización de caudales en la cuenca del río Huancané con el modelo GR2M

### Evaluation of the hydrological performance of the TerraClimate product for flow modeling in the Huancané river basin with the GR2M model

---

Raúl Juli Candia  
[rjulic@est.unap.edu.pe](mailto:rjulic@est.unap.edu.pe) - Universidad Nacional del Altiplano, Perú  
<https://orcid.org/0009-0002-3178-172X>

Delia Mamani Mamani  
[dmamanim@est.unap.edu.pe](mailto:dmamanim@est.unap.edu.pe) - Universidad Nacional del Altiplano, Perú  
<https://orcid.org/0009-0004-3307-3908>

Efrain Lujano<sup>1</sup>  
[elujano28@gmail.com](mailto:elujano28@gmail.com) - Universidad Nacional del Altiplano, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-6543-8324>

---

Recibido (Received): 25/08/23 | Aceptado (Accepted): 28/09/23

#### Resumen

La gestión de los recursos hídricos requiere de una buena aproximación de la cantidad de agua de una cuenca. Sin embargo, los datos de flujo espacio-temporales de caudales no están disponibles en cuencas con escasez de datos. Los conjuntos de datos climáticos globales (CDCG) brindan una fuente alternativa para aplicaciones hidrometeorológicas en regiones con escasez de datos. No obstante, una evaluación de los CDCG es importante para cuantificar su precisión, error y sesgo en las estimaciones. Este estudio evaluó el rendimiento hidrológico del producto TerraClimate (TC) para la modelización de caudales en la cuenca del río Huancané con el modelo GR2M en Perú. Se realizó una evaluación en conjunto de precipitación y evapotranspiración potencial (ET<sub>o</sub>) de TC, considerando tres enfoques: 1) de pixel a punto de estaciones meteorológicas, 2) con valores medios sobre la cuenca, y 3) como forzantes en la modelización hidrológica. En consecuencia, se utilizaron cinco métricas de desempeño, a saber, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de correlación ( $r$ ), el sesgo porcentual (PBIAS), la eficiencia de Nash (NSE) y la eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe (NSE-L). Los resultados revelaron que la precipitación y evapotranspiración de TC tienen un rendimiento muy bueno, no obstante, al ser introducidos como forzantes en el modelado hidrológico resultó no ser muy satisfactorio para caudales en periodos húmedos, en cambio, para periodos de estiaje son tan eficientes como los caudales observados. Estos hallazgos brindan una mejor comprensión del rendimiento de TC y siguen siendo útiles cuando las observaciones terrestres son limitadas o no están disponibles, sobre todo para estimar la disponibilidad hídrica en cuencas sin información.

**Palabras claves:** *Cuenca del río Huancané; GR2M; Modelado hidrológico; TerraClimate.*

---

**Como citar:** Juli, R. Mamani, D. & Lujano, E (2023). Evaluación del rendimiento hidrológico del producto TerraClimate para la modelización de caudales en la cuenca del río Huancané con el modelo GR2M. ÑAWPARISUN – Revista de Investigación Científica de Ingenierías, 4(3), 39-47.

<sup>1</sup> Corresponding author: [elujano28@gmail.com](mailto:elujano28@gmail.com)

## Abstract

The management of water resources requires a good approximation of the amount of water in a basin. However, spatio-temporal flow data are not available in data-scarce basins. Global climate data sets (GCDS) provide an alternative source for hydrometeorological applications in data-scarce regions. However, an evaluation of GCDS is important to quantify their precision, error, and bias in estimates. This study evaluated the hydrological performance of the TerraClimate (TC) product for flow modeling in the Huancané river basin with the GR2M model in Peru. A joint assessment of precipitation and potential evapotranspiration (ET<sub>p</sub>) of TC was performed, considering three approaches: 1) from pixel to point of meteorological stations, 2) with mean values over the basin, and 3) as forcing in hydrological modeling. Accordingly, five performance metrics were used, namely, root mean square error (RMSE), correlation coefficient (r), percent bias (PBIAS), Nash efficiency (NSE), and log Nash-Sutcliffe efficiency (L-NSE). The results revealed that TC precipitation and evapotranspiration perform very well, however, when introduced as forcings in the hydrological modeling it turned out to be not very satisfactory for wet period flows, on the other hand, for low water periods they are as efficient as the observed flows. These findings provide a better understanding of TC yields and remain useful when ground-based observations are limited or unavailable, especially for estimating water availability in basin without data.

**Keywords:** *GR2M; Huancané river basin; Hydrological modeling; TerraClimate.*

## Introducción

La precipitación es una variable importante en el ciclo global del agua que afecta directa o indirectamente la escorrentía superficial, la humedad del suelo, la evaporación, la recarga de aguas subterráneas y varias variables hidrológicas (Ghajarnia et al., 2021; Kalantari et al., 2019; Markonis et al., 2021; Markonis et al., 2019). Su uso es esencial para diversas aplicaciones hidrometeorológicas, a saber, el modelado hidrológico (Wijayarathne et al., 2020; Guan et al., 2022; Tao & Barros, 2010), caracterización climática (Matteo et al., 2012) y caracterización de sequías (Tang et al., 2022). Una de las fuentes de información más confiable, son las lecturas de los pluviómetros (Lanza et al., 2022). Sin embargo, la baja densidad de estaciones meteorológicas, registros cortos, valores faltantes y datos de precipitación inconsistentes dificultan la obtención de información básica para estudios hidrometeorológicos (Essou et al., 2017).

Los productos de precipitación global (PPG) son una fuente alternativa para fines hidrometeorológicos, principalmente cuando son limitados (Rajulapati et al., 2020). En las últimas décadas, con el uso cada vez mayor de técnicas de teledetección y la mejora de la potencia informática, se han desarrollado varios productos de estimación de precipitación de alta resolución (Rahmati Ziveh et al., 2022). Estos PPG se ha utilizado ampliamente en aplicaciones casi en tiempo real, como el pronóstico de cultivos, pronóstico de inundaciones, monitoreo de sequías y detección de deslizamientos de tierra (Chen et al., 2020). Sin embargo, las desviaciones significativas en las precipitaciones pueden conducir a resultados inconsistentes (Aranda, 1998).

El rendimiento de los productos de precipitación global PPG varía de una región a otra debido a diversos factores, como la altitud, los lugares cubiertos y la tecnología utilizada (Li et al., 2013). No obstante, la evaluación del desempeño de PPG es importante para representar la hidrología de la cuenca (Behrangi et al., 2011). Varios estudios a nivel mundial, han reportado el desempeño del conjunto de datos TerraClimate (TC), por ejemplo en Colombia (Cepeda Arias & Cañon Barriga, 2022) evaluaron el desempeño de

conjuntos de datos de precipitación de alta resolución, entre ellos CHIRPS y TerraClimate, en Brasil (de Andrade et al., 2022) evaluaron los productos de precipitación tales como CHIRPS, TRMM, IMERG, ERA5-Land y TerraClimate, mientras en India (Nguyen et al., 2022) evaluaron el desempeño espacial y temporal de modelos hidrológicos distribuidos utilizando productos como SSEBop y TerraClimate, en Indonesia (Dumont et al., 2022) evaluaron la confiabilidad de los productos para la gestión de recursos hídricos, entre ellos CHELSA, TerraClimate y CHIRPS, mientras en Asia (Ansari et al., 2022) evaluaron conjuntos de datos grillados para la evaluación del balance de agua terrestre en la cuenca superior del río Jhelum entre ellas, productos de precipitación APHRODITE, CHIRPS, PGMFD, ERA-5, MSWEP y evapotranspiración MOD16A2, SSEBop, GLDAS-NOAH, TerraClimate y DOLCE. En Perú (Huerta et al., 2022) analizaron datos cuadrículada de evapotranspiración de referencia basada en FAO Penman-Monteith, tales como CRU\_TS, TerraClimate, y ERA5-Land. Estas prácticas, son poco realizadas en cuencas peruanas, sobre todo utilizando los productos de TC como forzantes en la modelización hidrológica. Por lo tanto, esta investigación responde a la siguiente pregunta de investigación ¿Pueden los productos de TC ser útiles para la modelización de caudales en cuenca del río Huancané?

Bajo este contexto, se evaluó el rendimiento hidrológico del producto TC para la modelización de caudales en la cuenca del río Huancané con el modelo GR2M en Perú. Nuestra hipótesis fue que los productos de TC son de utilidad al igual que las observaciones terrestres para la modelización de caudales en la cuenca del río Huancané. Los resultados informan el desempeño de TC, ayudando a enriquecer las bases de datos hidrometeorológica, especialmente para las zonas con escasez de datos.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

La Cuenca del río Huancané, está ubicada en el sur del Perú dentro del Altiplano peruano y cubre un área de 3542.45 km<sup>2</sup>. La elevación más alta según modelo digital de elevación (DEM) es 5138 m.s.n.m., la elevación más baja es 3865 m.s.n.m. (promedio: 4502

m.s.n.m.). La precipitación media anual es de 676.22 mm, de los cuales el 50,41% de la precipitación anual cae en (verano, DEF) y el 4.98 % (invierno, JJA). Durante la transición de húmedo a seco se da un 24.90% (otoño, MAM), mientras que durante la transición de seco a húmedo 19.72 % (primavera, SON) de la precipitación total anual. El caudal promedio anual del río Huancané es de 18.67 m<sup>3</sup>/s.

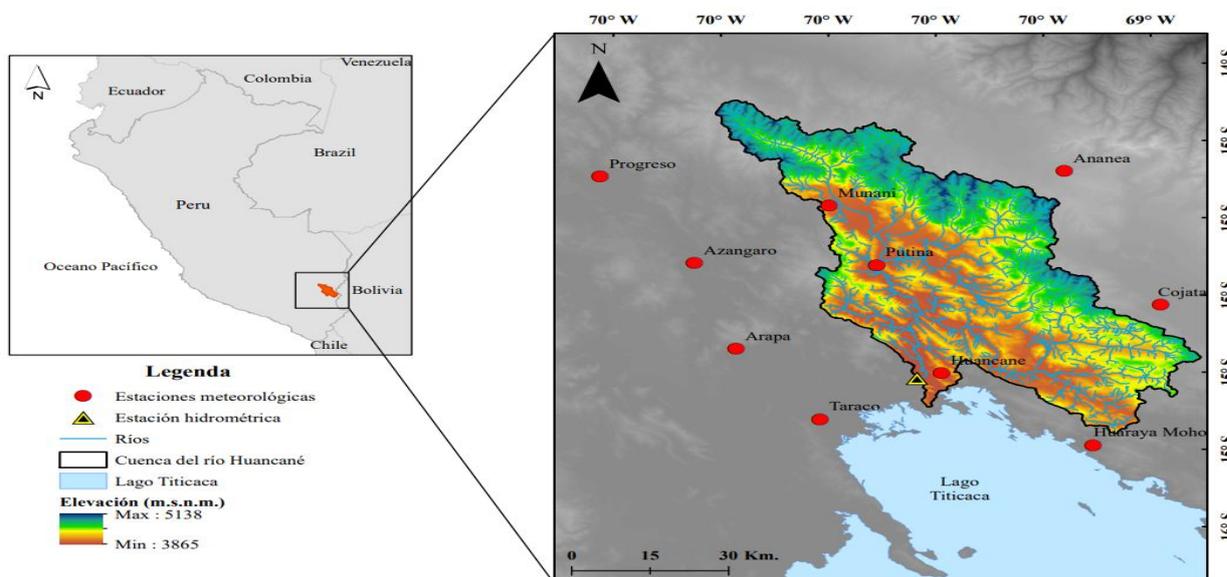


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Huancané con las estaciones hidrometeorológicas.

### Información cartográfica

Se utilizó el Modelo de Elevación Digital Global ASTER (ASTER GDEM), creado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI), con una resolución espacial de 30 metros.

### Datos hidrometeorológicos

Se utilizaron datos de precipitación, temperatura del aire (máxima, mínima y media) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Perú para 10 estaciones meteorológicas (Figura 1 y Tabla 1). El período de registro fue de 1980 a 2012 (33 años). Los datos de caudal se obtuvieron del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH) de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Perú para la estación hidrométrica del puente Huancané, para el mismo período.

Tabla 1.

Características de la ubicación de las estaciones meteorológicas, temperatura máxima media anual (Tmax), temperatura mínima media anual (Tmin), evapotranspiración potencial media anual (ETo) y precipitación media anual (Prc).

N°	Estación	Lat. [°]	Long. [°]	Alt. [m.s.n.m.]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	ETo [mm/año]	Prc [mm/año]
1	Ananea	-14.7	-69.5	4660.0	10.2	-2.0	911.5	642.0
2	Arapa	-15.1	-70.1	3830.0	16.4	1.9	1210.0	712.2
3	Azángaro	-14.9	-70.2	3863.0	16.6	1.2	1230.7	603.2
4	Cojata	-15.0	-69.4	4380.0	12.6	-3.3	1046.3	739.0
5	Huancané	-15.2	-69.4	3890.0	15.1	0.7	1146.3	676.9
6	Huaraya Moho	-15.3	-69.4	3890.0	14.6	2.3	1091.3	848.6
7	Muñani	-14.8	-70.0	3948.0	16.4	1.4	1222.4	638.4
8	Progreso	-14.7	-70.4	3980.0	16.1	1.1	1203.5	617.1
9	Putina	-14.9	-69.9	3878.0	17.2	0.4	1284.9	668.7
10	Taraco	-15.3	-70.0	3820.0	16.0	-0.4	1203.6	616.1

Nota: Lat: Latitud; Long: Longitud; Alt: Altitud; Tmax: Temperatura máxima; Tmin: Temperatura mínima; ETo: Evapotranspiración potencial; Prc: Precipitación.

### Conjunto de datos TerraClimate

Aquí, los datos de precipitación de ETo y TC se recopilaron utilizando la plataforma Climate Engine (<https://www.dri.edu/project/climate-engine/>). Climate Engine, una plataforma de conjunto de datos geoespaciales y climáticos que rastrea la temperatura, la precipitación, el viento y otras variables meteorológicas (Huntington et al., 2017). TC es un conjunto mensual de datos climáticos y de balance hídrico climático para áreas terrestres globales, y tiene una resolución espacial de  $(1/24^\circ, \sim 4 \text{ km})$ , con datos disponibles desde 1958 hasta el presente (Abatzoglou et al., 2018).

### Modelo hidrológico GR2M

GR2M es un modelo concentrado de lluvia-escurrentía con pasos de tiempo mensuales (Mouelhi, 2003). El modelo utiliza dos parámetros de optimización ( $X_1$  y  $X_2$ ), donde  $X_1$  representa la máxima capacidad de almacenamiento de producción en mm y  $X_2$  representa el coeficiente de intercambio de agua subterráneo, adimensional (Mvoundou et al., 2022). Es un modelo con dos áreas de almacenamiento: un área de almacenamiento en el piso conocida como área de almacenamiento de producción y un área de almacenamiento de enrutamiento con una capacidad establecida en 60 mm (Ditthakit et al., 2021). Las entradas al modelo GR2M fueron la precipitación y la evapotranspiración media sobre el área de la cuenca.

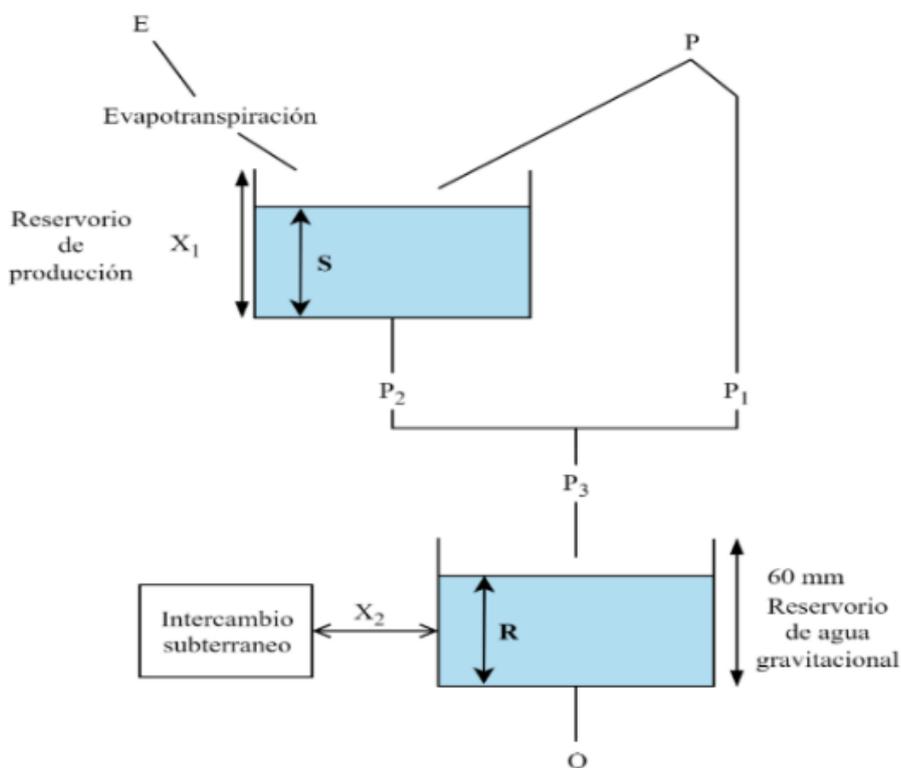


Figura 2. Diagrama conceptual del modelo GR2M (Mouelhi, 2003)

### Métodos

#### Evaluación de los productos de precipitación y evapotranspiración de TerraClimate

Los datos hidrometeorológicos se sometieron a un análisis de homogeneidad utilizando la prueba no paramétrica CUSUM incorporada en el software TREND (<https://toolkit.ewater.org.au/Tools/TREND>). En consecuencia, los valores faltantes se completaron utilizando el método de regresión lineal simple considerando la correlación más alta entre pares de datos de estaciones meteorológicas. La ETo se estimó utilizando el método de Hargreaves - Samani (HS) (Hargreaves & Samani, 1985).

Luego, para evaluar la precipitación TC y los productos ETo, se consideraron tres enfoques: 1) de pixel a punto de estaciones meteorológicas, 2) con valores medios sobre la cuenca, y 3) como forzantes en la modelización hidrológica. En consecuencia, se

utilizaron métricas de desempeño estadístico (Tabla 2). El criterio de interpretación de la NSE es muy bueno  $NSE > 0.80$ , bueno  $0.60 \leq NSE \leq 0.80$ , satisfactorio  $0.50 < NSE \leq 0.60$  y no satisfactorio  $NSE \leq 0.50$ , mientras que el PBIAS es muy bueno  $PBIAS < \pm 3\%$ , bueno  $\pm 3\% < PBIAS \leq \pm 10\%$ , satisfactorio  $\pm 10\% < PBIAS < \pm 15\%$  y no satisfactorio  $PBIAS \geq \pm 15\%$ , por otro lado,  $r$  es muy bueno  $r > 0.90$ , bueno  $0.80 \leq r \leq 0.90$ , satisfactorio  $0.70 < r < 0.80$  y no satisfactorio  $r \leq 0.70$  (Moriassi et al., 2015).

Tabla 2.  
 Métricas estadísticas.

Métrica	Ecuación	Rango	Valor óptimo
Error Medio Cuadrático (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}$	0.0 a $\infty$	0.0
Coefficiente de Correlación (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$	-1.0 a 1.0	1.0
Sesgo Porcentual (PBIAS)	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100$	$-\infty$ a $\infty$	0.0
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	$-\infty$ a 1.0	1.0
Eficiencia Logarítmica de Nash-Sutcliffe (L-NSE)	$L - NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log O_i - \log S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\log O_i - \log \bar{O})^2}$	$-\infty$ a 1.0	1.0

Nota:  $S$  son los valores simulados;  $O$  los valores observados;  $\bar{S}$  y  $\bar{O}$  denotan los valores medios de  $S$  y  $O$  respectivamente;  $n$  indica el número de pares de datos.

### Evaluación del rendimiento de los productos de precipitación y evapotranspiración de TerraClimate en la modelización hidrológica

Usando el DEM y el punto de la estación hidrométrica, se delineó la cuenca. Posteriormente, se calculó la precipitación media y la ETo sobre la cuenca mediante el método del polígono de Thiessen. Para CT, los valores medios sobre la cuenca se procesaron en la

plataforma Climate Engine. Luego, para la modelación hidrológica con GR2M, los datos hidrometeorológicos se separaron en dos partes: 1) para calibración 70% (1 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2002) y 2) para validación 30% (1 de enero de 2003 al 31 de diciembre de 2002). NSE y NSEV se utilizaron como función objetivo para calibrar GR2M. El período de calentamiento se consideró de un año.

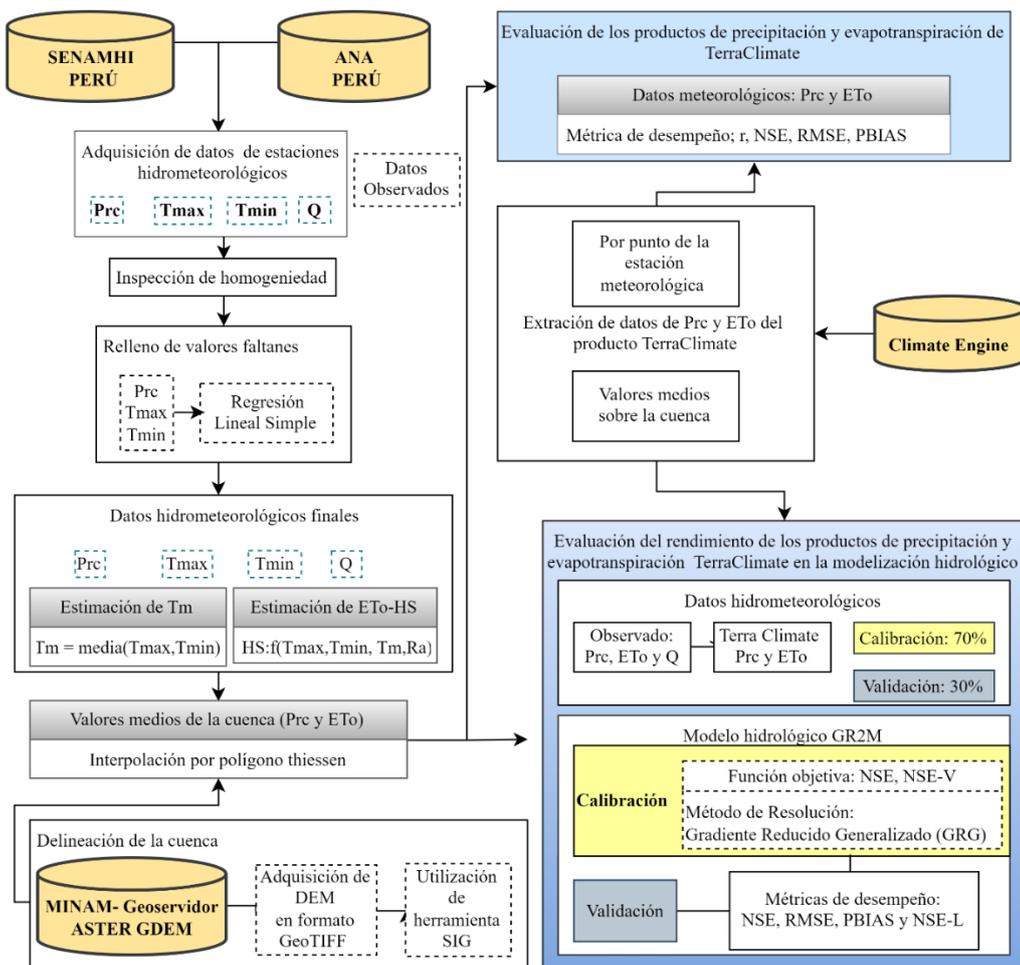


Figura 3. Diagrama de flujo metodológico para evaluar el rendimiento hidrológico del producto TC para la modelización de caudales para la cuenca del río Huancané.

## Resultados y discusiones

### Evaluación del producto de precipitación y evapotranspiración de TerraClimate.

Los conjuntos de datos de precipitación a través de las métricas estadísticas de RMSE,  $r$  y PBIAS en una escala de tiempo mensual a partir del producto TC en el periodo 1980 – 2012, exhibieron diferencias con respecto a la precisión, el error y el sesgo cuando se compara con las mediciones de pluviométricas (Figura 4a-c). El RMSE varió de 31.53 a 43.75 mm/mes (media de 36.26 mm/mes), el coeficiente de correlación varió de 0.82 a 0.86 (media de 0.84), mientras que el PBIAS varió de -5.40 a 31.80 % (media de 12 %). El RMSE muestra valores más altos (>31.53 mm/mes) (Figura 4a). En la (Figura 4b) se encuentran valores altos y positivos (>0.82) entre TC y CRH, es decir la correlación TC parecen ser más consistentes en todas las mediciones pluviométricas, lo que indica que los datos del TC si son fiables. TC sobrestimó la variabilidad de las lluvias en la mayoría

de las estaciones meteorológicas (Ananea, Azángaro, Cojata, Huancané, Muñani, Progreso, Putina y Taraco) mientras que la subestimó en Arapa y Huayara Moho (Figura 3c).

Por otro lado, la evapotranspiración potencial de TC, exhibió valores altos de RMSE (>54.33 mm/mes), valores altos del coeficiente de correlación (>0.83), pero un gran sesgo de subestimación (Figura 4d-f). El RMSE varió de 54.33 a 69.06 mm/mes (media 61.71 mm/mes), el coeficiente de correlación varió de 0.83 a 0.89 (media 0.86), mientras que el PBIAS varió de -72.50 a -55.60 % (media -64.05 %). Los valores del coeficiente de correlación TC parecen más consistentes cuando se comparan con la ETo estimada por el método HS con datos observados en los puntos de la estación meteorológica (Figura 3e). TC subestimó la variabilidad de ETo en todos los puntos de la estación meteorológica (Figura 3f). Se revela un mejor desempeño de los productos TC a escala de tiempo mensual, pero con sesgos significativos.

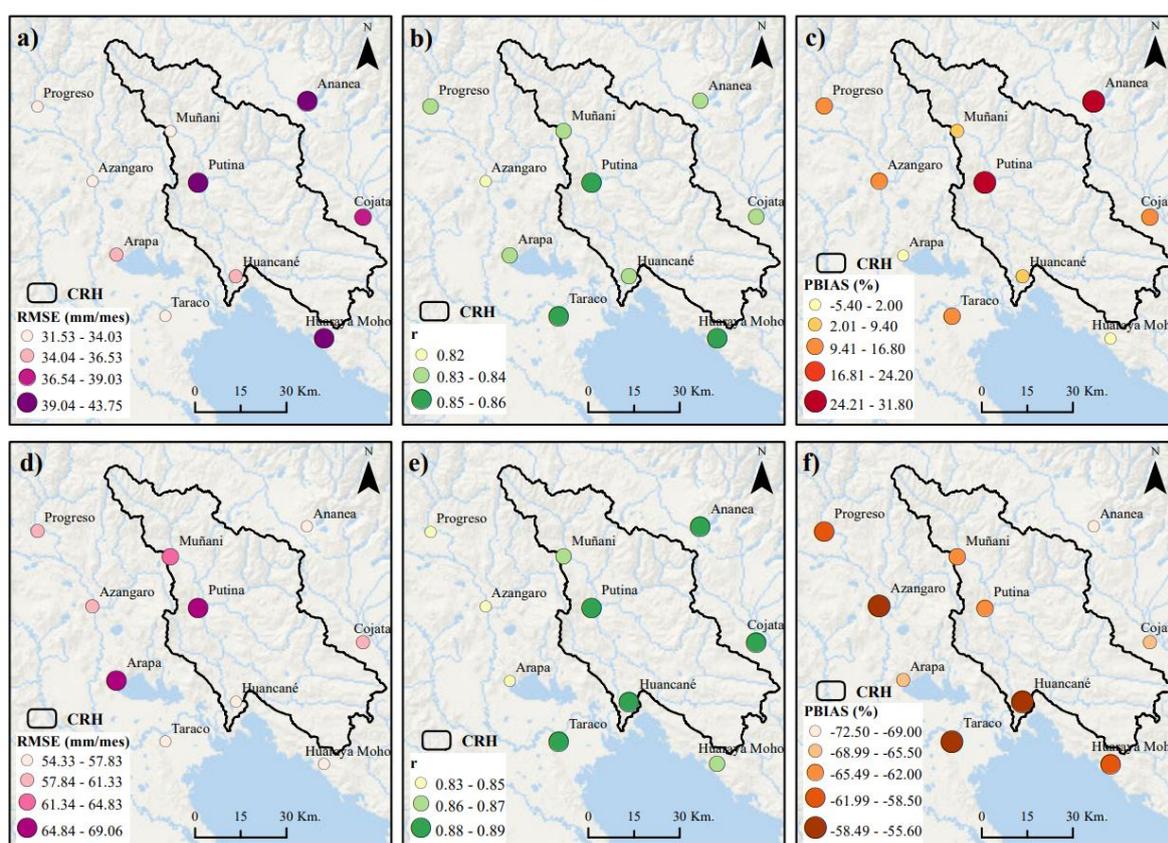


Figura 4. Distribución espacial de las métricas de rendimiento estadístico entre la estación meteorológica y los datos de TC; precipitación (a-c) y evapotranspiración potencial (d-f).

De acuerdo con el diagrama de dispersión correspondiente (Figura 5a), contenidos con las métricas de desempeño del producto TC frente a la precipitación media de la CRH. TC tiene una buena concordancia con el conjunto de datos, parecen ser más consistentes en las mediciones pluviométricas con un coeficiente de correlación alto (0.90), RMSE alto (31.12 mm/mes) y TC sobrestima la variabilidad

de las precipitaciones medias sobre la CRH. No obstante, la evapotranspiración potencial media de TC, frente a la media de CRH (Figura 5b). TC tiene una buena concordancia con el conjunto de datos, parecen ser más consistentes en las mediciones pluviométricas con un coeficiente de correlación alto (0.90), RMSE alto (62.16 mm/mes) y TC subestima la variabilidad de ETo sobre la media CRH.

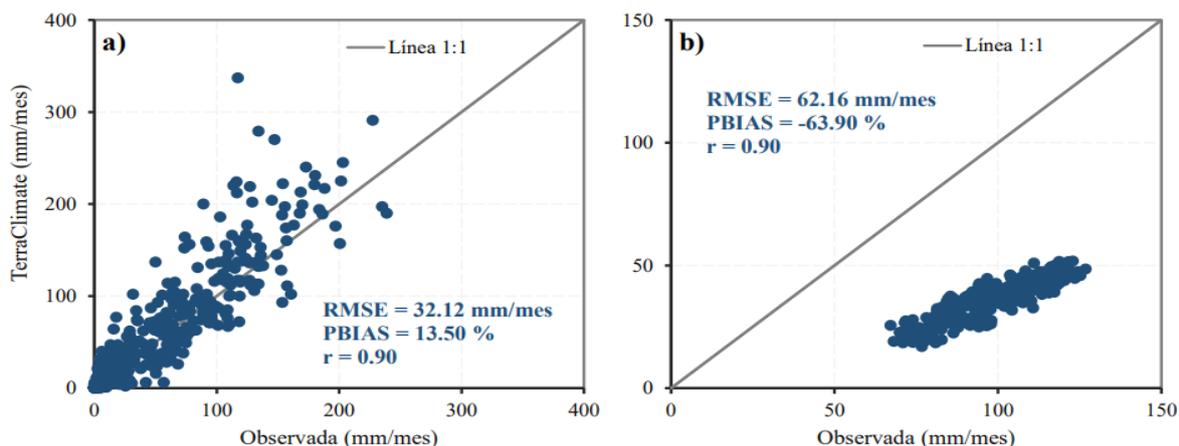


Figura 5. a) Diagrama de dispersión de la precipitación media frente a la media de TC a escala mensual; b) diagrama de dispersión de evapotranspiración potencial media frente a la media de TC a escala mensual.

### Evaluación de los productos de precipitación y evapotranspiración de TerraClimate en la modelización hidrológica

Los resultados revelaron que la precipitación y la evapotranspiración cuando se introdujeron como forzamientos en el modelado hidrológico no fueron satisfactorias para los flujos del período húmedo, pero para los períodos de aguas bajas son tan eficientes como los flujos observados. Durante la calibración y validación del modelo GR2M, se obtuvieron mejores resultados al utilizar datos pluviométricos observados y ETo calculado a partir de datos observados (Figura 4). Mientras que cuando se usaron productos TC en la

calibración, fue bueno y disminuyó en la validación a ser insatisfactorio. Sin embargo, para caudales bajos, el rendimiento fue muy bueno en la calibración y disminuyó a bueno en la validación (Moriassi et al., 2015).

Los parámetros del modelo calibrado  $X1 = 5.66$  y  $X2 = 1.05$  permitieron una mejor aproximación a los valores de caudal observados, pero en cada corrida fueron diferentes con respecto a los parámetros calibrados  $X1 = 6.61$  y  $X2 = 0.57$  cuando se utilizaron datos de TC. Esto no es sorprendente porque no se corrigió el sesgo en los datos de TC.

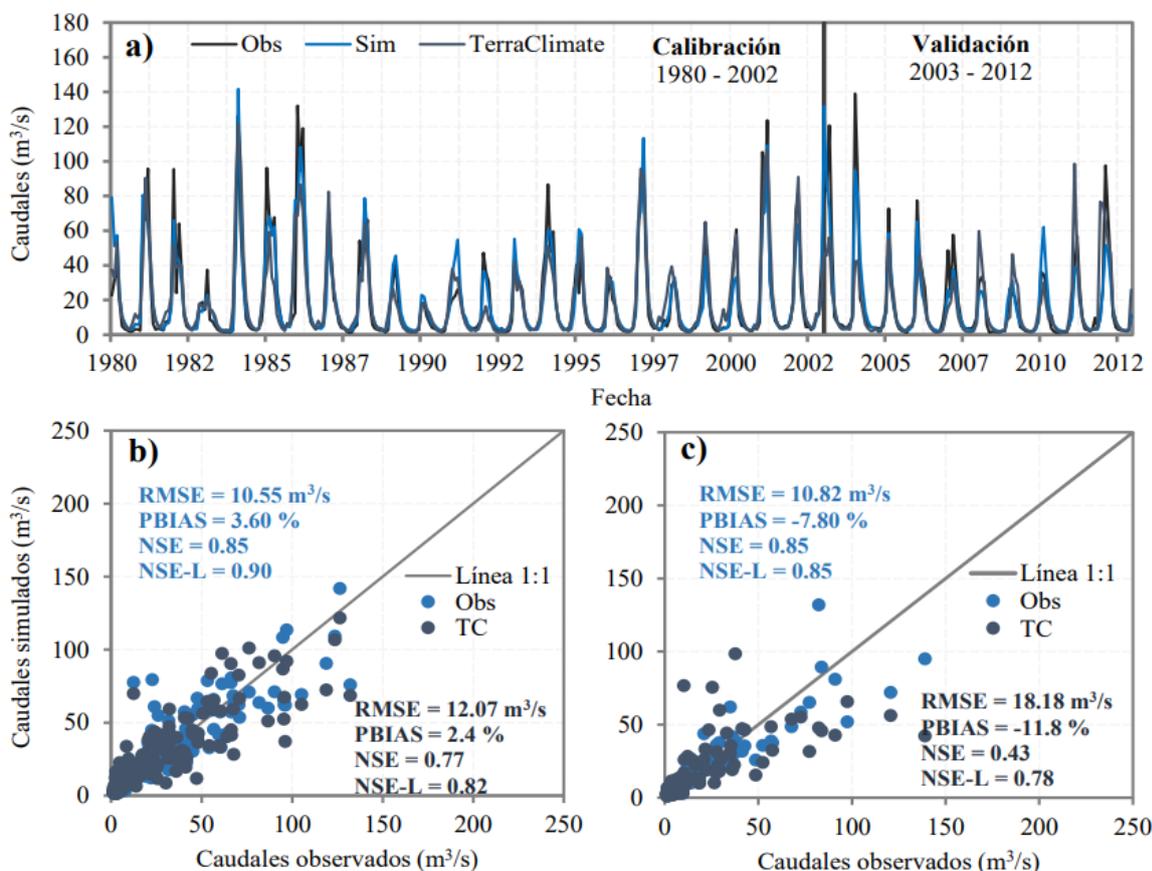


Figura 6. a) Hidrograma de caudales observados y simulados, b) diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados Pre y ETo observado, y de datos TC (calibración), c) diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados Pre y ETo observado, y de datos TC (validación).

## Conclusiones

El desempeño de los productos TC se evaluó mediante comparación con datos observados de estaciones meteorológicas, y como forzante para la modelación hidrológica en la cuenca del río Huancané. Se concluye que:

La evaluación de la precipitación TC a través de métricas de rendimiento reveló una buena correlación en todas las estaciones meteorológicas, pero con un gran sesgo de sobreestimación. Por otro lado, los coeficientes de correlación de TC ETo fueron más consistentes en todas las estaciones, sin embargo, los valores de ETo se subestimaron en comparación con las observaciones de referencia.

Las simulaciones de flujo muestran que el uso de datos de precipitación TC y ETo como forzamiento del modelo GR2M proporciona una buena concordancia entre los flujos observados y simulados para períodos de aguas bajas.

Estos hallazgos brindan una mejor comprensión del desempeño de TC y continúan siendo útiles cuando las observaciones terrestres son limitadas o no están disponibles, especialmente para estimar la disponibilidad de agua en cuencas sin información y podrían reemplazarse como una alternativa valiosa cuando las observaciones terrestres de precipitación y ETo no están disponibles, ya que proporcionan datos consistentes en el modelado hidrológico para caudales bajos. En futuras investigaciones se recomienda aplicar una corrección de sesgo para aplicaciones prácticas en la gestión de recursos hídricos en las cuencas del río Huancané.

## Referencias bibliograficas

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 5, 191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Ansari, R., Usman Liaqat, M., & Grossi, G. (2022). Evaluation of gridded datasets for terrestrial water budget assessment in the Upper Jhelum River Basin-South Asia. *Journal of Hydrology*, 613, 128294. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.128294>
- Aranda, D. F. C. (1998). Estimación estadística de la precipitación máxima probable en San Luis Potosí. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 13(3), 45–66.
- Behrang, A., Khakbaz, B., Jaw, T. C., AghaKouchak, A., Hsu, K., & Sorooshian, S. (2011). Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. *Journal of Hydrology*, 397(3–4), 225–237. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.11.043>
- Cepeda Arias, E., & Cañon Barriga, J. (2022). Performance of high-resolution precipitation datasets CHIRPS and TerraClimate in a Colombian high Andean Basin. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2129816>
- Chen, H., Yong, B., Shen, Y., Liu, J., Hong, Y., & Zhang, J. (2020). Comparison analysis of six purely satellite-derived global precipitation estimates. *Journal of Hydrology*, 581, 124376. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124376>
- de Andrade, J. M., Ribeiro Neto, A., Bezerra, U. A., Moraes, A. C. C., & Montenegro, S. M. G. L. (2022). A comprehensive assessment of precipitation products: Temporal and spatial analyses over terrestrial biomes in Northeastern Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100842. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2022.100842>
- Ditthakit, P., Pinthong, S., Salaeh, N., Binnui, F., Khwanchum, L., & Pham, Q. B. (2021). Using machine learning methods for supporting GR2M model in runoff estimation in an ungauged basin. *Scientific Reports* 2021 11:1, 11(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99164-5>
- Dumont, M., Saadi, M., Oudin, L., Lachassagne, P., Nugraha, B., Fadillah, A., Bonjour, J. L., Muhammad, A., Hendarmawan, Dörfliger, N., & Plagnes, V. (2022). Assessing rainfall global products reliability for water resource management in a tropical volcanic mountainous catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101037. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2022.101037>
- Essou, G. R. C., Brissette, F., & Lucas-Picher, P. (2017). The Use of Reanalyses and Gridded Observations as Weather Input Data for a Hydrological Model: Comparison of Performances of Simulated River Flows Based on the Density of Weather Stations. *Journal of Hydrometeorology*, 18(2), 497–513. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0088.1>
- Ghajarnia, N., Kalantari, Z., & Destouni, G. (2021). Data-Driven Worldwide Quantification of Large-Scale Hydroclimatic Covariation Patterns and Comparison With Reanalysis and Earth System Modeling. *Water Resources Research*, 57(10), e2020WR029377. <https://doi.org/10.1029/2020WR029377>
- Guan, H., Zhu, Y., Sinsky, E., Fu, B., Li, W., Zhou, X., Xue, X., Hou, D., Peng, J., Nageswararao, M. M., Tallapragada, V., Hamill, T. M., Whitaker, J. S., Bates, G., Pegion, P., Frederick, S., Rosencrans, M., & Kumar, A. (2022). GEFSv12 Reforecast Dataset for Supporting Subseasonal and Hydrometeorological Applications. *Monthly Weather Review*, 150(3), 647–665. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0245.1>
- Huerta, A., Bonnesoeur, V., Cuadros-Adriazola, J., Gutierrez, L., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., & Lavado-Casimiro, W. (2022). PISCOeo\_pm, a reference evapotranspiration gridded database based on FAO Penman-Monteith in Peru. *Scientific Data* 2022 9:1, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10000-0>

- 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01373-8>
- Huntington, J. L., Hegewisch, K. C., Daudert, B., Morton, C. G., Abatzoglou, J. T., McEvoy, D. J., & Erickson, T. (2017). Climate Engine: Cloud Computing and Visualization of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(11), 2397–2410. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00324.1>
- Kalantari, Z., Ferreira, C. S. S., Koutsouris, A. J., Ahmer, A. K., Cerdà, A., & Destouni, G. (2019). Assessing flood probability for transportation infrastructure based on catchment characteristics, sediment connectivity and remotely sensed soil moisture. *Science of The Total Environment*, 661, 393–406. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.01.009>
- Lanza, L. G., Cauteruccio, A., & Stagnaro, M. (2022). Rain gauge measurements. *Rainfall: Modeling, Measurement and Applications*, 77–108. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822544-8.00002-0>
- Li, Z., Yang, D., & Hong, Y. (2013). Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 500, 157–169. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.07.023>
- Markonis, Y., Kumar, R., Hanel, M., Rakovec, O., Máca, P., & Kouchak, A. A. (2021). The rise of compound warm-season droughts in Europe. *Science Advances*, 7(6). [https://doi.org/10.1126/SCIADV.ABB9668/SUPPL\\_FILE/ABB9668\\_SM.PDF](https://doi.org/10.1126/SCIADV.ABB9668/SUPPL_FILE/ABB9668_SM.PDF)
- Markonis, Y., Papalexiou, S. M., Martinkova, M., & Hanel, M. (2019). Assessment of Water Cycle Intensification Over Land using a Multisource Global Gridded Precipitation Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(21), 11175–11187. <https://doi.org/10.1029/2019JD030855>
- Matteo, L. Di, Valigi, D., & Cambi, C. (2012). Climatic Characterization and Response of Water Resources to Climate Change in Limestone Areas: Considerations on the Importance of Geological Setting. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(7), 773–779. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000671](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000671)
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Mouelhi, S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. 322.
- Mvoundou, C. N., Tathy, C., Obami-Ondon, H., Moukoko, G. B. M., Niere, R. R., Mvoundou, C. N., Tathy, C., Obami-Ondon, H., Moukoko, G. B. M., & Niere, R. R. (2022). Calibration and Validation of the GR2M Hydrologic Model in the Kouilou-Niari Basin in Southwestern Congo-Brazzaville. *Open Journal of Modern Hydrology*, 12(3), 109–124. <https://doi.org/10.4236/OJMH.2022.123007>
- Nguyen, T. V., Uniyal, B., Tran, D. A., & Phan, T. B. T. (2022). On the Evaluation of Both Spatial and Temporal Performance of Distributed Hydrological Models Using Remote Sensing Products. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 1959*, 14(9), 1959. <https://doi.org/10.3390/RS14091959>
- Rahmati Ziveh, A., Bakhtar, A., Shayeghi, A., Kalantari, Z., Bavani, A. M., & Ghajarnia, N. (2022). Spatio-temporal performance evaluation of 14 global precipitation estimation products across river basins in southwest Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101269. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2022.101269>
- Rajulapati, C. R., Papalexiou, S. M., Clark, M. P., Razavi, S., Tang, G., & Pomeroy, J. W. (2020). Assessment of Extremes in Global Precipitation Products: How Reliable Are They? *Journal of Hydrometeorology*, 21(12), 2855–2873. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0040.1>
- Tang, M., Yuan, L., Jiang, Z., Yang, X., Li, C., & Liu, W. (2022). Characterization of hydrological droughts in Brazil using a novel multiscale index from GNSS. *Journal of Hydrology*, 128934. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.128934>
- Tao, K., & Barros, A. P. (2010). Using Fractal Downscaling of Satellite Precipitation Products for Hydrometeorological Applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(3), 409–427. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1219.1>
- Wijayarathne, D., Boodoo, S., Coulibaly, P., & Sills, D. (2020). Evaluation of Radar Quantitative Precipitation Estimates (QPEs) as an Input of Hydrological Models for Hydrometeorological Applications. *Journal of Hydrometeorology*, 21(8), 1847–1864. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0033.1>