





Flow generation at daily level using the GR4j Method and gridded climate information in the Huayabamba river basin





Falero-Alama Andrea¹, Huallanca-Valenzuela Manuel David², Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³, Vereau-Miranda Edmundo, Magister en Administración de Empresas⁴ ^{1,2,3,4}Universidad Privada del Norte, Perú, N00263645@upn.pe, N00092741@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe, edmundo.vereau@upn.edu.pe

Abstract– Given the small number of hydrometric records, this research aims to generate daily and monthly flows for the Huayabamba river basin up to its confluence with the Huallaga river, for the period between the years 1981-2020, this in order to This information can be used in the future for the elaboration of hydrological and hydraulic projects, which can mitigate flooding in the towns established in the lower part of the basin. For this reason, to achieve this purpose, the ERA5 temperature and precipitation grid information and the GR4j runoff precipitation method were used.

Keywords-- Huayabamba Basin, GR4j, ERA5, Daily Flows

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Generación de caudales a nivel diario usando el Método GR4j y la información climática grillada en la cuenca del río Huayabamba

Falero-Alama Andrea¹, Huallanca-Valenzuela Manuel David², Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³, Vereau-Miranda Edmundo, Magister en Administración de Empresas⁴ ^{1,2,3,4} Universidad Privada del Norte, Perú, N00263645@upn.pe, N00092741@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe, edmundo.vereau@upn.edu.pe

Resumen- Ante la poca cantidad de registros hidrométricos, esta investigación tiene como objetivo la generación de caudales diarios y mensuales para la cuenca del río Huayabamba hasta su confluencia con el río Huallaga, para el periodo entre los años 1981-2020, esto con el fin de que esta información puede ser usada en un futuro para la elaboración de proyectos hidrológicos e hidráulicos, que puedan mitigar las inundaciones en los poblados establecidos en la parte baja de la cuenca. Por tal motivo para lograr este propósito se uso la información grillada de temperatura y precipitación ERA5 y el método de precipitación escorrentía GR4j.

Palabras claves-- Cuenca Huayabamba, GR4j, ERA5, Caudales diarios

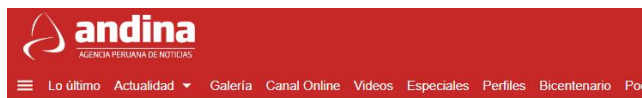
I. INTRODUCCIÓN

Cada cierto tiempo en Perú se observan noticias del desborde de los ríos; este es el caso del río Huayabamba, el cual al traer grandes avenidas produce inundaciones en los poblados de Pachiza, Bellavista, Huingo, Juanjui y Limón. (Fig.1).

Para contrarrestar esto en los últimos años, en el Perú se han planteado diferentes proyectos hidráulicos para contrarrestar estas problemáticas.

Se sabe que para cualquier proyecto hidráulico se necesita registros y mediciones de caudales diarios de varios años, para estimar las dimensiones de estas obras; lamentablemente en nuestro país no se han realizado mediciones de los cauces de los ríos durante mucho tiempo debido a diferentes factores.

En la actualidad, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) conjuntamente con el Servicio Nacional de Hidrología y meteorología (SENAMHI) realizan mediciones de registros hidrométricos a nivel diario en muchas cuencas. Sin embargo, estos datos no son suficientes para ejecutar las obras mencionadas anteriormente.



Río Huayabamba aumentó nivel por lluvias en zona central de Amazonas

Está próximo a alcanzar valor crítico y generar inundaciones



Fig.1 Noticias de posible desborde del río Huayabamba [1]

II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACION

En esta investigación se ha previsto usar el modelo francés de Precipitación-escorrentía GR4j y el producto grillado climático ERA5 de base satelital para calibrar, validar, y reconstruir el registro hidrométrico diario del río Huayabamba hasta su confluencia con el río Huallaga para los años 1981 al 2020. La cual podrá ser usada más adelante para futuros proyectos hidrológicos e hidrométricos.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Ubicación de zona de estudio

La cuenca hidrográfica del río Huayabamba, se encuentra colindante, por el margen izquierdo, al río Huallaga el cual perteneciente a la vertiente del Amazonas. En la Fig.2, se muestran sus principales subcuencas.

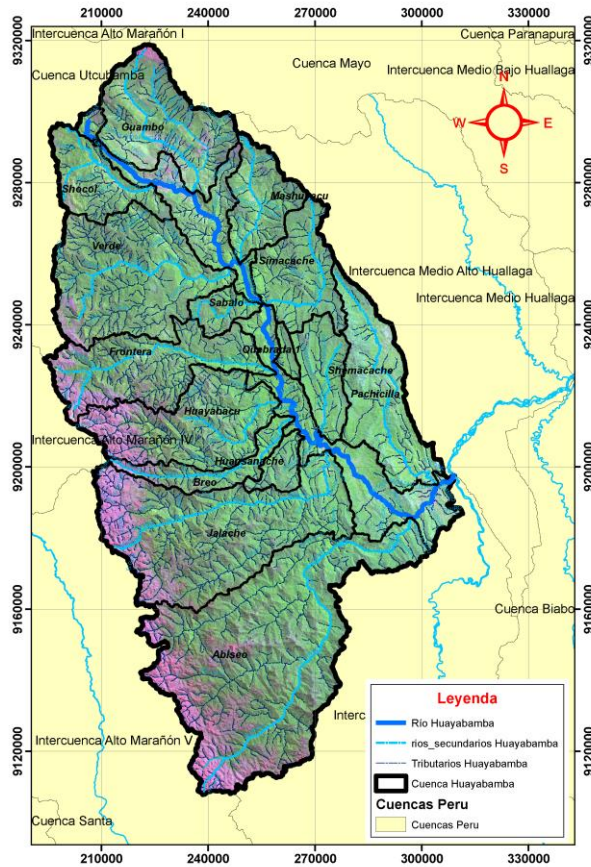


Fig.2 Delimitación de las subcuencas del río Huayabamba

La cuenca está comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas WGS84: Latitud $6^{\circ}7'42''$, longitud $77^{\circ}48'29''$ y latitud $8^{\circ}6'42''$, longitud: $76^{\circ}40'6''$.

3.2 Información hidrométrica de la cuenca

El cauce principal del río Huayabamba posee una longitud aproximada de 211.46 km. Su régimen posee irregular y tormentoso. Los caudales máximos mensuales en época de avenidas rondan los $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ y en época de estiaje están por el rango de los $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3 Datos morfológicos de la cuenca

Como se observa en la Fig.3, la cuenca Huayabamba hasta su unión con el río Huallaga abarca un área de 13875 km^2 . También se aprecia la distribución de las elevaciones en la cuenca. Comprende elevaciones de 4700 msnm en sus

partes altas y 273 msnm en sus partes más bajas, lo cual indica que su morfología es accidentada.

3.4 Arcgis

Es un programa completo que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Asimismo, es considerada como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica [2].

Este programa fue necesario para la delimitación de la cuenca del río Huayabamba hasta la estación hidrométrica Huayabamba. Para esto se usaron las cartas nacionales en formato shapefile.

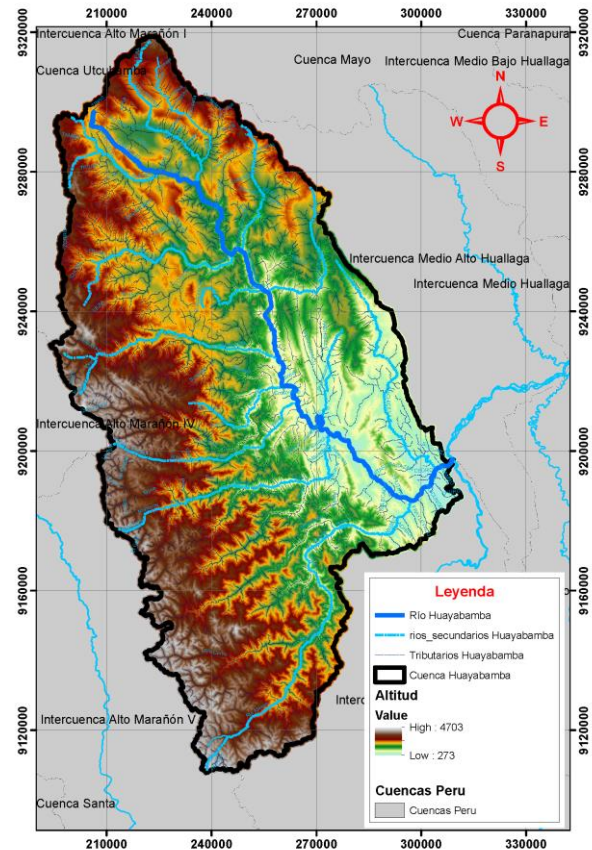


Fig.3 Distribución de altitudes en la cuenca del río Huayabamba

3.5 Instituto Geográfico Nacional (IGN)

El IGN es la institución encargada de la elaboración de la cartografía en Perú. Para la elaboración de la delimitación de la cuenca se usó las cartas nacionales en formato shapefile a una escala de 1:100000, descargadas de la página del ministerio de educación [3]. Estas cartas son: 13h, 13i, 14h, 14i, 14j, 15h, 15i, 15j, 16h, 16i, 16j y 17i, las cuales se encuentran en coordenadas WGS84, UTM - zona 18 sur.

3.6 Google Earth Engine (GEE)

Para la obtención de los datos meteorológicos de precipitación y temperaturas medias se usó la plataforma GEE, la cual es una aplicación innovadora de geomática basada en la nube que permite a los usuarios visualizar, realizar análisis geoespaciales y realizar descargas de registros climáticos recopilados por satélites que orbitan nuestro planeta.

Para acceder a esta información es necesario crear códigos en lenguaje de programación Python, así que se utilizaron los códigos creados por el Mg. Sc. Abel Carmona Arteaga [4].

La precipitación en metros y la temperatura en Kelvin, los cuales se convirtieron a milímetros y grados Celsius, respectivamente.

3.7 Autoridad Nacional del Agua (ANA)

Es una entidad que tiene el mando técnico-normativo del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos adscrito al Ministerio de Agricultura y Riego, que rige, preserva y defiende los medios hídricos de las diferentes cuencas optando por un crecimiento sostenido y responsabilidad nacional dando mediante su web los caudales promedios diarios. Para este estudio se usaron registros de caudales diarios descargados desde su página web. [5].

Para la calibración del método GR4j se usaron los registros de caudales en un periodo de tiempo entre 01/01/2005 al 30/09/2006 y para la validación entre 31/12/2019 al 22/02/2022.

3.8 ERA5

Proporciona estimaciones por hora y diaria de una gran cantidad de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. Los datos cubren la Tierra en una cuadrícula de 30 km. [6].

3.9 Modelo GR4j

Es un modelo francés que simula caudales en una escala de tiempo diaria utilizando cuatro parámetros. Este modelo ha sido utilizado como simulación secuencial de datos de humedad y caudal del suelo en modelos conceptuales de precipitación-escorrentía, obteniendo resultados muy satisfactorios, por lo que se decidió utilizarlo en el desarrollo de este artículo. En la Fig.4, se observa un esquema del algoritmo del modelo GR4j [7].

El modelo hidrológico toma la precipitación y la evapotranspiración diaria promedio dentro del área de la cuenca como valores de entrada y el caudal diario como valor de salida. Asimismo, utiliza el coeficiente de Nash-Sutcliffe como función objetivo en la fase de calibración.

En esta investigación, los valores de precipitación promedio registrados por teledetección y proporcionados en

un conjunto de climas reticulares ERA5 se calculan mediante interpolación espacial. Cabe señalar que todas las cantidades, ya sean entradas, salidas o variables internas, se expresan en mm/día, por lo que los volúmenes de agua deben dividirse por el área de la cuenca cuando sea necesario.

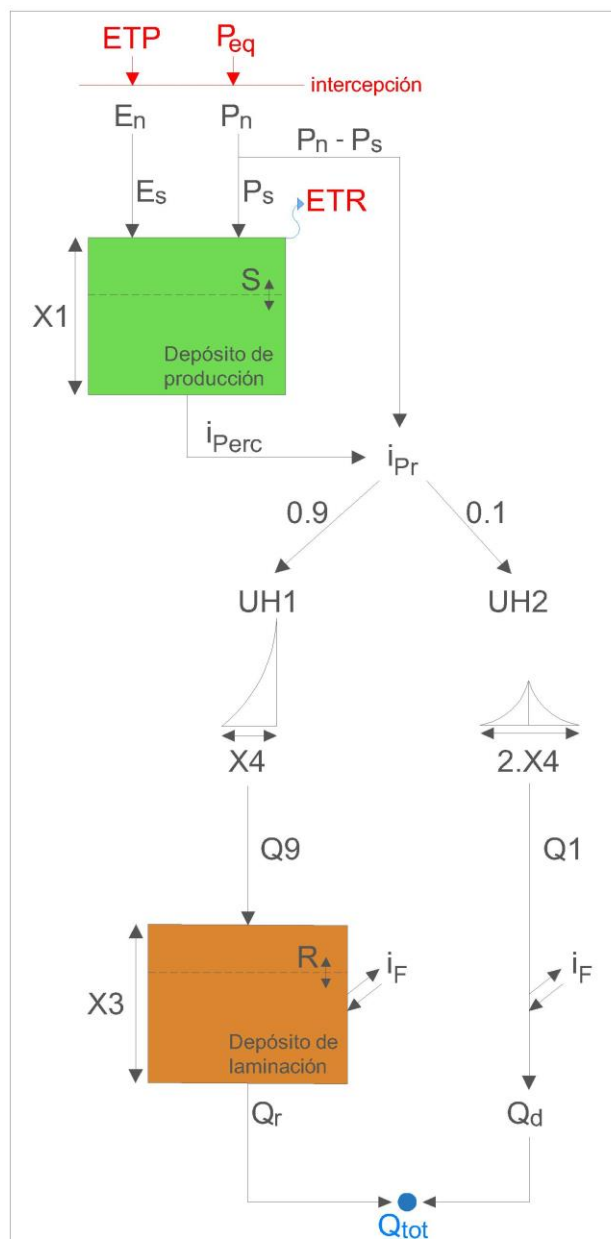


Fig. 4 Modelo de precipitación – escorrentía GR4j (Perrin et al., 2010).

3.10 Método de Malmstrom

Para estimar la evapotranspiración potencial se realizó el método Malmstrom que consiste en usar la presión de vapor a saturación (e_s), la cual está relacionada a la temperatura media. Seguidamente, se muestra la expresión:

$$ET_o = 4.09e_s \quad (1)$$

Donde e_s está expresado por la siguiente formula:

$$e_s = 6.11 * e^{\left(\frac{17.27T_m}{237.3+T_m}\right)} \quad (2)$$

3.11 Coeficiente de determinación R^2

Expresa la dependencia lineal entre dos variables. Para el estudio, se refiere a los caudales medidos y los caudales generados.

En la TABLA 1, se pueden apreciar los rangos de R^2

TABLA 1
Valores referenciales para el coeficiente de determinación
Fuente: Mirosław y Okruszko (2011)

Rango del R^2	Categoría de calidad de modelo
$0.99 \leq R^2 < 1.00$	Excelente
$0.95 \leq R^2 < 0.99$	Muy bueno
$0.90 \leq R^2 < 0.95$	Bueno
$0.85 \leq R^2 < 0.90$	Bastante bueno
$0.80 \leq R^2 < 0.85$	Promedio
$0.70 \leq R^2 < 0.80$	Satisfactorio
$R^2 < 0.70$	Insuficiente

3.12 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Es el criterio de evaluación que determina la eficiencia entre un modelo simulado y otro observado midiendo la variabilidad de las observaciones [8]. Se expresa de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3)$$

Dónde:

$Q_{sim,i}$: caudales simulados en m^3/s

Q_i : Caudales observados en m^3/s

\bar{Q} : Caudales medios observados en m^3/s

La TABLA 2 indica los valores de referencia del criterio de Nash Sutcliffe:

TABLA 2

Valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe (Molnar, 2011).

Nash	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

IV. RESULTADOS

Para desarrollar el método GR4j se empleó el Excel elaborado por Charles Perrin y Vazken Andréassian [7], el cual presenta una hoja de cálculo que se utiliza para realizar simulaciones de caudales en pasos de tiempo diarios, haciendo una mejora de un modelo global de precipitación y escorrentía a través de un enfoque comparativo. Además, los valores de los parámetros X_1, X_2, X_3, X_4 del modelo se pueden optimizar utilizando la función "Solver".

4.1 Calibración

Para el análisis de la calibración se usó el área de cuenca, la cual es 13875 km^2 , y un periodo de tiempo entre 01/01/2005 al 30/09/2006. En la TABLA 3, se observa que el valor del criterio de eficiencia obtenido es de 50.3%,

Considerando los valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe, el resultado obtenido se ubica en el rango de 0.40 a 0.60. De manera que, se interpreta que el ajuste realizado es bueno.

TABLA 3

Criterios de eficiencia (%) obtenidos en el proceso de calibración

Criterios de eficiencia (%)	
Nash (Q)	50.3
Nash (VQ)	54.6
Nash (ln(Q))	56.5
Bilan	99.8

En la TABLA 4 se observan los parámetros de X, para la calibración.

TABLA 4

Parámetros del modelo GR4j en el proceso de calibración

Parámetros	Unidad	Transf.
X_1	mm	6.92
X_2	mm	2.77
X_3	mm	4.47
X_4	días	-13.62

En la TABLA 5 también se aprecian los valores iniciales de llenado

TABLA 5

Valores iniciales para la cuenca Huayabamba en la calibración

Valores iniciales	
Tasa de llenado inicial S0/x1	0.6
Tasa de llenado inicial R0/3	0.7

En la TABLA 6 se muestran los datos hidrométricos utilizados en el proceso de calibración.

TABLA 6

Datos hidrométricos utilizados en el proceso de calibración

Precipitación media observada (mm/día)	3.435
Promedio de ETP observados (mm/día)	2.944
Caudales medios observados (mm/día)	4.589
Promedio de las raíces de los caudales observados	2.069
Logaritmo promedio de flujos observados	1.417

Una vez realizado el proceso de calibración, se obtuvieron los parámetros de ajuste del modelo, se compararon los datos de caudales medidos por el ANA y los caudales diarios estimados por el modelo GR4j. En la Fig.5, se observa que el día 25/01/2006 los caudales medidos presentan un valor más elevado que los generados por el modelo.

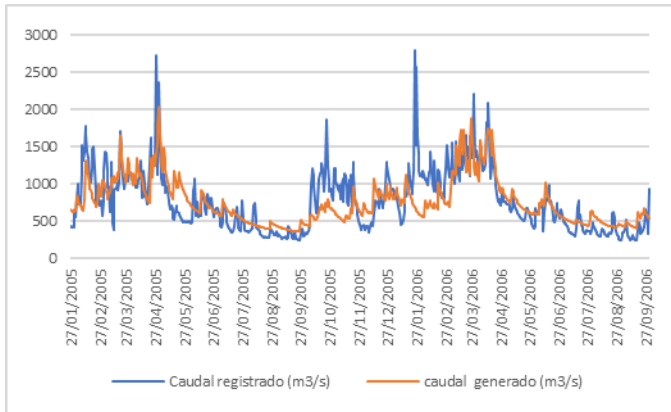


Fig. 5 Comparativa de caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados (GR4j) para la cuenca Huayabamba en el proceso de calibración entre el 01/10/2001 hasta el 30/09/2004

En la Fig.6 se muestra el coeficiente de correlación (R^2) entre los de caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados (GR4j) para la cuenca del río Huayabamba en el proceso de calibración entre 01/01/2005 al 30/09/2006.

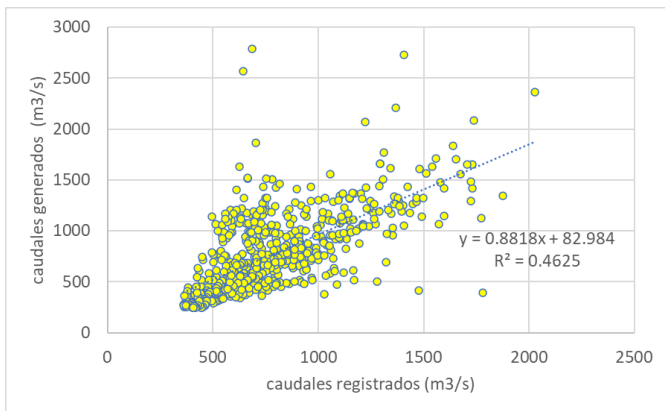


Fig. 6 Correlación del R^2 entre caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados (ERA 5) para el periodo de calibración

Considerando una línea de tendencia lineal, se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.4625.

4.2 Validación

En esta fase de análisis, se tomó el periodo entre los días 31/12/19 al 22/2/2022, diferente a la etapa de calibración, para determinar si los cálculos obtenidos mantienen una tendencia similar.

En la TABLA 7, se observa que el valor del criterio de eficiencia obtenido es de 51.5%. Considerando los valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe, el resultado obtenido se ubica en el rango de 0.40 a 0.60. De manera que, se interpreta que el ajuste realizado es bueno.

TABLA 7

Criterios de eficiencia (%) obtenidos en el proceso de validación

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	51.5
Nash(VQ)	54.1
Nash(ln(Q))	53.6
Bilan	100.2

En la TABLA 8, se observan los parámetros del método GR4j calculados para la cuenca del río Huayabamba. En la TABLA 9, se presentan los valores iniciales para la validación.

TABLA 8

Criterios de eficiencia (%) obtenidos en el proceso de validación

Parámetros	Unidad	Transf.
X_1	mm	7.15
X_2	mm	3.26
X_3	mm	5.23
X_4	días	-13.62

TABLA 9

Valores iniciales para la cuenca Huayabamba en la validación

Valores iniciales	
Tasa de llenado inicial $S0/x1$	0.6
Tasa de llenado inicial $R0/3$	0.7

Además, en la TABLA 10 se tienen los valores hidrométricos obtenidos usando el modelo de calibración de la cuenca del río Huayabamba.

TABLA 10

Datos hidrométricos utilizados en el proceso de validación

Precipitación media observada (mm/día)	3.530
Promedio de ETP observados (mm/día)	3.060
Caudales medios observados (mm/día)	4.086
Promedio de las raíces de los caudales observados	1.952
Logaritmo promedio de flujos observados	1.303

En la Fig.7 se presenta la comparativa entre los caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados (GR4j) para la cuenca Huayabamba.

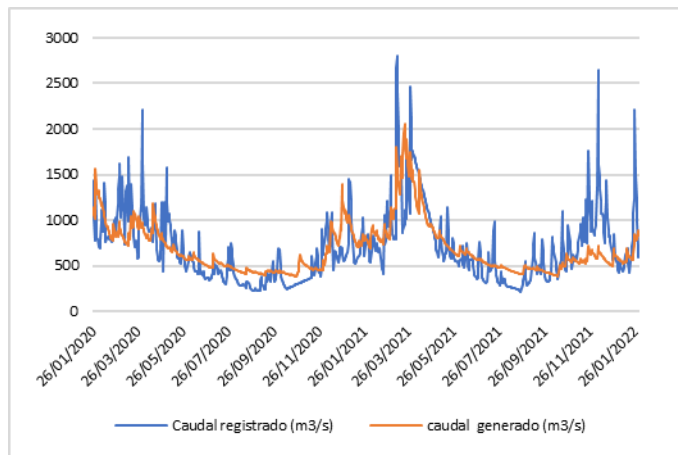


Fig. 7 Comparativa de caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados (GR4j) para la cuenca Huayabamba en el proceso de validación entre el 31/12/19 al 22/2/2022

Los caudales medidos presentan un valor más elevado los días cercanos al 7/12/2021 que los generados por el modelo GR4j.

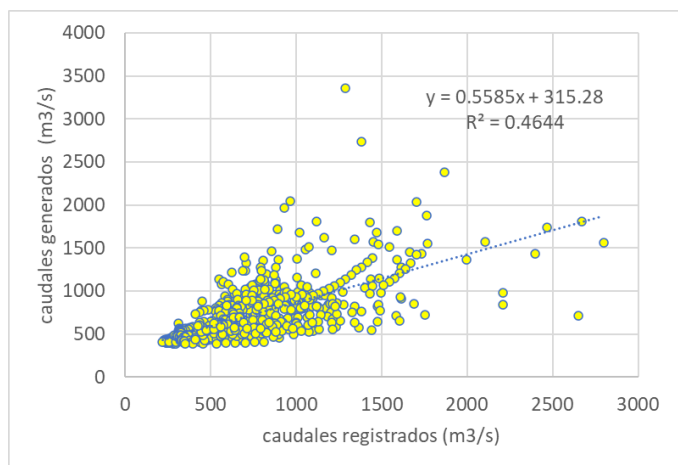


Fig. 8 Correlación del R^2 Comparativa de caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados (ERA5) para la cuenca Huayabamba en el proceso de validación entre el 31/12/19 al 22/2/2022

En la Fig.8 se presenta la comparativa de caudales estimados y medidos. Considerando una línea de tendencia lineal, se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.4644.

4.3 Extensión de caudales

Finalmente, al ser los parámetros de calibración y validación muy similares como se muestra en la TABLA 4 y TABLA 7, se usaron los parámetros de la calibración para

generar los caudales diarios en el periodo 02/01/1981 al 09/07/2020, usando el modelo de precipitación escorrentía GR4j.

Estos caudales utilizaron la información de los registros climáticos grillados de precipitación y temperatura obtenidos a través del ERA5 desde la plataforma GGE. En la Fig.9 se observa el ajuste entre los caudales generados y medidos.

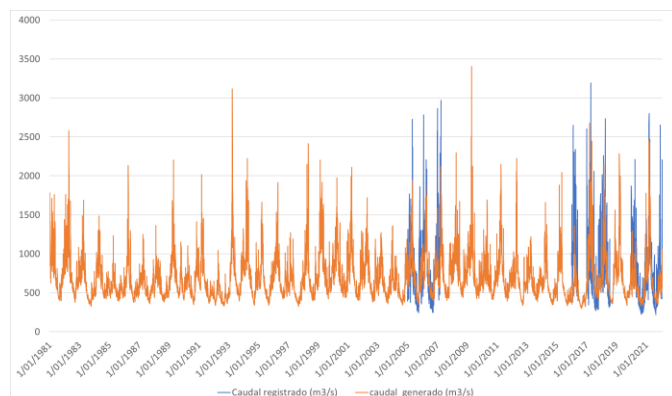


Fig. 9 Comparativa diaria de caudales medidos (ANA) y caudales generados (GR4j) para la cuenca Huayabamba en el periodo entre 02/01/1981 hasta el 09/07/2020

V. CONCLUSIONES

En síntesis, de acuerdo con el análisis de la presente investigación, se demostró un desempeño óptimo del modelo hidrológico. Por un lado, en la etapa de calibración, el valor del criterio de eficiencia de Nash fue 50.3%; y en la validación, fue de 51.5%. Considerando el rango de valores referenciales, ambos se encuentran dentro de un rango aceptable. Es decir, el modelo empleado se ajustó adecuadamente.

Asimismo, los coeficientes de correlación (R^2) son 0.4625 para la calibración y 0.4644 para la validación. El valor del criterio de Bilan en la primera etapa es 99.8% y en la siguiente es 100.2%. Estos resultados dan validez al estudio realizado.

Por otro lado, según los resultados obtenidos, se estima que ciertos caudales extremos, en un rango de 3000 m³/s a 3500 m³/s, se presentaron en la cuenca del río Huayabamba, y que en los últimos 40 años se han presentado con cierta recurrencia.

Finalmente, estos registros generados utilizando el modelo hidrológico GR4j podrán utilizarse más adelante en la elaboración de proyectos de prevención y mitigación ante futuros desbordes del río Huayabamba, y así mejorar el dimensionamiento de las obras a construir.

VI. REFERENCIAS

- [1] Andina, 2015. Río Huayabamba aumentó nivel por lluvias en zona central de Amazonas. Recuperado de <https://andina.pe/agencia/noticia-rio-huayabamba-aumento-nivel-lluvias-zona-central-amazonas-587386.aspx>
- [2] ESRI, 2023. ¿Qué es Arcgis?. Recuperado de <https://www.sigsa.info/es-mx/arcgis/about-arcgis/overview#:~:text=ArcGIS%20es%20un%20completo%20sistema,c ompartir%20y%20distribuir%20informaci%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica>
- [3] IGN, 2023. Recuperado de <https://www.gob.pe/ign>
- [4] Carmona A. (2021). Code Google Earth Engine. <https://code.earthengine.google.com/ce29e6d1d05079dfac0063043b3be4c5>
- [5] ANA, 2023. Recuperado de <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/>
- [6] ERA5, 2018. ECMWF/ERA5/DAILY. Recuperado https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_DAILY
- [7] INRAE, 2023. Modèle du “Génie Rural à 4 paramètres Journalier . Recuperado de <https://webgr.inrae.fr/en/models/daily-hydrological-model-gr4j/description-of-the-gr4j-model/>
- [8] Carmona, A. 2019. Tendencias, validación y generación de caudales usando la data grillada para cuecas del río Biabo. *Escuela de Posgrado. Universidad Nacional Agraria*. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4214>