

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-05-07

Artículos

Simulación estocástica de la operación del reservorio Gallito Ciego, región Cajamarca, Perú

Stochastic simulation of the Gallito Ciego reservoir operation, Cajamarca region, Peru

Pedro Gálvez¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2182-2312>

Eduardo Chávarri-Velarde², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8445-8996>

¹Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM)-Escuela de Posgrado-Programa de Maestría en Recursos Hídricos, Lima, Perú, 20141558@lamolina.edu.pe

²Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM)-Escuela de Posgrado-Programa de Maestría en Recursos Hídricos, Lima, Perú, echavarri@lamolina.edu.pe

Autor para correspondencia: Pedro Gálvez, 20141558@lamolina.edu.pe

Resumen

Se construyó la represa Gallito Ciego en la zona norte del Perú que sirve de almacenamiento de agua para generar energía hidroeléctrica, abastecer de riego a los valles Jequetepeque-Zaña y controlar las



inundaciones mediante regulaciones. Por esto, se propuso reglas de operación para mejora de la gestión de entrega de agua a la "Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Menor Jequetepeque Clase A" para satisfacer la demanda agrícola, poblacional y primaria, mediante evaluación del comportamiento del embalse por medio de múltiples escenarios simulados. Se evaluó y utilizó un modelo estocástico del tipo SARIMA para aproximación a los caudales de ingreso más un modelo del tipo IGARCH, siguiendo la metodología Box-Jenkins para identificar, estimar, validar y pronosticar la serie simulada. Directivas de operación fueron obtenidas a través de ocho escenarios simulados mediante el *software Hec-ResSim* para saciar demandas máximas y mínimas, y controlar la operación del sistema para evitar descargas innecesarias y preservar la infraestructura de la presa.

Palabras clave: presa, riego, central hidroeléctrica, plan de lucha contra las inundaciones, gestión de los recursos hídricos, modelo matemático, SARIMA, IGARCH, Box-Jenkins, *Hec-ResSim*, análisis estadístico, Perú.

Abstract

The Gallito Ciego dam was built in the northern part of Peru, which serves as water storage to generate hydroelectric energy, supply irrigation to the Jequetepeque – Zaña valleys, and control floods through regulations. For this reason, operating rules were proposed to improve water delivery management to the "Jequetepeque Class A Minor Hydraulic Sector User Board" to satisfy agricultural, population and primary demand, by evaluating the behavior of the reservoir through multiple simulated scenarios. A stochastic model of the SARIMA type was evaluated and used to approximate the inflow flows plus an IGARCH type model, following the

Box-Jenkins methodology to identify, estimate, validate and forecast the simulated series. Operation directives through eight simulated scenarios using the Hec-ResSim software to satisfy maximum and minimum demands, and control operation of the system to avoid unnecessary discharges and preserve the dam's infrastructure.

Keywords: dams, irrigation, hydroelectric power stations, flood control, water resources management, mathematical models, SARIMA, IGARCH, Box-Jenkins, Hec-ResSim, statistical analysis, Peru.

Recibido: 05/06/2025

Aceptado: 09/12/2025

Publicado *ahead of print*: 09/02/2026

Versión final: 01/09/2026

Introducción

La represa Gallito Ciego es uno de los más importantes embalses ubicados al norte del Perú. Su función principal es el abastecer hídrico para el sector agrícola. Beneficia a las regiones de Cajamarca, La Libertad y Lambayeque. Por su volumen (434 hm^3), guía el suministro apropiado de agua de manera regulada según los requerimientos de los valles Jequetepeque y Zaña. En ese punto, el impulso es generar en tiempo real el control y manejo de volúmenes frente a distintos escenarios de operación en su gestión para evitar el consumo absurdo de agua regulada en riego, población y primario, y avalar la seguridad y firmeza de la presa Gallito Ciego con todos sus accesorios.

Como antecedente de la investigación, se tiene a Sialer-Díaz (2014), quien elaboró un plan de optimización del caudal mediante modelos estocásticos utilizando el *software SPSS* para la ampliación hidroenergética del reservorio Gallito Ciego. Posteriormente, Janampa-Vallejo y Quispe-Palomino (2021) realizaron una evaluación del desempeño y las políticas de operación del reservorio Gallito Ciego. Para esto se usó el *software Hec-ResSim*, y se consideró información de entrada y salida al embalse a escala diaria; su evaluación fue solo con base en un intervalo de tiempo histórico dado, donde se clasificó en años para diferentes condiciones (húmedos, normales y secos). Luego, para satisfacer las demandas de agua de los diferentes usuarios, se evaluó utilizando indicadores de confiabilidad.

Ndiritu *et al.* (2017) describen una evaluación del comportamiento histórico de la presa Hluhluwe y el desarrollo de sus condiciones operativas en la que se consideraron múltiples niveles de confiabilidad para satisfacer las demandas municipales y de riego, y la variabilidad interanual e interdecenal del clima y afluencias a la presa en el sur del África, teniendo como objetivo a través de dicha evaluación desarrollar reglas integrales de operación para la presa.

En esta investigación se aproximó un modelo SARIMA-IGARCH con presencia de heterocedasticidad condicional en su varianza residual a los caudales diarios de entrada al reservorio, utilizando *EViews 14 University Edition* (IHS Global Inc.). Su objetivo fue —mediante la respuesta de este— evaluar el comportamiento del embalse proponiendo reglas de operación para el mejor abastecimiento de las distintas demandas de agua y, obtener la máxima descarga simulada por vertedero y válvulas

utilizando *HEC-ResSim Version 3.3* (U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2021).

Sitio de estudio

Se propusieron órdenes de operación con información del reservorio Gallito Ciego, ubicado en la región de Cajamarca y cuyas aguas desembocan en la costa norte de Perú. El proyecto, ubicado geográficamente en la cuenca del río Jequetepeque, posee una superficie de 3 956 km², que desemboca al Pacífico (Minagri, 2015). Limita por el norte con la cuenca de los ríos Chancay y Zaña-Lambayeque; por el este, con la cuenca de los ríos Llaucano y Cajamarca; por el sur, con la cuenca del río Chicama, y por el oeste con el océano Pacífico (Figura 1) (Jiménez-Motta, 2019).

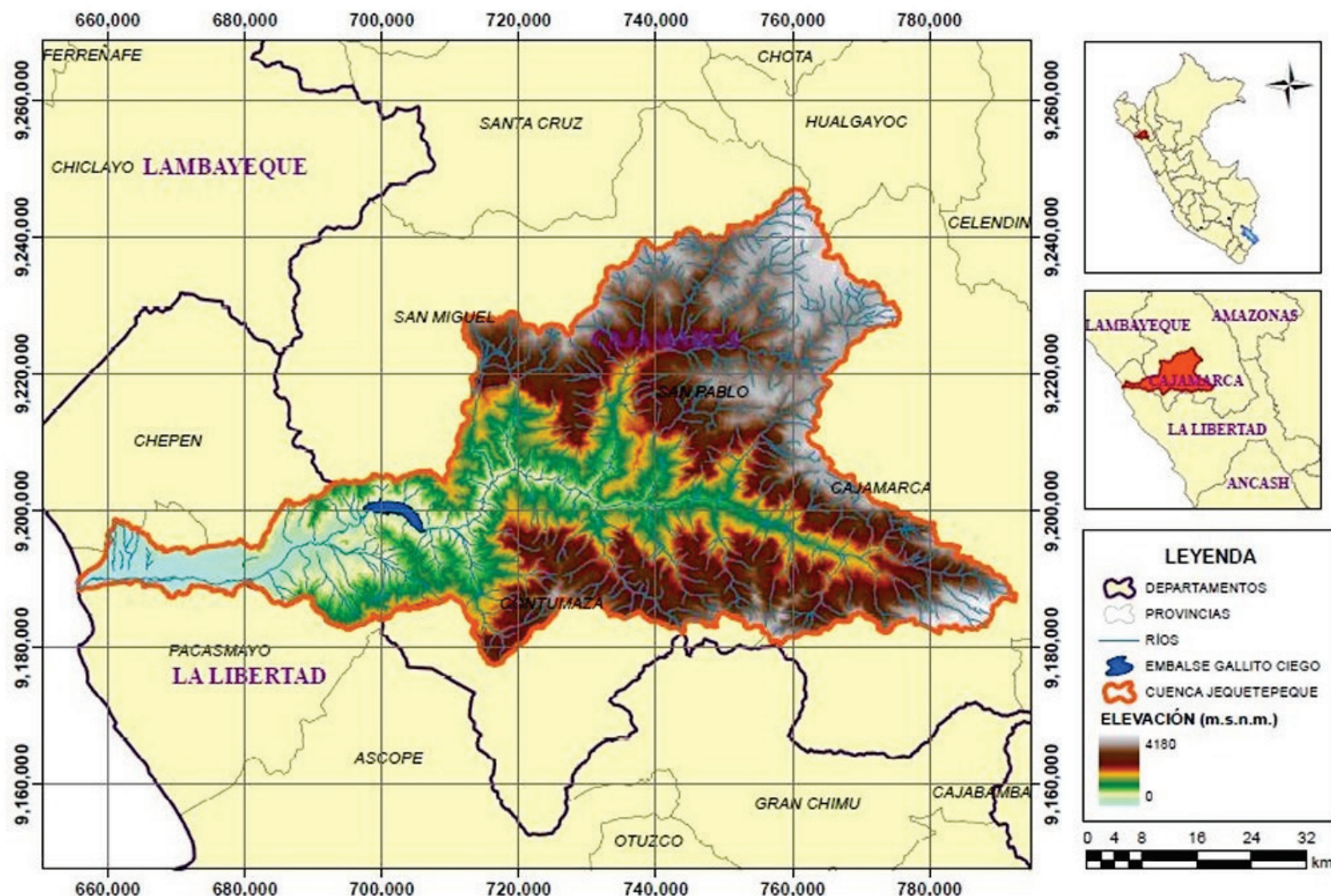


Figura 1. Cuenca del río Jequetepeque, ubicación política y geográfica.

Fuente: Jiménez-Motta (2019).

La altura de la presa es de 105 m y almacena un volumen a un nivel máximo óptimo (NAMO: 404 m.s.n.m.) en más de 434 hm³. Tiene un volumen útil de 366 hm³ y un volumen muerto de 68 hm³ al nivel altitud mínimo óptimo (NAMINO: 361 m.s.n.m.) (Aponte-Rosales, 2018). Con una curva gasto del aliviadero de demasías al nivel de altitud máximo

equivalente (NAME: 410.3 m.s.n.m.) descarga 1 531 m³s⁻¹ (Jiménez-Motta, 2019) y, finalmente el nivel de corona es de 413 m.s.n.m. Tiene dos descargas, la primera está a 315 m.s.n.m., con una sección de 1.2 m x 1.2 m (obstruida por sedimento), la segunda tiene sección de 4.2 m x 5.8 m a 336.7 m.s.n.m. Mediante esta, se conecta a un túnel de aducción, que es una extensión para la central hidroeléctrica comprendida por dos turbinas tipo Francis. La capacidad máxima turbinada es de 20 m³s⁻¹ por cada una. También posee válvulas Howell-Bunger, con capacidad máxima de 70 m³s⁻¹ cada una (140 m³s⁻¹) (Aponte-Rosales, 2018).

Las operaciones contemplan la regulación de los recursos hídricos del río Jequetepeque para el suministro de agua a los usuarios y que se utilice volumen hasta un nivel de altitud mínimo de 350 m.s.n.m. (NAMIN) (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI] & Proyecto Especial Jequetepeque-Zaña [PEJEZA], 2023). La prioridad es el abastecer agrícola que recibe del río Jequetepeque para más de 42 000 ha (Sialer-Díaz, 2014); su función secundaria es proveer energía eléctrica mediante las turbinas para el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (Statkraft Perú, S. A., 2016). Sialer-Díaz (2014) señaló que la central hidroeléctrica tiene capacidad máxima energética de 34 MW, y Rodríguez y Marciano (2022) señalaron que el embalse Gallito Ciego cuenta con una minicentral hidroeléctrica al pie de esta, que maneja una turbina del tipo Michell Banki que brinda energía al campamento del personal con una potencia nominal de 220 KW.

Materiales y métodos

Se aproximó un modelo a los caudales de ingreso al embalse con el propósito de generar diversos escenarios posibles de manera estocástica. Scheidereiter y Faure (2022: 34) exponen que:

"... para establecer un modelo, que explique la estructura del proceso estocástico del cual proviene una serie temporal, es necesario explicar el valor que toma una variable aleatoria que muestra dependencia temporal en un momento t . Para ello, es preciso examinar el comportamiento del pasado de la variable y explorar los patrones de regularidad a lo largo de su evolución".

Amaris *et al.* (2017: 90) expresan que:

"... se destaca el modelo ARIMA por su simplicidad y practicidad en la modelación y pronóstico. Este modelo es considerado el enfoque más implementado en hidrología y estudios relacionados con variabilidad climática debido a que considera registros de datos no estacionarios (con tendencia). El modelo ARIMA consiste en la combinación de un término autorregresivo (AR) y un término de promedio móvil (MA) con un elemento diferenciador dado por la letra I".

Patrones para emular considerados como regulares son la tendencia y la estacionalidad de la variable, que en el caso hidrológico se presentan por lo general en escalas mensuales y/o diarias. Por otra parte, la heterocedasticidad condicional se trata en variables econométricas, en donde investiga la volatilidad de las series temporales. En la hidrología también se presenta este problema conforme se va atomizando la escala de la variable. De Arce (1998: 3) dice:

"... la clave de estos modelos (familia ARCH) está en considerar la información pasada de la variable y su volatilidad observada como un factor altamente explicativo de su comportamiento presente y, por extensión lógica, de su futuro predecible".

La simulación del embalse de Gallito Ciego usó el *software Hec-ResSim*. Janampa-Vallejo y Quispe-Palomino (2021: 42) señalan que:

"... este *software* es un modelo de simulación en el cual representa el comportamiento del sistema de embalse a través de cálculos hidráulicos gracias a las estructuras de control que se posee y del aporte hidrológico de la cuenca a través del cauce del río. Este *software* se enfoca en modelar la operación de reservorios, simula operaciones de embalses para manejos de inundaciones, aumento de caudal y suministro de agua para estudios de planificación y soporte de decisiones en tiempo real".

Se analizaron dos estaciones hidrométricas: "Yonán" y "Canal de descargas E-02". La primera tiene información de ingreso de caudales al embalse y se usó para la aproximación al modelo estocástico; la segunda tiene caudales de salida del embalse y se utilizó para la validación del comportamiento hidráulico dicha estructura. Se contó con información de demanda (agrícola, población y primaria) para el abastecimiento de los 15 subsectores hidráulicos, que comprende desde el 1º de septiembre de 2018 hasta el 31 de julio de 2021. Se incluyó también información de evaporación total mensual de la estación meteorológica "Monte grande". Finalmente, se evaluó el embalse con batimetría correspondiente al año 2017. Toda la información fue llevada a cabo por PEJEZA (Proyecto Especial Jequetepeque y Zaña).

La serie temporal de caudales de ingreso son de alta frecuencia por tener las siguientes características: no hay media constante a lo largo del tiempo considerado, muestra un componente estacional (intervalos de 365 días) y un componente aleatorio que se alinea al componente estacional (Figura 2).

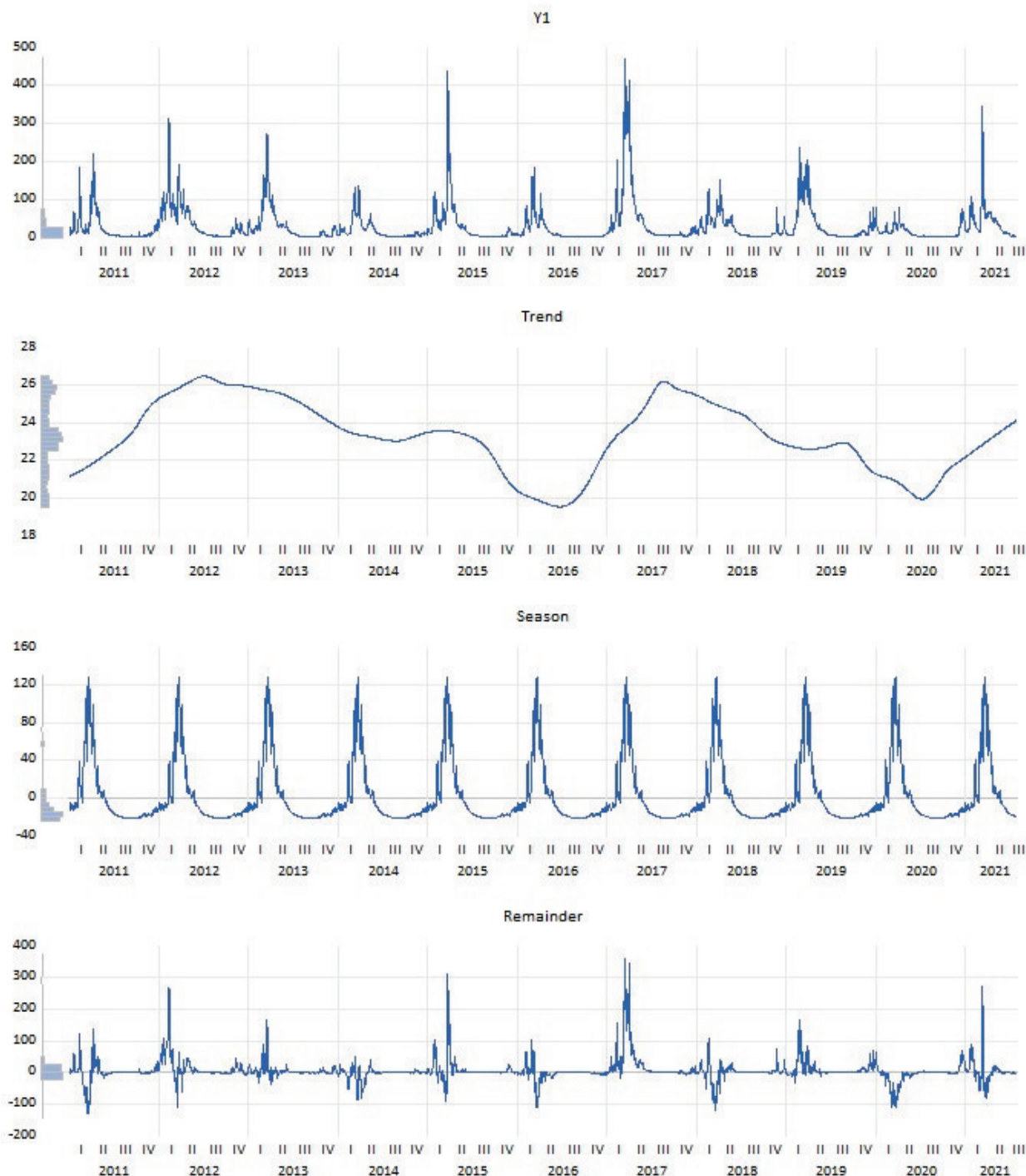


Figura 2. Caudales de la estación Yonán, disgregados en sus componentes: tendencia, estacionalidad y elemento aleatorio.

Elaboración propia en *EViews 14 University Edition*.

El modelo estocástico que se aproximó a la variable se seleccionó a través del método de Box y Jenkins (Figura 3), y consistió en seguir una serie de pasos que se les aplica a los modelos autorregresivos de media móvil. Dentro de esta metodología no se considera el efecto por heterocedasticidad condicional residual, pero se incluyó esta característica dentro del método durante el desarrollo.

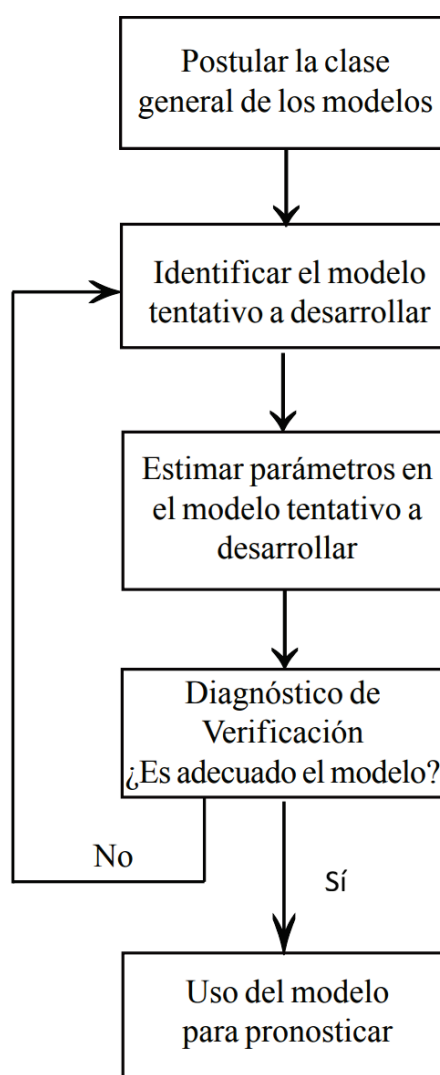


Figura 3. Flujo de la Metodología de Box-Jenkins. Fuente: Ceballos-Pérez y Pire (2015).

El objetivo de modelar series de tiempo es recoger y estudiar las observaciones pasadas para obtener un adecuado modelo para detallar la estructura de la serie y producir pronósticos (Raicharoen *et al.*, 2003, citados en Roque-Rojas, 2022). Adhikari y Agrawal (2013), en Roque-Rojas (2022: 6), definen:

"...los modelos de predicción pueden ser de muchas formas y tener procesos estocásticos. Hay dos modelos muy usados: el modelo autorregresivo (AR) y el promedio móvil (MA); combinándolos se tienen los modelos autorregresivos de media móvil (ARMA) y el integrado (ARIMA)".

"El modelo autorregresivo y media móvil integrado (ARIMA) es usado para predecir series de tiempo con un comportamiento no estacional" (Hamzaçebi, 2008, citado en Roque-Rojas, 2022).

"...su formulación matemática es ARIMA (p, d, q)" (Hipel & McLeod, 1994, citado en Roque-Rojas, 2022: 6):

"...por lo general d es 1, pero cuando es 0, el modelo se reduce a ARMA (p, q)" (Roque-Rojas, 2022: 6).

Box y Jenkins (1970), citados en Roque-Rojas (2022: 6):

"...generalizaron el modelo ARIMA para tratar la estacionalidad y propusieron el modelo estacional (SARIMA)".

Por lo que Roque-Rojas (2022: 6) afirma que:

"...el modelo aplica una diferencia que consiste en la observación del año anterior y se calcula como $z_t = Y_t - Y_{t-s}$; la s es el número de periodos en un año, por ejemplo, si la serie es diaria $s = 365$, si la serie es mensual $s = 12$ y se expresa como: $SARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)^s$. Donde p es el parámetro asociado con la parte autorregresiva del modelo; d , el parámetro del orden de diferenciación mínima para que la serie sea estacionaria, y q está relacionado al promedio móvil del modelo".

Casas y Cepeda (2008) resaltan que:

"... la volatilidad es una característica inherente a las series de tiempo financieras. En general, no es constante y en consecuencia los modelos de series de tiempo tradicionales que suponen varianza homocedástica no son adecuados para modelar series de tiempo financieras".

Esto no descarta a las series temporales hidrológicas, ya que por la escala usada mostró esta misma característica (Engle, 1982) y presenta la siguiente expresión:

$$h_t = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2$$

Donde:

h_t = varianza condicional.

α_0 = término constante.

α_1 = coeficiente de regresión.

ε_{t-1}^2 = residual elevado al cuadrado.

Este modelo es conocido como ARCH (modelos autorregresivos con condición heterocedástica). Engle y Bollerslev (1986) generalizaron los modelos ARCH y proponen los modelos GARCH (modelos autorregresivos generalizados con condición heterocedástica) con la siguiente forma:

$$h_t = \alpha_0 + \alpha_1 \sum_{i=1}^q \varepsilon_{t-i}^2 + \alpha_2 \sum_{i=1}^p h_{t-i}$$

Donde:

h_t = varianza condicional.

α_0 = término constante.

α_1 y α_2 = parámetros que estiman la influencia de los residuos y varianzas pasadas en la volatilidad reciente.

h_{t-1} = varianza condicional en un rezago anterior.

ϵ_{t-1}^2 = residual elevado al cuadrado.

En el caso de tener $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, Engle y Bollerslev (1986), citados en Akgül y Sayyan (2008: 465), introdujeron el modelo generalizado autorregresivo con condicional heterocedástico integrado (IGARCH).

Etapas de Box-Jenkins

La identificación, según Dickey Fuller (1979) (citado en Mamani *et al.*, 2022: 30), se realiza mediante:

"...el análisis de estacionariedad (ruido blanco) de la variable y , para ello, se recurre a pruebas gráficas (correlogramas FAC y FACP) o a través de la prueba estadística de raíces unitarias ADF".

También Hipel y McLeod (1994), citados en Roque-Rojas (2022: 6) afirman que:

"...Función de Autocorrelación (ACF) y Función Parcial de Autocorrelación (PACF) para verificar que la media y la varianza sean constantes siendo efectivas en los datos de entrenamiento y deben coincidir con los valores teóricos o reales".

Por lo que Reddy *et al.* (2017), citados en Roque-Rojas (2022: 6), continúan:

"...esto es considerado luego de los pedidos estacionales apropiados para los modelos ARIMA y SARIMA para restringir la importancia a los retrasos estacionarios".

La estimación de parámetros, según Roque-Rojas (2022: 6), busca:

"...la selección del modelo ARIMA o SARIMA a partir del análisis de estacionalidad de la serie de tiempo que se está analizando, para luego estimar parámetros usando el FAC y FACP para definir el p y q a partir de los valores altos que se repiten cada retardo o *lag* representados gráficamente. Luego se realiza un diagnóstico a partir de la partición de la serie original (entramiento y prueba) para seleccionar el mejor modelo; se pueden usar las autocorrelaciones de los residuos del FAC y FACP de datos de prueba".

Desde otra perspectiva, Cueva (2024: 17-18) narra que:

"...identificar la presencia de efectos ARCH/GARCH en las series temporales financieras es crucial modelar correctamente la volatilidad y hacer predicciones precisas. Estos efectos de volatilidad agrupada, característicos de

estos modelos se manifiestan como autocorrelación en los retornos al cuadrado".

Finalmente, también los modelos se seleccionan usando los criterios de información de Akaike (1974) y Schwarz (1978), eligiendo el de menor valor (Mamani *et al.*, 2022).

La validación del modelo consideró que los residuos se comporten como un ruido blanco; con autocorrelación nula, media cero, varianza constante y la normalidad de los residuos (Scheidereiter & Faure, 2022). Entre todas las mencionadas, para la verificación de la autocorrelación nula, se aplicaron las pruebas de Portmanteau propuestas por Box y Pierce (1970), y Ljung y Box (1978) (citados en Mamani *et al.*, 2022).

La predicción del modelo, según Camones-Gonzales (2002: 29), es:

"...para el periodo histórico puede realizarse dos tipos de predicción: la estática (paso a paso) y la dinámica (en cadena). La simulación estática y dinámica coinciden solo para el primer periodo; pero a partir del segundo periodo, la predicción dinámica utiliza el valor estimado y no el valor real del periodo precedente. La simulación estática nos informa, pues, de los errores que hubiéramos cometido de utilizar el modelo para predecir solo un periodo por delante. La simulación dinámica deja al modelo que vaya realimentando sus propias predicciones".

Después de obtener la serie simulada, se aplicó el Método Monte Carlo, que consiste en controlar parámetros para llevar a cabo las simulaciones probabilísticas, como el número de escenarios y la forma de llevar a cabo el muestreo de variables estocásticas (GoldSim Technology Group LLC, 2026):

"En una simulación probabilística, se basa en el ingreso de uno o más parámetros que son representados como una distribución de probabilidad (algunos procesos son representados como estocásticos) y la simulación se realiza por corridas del modelo varias veces" (GoldSim Technology Group LLC, 2026: 503).

"GoldSim provee dos maneras que puedes controlar para desarrollar el muestreo de elementos estocásticos Monte Carlo: i) implementando el Muestreo Latino Hipercubo y ii) repetir secuencias de muestreo. El método estadístico (MLH) provoca distribuciones de probabilidad (es decir, elementos estocásticos) para dividirse en varios "estratos" igualmente probables. Esto tiene el efecto de asegurar que el espacio de probabilidad del parámetro sea abarcado uniformemente" (GoldSim Technology Group LLC, 2026: 504).

A través del *HEC-ResSim Version 3.3* (USACE-HEC, 2021) se generaron simulaciones en el reservorio Gallito Ciego que muestra según el manual de sistemas de embalses en tres módulos: configuración de

cuenca (1), red de reservorios (2) y simulación (3). En el primero se georreferencian la cuenca (GIS), la red hídrica y el tramo en donde está localizada la represa (un nudo de ingreso y un nudo de salida). En el segundo, se configura la evaporación de embalse (mm) de la estación Montegrande a escala total media mensual; finalmente, se consideró el volumen no controlado de descarga a través del vertedero (niveles vs. caudales). También se contó con el volumen controlado a descargar por la presa de acuerdo con el número de aberturas de las válvulas Howell-Bunger vs. el nivel de agua del embalse. Se ingresó la gráfica de elevación vs. almacenamiento y elevación vs. área al año 2017. Por último, en la simulación se ingresó en distintos escenarios a escala diaria la variable de ingreso a través del *software HEC-DSSVue* (USACE-HEC, 2023), fijándose las condiciones de frontera (nivel de agua en embalse, caudal no controlado y caudal controlado), considerando previamente el porcentaje de abertura de válvula(s) (%).

En la Figura 4(b), el sistema de descarga idealizado para el *software Hec-ResSim* difirió del real (Figura 4(a)). La captación es emulada por una válvula del tipo Howell-Bunger, que descarga al mismo tiempo un valor de hasta un valor de $180 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (considera los $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ por turbinas y $140 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de válvulas H-B). Si el volumen de agua excede este valor, el vertedero considera descarga. Se realizó una validación entre sistemas a partir de los niveles del embalse históricos y las descargas tomadas en el punto de control de la estación hidrométrica "canal de descarga E-02" en un determinado tiempo, donde mediante estadísticos resultó con una muy buena aproximación.

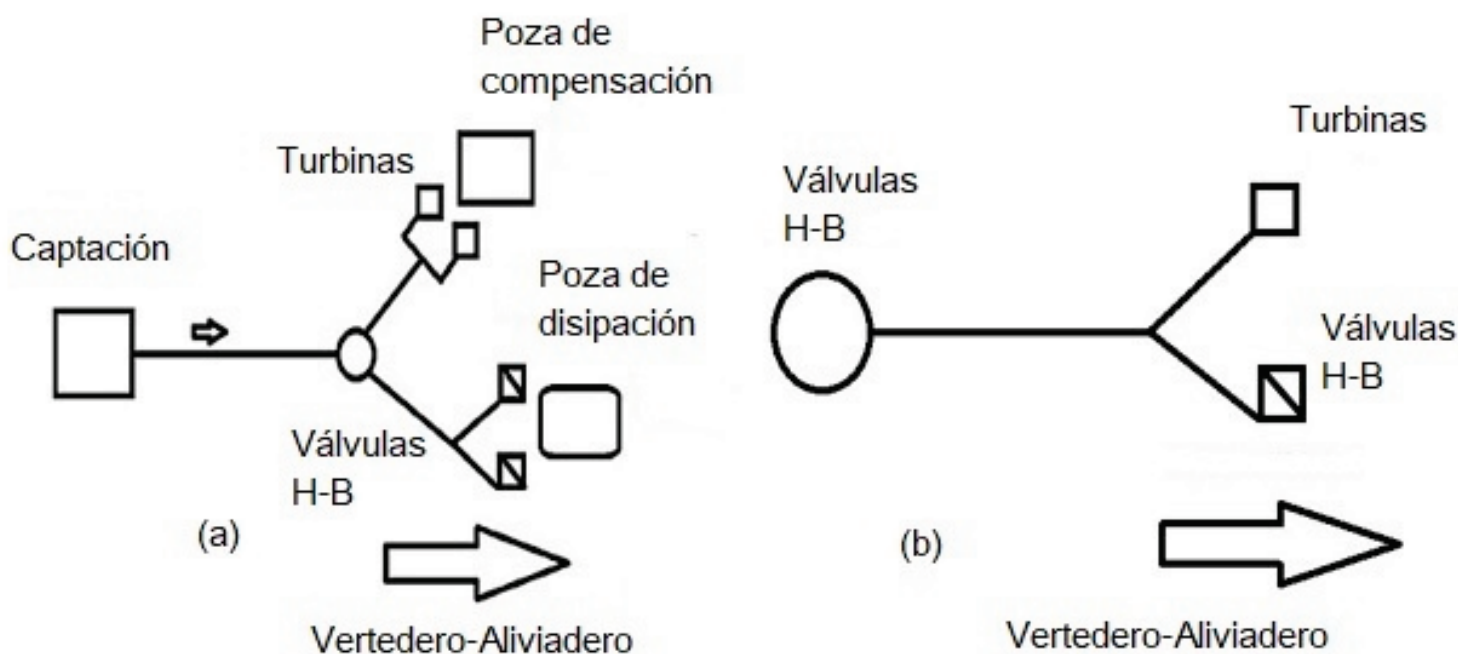


Figura 4. Esquema real/idealizado de descarga de la represa Gallito Ciego.

Esto se validó con los estadísticos PBIAS (tendencia media de los datos simulados a ser más grande o pequeña de los datos históricos), RSR (razón de la desviación estándar media de la raíz) y NSE (es la eficiencia de Nash-Sutcliffe, que hace una comparación entre la serie de datos simulados con los históricos) (Tabla 1).

Tabla 1. Relación de valores estadísticos.

Relación del comportamiento	RSR	NSE	PBIAS (%)
			CAUDAL
Muy buena	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 \leq \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Buena	$0.50 \leq \text{RSR} \leq 0.60$	$0.65 \leq \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 15$
Satisfactoria	$0.60 \leq \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 \leq \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 25$
No satisfactoria	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

Validación para simulación estática

Fuente: Moriasi *et al.* (2007).

Los escenarios estuvieron sometidos a incertidumbre para cubrir con la demanda total (primaria, agrícola y poblacional) en condición máxima; por lo tanto, se recurrió al uso de índices para poder evaluar su abastecer máximo. Índice basado en el tiempo para el abastecer (I_t), que tomó en cuenta los días simulados y la sumatoria de los días sin abastecer (Peralta-Gálvez & Tapia-Monsalve, 2019):

$$I_t = \left(\frac{\sum \text{días simulados} - \sum \text{días no abastecidos}}{\sum \text{días simulados}} \right) \times 100$$

El índice basado en el volumen (I_v), que tomó en cuenta el volumen total de la demanda y el volumen sin abastecer:

$$I_v = \left(\frac{\sum \text{volumen demanda} - \sum \text{volumen sin abastecer}}{\sum \text{volumen demanda}} \right) \times 100$$

Finalmente, se estableció el déficit volumétrico (%) dado:

$$D_v = 100 - I_v$$

Donde:

D_v = déficit volumétrico (%).

I_v = índice basado en el volumen necesario para el abastecimiento (%).

Resultados

Se tomó como entrada la serie temporal de caudales medios diarios de la estación "Yonán" desde el 1° de enero de 2011 hasta el 31 de julio de 2021 (Figura 5).

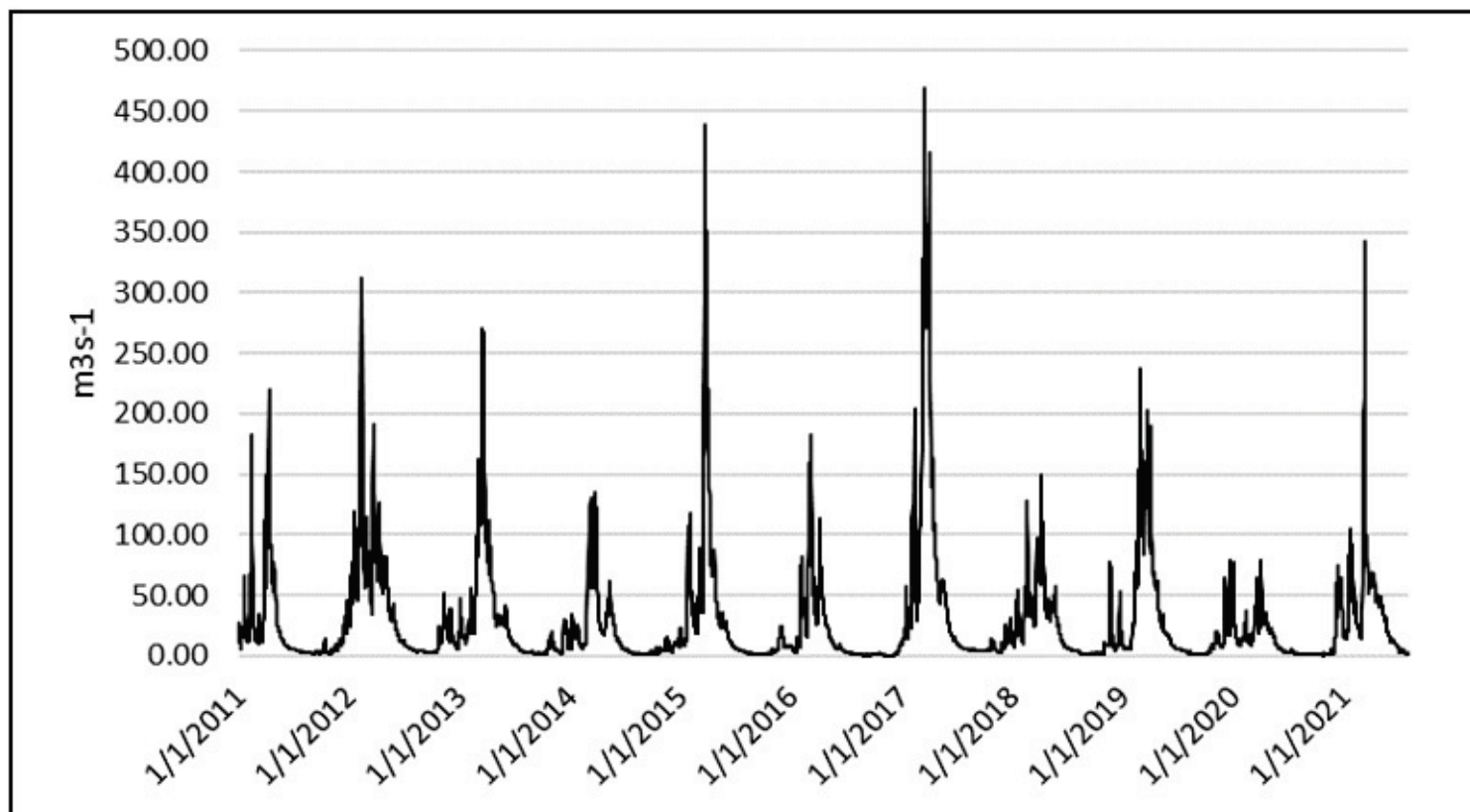


Figura 5. Caudales diarios, estación Yonán, del 1° de enero de 2011 al 31 de julio de 2021.

Se tomó como variable de entrada original la información histórica de caudales ya mencionada y como variable de entrada tratada a la información reducida de la variable original, producto de diferencias regulares, aplicación de logaritmos y diferencia estacional.

Se realizaron los correlogramas (función de autocorrelación y función de autocorrelación parcial) de la variable de entrada original (Figura 6, lado izquierdo) y de la variable de entrada tratada (Figura 6, lado derecho). La variable original muestra una notoria longitud de onda estacional a cada 365 rezagos (FAC). La variable tratada muestra ese

mismo comportamiento de otra forma, representado en barras que sobresalen marcando el rezago estacional, más persistente en el FACP.

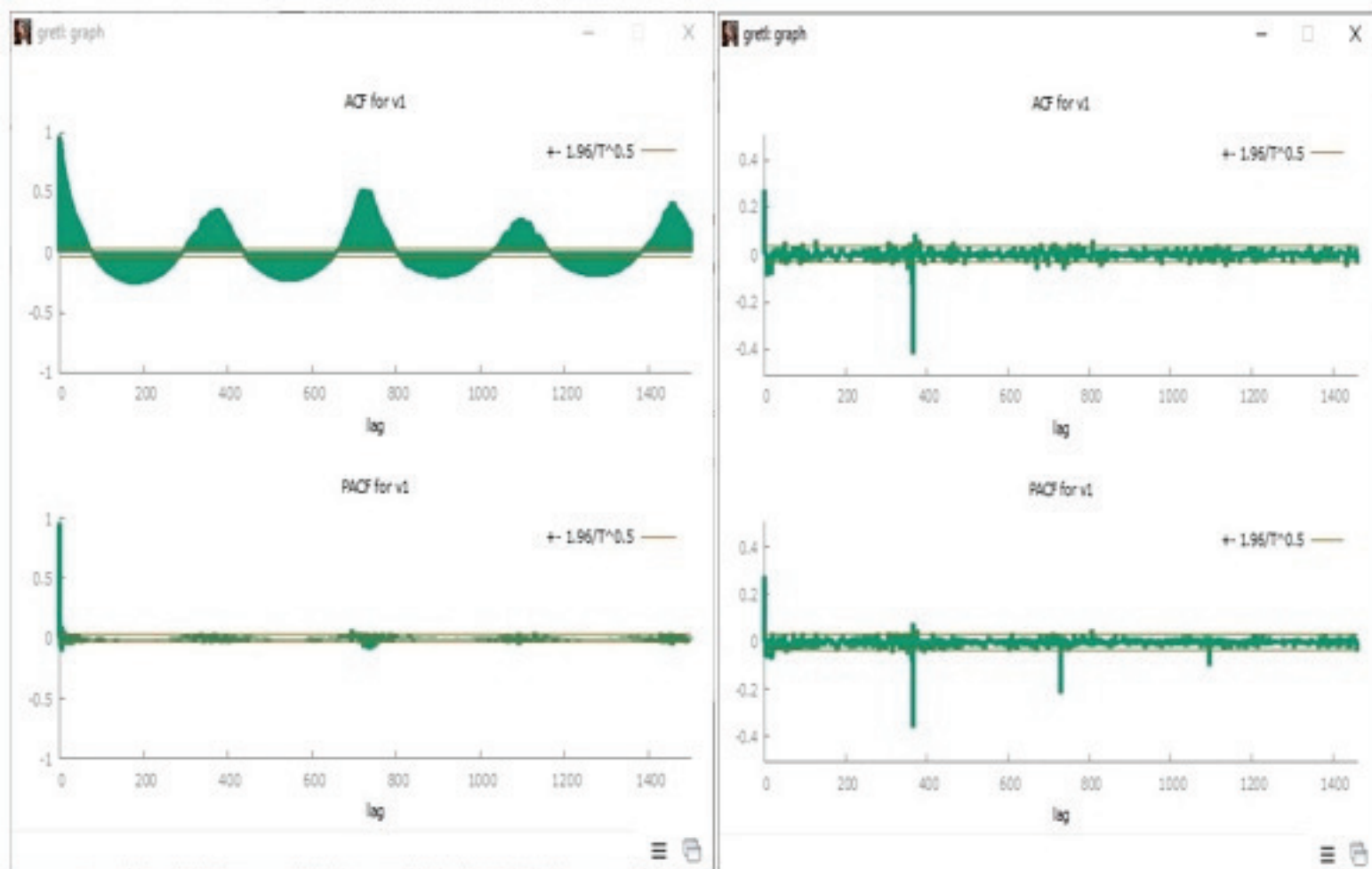


Figura 6. Correlogramas a 1500 rezagos para la serie temporal de caudales Yonán del 01/01/2011 al 31/07/2021 Se utilizó la interfaz GUI del *software gretl 2023a* para los correlogramas.

Mediante la prueba aumentada de Dickey-Fuller se evaluó la estacionariedad de la variable tratada, en donde la hipótesis nula afirma

la presencia de una raíz unitaria (no estacionariedad) (citado en Mamani *et al.*, 2022), mediante *EViews 14 University Edition* (IHS Global Inc.); se obtuvo para el máximo rezago tanto en su parte regular como estacional (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la prueba Dick-Fuller aumentada.

Rezago	t_{tab}	t_{cal}	p -valor	Observación
17	-2.86	-17.81	< 0.05	Rechaza H_0
730	-2.86	-3.50	< 0.05	Rechaza H_0

Estimaciones realizadas en *EViews 14 University Edition*.

Con base en FAC y FACP, los parámetros designados para AR(p) en su parte regular son 1, 5, 8, 10 y 11. MA(q) son 2 y 17. Aplicó diferenciación en su parte regular una sola vez, por lo que el valor de d es 1. En su parte estacional AR(P), los valores de P son iguales a 365 y 730, y el valor de D es igual a 1.

Mediante el modelo IGARCH que modeliza la varianza de los residuos que SARIMA (media y estacionalidad) produce con la variable tratada (serie logarítmica de los caudales con diferencia regular y estacional) aplicada a los rezagos ya mencionados; en la Tabla 3 se muestran resultados preliminares. La primera columna es el modelo SARIMA implementado al rezago. La segunda contiene los coeficientes usando el modelo de varianza residual IGARCH de los parámetros asociados con el modelo de la columna primera; la tercera contiene errores estándar de los estimadores IGARCH al modelo SARIMA de la columna primera; la cuarta es el z-estadístico que contiene los

coeficientes entre la estimación IGARCH de la columna primera y el error estándar del estimador IGARCH correspondiente; la última columna son los niveles de significancia marginal (p -valor) (Mauricio, 2005), que se basa en el contraste que es estadísticamente significativo si p -valor $\leq$ Alpha (Alpha = 0.05) (Ocaña- Peinado (s.f.).

Tabla 3. Significancia de los rezagos en los modelos en la parte regular y estacional.

Variable	Coeficiente	Desviación estándar del error	Z-estadístico	Probabilidad
C	-0.001316	0.000688	-1.911672	0.0559
AR(1)	0.317206	0.015884	19.97022	0.0000
AR(5)	-0.027359	0.015254	-1.793596	0.0729
AR(8)	-0.032930	0.015089	-2.182407	0.0291
AR(10)	-0.029922	0.015897	-1.882203	0.0598
AR(11)	-0.020575	0.015726	-1.308328	0.1908
SAR(365)	-0.643883	0.010408	-61.86586	0.0000
SAR(730)	-0.328093	0.010266	-31.95831	0.0000
MA(2)	-0.088813	0.017674	-5.024975	0.0000
MA(17)	-0.030979	0.014690	-2.108846	0.0350

Estimaciones realizadas en *EViews 14 University Edition*.

La Figura 7 muestra el comportamiento de los residuos del modelo, por lo que evaluó la prueba de multiplicador de LaGrange (LM) para efectos ARCH (Engle, 1982, citado en Cueva, 2024), dando valores por encima del 5 % (chi-cuadrado, p -valor = 0.5049), utilizando el modelo

IGARCH (varianza residual), lo que no rechaza la hipótesis nula de no presencia de heterocedasticidad (Sjölander, 2011).

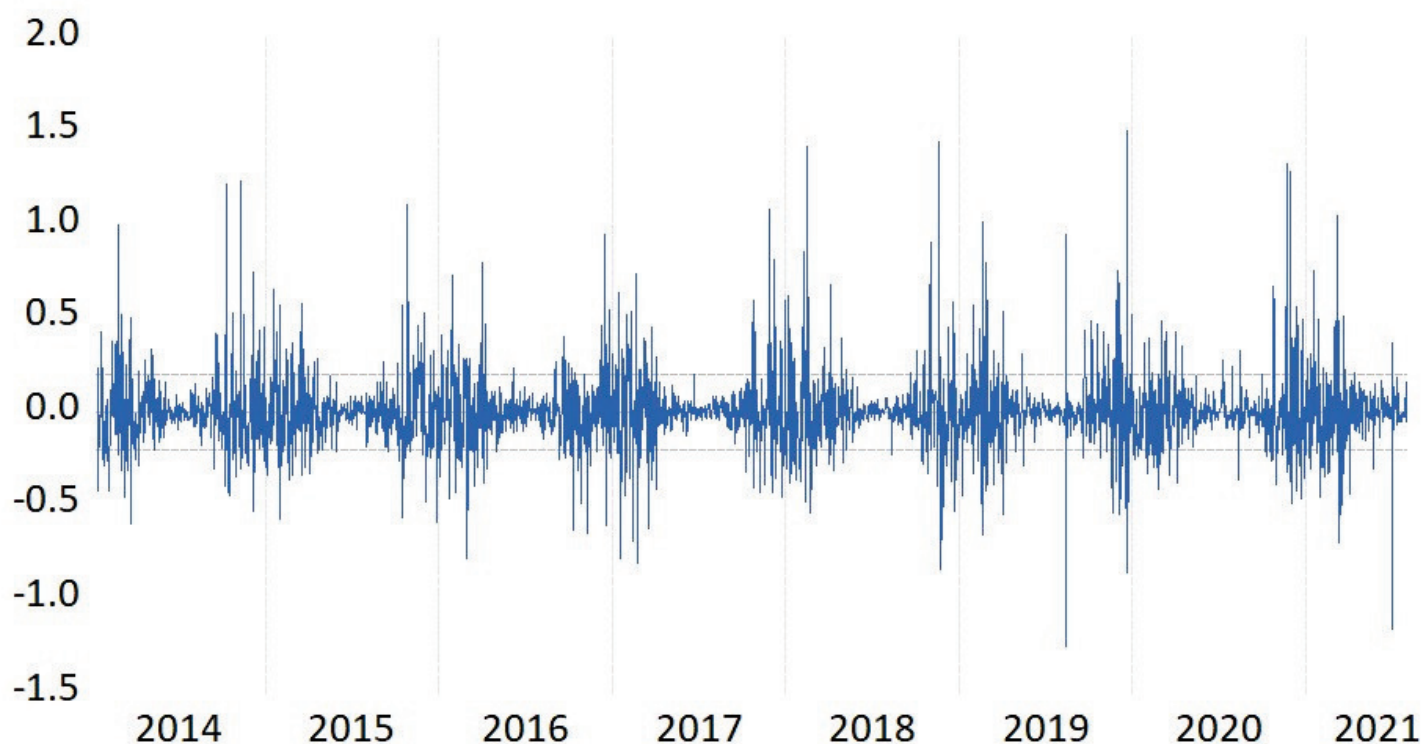


Figura 7. Elaboración propia en *EViews 14 University Edition*.

La Tabla 4 muestra la suma de los coeficientes igual a 1 ($\alpha_1 + \alpha_2$), por lo que se define como un proceso IGARCH (Engle & Bollerslev, 1986, citados en Akgül & Sayyan, 2008). El valor del primer coeficiente no es pequeño y el valor del segundo no es relativamente grande (Corvi, 2017), lo cual indica que la variable tiene una considerable volatilidad condicional. La columna de probabilidad de dichos coeficientes (Tabla 4) indica que el contraste es estadísticamente significativo si $p\text{-valor} \leq \text{Alpha}$

(Alpha = 0.05) (Ocaña-Peinado (s.f.)), que muestra que el modelo IGARCH usado es aceptado. Cabe resaltar que la varianza residual del modelo SARIMA seleccionado (Tabla 3), se modeló con un GARCH(1,1), pero la suma de $(\alpha_1 + \alpha_2)$ dio 1.0, lo que apremió a usar un modelo IGARCH(1,1) en su lugar.

Tabla 4. Parámetros del modelo de varianza.

Variable	Coeficiente	Desviación estándar del error	Z-estadístico	Probabilidad
RESID(-1)^2	0.105055	0.006469	16.23930	0.0000
GARCH(-1)	0.894945	0.006469	138.3399	0.0000

Estimaciones realizadas en *EViews 14 University Edition*.

La serie temporal de entrada de la estación "Yonán" no tuvo amplia variedad de modelos, por lo que mediante el modelo IGARCH simuló la varianza condicional de los residuos generados por el modelo SARIMA seleccionado. En la Tabla 5, los parámetros considerados son el valor de Akaike (AIC), una señal de precisión, y el valor de Schwarz (BIC), una señal de simplicidad del modelo. Estos son presentados como resultado por distintos modelos de varianza para los residuos (la segunda columna es para modelos con varianza constante).

Tabla 5. Parámetros para diferentes modelos de varianza

Valores	NLS-ARMA	ARCH(1)	GARCH(1,1)	IGARCH(1,1)
AIC	-0.323899	-0.917155	-1.106559	-1.085717
BIC	-0.304533	-0.889240	-1.076497	-1.062097

Estimaciones realizadas en *EViews 14 University Edition*.

La validación del modelo, siguiendo el método Box-Jenkins mediante *EViews 14 University Edition* (IHS Global Inc.) arrojó para la prueba de normalidad una $p < 0.05$ rechazando la hipótesis nula de que los residuos siguen una distribución normal por el contraste de Jarque-Bera (Romero *et al.*, 2018) (Tabla 6). La media de los residuos es aproximadamente 0 (0.03). La prueba ARCH-LM obtuvo un $p > 0.05$, lo cual indica que la hipótesis nula fue aceptada (Sjölander, 2011), eso quiere decir que el modelo IGARCH para la varianza residual es aceptado. Finalmente, se aplicó la prueba de Ljung-Box (Figura 8) para evaluar la presencia de autocorrelación en los residuos del modelo. Al obtener un p -valor superior a 0.05 en más de 200 rezagos, se aceptó la hipótesis nula (H_0). Esto demuestra la ausencia de autocorrelación serial y confirma que los residuos se comportan como ruido blanco. Cabe precisar que esta prueba de Portmanteau, propuesta originalmente por Box-Pierce y perfeccionada por Ljung-Box, valida de manera conjunta el correcto ajuste del modelo estimado (Ljung & Box, 1978, citados en Mamani *et al.*, 2022).

Tabla 6. Validación del modelo.

Pruebas de validación	Normalidad	Heterocedasticidad	Aleatoriedad e independencia
Jarque-Bera	$p < 0.05$	X	X
Prueba-LM-ARCH	X	$p > 0.05$	X
Prueba Ljung-Box	X	X	$p > 0.05$

Estimaciones realizadas en *EViews 14 University Edition*.

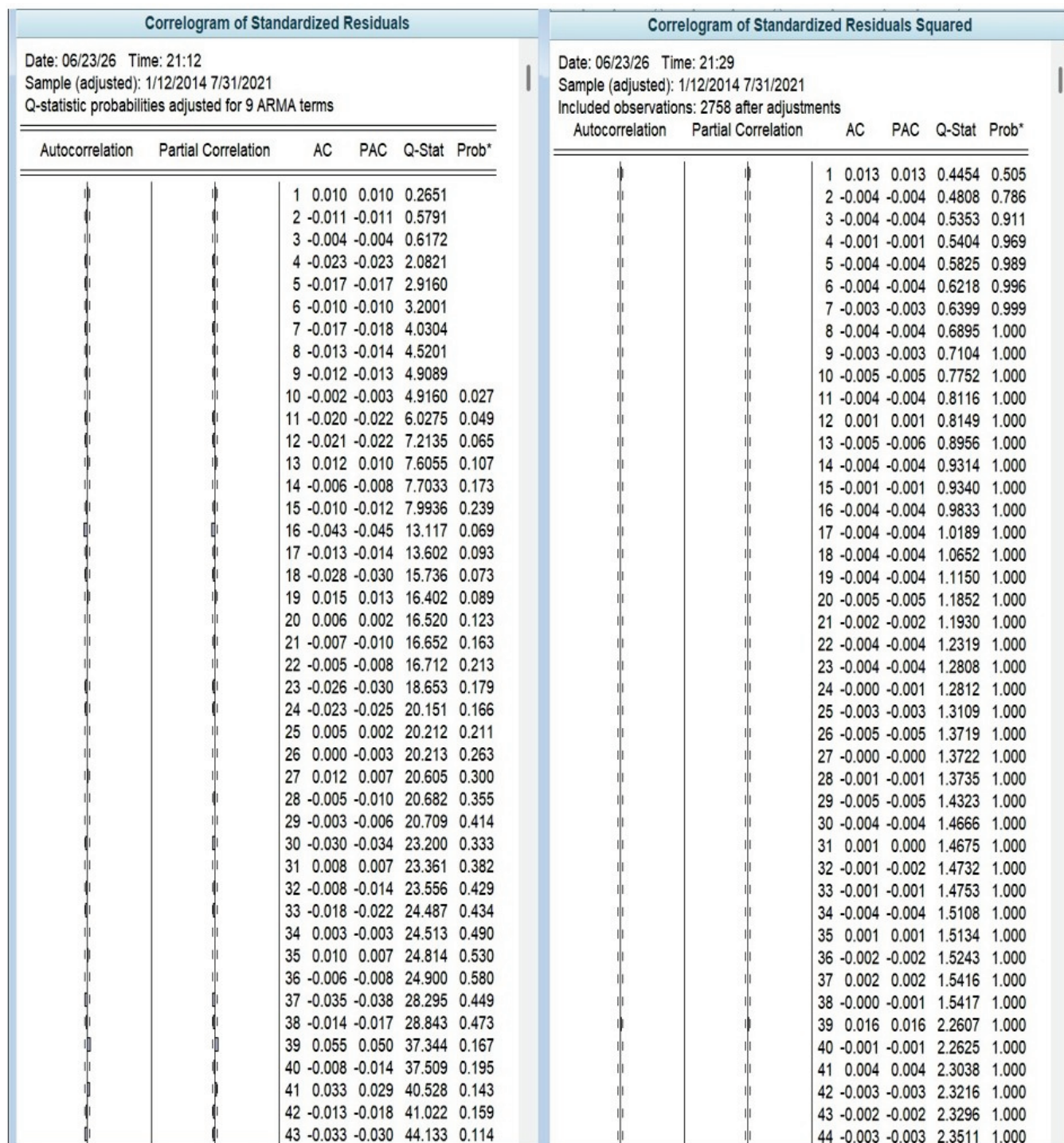


Figura 8. Elaboración propia en *EViews 14 University Edition* de la prueba Ljung-Box para residuos simples y cuadráticos estandarizados.

Para evaluar el desempeño de la simulación de datos, se usó la prueba de sensibilidad de Monte Carlo. A través del *software* GoldSim Technology Group LLC (2026), la respuesta se presenta en la Figura 9.

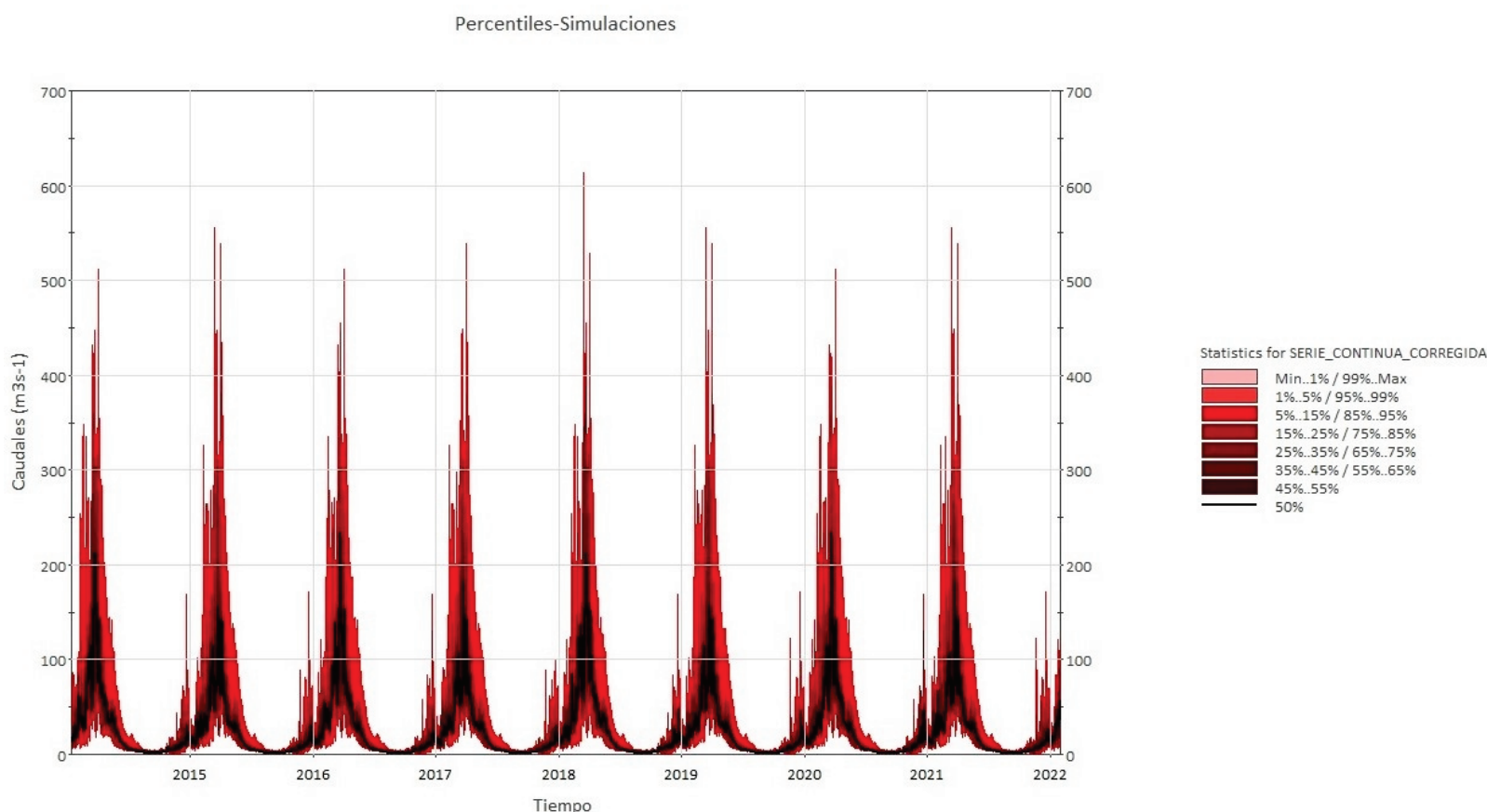


Figura 9. Variabilidad de caudales simulados. Elaboración propia con *GoldSim 15 R2 Limited Edition (Trial)*.

Para la simulación con el *HEC-ResSim Version 3.3* (U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2021) se consideraron ocho escenarios para los últimos 365 días (Figura 10).

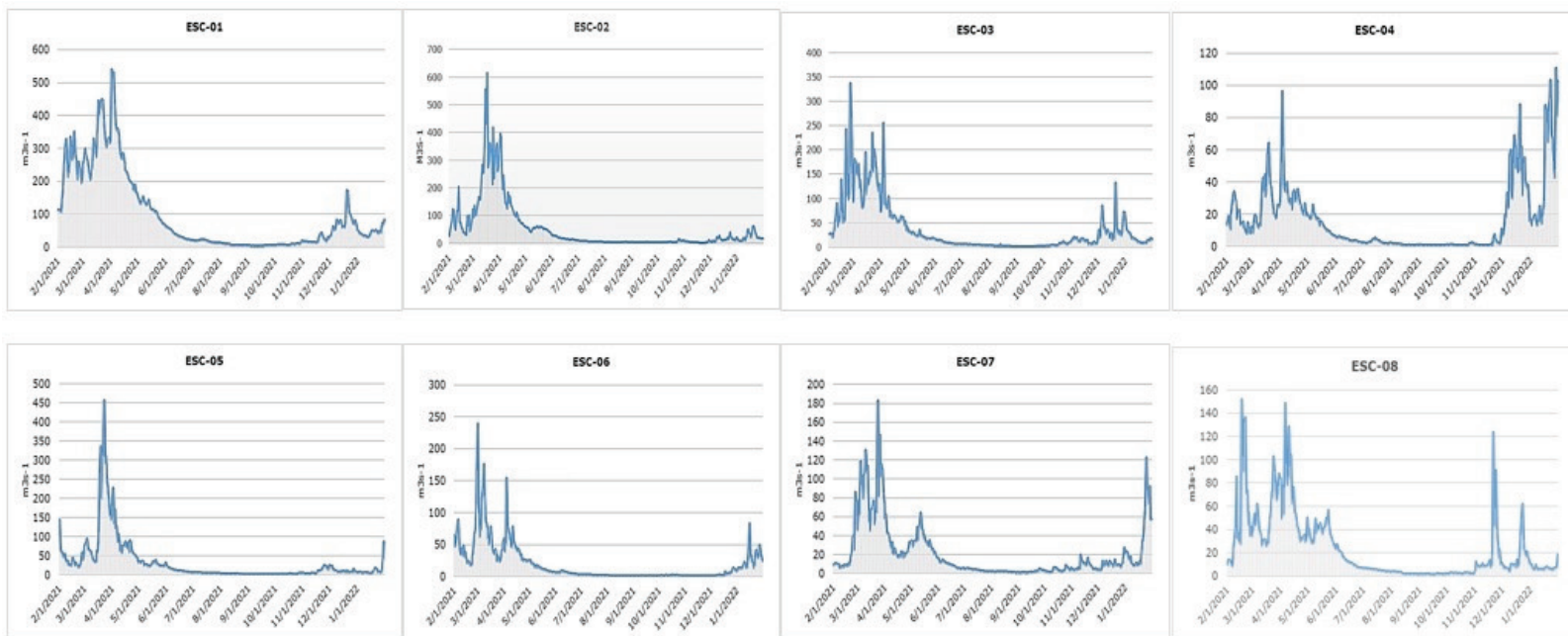


Figura 10. Escenarios simulados del modelo SARIMA+IGARCH.

El comportamiento hidráulico del reservorio fue validado con base en información de niveles históricos de la presa Gallito Ciego y de información de descarga a través de la estación "Canal de descarga E-02". El intervalo de tiempo tomado comprendió del 1° de septiembre de 2018 al 31 de julio de 2021 a escala diaria. Se generaron valores de aproximación estadísticos (Tabla 7) y se compararon con valores tomados en la Tabla 1.

Tabla 7. Comparación valores estadísticos.

Serie temporal	RSR	NSE	PBIAS	R^2	Observación
Niveles de agua (m.s.n.m.)	0.05	1.00	0.00	0.99	Muy buena
Descargas históricas (m ³ s-1)	0.45	0.80	1.50	0.80	Muy buena

Obtenido del código *r HydroGoF*.

La Figura 11 muestra los escenarios simulados de un año de duración para abastecer la demanda máxima (poblacional, primaria y agrícola) mediante índices de operación. El índice del abastecer por tiempo son las barras con relleno blanco; el índice del abastecer volumétrico son las de relleno negro, y el déficit por volumen son las barras en líneas discontinuas; todo estos representados en porcentaje (%). En la gráfica superior izquierda (396 msnm), los escenarios 4, 6 y 7 no abastecen a la demanda máxima; para la gráfica superior derecha (388 msnm), se suma el escenario 8 al desabastecer y, por último, en la gráfica inferior (361 m.s.n.m.) se agrega el escenario 5 al desabastecimiento. Solo abastecen tres escenarios (1, 2 y 3) las demandas máximas hasta llegar al nivel mínimo óptimo (NAMINO = 361 m.s.n.m.). Entre los escenarios que no abastecen a la demanda, el más desfavorable es el escenario 4, que a un nivel de "arranque" de 361 m.s.n.m. llega a tener un déficit volumétrico de 87.4 %. Este escenario tampoco llega a abastecer las mínimas demandas (361 m.s.n.m.), por lo que recién dichas demandas las cubre con un nivel de "arranque" de simulación en 364 m.s.n.m.

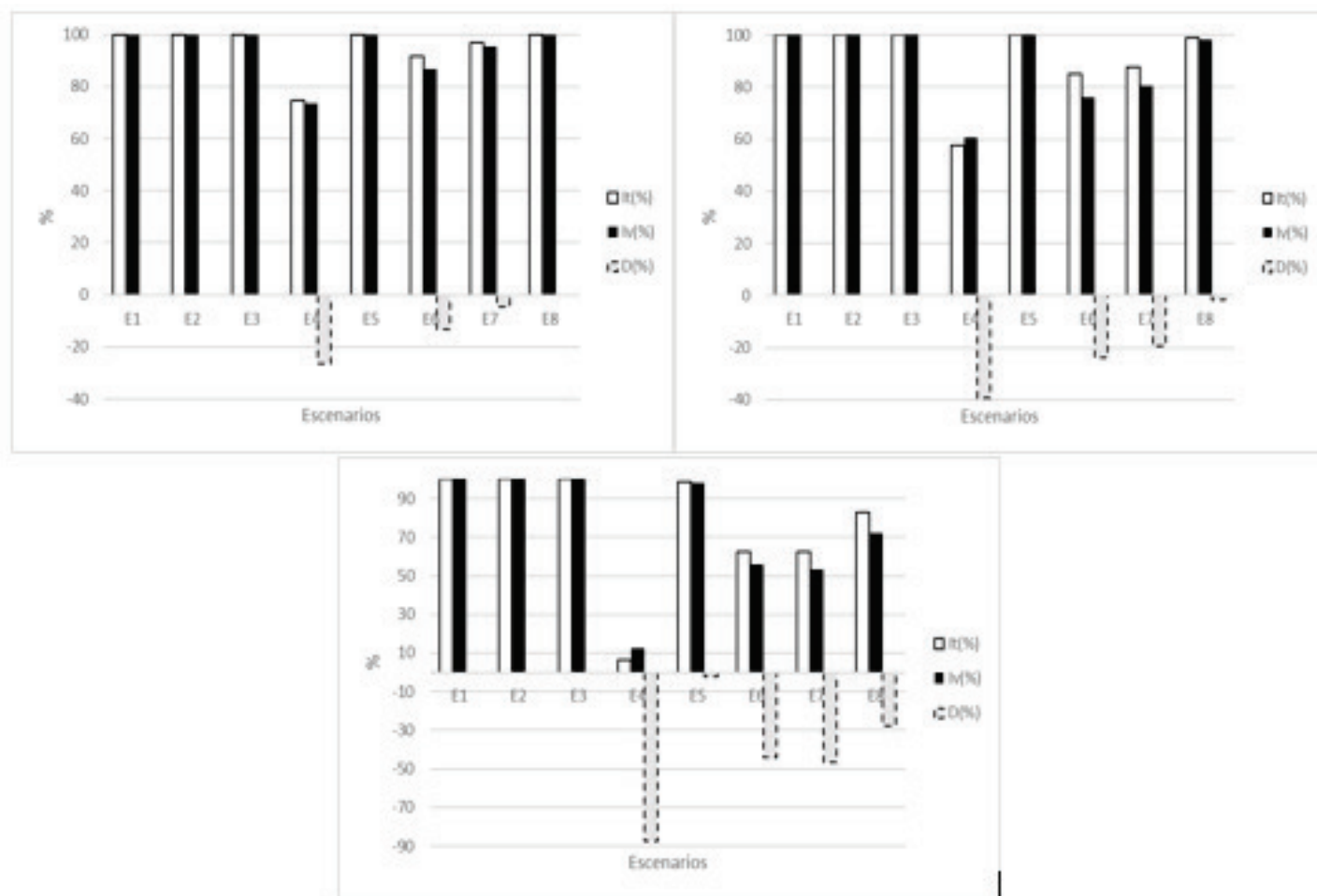


Figura 11. Índices de abastecimiento para máximas demandas en diferentes niveles de "arranque" de simulación.

La Figura 12 muestra el comportamiento del reservorio para el escenario 4 abasteciendo la demanda mínima (agrícola, poblacional y primaria), con una simulación de un año en un nivel de "arranque" de 364 m.s.n.m. mediante el *software HEC-ResSim Version 3.3* (USACE, 2021).

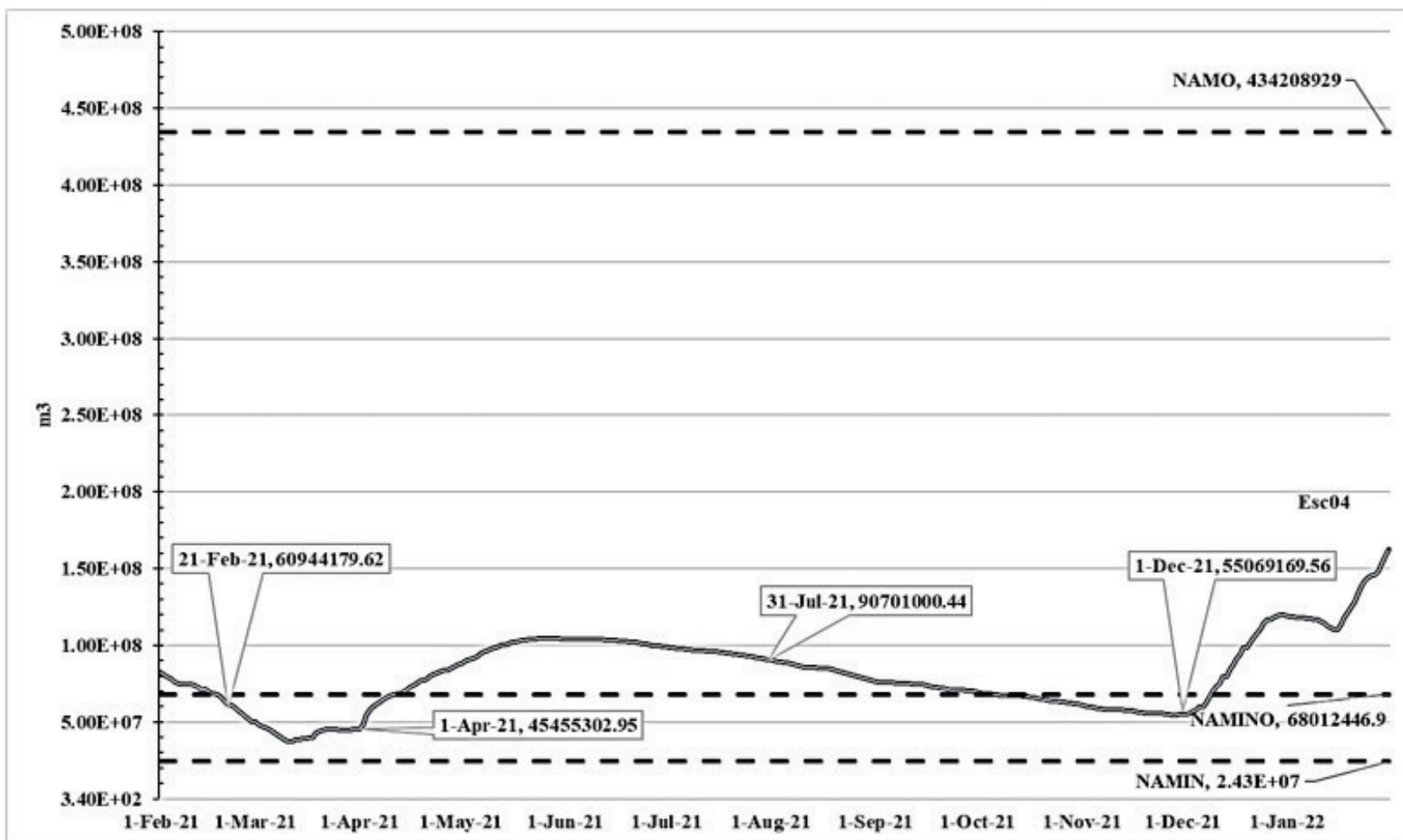


Figura 12. Comportamiento del reservorio en el escenario 4 en un nivel de "arranque" de simulación de 364 m.s.n.m. (82.44 hm³), escenario más desfavorable.

En la Figura 13 se mostraron perfiles de simulación del reservorio para los escenarios 1, 3 y 5 en diferentes niveles de "arranque".



Se consideró inicio de temporadas de lluvias el 1° de diciembre e inicio de temporadas de estiaje el 1° de abril. La Tabla 8 muestra los niveles del reservorio utilizando batimetría 2017.

Tabla 8. Niveles y volúmenes, embalse Gallito Ciego.

Batimetría	Nivel (m. s. n. m.)	Volumen (hm ³)
CORONA	413.0	-
Nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME)	410.3	-
Nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO)	404.0	434.21
Nivel de aguas mínimas ordinarias (NAMINO)	361.0	68.01
Nivel de aguas mínimas (NAMIN)	350.0	24.30
SEGURIDAD (01FEB)	396.3	332.99

Batimetría 2017.

Reglas de operación y descarga para demandas máximas (volumen/nivel) presentadas en la Tabla 9.

Tabla 9. Reglas de operación demandas y descargas máximas.

Directiva	Volumen mínimo	Nivel de agua	
Reglas de operación para demandas máximas			
Inicio de temporada de estiaje	358.03 hm ³	398.31 m.s.n.m.	
Durante la temporada de estiaje (31 de julio)	312.59 hm ³	394.59 m.s.n.m.	
Inicio de temporada de avenida	127.90 hm ³	372.54 m.s.n.m.	
Reglas de operación para descargas			
Descarga por vertedero	33.82 hm ³ /355.59 m ³ s-1	406.38 m.s.n.m.	
Descarga variable válvulas H-B	Máximo descargado	Máxima duración	
	139.47 m ³ s-1	204 días	
Descarga máxima de las turbinas	40 m ³ s-1	Máxima duración	Mínima duración
		204 días	152 días

Elaboración propia utilizando *HEC-ResSim 3.3*.

Reglas de operación y descarga para demandas mínimas (volumen/nivel) presentadas en la Tabla 10.

Tabla 10. Reglas de operación demandas y descargas mínimas.

Directiva	Volumen mínimo	Nivel de agua
Reglas de operación para demandas mínimas		
Inicio de temporada de estiaje	45.50 hm ³	355.79 m.s.n.m.
Durante la temporada de estiaje (31 de julio)	90.70 hm ³	365.65 m.s.n.m.
Inicio de temporada de avenida	55.07 hm ³	358.10 m.s.n.m.
Reglas de operación para descargas		
Descarga por vertedero	No trabaja	
Descarga variable válvulas H-B	No trabaja	
Descarga máxima de las turbinas	Máxima descarga	Mínima descarga
	39.06 m ³ s ⁻¹	0.50 m ³ s ⁻¹

Elaboración propia utilizando *HEC-ResSim 3.3*.

Discusión

El ACF de los caudales diarios (Figura 6, lado izquierdo) muestra la autocorrelación total de los valores (efectos directos e indirectos), y como respuesta muestra en este correlograma un comportamiento oscilatorio que se interpreta como estacionalidad en la variable, que la hace ser no estacionaria por estacionalidad. Esta fue transformada mediante diferenciaciones (regular y estacional) para así obtener el correlograma de esta variable (Figura 6, lado derecho) y que cumpla con el requisito de

estacionariedad (prueba Dick-Fuller aumentada, Tabla 2). Se aplicaron modelos AR (autorregresivo) y MA (media móvil) en diferentes rezagos que están fuera de la zona de confianza ($\pm 1.96/N^{0.5}$) y se les aplicó el modelo tipo IGARCH a los residuos del modelo SARIMA (Tabla 3). En la Figura 7 se mostró el comportamiento heterocedástico condicional residual entre el modelo y la variable. Para validar el modelo y así generar pronósticos (Figura 10), a través del método Box-Jenkins y el *software EViews 14 University Edition* (IHS Global Inc.), la normalidad, aunque haya rechazado la hipótesis nula (Tabla 6) de que la serie sigue una distribución normal; esto es irrelevante, ya que el teorema central del límite dice que si una muestra es lo bastante grande ($N \geq 30$), sea cual sea la distribución de la media muestral, seguirá aproximadamente una distribución normal (Díaz, 2006: 119). A partir de la prueba ARCH-LM, acepta la hipótesis nula (no presenta problemas de heterocedasticidad), lo cual indica que el modelo usado es válido (familia ARCH). Por último, la prueba de Ljung-Box presenta valores mayores al 5% de probabilidad, lo que acepta la H_0 que los residuos cumplen con la definición de ruido blanco (Figura 8); esto cumple con lo afirmado por Ljung y Box (1978) (citados en Mamani *et al.*, 2022: 33).

Para el análisis de sensibilidad mediante el método de Monte Carlo, no fue necesario un número elevado de escenarios, por lo que solo se generaron 100, ya que el sistema es sencillo (Avilés-Añazco *et al.*, 2016). Se produjeron ocho escenarios de 2 942 días de duración en "estratos" igualmente probables mediante el método estadístico MLH (muestreo latino hipercubo) para asegurar que el espacio de probabilidad del parámetro sea abarcado uniformemente (GoldSim Technology Group LLC, 2026: 504). El análisis de sensibilidad comprende la capacidad de generar varias simulaciones del modelo a través del método de Monte Carlo y está

relacionado, a su vez, con la incertidumbre, lo cual implica el empleo del método estadístico MLH que genera una función de distribución acumulativa (FDA). Esta incertidumbre se evaluó mediante la cuantificación de la variabilidad de estas simulaciones a través de porcentajes. En la simulación del embalse a través del *software Hec-ResSim* se consideró el mínimo nivel de abastecimiento de 350 m.s.n.m. (nivel de altitud mínimo) con base en el manual de operaciones de la represa Gallito Ciego (Midagri & Pejeza, 2023).

Así como las simulaciones se consideran desde el 1° de febrero hasta el 31 de enero del año siguiente último (u año), por cada simulación se consideró para el *software HEC-ResSim Version 3.3* (USACE, 2021) un nivel de embalse de "arranque" (396, 388 y 361 m.s.n.m.). En la Figura 13, el escenario 1 resalta porque es el hidrograma más vasto del resto, lo que indica el valor mayor simulado que descarga el vertedero, considerando máxima salida por turbinas ($40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y por válvulas H-B ($140 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Los escenarios 3 y 5 son aquellos que abastecen por poco a la demanda máxima. El escenario 5 limita hasta el 10 abril y el escenario 3 hasta 31 enero; o sea, los niveles de reservorio que estén por debajo de estas curvas muestran que el sistema no asegura abastecimiento de las demandas máximas a partir de los escenarios simulados.

Conclusiones

En general, mediante la simulación de información hidrológica a través de un modelo estocástico y utilizando un método para el análisis de sensibilidad —que permitió generar diversos escenarios que relacionados con una incertidumbre para cada uno de estos— se cuantificó su variabilidad mediante percentiles y a través de índices de capacidad para

abastecer a la demanda en los valles Jequetepeque y Zaña, dando una evaluación adecuada del comportamiento del sistema; esto determinó finalmente una serie de reglas de operación ya señaladas. Por otro lado, el modelo SARIMA no solo pronostica el comportamiento típico de la variable hidrológica usada (tendencia en la media y estacionalidad anual), sino que mediante el modelo IGARCH, genera pronóstico de la varianza residual heterocedástica condicional a escala diaria, semejándose al comportamiento de las variables econométricas.

El modelo estocástico seleccionado se aproximó a los caudales diarios de la estación Yonán desde el 1° de enero de 2011 hasta el 31 de julio de 2021 y mediante un análisis de sensibilidad generó ocho escenarios simulados. Los escenarios 3 y 5 definieron la frontera mínima volumétrica para abastecer las demandas máximas (agrícola, poblacional y primaria); el escenario 1 delimitó y cuantificó el volumen de salida por vertedero; el escenario 4 fue la simulación del embalse en su condición mínima de funcionamiento para poder abastecer la demanda (Figura 12).

Se recomienda evaluar el impacto del material de arrastre, pues la batimetría con que se simuló el sistema pertenece en este documento al año 2017; evaluar el mantenimiento para canales de distribución y también sus otras estructuras de derivación (bocatomas, compuertas, etc.) desde el punto de vista de limpieza como estructural; evaluar la calidad de la poza de compensación y la poza disipadora, y dar mantenimiento a todos los accesorios de la represa Gallito Ciego.

Agradecimientos

Un agradecimiento en especial al Proyecto Especial Jequetepeque-Zaña (PEJEZA) por el apoyo brindado y por toda la información alcanzada para

el presente artículo (Resolución Jefatural N° 045-2017-ANA de fecha 28.02.2017).

Financiamiento

No se contó con financiamiento para esta investigación.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de uso de IA

Se utilizó ChatGPT solo para mejorar la redacción del párrafo: "(...) Al obtener un p -valor superior a 0.05 en más de 200 rezagos, se aceptó la hipótesis nula (H_0). Esto demuestra la ausencia de autocorrelación serial y confirma que los residuos se comportan como ruido blanco. Cabe precisar que esta prueba de Portmanteau, propuesta originalmente por Box-Pierce y perfeccionada por Ljung-Box, valida de manera conjunta el correcto ajuste del modelo estimado".

Cabe aclarar que todos los resultados técnicos son producto del uso de los autores a través de los *softwares*:

IHS Global Inc. (2024). EViews 14 University Edition (Versión 14) [Software de computadora].

Cottrell, A., & Lucchetti, R. (2023). *gretl: Gnu regression, econometrics and time-series library (Version 2023a)* [Software de computadora]. Free Software Foundation (código libre).

U.S. Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-ResSim (Version 3.3) [Software de computadora]* (código libre).

GoldSim Technology Group LLC. (2026). *GoldSim 15 R2 Limited Edition (Trial) [Software de computadora]*.

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2023). *HEC-DSSVue (Version 3.3.29) [Software]*. (código libre).

Referencias

Adhikari, R., & Agrawal, R. K. (2013). *An introductory study on time series modeling and forecasting (Preprint)*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1302.6613>

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>

Akgül, I., & Sayyan, H. (2008). Modelling and forecasting long memory in exchange rate volatility vs. stable and integrated GARCH models. *Applied Financial Economics*, 18(6), 463-483. <https://doi.org/10.1080/09603100600959860>

Amaris, G., Ávila, H., & Guerrero, T. (2017). Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena. *Tecnura*, 21(52), 88-101. <https://doi.org/10.14483/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a07>

- Aponte-Rosales, C. (2018). *Factibilidad de aplicar la metodología de descolmatación UDEP en el embalse Gallito Ciego* (tesis de ingeniería). Universidad de Piura. <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/39d280a3-9a5c-4207-b9c8-2c46683bb34e/content>
- Avilés-Añazco, A., Solera-Solera, A., & Paredes-Arquiola, J. (2016). Análisis del rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (15), 48-57. <https://doi.org/10.17163/ings.n15.2016.05>
- Box, G. E. P., & Pierce, D. A. (1970). Distribution of residual autocorrelations in autoregressive-integrated moving average time series models. *Journal of the American Statistical Association*, 65(332), 1509-1526. <https://doi.org/10.1080/01621459.1970.10481180>
- Camones-Gonzales, F. C. (2002). *Control de calidad en los procesos estadísticos: una aproximación basada en los modelos ARIMA* (Vol. 2). Instituto Nacional de Estadística e Informática, Perú (INEI). Centro de Investigación y Desarrollo (CIDE). https://books.google.com.pe/books/about/Control_de_calidad_en_los_procesos_estad.html?id=JqqHrgEACAAJ&redir_esc=y
- Casas, M., & Cepeda, E. (2008). ARCH, GARCH and EGARCH models: Applications to financial series. *Cuadernos de Economía*, 27(48), 287-319. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1259248

- Ceballos Pérez, S. G., & Pire, R. (2015). Estimación del precio internacional del arroz (*Oryza sativa* L.) bajo el modelo ARIMA. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(Especial 11), 2083-2089. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.776>
- Corvi, D. (2017). Evidencia de volatilidad agrupada en el mercado accionario ecuatoriano: aplicación de un modelo Igarch para el índice Ecuindex. *Revista Economía y Política*, (25), 87-99. <https://doi.org/10.25097/rep.n25.2017.05>
- Cueva, V. E. R. (2024). *Series temporales avanzadas: modelos heterocedásticos ARCH y GARCH* (tesis para máster). Universidad de Granada. https://www.researchgate.net/publication/389624812_Series_Temporales_Avanzadas_Modelos_Heterocedasticos_ARCH_y_GARCH
- De Arce, R. (1998). *Introducción a los modelos autorregresivos con heterocedasticidad condicional (ARCH)* (documento de trabajo). https://www.researchgate.net/publication/266498360_INTRODUCCION_A_LOS_MODELOS_AUTORREGRESIVOS_CON_HETEROCEDASTICIDAD_CONDICIONAL_ARCH
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366a), 427-431. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10482531>
- Díaz, N. C. (2006). Distribuciones de probabilidad. El teorema central del límite. En: *Métodos estadísticos para enfermería nefrológica* (pp. 107-120). <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w24710w/8-CAP%208.pdf>

- Engle, R. F. (1982). Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation. *Econometrica*, 50(4), 987-1007. <https://doi.org/10.2307/1912773>
- Engle, R. F., & Bollerslev, T. (1986). Modelling the persistence of conditional variances. *Econometric Reviews*, 5(1), 1-50. <https://doi.org/10.1080/07474938608800095>
- GoldSim Technology Group LLC. (2026). *GoldSim software manual* (Versión 15, Rev. 2). <https://media.goldsim.com/Documents/Manuals/Version15/GoldSim.pdf>
- Hamzaçebi, C. (2008). Improving artificial neural networks' performance in seasonal time series forecasting. *Information Sciences*, 178(23), 4550-4559. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.07.024>
- Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (1994). *Time series modelling of water resources and environmental systems* (Vol. 45). Elsevier. <https://books.google.com.pe/books?id=t1zG8OUbgdgC>
- Janampa-Vallejo, M., & Quispe-Palomino, E. Y. (2021). *Modelamiento de la operación del reservorio Gallito Ciego para mejorar la gestión de los recursos hídricos* (tesis para Ingeniero Civil). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/656779>
- Jiménez-Motta, J. V. (2019). *Evaluación del funcionamiento hidráulico del aliviadero de la presa Gallito Ciego mediante modelación numérica tridimensional* (tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/4ae75508-b5c7-4191-b904-3593fe6821d3>

- Ljung, G. M., & Box, G. E. (1978). On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, 65(2), 297-303.
<https://doi.org/10.1093/biomet/65.2.297>
- Mamani, J. W. T., Melo, G. A., & Cahui, E. C. (2022). Impacto del COVID-19 en la demanda de turismo internacional del Perú: una aplicación de la metodología Box-Jenkins. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 27-36.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8686683>
- Mauricio, J. A. (2005). *Econometría I - Introducción al uso de EViews 3.1 (Apunte de cátedra)*. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad Complutense de Madrid.
<https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Ectr1-JAM-IntroEViews.pdf>
- Minagri, Ministerio de Agricultura y Riego, Autoridad Nacional del Agua, Autoridad Administrativa del Agua Jequetepeque-Zarumilla, & Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. (2015). *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca del río Jequetepeque*.
https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/erh-jequetepeque_2015_superficiales.pdf
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, & Proyecto Especial Jequetepeque-Zaña. (2023, agosto 17). *Operación de embalses durante eventos extremos: Caso práctico Gallito Ciego* [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/680754042/Operacion-Gallito-Ciego>

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Ndiritu, J., Odiyo, J., Makungo, R., Mwaka, B., Mthethwa, N., Ntuli, C., & Andanje, A. (2017). Development of probabilistic operating rules for Hluhluwe Dam, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 343-352. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.017>
- Ocaña-Peinado, F. M. (s.f.). *Análisis de variables relacionadas con la docencia e investigación en la Facultad de Farmacia: estimación y contraste de hipótesis*. Universidad de Granada. <https://www.ugr.es/~fmocan/MATERIALES%20CURSO/ESTIMACION%20Y%20CONTRASTES.pdf>
- Peralta-Gálvez, & Tapia-Monsalve, L. D. (2019). *Determinación de la capacidad de embalse de la represa Ite - Provincia de Jorge Basadre Tacna-Perú mediante el uso del software WEAP* (tesis de ingeniería). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú. <https://doi.org/10.19083/tesis/626090>
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2021). *HEC-ResSim: Reservoir System Simulation User's Manual* (Version 3.3). Hydrologic Engineering Center. https://www.hec.usace.army.mil/software/hecressim/documentation/HEC-ResSim_33_UsersManual.pdf

- Raicharoen, T., Lursinsap, C., & Sanguanbhokai, P. (2003, May). Application of critical support vector machine to time series prediction. In: *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'03)* (Vol. 5, pp. V-V). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2003.1206419>
- Reddy, J. R., Ganesh, T., Venkateswaran, M., & Reddy, P. (2017). Forecasting of monthly mean rainfall in Coastal Andhra. *International Journal of Statistics and Applications*, 7(4), 197-204. https://www.researchgate.net/publication/319135842_Forecasting_of_Monthly_Mean_Rainfall_in_Coastal_Andhra
- Rodríguez, A., & Marciano, L. (2022). *Influencia del ángulo de ataque del álabe directriz sobre la potencia generada en una turbina Michell-Banki mini central hidroeléctrica Gallito Ciego* (tesis de ingeniería). Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/103492>
- Romero, B. A., Bosque, M. I. A., & Martín, I. V. (2018). *Estudio del comportamiento de los contrastes de normalidad Jarque Bera y Lilliefors a través de experimentos de Monte Carlo*. <https://zaguan.unizar.es/record/86937/files/TAZ-TFG-2019-3805.pdf?version=1>
- Roque-Rojas, E. (2022). *Predicción de la demanda de pasajeros a clústeres de estaciones del Metropolitano usando métodos de data mining, la metodología Box-Jenkins y SARIMA* (tesis de ingeniería). Universidad de Lima. <https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/16675/Tesis.pdf?sequence=1>

- Scheidereiter, G. D., & Faure, O. R. (2022). *Aplicación de los modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA) a las series de precipitaciones de lluvia* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional de La Matanza. <https://repositoriocytc.unlam.edu.ar/handle/123456789/1000>
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, 6(2), 461-464. <https://www.jstor.org/stable/2958889>
- Sialer-Díaz, C. D. (2014). *Optimización del caudal mediante modelos estocásticos ARIMA para la aplicación hidroenergética de la infraestructura hidráulica Jequetepeque-Zaña* (tesis de maestría). Lambayeque, Perú. <https://es.scribd.com/document/605596609/02>
- Sjölander, P. (2011). A stationary unbiased finite sample ARCH-LM test procedure. *Applied Economics*, 43(8), 1019-1033. <https://doi.org/10.1080/00036840802600046>
- Statkraft Perú, S. A. (2016). *Memoria anual 2015*. <https://www.statkraft.com/globalassets/0/.pe/comunicaciones/publicaciones/statkraft-peru--memoria-anual-2015.pdf>