





Daily flow generation using the GR4j model and ERA5 gridded climatic information in the Jequetepeque basin up to the Yonan station

Ticona-Flores Mario Antonio¹, Valarezo-Loaiza Jorge Dionicio², 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, N00233233@upn.pe, N00235893@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe, edmundo.vereau@upn.edu.pe

Abstract– Given the absence of hydrometeorological records in the Jequetepeque basin, the present study aims to generate the daily flow rates in the main channel of the river up to the Yonan station based on the gridded data of ERA5 and the French model of precipitation-runoff GR4j. This work will serve to be able to evaluate, using hydraulic models, the overflow of the Jequetepeque river and to be able to calculate the flows of maximum avenues. For this work, it is planned to carry out a calibration, validation and extension of the hydrometric records on a daily basis between the years 1979-2020.

Keywords– Jequetepeque Basin, Yonan, 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 diarios utilizando el modelo GR4j y la información climática grillada ERA5 en la cuenca de Jequetepeque hasta la estación Yonán

Ticona-Flores Mario Antonio¹, Valarezo-Loaiza Jorge Dionicio², 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, N00233233@upn.pe, N00235893@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe, edmundo.vereau@upn.edu.pe

Resumen- Ante la ausencia de registros hidrometeorológicos en la cuenca Jequetepeque el presente estudio tiene como objetivo generar los caudales a paso diarios en el cauce principal del río hasta la estación Yonán en base a los datos grillados del ERA5 y el modelo francés de precipitación escorrentía GR4j. Este trabajo servirá para poder evaluar, usando modelos hidráulicos, el desborde del río Jequetepeque y poder calcular los caudales de máximas avenidas. Para este trabajo, se ha previsto realizar una calibración, validación y extensión de los registros hidrométricos a paso diario entre los años 1979-2020.

Palabras claves-- Cuenca Jequetepeque, Yonán, GR4j, ERA5, Caudales diarios

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, en el Perú se están realizando diferentes proyectos que necesitan de una evaluación hidrológica como en los siguientes trabajos: construcción de represas, desarrollo de obras para el control de inundaciones, agricultura, etc. La ausencia de la ejecución de estos proyectos siempre se ha debido a que durante mucho tiempo no se han realizado mediciones de caudales en los ríos de diversas localidades del país.

Actualmente, instituciones como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) junto al Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (SENAMHI), se encuentran realizando mediciones de registros hidrométricos a nivel diario en muchas cuencas. Lamentablemente, como se sabe en los estudios hidrológicos no hay suficientes datos hidrométricos de corta data, sobre todo aquellos referidos a obras del control de inundaciones.

A causa de la ausencia de registros hidrométricos, en estos últimos años, se está usando cada vez más modelos de precipitación-escorrentía para poder simular series de caudales. Un ejemplo de esta problemática es lo ocurrido en la cuenca Jequetepeque, la cual ha sido vulnerable por las intensas lluvias provocando el desborde de su cauce principal al no contar con una buena distribución de registros meteorológicos e hidrométricos [1].

II. OBJETIVO

Es por esta razón que en esta investigación se ha previsto usar el producto grillado climático de la base satelital ERA5 y el modelo francés de precipitación escorrentía GR4j para poder

calibrar, validar y reconstruir el registro hidrométrico hasta la estación Yonán para los años 1979 – 2020 la cual podrá ser usada más adelante para futuros proyectos.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Ubicación de la Cuenca

La cuenca del río Jequetepeque posee una extensión de 3935 km² según el “Estudio de Delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú”, y pertenece a la costa norte del Perú. Su ubicación geográfica está entre las coordenadas 6°48' y 7°26' S con 78°20' y 79°35' W, además se encuentra ubicada políticamente en cuatro provincias del departamento de Cajamarca: Cajamarca, Contumaza, San Miguel y San Pablo, y en dos provincias de La Libertad: Chepén y Pacasmayo [2].

3.2 Datos morfológicos de la cuenca y meteorológica

Como se ve en la Fig. 1, la Cuenca Jequetepeque hasta su estación hidrométrica de Yonán tiene un área de 3307.59 km²; En la Fig. 2, podemos apreciar también la distribución de sus principales subcuencas usando como punto guía la estación Yonán; en la Fig. 3, se puede también apreciar la distribución de las elevaciones las cuales se encuentran entre 25msnm y 4200msnm y la Fig. 4, se puede apreciar la densidad de centros poblados dentro de la cuenca y la clasificación de pendientes en grados del terreno.

3.3 Instituto Geográfico Nacional del Perú (IGN)

Para la elaboración de estos gráficos se usó las cartas nacionales a una escala de 1:100 000 las cuales son: 14e, 14f, 15d, 15e, 15f, 15g; Estas sirvieron para realizar la delimitación de la cuenca [3].

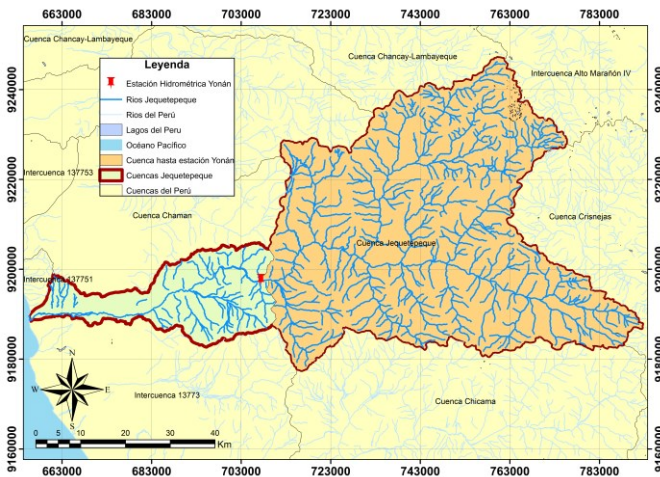


Fig. 1 Cuenca Jequetepeque completa y hasta la estación hidrométrica Yonán.

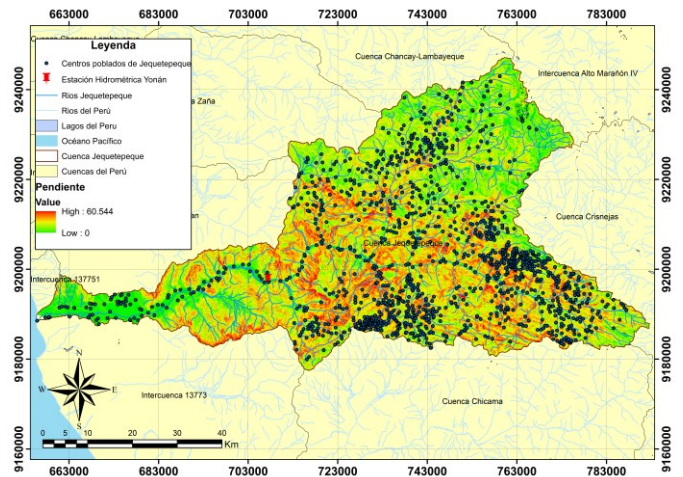


Fig. 4 Mapa de pendientes y ubicación de centros poblados en la cuenca del río Jequetepeque

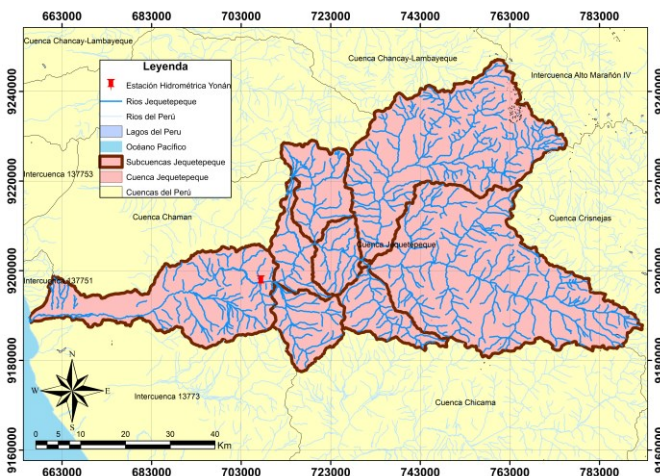


Fig. 2 Delimitación de las principales subcuencas del río Jequetepeque

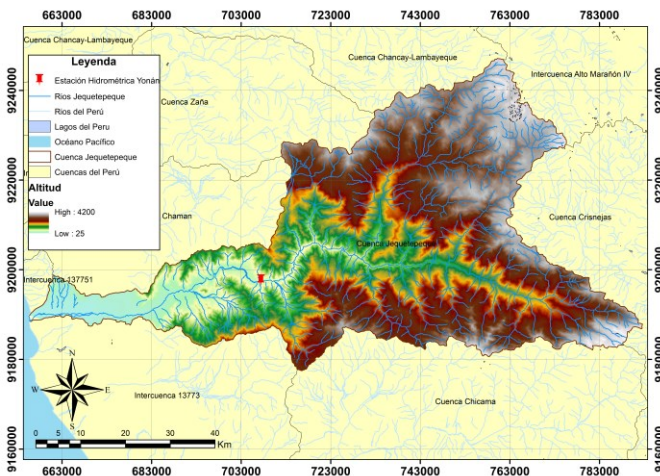


Fig. 3 Distribución de elevaciones en la cuenca del río Jequetepeque

3.4 Google Earth Engine (GEE)

Para la obtención de los datos meteorológicos como la precipitación y temperatura promedio en la cuenca, se usó la plataforma (GEE), la cual es una herramienta innovadora de geomática basada en la nube que permite a los usuarios visualizar, descargar datos climáticos satelitales y realizar análisis geoespaciales usando procesamientos de imágenes multispectrales y registros climáticos recopilados por satélites que orbitan nuestro planeta [4].

Por medio de esta plataforma, se extrajeron datos climáticos grillados usando el script suministrado por el Mg. Sc. Abel Carmona Arteaga (link del script: <https://code.earthengine.google.com/83fce4f6cb32202e561e815f12111367>) con lo cual se obtuvieron la precipitación en metros y la temperatura en grados Kelvin, los cuales se convirtieron a milímetros y grados Celsius, respectivamente.

3.5 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 dándonos mediante su web los caudales promedios diarios [5]. Destacamos que para el uso del método GR4j se usaron los registros de caudales diarios entre los días 01/10/2001 al 30/09/2004 para la calibración y 01/01/2005 al 31/12/2007 para la validación.

3.6 ERA5

Es el último reanálisis climático producido por ECMWF, 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].

IV. METODOLOGÍA

4.1 Modelo GR4j

Es un modelo que simula el proceso precipitación-escorrentía 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 [7], por lo que se decidió utilizarlo en el desarrollo de este artículo. En la Fig. 5 podemos apreciar el algoritmo del modelo GR4j.

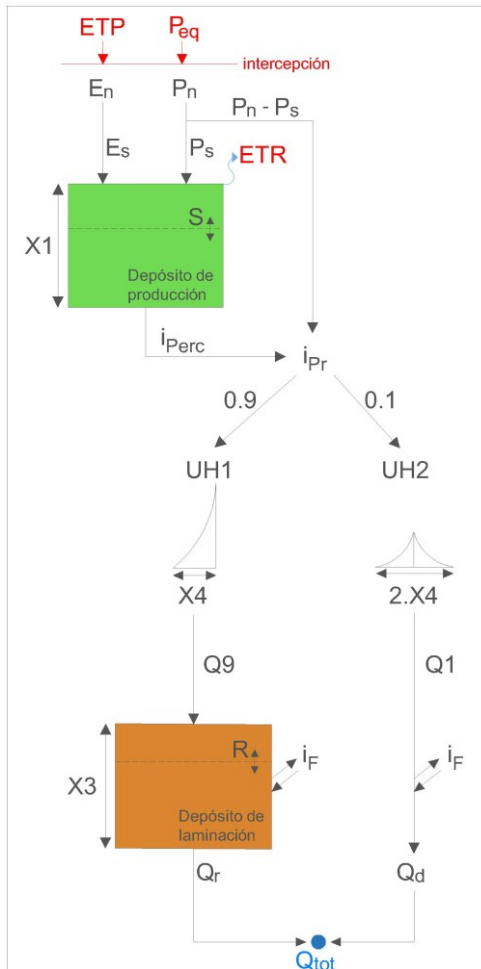


Fig. 5 GR4j modelo hidrológico (Perrin et al., 2010) [8].

El modelo GR4j toma la precipitación y la evapotranspiración diaria promedio dentro del área de la cuenca como entrada y el caudal diario como salida. Asimismo, utiliza el coeficiente de Nash - Sutcliffe como función objetivo en la fase de calibración. En el modelo GR4j, la precipitación y la evapotranspiración potencial se expresan como y respectivamente (Rincón, 2019) [9].

Para nuestro caso, 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.

4.2 Método de Malmstrom

Para poder estimar la evapotranspiración potencial se usó el método Malmstrom, este usa la presión de vapor a saturación (e_s), la cual está relacionada a la temperatura media [10]. Seguidamente, se muestra la siguiente expresión:

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

Donde e_s está dada por:

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

4.3 Coeficiente de determinación R^2

El coeficiente de determinación (R^2) expresa la predicción del resultado de una hipótesis entre dos variables que varía entre 0 y 1; para este estudio, nos referimos a los caudales medidos y los caudales generados [10].

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) [11]

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

4.4 Coeficiente de determinación Nash - Sutcliffe

Es un criterio de ajuste de acuerdo con el valor referencial y de acuerdo con sus variables. Este puede ir cambiando parámetros en el modelo para que los resultados generados se parezcan a los observados, dando así una optimización al

modelo. Este criterio va desde un menos infinito a uno, que según valores referenciales presenta un ajuste u otro [11].

Criterio de evaluación que determina la eficiencia entre un modelo simulado y otro observado midiendo la variabilidad de las observaciones [12]. 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 m³/s

Q_i : Caudales observados en m³/s

\bar{Q} : Caudales medios observados en m³/s

La Tabla 2, indica los valores de referencia del criterio de Nash:

TABLA 2

Valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe (Molnar, 2011). [12]

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

V. RESULTADOS

Para proceder a desarrollar el método GR4j se empleó el Excel de Charles Perrin y Vazken Andréassian, 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 X₁, X₂, X₃, X₄ del modelo se pueden optimizar utilizando la función "Solver".

5.1 Calibración

Para el análisis de la cuenca Jequetepeque se tomó un punto guía siendo esta la estación Yonán, esta subcuenca posee un área de 3307.59 km². Para la simulación de caudales en el proceso de calibración se tomó un periodo de 3 años entre el 01/10/2001 y el 30/09/2004.

Al comparar los resultados de los de los caudales generados y los registrados, el criterio de Nash – Sutcliffe nos da un valor de 76%, ubicándose así en el rango de 0.6 – 0.80 interpretándose que el ajuste realizado es muy bueno.

TABLA 3

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

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	76
Nash(VQ)	79
Nash(ln(Q))	76
Bilan	104.7

En la Tabla 4 se pueden ver los parámetros de X, para la calibración.

TABLA 4

Parámetros del modelo GR4j en el proceso de calibración

Parámetros	Unidad	Transf.
X ₁	mm	6.52
X ₂	mm	-5.09
X ₃	mm	5.83
X ₄	días	-13.62

En la Tabla 5 también podemos apreciar los valores iniciales de llenado

TABLA 5

Valores iniciales para la subcuenca de la estación Yonán

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

En la Tabla 6, también podemos apreciar los datos hidrométricos utilizados en el proceso de calibración.

TABLA 6

Datos hidrométricos utilizados en el proceso de calibración

Precipitación media observada (mm/día)	5.709
Promedio de ETP observados (mm/día)	2.410
Caudales medios observados (mm/día)	0.651
Promedio de las raíces de los caudales observados	0.660
Logaritmo promedio de flujos observados	-1.194

Una vez que se realizó el proceso de calibración y se obtuvieron los parámetros de ajuste del modelo, se realizó una comparativa de los datos de caudales medidos por el ANA y los caudales diarios generados por el ERA5, el 09/04/2002 los caudales cuantificados por el ANA presentan un pico más elevado que los proyectados por el modelo del ERA5, presentándose así un criterio de eficiencia del 76%. En general los periodos de calibración del 01/10/2001 al 30/09/2004 son óptimos, reflejándose en la similitud que se grafica en la comparativa de curvas. Esto podemos verlo en la Fig. 6.

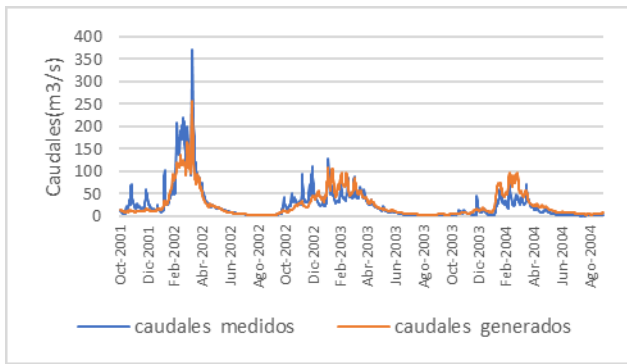


Fig. 6 Comparativa entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en el proceso de calibración

Analizando estos datos se puede lograr estimar de manera óptima los caudales diarios, ya que al generar una comparativa de los caudales diarios generados con el GR4j, proyectando de manera polinómica se obtiene un coeficiente de correlación (R^2) igual a 0.7952. Este valor se encuentra cerca de 1, interpretándose que este modelado generado de caudales diarios en el periodo calibrado presenta una buena afinidad.

En la Fig. 7, se puede observar la Correlación del R^2 comparativa de caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados para la cuenca Jequetepeque hasta la estación Yonán en el proceso de calibración entre 01/10/2001 hasta el 30/09/2004.

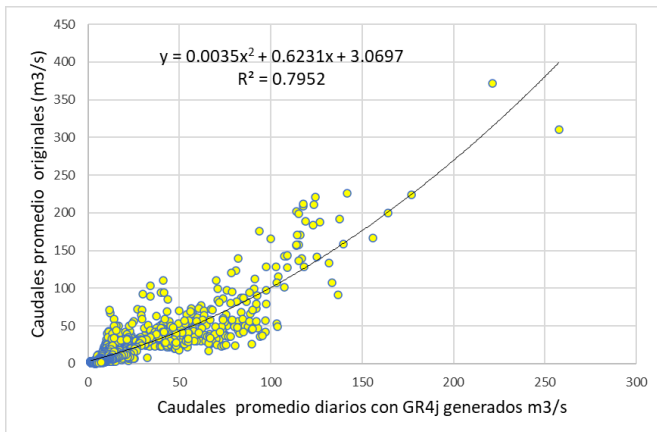


Fig. 7 Correlación del R^2 entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en el proceso de calibración

5.2 Validación.

En esta etapa de análisis, para la simulación de caudales en el proceso de validación se tomó un periodo de 3 años entre el 01/01/2005 y el 31/12/2007, siendo estos diferente a los periodos de calibración para determinar si los cálculos obtenidos en esta siguen una tendencia similar.

Al comparar los resultados de los de los caudales generados y los registrados, el criterio de Criterio de Nash – Sutcliffe nos da un valor de 82.5%, ubicándose así en el rango

mayor a 0.80 interpretándose que el ajuste realizado es muy bueno.

TABLA 7
Criterios de eficiencia (%) obtenidos en el proceso de validación

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	82.5
Nash(VQ)	83.9
Nash(ln(Q))	79.9
Bilan	106.8

En la Tabla 8, se observan los parámetros del método GR4j calculados para la subcuenca de la estación Yonán y en la Tabla 9 los valores iniciales para la calibración.

TABLA 8
Criterios de eficiencia (%) obtenidos en el proceso de validación

Parámetros	Unidad	Transf.
X_1	mm	6.53
X_2	mm	-5.21
X_3	mm	6.13
X_4	días	-13.62

TABLA 9
Valores iniciales para la subcuenca de la estación Yonán

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 Jequetepeque hasta el punto de guía.

TABLA 10
datos hidrométricos utilizados en el proceso de validación

Precipitación media observada (mm/día)	5.762
Promedio de ETP observados (mm/día)	2.389
Caudales medios observados (mm/día)	0.747
Promedio de las raíces de los caudales observados	0.679
Logaritmo promedio de flujos observados	-1.183

En la Fig. 8, se puede apreciar la comparativa entre los caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados (ERA5) para la cuenca Jequetepeque hasta la estación Yonán.

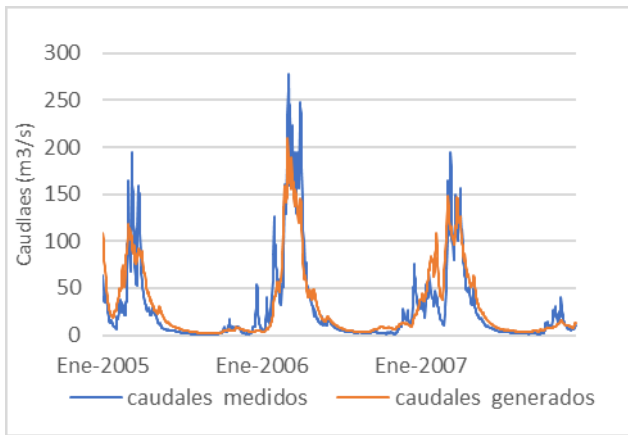


Fig. 8 Comparativa entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en el proceso de validación

En esta comparativa de caudales estimados y medidos se pudo corroborar que el modelo utilizado se ajustó correctamente a una ecuación de 2 do orden, ya que con una proyección polinómica el $R^2=0.8254$ (coeficiente de correlación) se acerca al 1. Esto demostraría que en la subcuenca de la estación Yonán la calibración en los periodos diarios tomados existe una buena reciprocidad, pudiéndose así tener una estimación de los caudales. Esto podemos verlo en la Fig. 9.

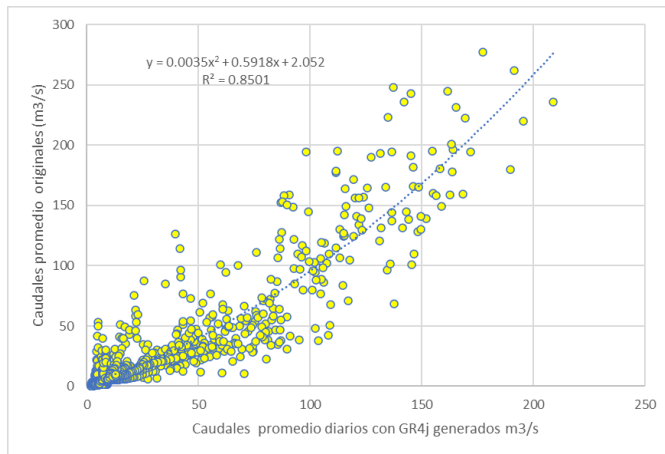


Fig. 9 Correlación del R^2 entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en el proceso de validación

5.3 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 poder generar los caudales diarios en el periodo 02/01/1979 al 09/07/2020, usando el modelo de precipitación escorrentía GR4j.

Estos caudales fueron usando la información de los registros climáticos grillados de precipitación y temperatura obtenidos a través del ERA5 desde la plataforma GEE. En la Fig. 10, se pueden apreciar el buen ajuste entre los caudales generados y medidos.

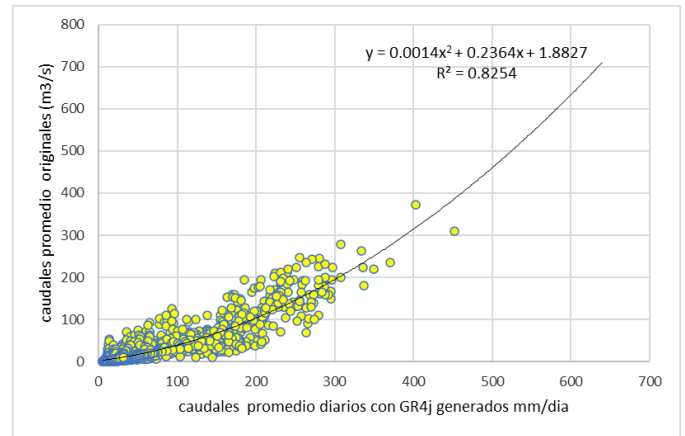


Fig. 10 Correlación del R^2 entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en todo el periodo de análisis

Para un mejor ajuste se realizó un reajuste con una ecuación polinómica de segundo orden, con ello se puede apreciar una mejor aproximación a los resultados de los datos generados, esto se puede apreciar en la Fig. 11.

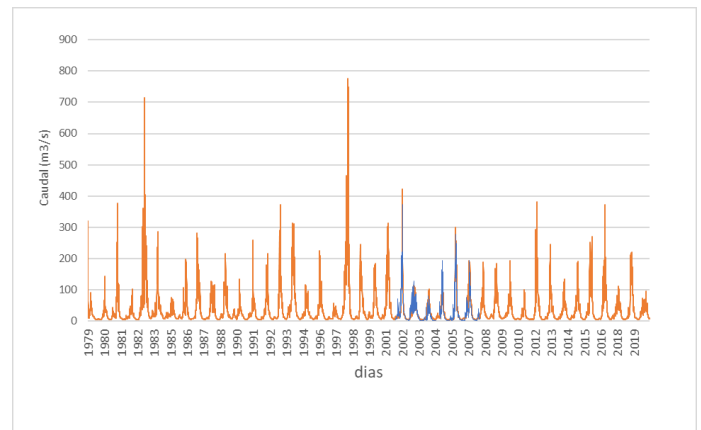


Fig. 11 Comparativa diaria de caudales medidos (ANA) y caudales generados (ERA5) para la cuenca Jequetepeque hasta la estación Yonán en el periodo entre 02/01/1979 hasta el 09/07/2020

VI. CONCLUSIONES

En síntesis, de acuerdo con el análisis exhaustivo de la presente investigación se pudieron obtener coeficientes R^2 satisfactorios para el periodo de calibración y validación entre los caudales generados con la información climática del ERA5 y la información que brinda la Autoridad Nacional del Agua (ANA) para la estación hidrométrica Yonán, estos coeficientes están en rango de 76 y 82% respectivamente.

Esto da gran validez a al estudio, y según los resultados podemos indicar algunos caudales extremos que se pudieron haber presentado en la cuenca Jequetepeque entre los $700\text{m}^3/\text{s}$ a $800\text{m}^3/\text{s}$, los cuales nos podrían indicar la magnitud del

caudal que vino durante el fenómeno del niño en los años 1982-1983 y 1997-1998.

Estos registros generados podrán ser consultados más adelante para poder elaborar proyectos de prevención ante futuros desbordes en el río Jequetepeque.

VII. REFERENCIAS

- [1] MINSA, 2019, Situación actual de la Cuenca del río Jequetepeque. Recuperado de <http://www.minsa.gob.pe/digerd/images/gestor/coe/1176.PDF>
- [2] A. N. d. Agua, «Evaluación de recursos hídricos cuenca del río Jequetepeque,» Autoridad Nacional del Agua, 2015.
- [3] Instituto Geográfico Nacional - Infraestructura de Datos Geoespaciales Fundamentales. <https://www.idep.gob.pe/>
- [4] G. A. & M. J.-F. Perilla, "Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube ", Investigaciones geográficas, 2020.
- [5] La Autoridad Nacional del Agua | Drupal. Autoridad Nacional del Agua - ANA. <https://www.ana.gob.pe/contenido/la-autoridad-nacional-del-agua>
- [6] *Datos de ERA5 | Cloud Storage.* (2022, November 6). Google Cloud. <https://cloud.google.com/storage/docs/public-datasets/era5?hl=es-419>
- [7] Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- [8] Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V.: Improvement of a ' parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279(1), 275–289 (2003).
- [9] Rincon Achury, L. V. Aplicación de los modelos lluvia-escorrenia GR2m y GR4j en la cuenca del Río Gualí para la gestión de los recursos hídricos. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16704/2019laurarinc%C3%B3n.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- [10] Carmona Arteaga, A. (2019). Tendencias, validación y generación de caudales usando la data grillada pisco para las cuencas del río Biabo. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4214>
- [11] Mirosław-Swiatek, D., & Okruszko, T. (2011). *Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment.* Springer.
- [12] Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.