

The Impact of Hydroclimatic Variability on Hydroelectric Power Generation in the Mantaro River Basin in Peru Between 1990 and 2024

Ulises Francisco Giraldo Malca, Doctor¹; Saleth Bustamante Hernández²; Adriana Romina Aráoz Lozano³;
Cristina Priscila Novoa Poma⁴; Carlos Alberto Amaya Corredor⁵
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ, pcigugir@upc.edu.pe¹, u202320836@upc.edu.pe²,
u202422136@upc.edu.pe³, u20241A508@upc.edu.pe⁴
Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, camaya@correo.uts.edu.com⁵

Abstract— Currently, hydropower generation is the most sustainable alternative contributing to electricity production. This is essential for countries that do not have sufficient fossil fuel production. However, its sustainability is at risk due to the changes that global warming and the intensification of El Niño Costero are likely to cause. This study analyzes the impact of hydroclimatic variability on hydroelectric power generation in the Mantaro River basin from 1990 to 2024, taking into account the effects of climate change and ENSO events. The analysis used meteorological records from Peru's National Meteorology and Hydrology Service, flow rates from the National Water Resources Information System, and production data from the Mantaro Hydroelectric Complex. The results revealed pronounced seasonal rainfall patterns, with nearly 80% of precipitation occurring during the wet season, as well as an overall rise in temperatures. Hydroelectric production exhibited two distinct phases: growth until 2006 and a subsequent gradual decline until 2024. There were higher correlations with rainfall in unregulated basin sectors than with flows, which are strongly influenced by reservoir operations. ENSO analysis reveals significant water deficits during El Niño episodes, particularly during the dry season. While previous studies have reported downward trends in flows, the opposite behavior was observed during the evaluated period, which underscores the importance of local and multitemporal analyses. In conclusion, the Mantaro basin is highly vulnerable to hydro-energy due to climate variability, which underscores the need to strengthen hydro-climatic monitoring, optimize reservoir regulation, and promote adaptation strategies that reduce exposure to prolonged dry periods.

Keywords— El Niño-Southern Oscillation; hydroelectric power plant; Santiago Antúnez de Mayolo; water availability; energy security.

Impacto en la Variabilidad hidroclimática en la generación hidroeléctrica en la cuenca del río Mantaro, Perú entre 1990 y 2024

Ulises Francisco Giraldo Malca, Doctor¹; Saleth Bustamante Hernández²; Adriana Romina Aráoz Lozano³;
Cristina Priscila Novoa Poma⁴; Carlos Alberto Amaya Corredor⁵
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ, pcigugir@upc.edu.pe¹, u202320836@upc.edu.pe²,
u202422136@upc.edu.pe³, u20241A508@upc.edu.pe⁴
Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, camaya@correo.uts.edu.com⁵

Resumen– La generación hidroeléctrica es la alternativa sostenible que mayor aporte tiene actualmente a la producción de electricidad, fundamental para países que no cuentan con producción suficiente de combustibles fósiles, pero su sostenibilidad está en riesgo por los cambios que estarían generado el calentamiento global y la intensificación de El Niño Costero. En ese sentido la investigación analiza el efecto de la variabilidad hidroclimática sobre la generación hidroeléctrica en la cuenca del río Mantaro entre 1990 y 2024, considerando la incidencia del cambio climático y eventos de ENOS. Se emplearon registros meteorológicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú y de la plataforma web NASA POWER, caudales del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos, así como la producción del Complejo hidroenergético del Mantaro. Los resultados muestran una marcada estacionalidad pluviométrica, con cerca del 80% de precipitaciones concentradas en la estación húmeda, así como un incremento generalizado de las temperaturas. La producción hidroeléctrica mostró dos fases diferenciadas, de crecimiento hasta 2006, seguido por un descenso gradual hasta 2024, teniendo correlaciones más altas con las precipitaciones en sectores de cuenca sin infraestructura de regulación, superando a las relaciones que presenta con los caudales (fuertemente influenciados por la operación de embalses). El análisis del ENOS revela déficits hídricos significativos durante eventos El Niño, particularmente en la estación seca. Aunque estudios previos reportan tendencias decrecientes de caudal, se identifica un comportamiento opuesto para el periodo evaluado, subrayando la importancia de análisis locales y multitemporales. Finalmente se concluye que hay una alta vulnerabilidad hidroenergética en la cuenca del Mantaro frente a la variabilidad climática, destacando la necesidad de fortalecer el monitoreo hidroclimático, optimizar la regulación de embalses y promover estrategias de adaptación que reduzcan la exposición a periodos secos prolongados.

Palabras clave-- El Niño-Oscilación Sur; central hidroeléctrica; Santiago Antúñez de Mayolo; disponibilidad hídrica; seguridad energética.

I. INTRODUCCIÓN

La demanda energética a nivel global ha registrado un incremento de 260% a 275% entre 1965 y 2020 [1] aumento que está estrechamente asociado al crecimiento poblacional, la expansión económica y los procesos de industrialización y urbanización, especialmente en países emergentes, donde el consumo energético aumenta a un ritmo superior al promedio mundial [2]. El aumento del producto interno bruto y de la población ejerce una presión directa sobre los sistemas energéticos, al incrementar la demanda de fuentes capaces de

suministrar electricidad a gran escala y continua [2]. Así, se proyecta que el consumo de energía global se incrementará en un 145% para el año 2030, y en un 290% para el 2050 [1]. En este contexto, la seguridad energética se convierte en un elemento clave del desarrollo económico y social, al garantizar la estabilidad del suministro frente al crecimiento de la demanda y a cambios estructurales en las economías [3], pero conlleva un mayor uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) y un mayor consumo de agua para la producción hidroeléctrica [4].

La energía hidroeléctrica es una forma de energía renovable que aprovecha el flujo y caída del agua para generar electricidad [5]. A nivel mundial, tiene un aporte del 16% de la energía producida, y dentro del conjunto de energías renovables, representa cerca del 78% de la producción total, lo que la convierte en la fuente renovable más importante y competitiva en términos económicos [5]. Sin embargo, esta forma de energía estaría en riesgo, puesto que los cambios generados por el calentamiento global en climas y ecosistemas locales podrían alterar significativamente la producción de energía [5].

Las zonas de alta montaña son especialmente susceptibles al cambio climático, pues presentan un incremento de temperatura mayor que lugares más bajos. Este fenómeno modifica la forma en la que se almacena agua e intensifica eventos como flujos de detritos, pérdida glaciaria, deslizamientos o sequías [6]. Además, incrementa la variabilidad hidroclimática, alterando las fluctuaciones del ciclo hidrológico y de los patrones climáticos [7], fenómeno que se ha convertido en uno de los grandes retos para la sostenibilidad de la producción hidroeléctrica, ya que altera la disponibilidad de agua en las cuencas a través de cambios en la precipitación, el aumento de la temperatura y la ocurrencia de eventos extremos. Por ejemplo, Zhang et al. [8] señala que la variabilidad de la precipitación se ha incrementado en un 75% y la variabilidad de precipitación diaria, en un 1,2% por década. Del mismo modo, Li et al. [9] indica que se espera que se acentúen más los periodos húmedos y secos, lo que genera mayor inestabilidad en la generación hidroeléctrica, porque los excesos de agua no siempre pueden aprovecharse y los déficits reducen la producción. Además, la evapotranspiración como componente del sistema climático mediante el cual el agua del suelo y de las plantas pasa a la atmósfera [10], viene cambiando ante las

variaciones en la temperatura, y estaría impactando la disponibilidad hídrica. Así, se proyecta que ante un aumento de temperatura media mundial de 1.5 °C, se incrementaría en 4% la evapotranspiración potencial (ETP) para el periodo entre 2020 a 2039 con respecto a niveles preindustriales, y de hasta 8% con un incremento de 2 °C para el periodo 2040 a 2059 [11]. En consecuencia, la confluencia de todos estos procesos puede resultar en un déficit hídrico dentro de las cuencas y en una menor disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica [12].

Otro factor que altera el régimen de caudales es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) [13], evento atmosférico que genera fluctuaciones en el sistema climático global y alterna entre: a) El Niño, caracterizado por el calentamiento de la superficie del Pacífico ecuatorial con fuertes precipitaciones en la vertiente occidental Sudamericana y sequías en la vertiente oriental; y b) La Niña, que se relaciona con temperaturas frías en el Pacífico ecuatorial oriental [14], condiciones secas en la vertiente occidental y precipitaciones más intensas en la cuenca amazónica [15]. En América del Sur, se ha encontrado una relación entre la ocurrencia de estos eventos y los cambios en el promedio mensual del caudal de los ríos [16], como durante el periodo de 2015-2016, la cuenca del Amazonas experimentó una reducción del 30% al 40% en las descargas del río asociada a la ocurrencia de El Niño [17]. Asimismo, se sabe que la ocurrencia de La Niña incrementa las precipitaciones en los Andes centrales, especialmente durante la primavera y el verano austral [18], favoreciendo una mayor duración e intensidad de la temporada de lluvias.

Todos estos factores impactan en la disponibilidad hídrica de las cuencas [15], poniendo en riesgo la producción hidroeléctrica como se evidencia en Colombia, donde aproximadamente el 70% de la electricidad proviene de esta fuente. Allí se han experimentado impactos severos debido a la ocurrencia de ENOS, como el evento El Niño registrado entre 1992 y 1993, que causó apagones debido a la fuerte reducción en los caudales de los ríos [19]. Asimismo, otro país impactado es Ecuador, que redujo drásticamente la capacidad de generación hidroeléctrica ante la sequía registrada en 2023 y 2024 (ENOS fuerte), estimando que, de no tomar acción, el país se exponía a un déficit energético cercano a 250 días sin energía para el año 2029 [20].

En el Perú, la variabilidad de los caudales es un factor crítico para mantener la seguridad energética del país, pues cerca del 59% de nuestra electricidad proviene de hidroeléctricas, que lo hacen dependiente de la disponibilidad hídrica [13]. El proyecto hidroeléctrico del Mantaro produce entre el 13% y 20% de la electricidad que consume el Perú [21], con una capacidad de generación de 1008 MW [22], por lo que su correcto funcionamiento es crucial para mantener la estabilidad y seguridad energética del país. No obstante, la cuenca del río Mantaro es altamente vulnerable a la disponibilidad hídrica y su variabilidad, inducida por el cambio climático o el ENOS, como quedó evidenciado con la sequía ocurrida entre 1991 y 1992 en la cuenca del río Mantaro, que

coincide y se asocia con el evento de El Niño de 1992 [23]. Por ejemplo, se proyecta que, ante el incremento de las temperaturas de 3,3°C a 5°C para el final del presente siglo, se producirá un aumento considerable de la evapotranspiración, la disminución de las precipitaciones, la ocurrencia de sequías prolongadas y la reducción del 52% de las áreas aptas para almacenamiento de agua en la cuenca [24].

Asimismo, es necesario recalcar el impacto de la pérdida glaciaria en la cuenca, al ser reservorios de agua importantes para el ciclo hidrológico de los Andes y constituir la principal fuente para el río Mantaro durante la temporada seca [25]. Por ejemplo, la cordillera Huaytapallana, que aporta al caudal del río Mantaro, presenta una disminución en la cobertura de 55% entre 1984 y 2011 [26], pérdida que plantea una serie de riesgos ambientales, sociales y económicos, además de una mayor vulnerabilidad para la generación hidroeléctrica en la cuenca [27].

Considerando que la variación de generación de energía del complejo hidroeléctrico Mantaro (CHM), conformado por la central Santiago Antúnez de Mayolo (SAM), la más grande del país [28] y la central Restitución (RON), que utiliza el agua que no usó SAM [29], tiene fuerte impacto en la realidad socioeconómica de Perú, es necesario entender cómo ha cambiado su producción en relación al cambio climático, la ocurrencia de eventos ENSO, las evidentes variaciones hidrológicas registradas en la cuenca del río Mantaro en los últimos años [25], así como determinar los sectores de la cuenca que mayor impacto tienen en la disponibilidad hídrica para el complejo y su producción. Esta información será útil a tomadores de decisiones y otros gestores para focalizar recursos y esfuerzos en reducir la vulnerabilidad del complejo y adaptarse frente a los escenarios que se plantean a futuro. En este sentido, el objetivo de la investigación es analizar la relación de la variabilidad espaciotemporal hidroclimática con la generación de energía hidroeléctrica en la cuenca del río Mantaro en el periodo de 1990-2024.

II. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Mantaro es una unidad hidrográfica extensa y estratégica en la vertiente del Atlántico peruano (Fig. 1). Ubicada en los andes centrales, se extiende principalmente sobre los departamentos de Pasco, Junín y Huancavelica, con una extensión territorial de 34,363 km², y un rango altitudinal que va desde los 1,581 m s.n.m. (vertimiento de la CH SAM en el río Mantaro) hasta los 5,750m s.n.m. (nevado Pariacaca). Presenta un clima frío en zonas por encima de los 4,000 m s.n.m. y templado en zonas más bajas, cuyas precipitaciones estacionales se concentran principalmente entre los meses octubre y marzo, complementado por un invierno seco [30]. El río Mantaro se forma en el lago Junín o Chinchaycocha ubicado en la meseta de Bombón, desde donde fluye hacia el sur hasta su confluencia con el río Apurímac, para formar el río Ene [31]. Su red hidrológica conecta zonas altoandinas húmedas con áreas de transición andino-amazónicas semiáridas y subhúmedas, lo que convierte al

Mantaro en un corredor hidrológico de alta complejidad y relevancia ecológica.

La cuenca presenta una forma alargada, característica de las unidades hidrográficas interandinas, con divisorias conformadas por montañas escarpada que circundan la cuenca (región Cordillera). Sus nacientes hasta la Presa de Malpaso conforman una meseta de fisiografía ondulada y de altiplanicie llamada meseta de Bombón (Puna), seguida del valle del Mantaro, que se extiende desde Jauja hasta Chupuro (región Quechua), para continuar su descenso por estrechas gargantas de relieves quebrados y fuertes pendientes, cuya marcada gradiente altitudinal es aprovechada para la producción hidroenergética (región Yunga) [32].

III. MÉTODOS

La presente investigación es cuantitativa, descriptiva y correlacional, desarrollada con técnicas estadísticas y análisis de series temporales para establecer relaciones entre la variabilidad hidrológica y la producción de energía hidroeléctrica. Se obtuvo información de diferentes bases de datos oficiales del Perú que facilitaron el acceso a data confiable y de calidad, además de literatura científica indexada a *SCOPUS* y *Web of Science*. Las principales fuentes institucionales incluyeron al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú (SENAMHI), el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH), así como datos de producción de energía anual de las centrales hidroeléctricas SAM y RON proporcionados por la empresa Electroperú S.A.

A. Determinación de las condiciones hidrometeorológicas en la cuenca del río Mantaro

El análisis de las condiciones atmosféricas de la cuenca del río Mantaro se realizó con data histórica de precipitación y temperatura de seis estaciones meteorológicas disponible en el sitio web de SENAMHI, próximas a zonas estratégicas que regulan el caudal del río Mantaro como los nevados Huaytapallana y Pariacaca, las lagunas de Marcapomacocha, y las lagunas de los distritos de Chongos Alto y Acobambilla. Estos datos se procesaron en hojas de cálculo de *Microsoft Excel* para obtener valores de precipitación anual y temperaturas para cada año, información que permitió analizar la estacionalidad de los regímenes térmicos y pluviométricos, así como reconocer la variabilidad interanual y las tendencias que determinan la disponibilidad hídrica de la cuenca.

Se usaron datos de 2 estaciones hidrométricas del SNIRH denominadas Media Mantaro ($12^{\circ}31'59.2''$ S; $74^{\circ}56'17.5''$ O) y Tablachaca ($12^{\circ}27'51.5''$ S; $74^{\circ}47'6.7''$ O), ubicadas aguas arriba y aguas abajo de la presa Tablachaca (donde se ubica la bocatoma de la central hidroeléctrica Santiago Antúnez de Mayolo) respectivamente.

Se identificaron años con ocurrencia de eventos ENOS, se obtuvo registros de su medición con el Índice Costero de El Niño (ICEN) y se descargó el reporte de Anomalías térmicas Globales de la *National Aeronautics and Space Administration* de los Estados Unidos de Norteamérica (NASA), para determinar su impacto en la variabilidad de precipitaciones y temperaturas anuales, así como en la producción hidroeléctrica del CHM.

B. Análisis de la relación entre variabilidad hidrológica y generación energética

Se realizó la sistematización y procesamiento de data en hojas de cálculo y tablas dinámicas de *Microsoft Excel*, para generar gráficos de dispersión bivariados que permitieron identificar periodos secos y húmedos, patrones estacionales y años extremos (mínimos y máximos), así como su correspondencia con variaciones en la generación hidroeléctrica.

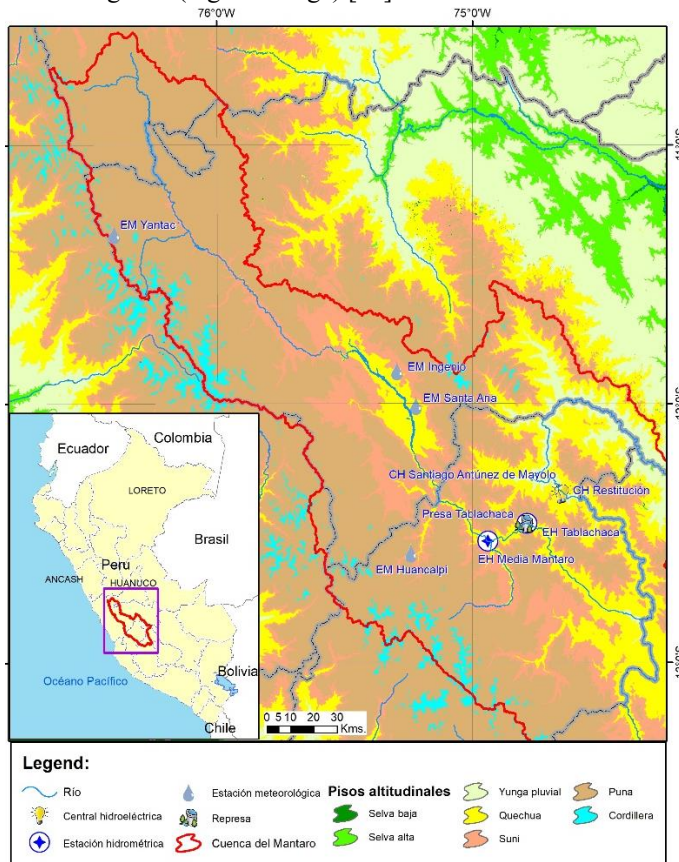


Fig 1. Mapa ubicación del CHM y estaciones hidrometeorológicas seleccionadas de la cuenca hidrográfica del Mantaro.

De acuerdo con el Registro Administrativo de Derechos de Uso de Agua, las actividades agrícolas consumen cerca del 70% del volumen autorizado de agua en la cuenca, mientras que la generación hidroeléctrica aproximadamente el 20%. En menor medida, los sectores minero y ganadero representan en conjunto cerca del 10% de todo el caudal aprovechado [33]. La Autoridad Nacional del Agua de Perú (ANA) indica que la coexistencia de diferentes usos puede estar generando competencia estacional por el recurso durante los periodos secos, lo que incrementa la vulnerabilidad hídrica en zonas más bajas [32].

Se establecieron relaciones cuantitativas entre las variables hidroclimáticas y la producción energética mediante análisis de series temporales y comparación de tendencias anuales en el *software Minitab*. El análisis de correlación anual se realizó utilizando el coeficiente de *Pearson* y se consideraron estadísticamente significativas aquellas correlaciones que arrojaron un valor de $p\text{-value} < 0.05$.

C. Procesamiento y control de calidad de datos

El control de calidad incluyó la eliminación de datos erróneos (registros con valores no numéricos) y la verificación de consistencia temporal de las series. En caso de datos faltantes, estos se excluyeron del análisis, priorizando la integridad de las series temporales completas disponibles.

IV. RESULTADOS

A. Variabilidad espacio-temporal de la precipitación y temperatura

El análisis de las estaciones meteorológicas distribuidas en la cuenca del río Mantaro evidencia una marcada heterogeneidad espacial y temporal en los regímenes pluviométricos. En la EM Yantac ubicado cerca el sector denominado Marcapomacocha en la cuenca alta, la precipitación promedio anual es de 819 mm con una tendencia incremental que habría elevado las precipitaciones anuales en 72 mm de 1970 al 2022. Del mismo modo, para el mismo periodo, las EM Santa Ana (en la ciudad de Huancayo, con 742 mm) y Huancalpi (próximo al sector de lagunas de Chongos Alto y Acobambilla, con 925 mm), mostraron tendencias similares, con incrementos de 380 y 136 mm respectivamente, pero contraria a la tendencia de las precipitaciones en la EM de Ingenio (valle del Mantaro con 760 mm al año) donde las precipitaciones anuales habrían descendido 114 mm.

La distribución intra-anual de las precipitaciones presenta una estacionalidad marcada, porque hay una alta concentración de precipitaciones en el periodo de octubre – marzo (alrededor de 80%), mientras que durante los meses de abril a setiembre solo precipitan entre 118 y 256 mm. Por otro lado, notamos que, a pesar de que las precipitaciones en la mayoría de las EM están aumentando, la diferencia entre ambas temporadas también está cambiando, porque en la EM Huancalpi la concentración de la precipitación en los meses de primavera y verano (estación húmeda) se incrementó en 8.6%, en la EM Yantac 4.2%, y en la EM Ingenio 1.3%, a diferencia de la EM Santa Ana donde se redujo en 2.6%.

Las temperaturas presentan un incremento en todas la EM procesadas de sus valores máximos, mínimos y medios, como en la EM Hualcapi ($T^{\circ}_{media} = 10.1^{\circ}\text{C}$) con un aumento de 1.9°C , en la EM Santa Ana ($T^{\circ}_{media} = 12.2^{\circ}\text{C}$) de 0.95°C , y en la EM Ingenio ($T^{\circ}_{media} = 11.63^{\circ}\text{C}$), muestra un incremento de 0.5°C . De la misma manera, la temperatura mínima promedio se ha incrementado en 0.36°C , 2.13°C y 1.26°C , y la temperatura máxima promedio en 0.50°C , 0.40°C y 1.81°C para cada una de las estaciones respectivamente.

B. Dinámica de caudales del río Mantaro

Los caudales del río principal, registrados en la estación hidrológica Medio Mantaro, ubicada antes de la represa de Tablachaca, han variado entre un máximo de $511.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1994 y un mínimo de $46.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1996, mostrando una tendencia incremental en sus caudales base en $3.86 \text{ m}^3/\text{s}$ (2.1%), medios en $8.78 \text{ m}^3/\text{s}$ (2%) y máximos en $5.41 \text{ m}^3/\text{s}$ (1.1%), en el periodo 1970 - 2022.

Al analizar las fluctuaciones de los caudales en el río Mantaro, se evidencia un incremento del 14.3% del caudal promedio entre 1990 y 2022, comportamiento que se repite en el caso de los caudales máximos mensuales, tanto en la estación húmeda (19.7%) como en la estación seca (18.3%). Sin embargo, al realizar la comparación de caudales mínimos anuales (flujo base) se observa que en la estación húmeda el caudal base está descendiendo en una mayor proporción (-21%) y que es contraria a la tendencia que tiene la estación seca donde se ve un aumento (10.1%), llegando a apreciar que en los últimos 6 años del registro el caudal mínimo de la estación seca fue superior al caudal mínimo de la estación húmeda.

En la estación hidrológica Tablachaca, ubicada aguas abajo de la CHM, los caudales máximos ($78.6 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 513.5 \text{ m}^3/\text{s}$) y medios ($15.6 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 74.6 \text{ m}^3/\text{s}$), se incrementaron en 1.8% y 2.4% respectivamente, mientras que el caudal mínimo registra valores de 0 para todos los años en el periodo de estudio.

C. Relación entre variables hidroclimáticas y generación hidroeléctrica

Las precipitaciones de las EM Ingenio, Yantac y Santa Ana tienen correlaciones moderadas significativas con los caudales del río Mantaro. En el caso de los caudales máximos (crecidas) el menor valor lo tiene la EM Ingenio ($r=0.388$, $p=0.041$) y la más alta con la EM Yantac ($r=0.493$, $p=0.012$); mientras que el caudal promedio tiene mejor correlación con la EM Santa Ana ($r=0.471$, $p=0.015$) y la correlación más baja es con la EM Ingenio ($r=0.392$, $p=0.039$). Por el contrario, las precipitaciones registradas en la EM Huancalpi muestran una mejor correlación con el caudal mínimo, aunque no llega a ser significativa ($r=0.349$, $p=0.069$).

Las correlaciones más robustas fueron las obtenidas al analizar los resultados de la producción de energía del complejo y las precipitaciones anuales registradas en las EM al interior de la cuenca del río Mantaro (Fig. 2), siendo directas en el caso de la EM de Ingenio ($r = 0.773$, $p < 0.001$), Yantac ($r = 0.695$, $p < 0.001$) y Santa Ana ($r = 0.682$, $p < 0.001$), excepto en la EM de Huancalpi, donde se obtuvo una correlación moderada inversas ($r = -0.482$, $p=0.007$).

A nivel de producción específica por central hidroeléctrica y generadores de cada una de ellas, se encontró que las correlaciones más altas fueron de la producción eléctrica de SAM ($r = 0.763$; $p < 0.001$) y de RON ($r = 0.778$, $p < 0.001$), así como la de todos los generadores de la central ROM y tres generadores de los siete que dispone la central SAM, con los registros de precipitaciones de la EM de Ingenio (Fig. 3). Los generadores que mostraron mejor correlación con otras EM

fueron G3 con la EM Huancalpi ($r=-0.664$; $p<0.001$), G4 con la EM Yantac ($r=0.698$, $p<0.001$), G6 ($r=0.62$; $p<0.001$) y G7 ($r=0.612$; $p=0.001$) con la EM Santa Ana.

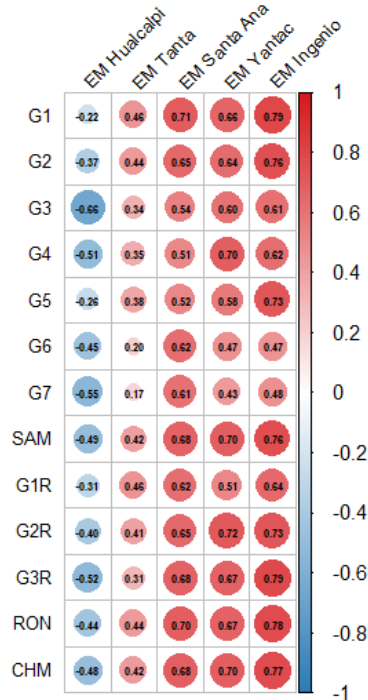


Fig. 3. Matriz de correlación entre la producción hidroeléctrica anual por generador y precipitaciones anuales de cada EM analizada

Del mismo modo, para los datos de temperatura, la mayoría de las correlaciones significativas fueron con los registros de la EM Santa Ana, mostrando valores moderados e inversos en el caso del promedio de máximas ($-0.555 < r < -0.396$; $p < 0.04$), promedio de mínimas ($0.395 < r < 0.652$; $p < 0.04$) y mínimas ($0.389 < r < 0.422$; $p < 0.05$). En menor medida el promedio de máximas de la EM Ingenio presentó correlaciones inversas con 3 generadores ($-0.62 < r < -0.582$; $p < 0.05$), el promedio de mínimas con 4 generadores ($0.435 < r < 0.485$; $p < 0.05$) y una correlación significativa moderada inversa de la producción del generador G-2 con el promedio de las mínimas ($r=-0.53$, $p=0.024$).

Al comparar la producción eléctrica con los caudales registrados en las estaciones hidrológicas del río Mantaro, se obtuvieron correlaciones significantes de 6 generadores con las máximas anuales ($0.364 < r < 0.515$, $p<0.04$) y el caudal medio anual ($0.358 < r < 0.496$, $p < 0.05$), 4 generadores con el caudal medio de la estación húmeda ($0.349 < r < 0.452$, $p<0.05$), 5 generadores con el caudal medio de la

estación seca ($0.367 < r < 0.512$, $p<0.04$), 3 generadores con el caudal máximo en la estación seca ($0.354 < r < 0.417$, $p<0.05$), 2 generadores con el caudal mínimo en la estación húmeda pero de tipo inverso ($-0.408 < r < -0.355$, $p<0.05$), y finalmente entre el generador G-6 con el caudal mínimo de la estación seca ($r = 0.378$, $p=0.03$).

La matriz de sensibilidad evidencia una relación ENSO-caudal altamente estacional. Durante el período seco (MAM-ASO), predominan anomalías negativas bajo El Niño, con déficits extremos de -49% a -111% en JJA, confirmando una relación inversamente proporcional entre calentamiento oceánico y disponibilidad hídrica. En contraste, el período húmedo (DEF-FMA) registra anomalías positivas moderadas a altas bajo La Niña (hasta $+95\%$), asociadas al fortalecimiento del sistema monzónico sudamericano. La amplitud de variación entre extremos alcanza $\pm 165\%$, lo que subraya que la cuenca es más sensible a ENSO durante el estiaje, donde El Niño amplifica déficits críticos que coinciden con máxima demanda energética, aumentando significativamente el riesgo para la generación hidroeléctrica.

La gráfica revela que el incremento del ICEN durante la estación seca (de abril a septiembre) suele ir acompañado de disminuciones moderadas en el caudal, sobre todo en los trimestres JJA, JAS y ASO, en los cuales es más notoria la pendiente negativa. Esto señala que las condiciones cálidas del ENSO se asocian con anomalías de caudal más reducidas, a la vez que los valores negativos (La Niña) tienden a estar relacionados con caudales más altos. En general, el patrón confirma que la cuenca del Mantaro tiene una mayor sensibilidad a El Niño en la época seca, cuando los caudales son naturalmente bajos.

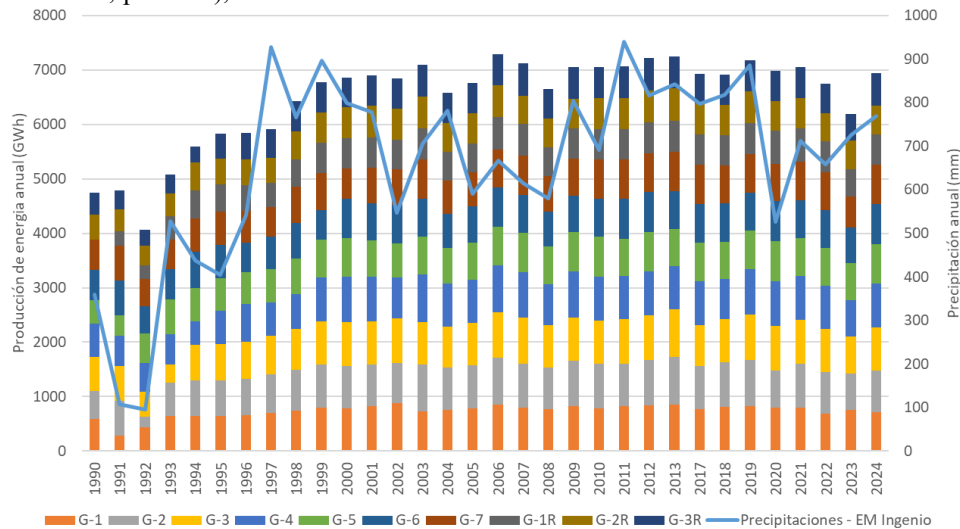


Fig. 3. Comparación de la producción anual de energía hidroeléctrica y precipitaciones anuales de la EM Ingenio.

Nota. La producción de los generadores G-1, G-2, G-3, G-4, G-5 y G-7 corresponden a la central SAM y los generadores G-1R, G-2R y G-3R a la central RON (Electroperu, 2025).

V. DISCUSIONES:

Los elementos hidroclimáticos estudiados en la cuenca del río Mantaro se caracterizan por una estacionalidad marcada y delimitada por la ocurrencia del Sistema Monzónico Sudamericano [34]. Las precipitaciones se encuentran distribuidas de forma desigual a lo largo del año, así, se encontró que alrededor del 80% ocurren de octubre a marzo, periodo en el que las precipitaciones son suficientes para satisfacer la demanda de la ETP. Al mismo tiempo, se ha notado que existe un incremento en la estacionalidad de las precipitaciones en la mayor parte del área de estudio, porque la concentración en la temporada húmeda se ha incrementado especialmente en zonas altas (>3,800 m s.n.m.) y en el sector sur occidental de la cuenca.

Ello es consistente con las proyecciones realizadas por SENAMHI hacia el año 2100, cuando se espera un incremento del 5% al 16% de lluvias en primavera y verano (temporada húmeda) dependiendo del sector de la cuenca, originado por precipitaciones más intensas. Sin embargo, se reporta una reducción en el sector norte (superior a 4200 m s.n.m.), donde se estima una disminución de hasta el 35% de precipitaciones en invierno [35], tendencia que concuerda con nuestros resultados donde las lluvias del periodo seco están disminuyendo ($y = -1.0785x + 2333.8$), a diferencia de las precipitaciones de la estación húmeda que presentan un fuerte incremento.

Trasmonte et al. Indica que el análisis de la variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones en la cuenca del río Mantaro muestra una tendencia negativa en la temporada de lluvias entre 1970 y 2004, con una reducción aproximada del 2% por década y una menor duración del periodo lluvioso debido al retraso en su inicio [27]. Del mismo modo, factores como ENOS y eventos extremos como la sequía del 2010 y El Niño Costero de 2017 influyeron significativamente en estos patrones, retrasando o adelantando la temporada lluviosa [27] y reduciendo la predictibilidad. En este sentido, las proyecciones sugieren una mayor irregularidad en la distribución de lluvias y un aumento en el déficit hídrico [27]. Estos cambios tienen un impacto directo en la generación hidroeléctrica [25], lo que resalta la importancia de implementar una adecuada gestión del recurso hídrico y medidas de adaptación al cambio climático.

A diferencia de lo indicado por Trasmonte et al, al señalar que las precipitaciones en la cuenca del río Mantaro están disminuyendo [27], tras analizar la data meteorológica histórica disponible, se identificó que el 75% de las EM elegidas al interior de la cuenca, mostraron una tendencia al incremento de las precipitaciones anuales a lo largo de todo el periodo analizado. Por ejemplo, el sector de lagunas de Chongos Alto y Acobambilla, aguas arriba de la EM Huancalpi, tendría un incremento de las precipitaciones de aproximadamente 136 mm en las últimas 5 décadas, y en el caso del flanco occidental del nevado Huaytapallana, donde se ubica la EM Santa Ana, de hasta 380 mm en el mismo periodo. Ello es consistente con las proyecciones realizadas por el SENAMHI, que establece que el sector sur de la cuenca espera un incremento de las

precipitaciones de entre un 5% y 10% en verano y entre 6% y 14% en primavera para el periodo 2090-2100 [36]. Del mismo modo, encontramos que en la EM Yantac, próxima al sector Marcapomacocha, se tuvo un incremento en la tendencia de lluvias anuales de hasta 72 mm entre 1970 y 2022, a diferencia de lo estimado por SENAMHI, que proyecta un descenso en las precipitaciones de 6% en verano, 5% en otoño y 35% en invierno para fines de siglo, en los territorios encima de los 4,000 m s.n.m., en zonas como Cerro de Pasco y Marcapomacocha [36].

Por otra parte, se encontró una reducción de las precipitaciones en la EM Ingenio de hasta 114 mm entre 1970 al 2022, lo cual coincide con la proyección de reducción de las precipitaciones del 6% para el sector norte de la cuenca planteada por el SENAMHI en 2009 [36]. Este patrón de las precipitaciones anuales en la EM Ingenio, contrario al que presentan las otras EM en la cuenca, puede tener su explicación en el efecto sombra de lluvias que genera las cumbres de los nevados de Huaytapallana en la cordillera central (5,557 m.s.n.m.), ubicados exactamente al este de la localidad de Ingenio. Esta incidencia sería menor en la ciudad de Huancayo (donde se ubica la EM Santa Ana) al estar dispuesta en el cono deyectivo del río Shullcas, cuyas nacientes se disponen en el abra Huaytapallana (4,570 m.s.n.m.), donde la cordillera central es más baja y tiene un efecto menor en la reducción de lluvias de la vertiente de sotavento.

Algunos de los principales hallazgos son correlaciones altas y moderadamente altas encontradas entre la generación de energía hidroeléctrica y las precipitaciones registradas por la EM de la cuenca alta y valle del Mantaro ($r > 0.68$), especialmente con la EM Ingenio, lo que sugiere una fuerte dependencia climática de este sector, debido a que la precipitación de las zonas altas de una cuenca regula el flujo de escorrentía del cauce aguas abajo, e influye en la disponibilidad hídrica para la generación hidroeléctrica [37]. Precisamente al observar la producción de energía del CHM, se ve una tendencia al incremento a lo largo de los 35 años analizados, pero en este periodo se puede diferenciar claramente dos momentos distintos, el primero entre 1990 y 2006 (año con el mayor registro) de un marcado incremento en la producción de energía ($y = 172.73x + 4525$), seguido por un segundo periodo entre 2006 y 2024 en el que se aprecia una tendencia de descenso ($y = -24.547x + 7191.9$), patrón que se repite en la producción individual de las centrales SAM y ROM. Este comportamiento de la producción histórica en el CHM explicaría porque la correlación más fuerte se da con las precipitaciones de la EM Ingenio, la única con tendencia descendente en el área de estudio. Ello coincide con lo planteado por Li et al. [9], quienes señalan que los sistemas hidroenergéticos en zonas andinas dependen de manera marcada de la disponibilidad hídrica interanual.

Otra explicación para la reducción que viene presentando la producción de energía hidroeléctrica en el CHM sería la concentración de las precipitaciones en los meses de octubre a marzo que muestran tres de las cuatro EM analizadas

aumentando entre 1.3% y 8.6%, disminuyendo el aporte de los meses de estiaje y reduciendo la distribución de aporte hídrico a lo largo del año. Este efecto se produce porque, como precisa Kronenberg et al., la precipitación es un factor influyente en la generación hidroeléctrica en zonas de alta montaña, y que una mayor estacionalidad en las precipitaciones puede conducir a una reducción en la acumulación de masa glaciar y un incremento en la energía de ablación, lo que deriva en déficit hídrico para el sector hidroeléctrico en la temporada seca [38].

La fuerte correlación entre las temperaturas del área de estudio con las anomalías térmicas globales reportadas por la NASA, dan a entender que su incremento se debería al calentamiento global, por la clara tendencia al ascenso que muestran sus valores medios coincidente con los patrones que plantea los escenarios RPC 4.5 y 8.5 para el año 2100 (+2.3°C y +4.2°C) [39].

Este factor estaría impulsando el descenso de la disponibilidad hídrica, debido al incremento de la ETP por el aumento de las temperaturas reportado por SENAMHI de 0.01°C a 0.02°C por año [35], que según Wongchuig et al. se proyecta que, para final del presente siglo, la ETP subirá entre 12% y 20% [40]. Ello afectaría el balance hídrico en la cuenca, pues se proyecta un incremento del 52% del déficit hídrico principalmente en el periodo de abril a setiembre [40]. Asimismo, se observa que los años con mayores temperaturas máximas coinciden con los de menores precipitaciones. Ello se debería a que, en años más secos, la menor nubosidad permite el incremento de la insolación, que impulsa el ascenso de la temperatura máxima superficial, especialmente en los meses de primavera y verano, en los que el sistema alcanza los máximos valores de declinación solar y se tiene los días de mayor fotoperiodo. De esta forma se agrava la respuesta del sistema climático, haciendo más probable la ocurrencia de temperaturas extremas, empeorando el estrés hídrico que afectaría a la cuenca [41].

La estacionalidad de las precipitaciones es directamente proporcional con la variación de caudal, pues este es 51% superior en el periodo húmedo que el registrado en el periodo seco. En el análisis de caudales en la EH Medio Mantaro, de acuerdo con las tendencias que marcan sus registros, se ve un incremento del caudal mínimo en la estación seca en el periodo de 1990 a 2022 (59.5 m³/s a 65.5 m³/s), que representa +10.1%. Sin embargo, en la estación húmeda se produce un descenso de los caudales mínimos de esta temporada, pues se redujo en 21% para el 2022 (55.8 m³/s) con relación a 1990 (70.7 m³/s).

Este contraste en el comportamiento de los caudales mínimos entre la estación húmeda y la estación seca puede ser explicado por los procesos de pérdida de cobertura glaciar que se está dando en las cumbres de Huaytapallana en la cordillera central que reporta una reducción del 56% en 27 años [42] y del Pariacaca en la cordillera occidental, deshielo que ha aumentado los caudales de los cursos de agua que nacen en sus vertientes durante la época de estiaje, como en el caso del río Shullcas, alimentada por el nevado Huaytapallana [35]. No obstante, escenarios a futuro reportan una reducción del caudal

del río Mantaro de 384.1 m³/s a 251.3 m³/s para el 2050 [43]. Estudios señalan que, ante la pérdida glaciar, en un primer momento (como el actual) aumentarán los caudales, seguido de un segundo momento en el que disminuirán de manera irreversible. Por ejemplo, en el glaciar de Conejeras en Colombia, en donde se registró un retroceso glaciar del 37% desde 2006 al 2016, también se presentó un incremento del caudal hasta ese mismo año, para luego empezó a disminuir [44]. Este es el impacto que se espera para el río Mantaro una vez se pierda la reserva de agua glaciar y su principal aporte en temporada con bajas precipitaciones. De igual manera, se estima que en el periodo de 2029 – 2035 se presentarán principalmente años secos y solamente de 1 de cada 3 años normales para la estación hidrométrica La Mejorada, perteneciente al sector Sur de la cuenca del Mantaro [35].

En cambio, la reducción de los caudales mínimos en la estación húmeda puede estar asociada a la intensificación de las precipitaciones o la expansión de las áreas urbanas que incrementan la escorrentía superficial inmediata [44]. Asimismo, la contaminación de suelos y cauces con material particulado fino producto del cambio de uso de suelo o vertimiento de actividades mineras, que se desarrolla en varias localidades de la cuenca como Cerro de Pasco, Yauli o Huancavelica [46], puede reducir la porosidad del suelo, limitar la infiltración y recarga del acuífero, impactando el flujo base [47].

El impacto que generaría la expansión de la ciudad de Huancayo, como centro urbano más importante de la cuenca, en la recarga del acuífero, explicaría la mayor correlación que presentan las precipitaciones en la EM Santa Ana con el caudal promedio y con el caudal máximo en la EH de Medio Mantaro, puesto que sus superficies impermeables de concreto y asfalto, incrementan significativamente la escorrentía superficial directa hacia los cursos de agua, determinando las crecidas que presentaran después de cada lluvia. En contraste, las precipitaciones que registra la EM Ingenio tienen un mayor aporte en la recarga del acuífero, por lo que no presentan una respuesta directa en la crecida del caudal. En consecuencia, no se presenta una relación marcada con el caudal máximo, pues estas precipitaciones contribuyen al mantenimiento del flujo base y regulan el aporte hídrico al río.

La mejor correlación del caudal mínimo del río Mantaro con las precipitaciones en la EM Huancalpi, sugiere que el aporte hídrico de este sector (cuenca alta del río Vilca) contribuye al mantenimiento del flujo base, debido a que su comportamiento estaría determinado por el sistema de lagunas en la zona alta de los distritos de Acobambilla y Chongos Altos, (aguas arriba de la EM Huancalpi) perteneciente a la cuenca del río Vilca, tributario del río Mantaro, ubicado al suroeste del área de estudio, que funcionan como reservorios naturales de agua, enriqueciendo el acuífero que mantiene el nivel base del río en periodos de ausencia de precipitación, contribuyendo a la generación hidroeléctrica [48].

La menor correlación entre las precipitaciones de la EM Ingenio con los caudales del río Mantaro contrastan con la

fuerte correlación entre sus precipitaciones y la generación hidroeléctrica de las centrales SAM y ROM. De acuerdo con Wei et al. [48], este comportamiento se puede producir debido a que la generación hidroeléctrica tiene un fuerte vínculo con el ingreso total de agua a la cuenca, el cual está determinado por las precipitaciones. Asimismo, hay que considerar que, en complejos hidroeléctricos con embalses, la infraestructura de regulación y almacenamiento modifica el régimen natural del río (como es el caso del río Mantaro en sus nacientes), por lo que los caudales no serían un reflejo directo de las condiciones del clima [50]. Este comportamiento permite comprender por qué los caudales del río Mantaro muestran una asociación menos marcada con la producción energética del CHM, que está regulado por embalses como los de Marcapomacocha, San Juan y Tablachaca. En efecto, la disponibilidad hídrica para la generación no depende únicamente del caudal medido en un punto específico del río, pues no siempre representa el volumen de agua utilizado para producir energía. Las presas y sistemas de regulación alteran el régimen natural del río mediante almacenamiento y control operativo, en cambio, la precipitación representa una señal climática directa del aporte hídrico potencial en la cuenca, por lo que muestra una asociación más marcada con la variabilidad de la producción energética.

Por otra parte, se evidencia que el caudal en la EH Tablachaca, ubicada aguas abajo de la represa Tablachaca y bocatoma de la CHM, presenta valores de 0 m³/s de caudal mínimo en todos los años del periodo de estudio, debido al impacto que tiene esta infraestructura, evidenciando la influencia antrópica en el régimen de caudales en la cuenca del Mantaro al presentarse una interrupción en el flujo por la regulación que se da en el embalse. Sin embargo, se encontró que los parámetros de caudal de la EH Tablachaca tienen correlaciones ligeramente mayores ($0.388 < r < 0.551$) que los caudales en la EH Medio Mantaro ($0.358 < r < 0.515$) con la producción de energía hidroeléctrica. Este efecto, se debería a que el caudal que tiene el río Mantaro a partir del embalse viene a ser volumen de agua sobrante de la fracción que se extrae en la bocatoma para el CHM, por lo tanto, depende en mayor medida de las necesidades y demandas de la producción energética.

Llama la atención la relación inversa que tienen las precipitaciones de la EM Huancaipí con la producción energética, contraria al resultado de las otras estaciones, que da a entender, que el aumento de precipitaciones en la zona alta de la subcuenca del río Vilca, afectan la producción de energía eléctrica en el CHM. Este hallazgo puede ser asociado a la dinámica hidrológica de la cuenca alta del río Vilca, como afluente del río Mantaro, debido a la proximidad que tiene la bocatoma del CHM en la presa de Tablachaca (2,700 m s.n.m), con las nacientes del río Vilca (+4,550 m s.n.m) y la EM Huancaipí (3,846 m s.n.m.), así como por el fuerte desnivel que hay entre ellas. Estas características dan a entender que se tienen abruptas pendientes, condiciones que generan tras una precipitación, menos infiltración, mayores crecidas, avenidas

repentinas, torrentes más fuertes y mayor carga sedimentaria. Estos factores pueden afectar los sistemas de producción, dificultando el aprovechamiento del recurso hídrico, especialmente frente a lluvias intensas en este sector. Al respecto, Gabor et al. [50] señalan que, en estos casos es posible que se requiera una regulación en la operación de los embalses, y se tomen medidas de seguridad operativa como el cierre parcial de compuertas, reduciendo temporalmente el volumen de agua disponible para la generación eléctrica.

Además, la variabilidad de los factores hidroclimáticos y de caudal está influenciada por la ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña, como lo señalan hallazgos obtenidos en investigaciones que examinan la conexión entre la hidrología andina y el ENOS, comportamiento que tiene consecuencias directas en la producción de energía. La comparación con estudios regionales refuerza esta interpretación, pues Jiménez-Saenz et al., [18] documenta que en cuencas hidroenergéticas de Colombia las reducciones de caudal durante eventos El Niño pueden generar disminuciones significativas en la capacidad de generación. Un comportamiento similar se observa en la cuenca del río Mantaro, donde años con la ocurrencia de El Niño, como 1992 (-15.3%), 2008 (-6.52%), 2016 (-7.4%) y 2023 (-8.3%), entre otros, presentan una caída en la generación de energía hidroeléctrica en relación con el año previo.

En conjunto estos hallazgos demuestran que la vulnerabilidad hidroenergética del Mantaro está estrechamente ligada a la intensificación de la variabilidad climática y al comportamiento oceánico-atmosférico del ENOS y el cambio climático. Así, Berga y Li et al. resaltan que el cambio climático y la irregularidad hidrológica aumentan la susceptibilidad de los sistemas hidroeléctricos, advirtiendo que el cambio climático podría reducir la producción hidroeléctrica en regiones dependientes de la precipitación estacional, como los Andes [5] [9]. Ello destaca la necesidad de optimizar la regulación, el almacenamiento y la gestión del recurso hídrico frente a escenarios futuros de mayor irregularidad. Pues es necesario fortalecer las estrategias de gestión integrada del agua, donde se prioriza el almacenamiento y regulación durante los meses húmedos para poder asegurar la estabilidad de la generación hidroeléctrica en épocas secas.

VI. CONCLUSIONES

El presente estudio muestra que el principal determinante de la producción hidroeléctrica en la cuenca del río Mantaro es la precipitación de sectores de la cuenca carentes de infraestructura de regulación hídrica, teniendo las correlaciones más robustas, evidencia que el aporte climático directo constituye la señal dominante del recurso disponible para el CHM, superando en importancia a los caudales, que se encuentran fuertemente condicionados por la operación de embalses y estructuras de derivación.

La regulación antrópica del sistema hidrológico modifica el régimen natural de descargas, generando una desconexión parcial entre los caudales observados y la disponibilidad real de agua utilizada para la generación energética. Este hallazgo

explica la menor capacidad explicativa de los registros hidrométricos frente a la precipitación como variable predictora de la producción hidroeléctrica, y resalta la necesidad de incorporar indicadores climáticos directos en los modelos de planificación energética en cuencas reguladas.

Si bien investigaciones previas han reportado tendencias decrecientes de caudal en décadas recientes, los resultados obtenidos muestran una tendencia opuesta para el periodo evaluado, destacando la importancia de analizar series temporales locales y ventanas temporales específicas para comprender la dinámica hidrológica real de cada cuenca, especialmente en sistemas montañosos donde coexisten procesos climáticos, glaciares y antrópicos altamente dinámicos.

Finalmente, la investigación confirma que la cuenca del río Mantaro es altamente vulnerable a la variabilidad climática interanual y las fluctuaciones asociadas al calentamiento global y al ENSO. La dependencia crítica del sistema hidroeléctrico respecto al régimen pluvial resalta la urgencia de fortalecer el monitoreo hidroclimático en cabeceras de cuenca, optimizar la operación y almacenamiento de los embalses durante periodos húmedos, y promover estrategias de diversificación energética que reduzcan la exposición del país a sequías prolongadas. En este contexto, una gestión integrada del recurso hídrico, basada en evidencia científica local, resulta fundamental para sostener la seguridad energética en países como Perú frente a escenarios futuros de creciente incertidumbre climática.

REFERENCES

- [1] S. Zhang, S. Lin, C. Wang, and P. Shahbaz, "Towards energy sustainability: Exploring the nexus between global value chain participation and energy security in developing and developed countries," *PLoS One*, vol. 19, no. 1 January, Jan. 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0296705.
- [2] T. Jia, P. Dou, E. Chen, and Y. Dai, "Feasibility and performance analysis of a hybrid GAX-based absorption-compression heat pump system for space heating in extremely cold climate conditions," *Energy*, vol. 242, p. 122936, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122936.
- [3] R. H. Jongbloed, J. T. Van der Wal, and H. J. Lindeboom, "Identifying space for offshore wind energy in the North Sea. Consequences of scenario calculations for interactions with other marine uses," *Energy Policy*, vol. 68, pp. 320–333, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.042.
- [4] X. Liao, X. Zhao, J. W. Hall, and D. Guan, "Categorising virtual water transfers through China's electric power sector," *Appl. Energy*, vol. 226, pp. 252–260, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.132.
- [5] L. Berga, "The Role of Hydropower in Climate Change Mitigation and Adaptation: A Review," *Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 313–318, 2016, doi: 10.1016/J.ENG.2016.03.004.
- [6] S. Khanal, S. Tiwari, A. F. Lutz, B. V. D. Hurk, and W. W. Immerzeel, "Historical Climate Trends over High Mountain Asia Derived from ERA5 Reanalysis Data," *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 62, no. 2, pp. 263–288, Feb. 2023, doi: 10.1175/JAMC-D-21-0045.1.
- [7] Y. Ben Dor *et al.*, "Hydroclimatic variability of opposing Late Pleistocene climates in the Levant revealed by deep Dead Sea sediments," *Climate of the Past*, vol. 17, no. 6, pp. 2653–2677, 2021, doi: 10.5194/cp-17-2653-2021.
- [8] W. Zhang, T. Zhou, and P. Wu, "Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century," *Science*, vol. 385, no. 6707, pp. 427–432, 2024, doi: 10.1126/science.adp0212.
- [9] J. Li, Z. Wang, X. Wu, B. Ming, L. Chen, and X. Chen, "Evident response of future hydropower generation to climate change," *J. Hydrol. (Amst.)*, vol. 590, no. April, p. 125385, 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125385.
- [10] Q. feng WANG *et al.*, "Spatial-temporal evolution of vegetation evapotranspiration in Hebei Province, China," *J. Integr. Agric.*, vol. 17, no. 9, pp. 2107–2117, 2018, doi: 10.1016/S2095-3119(17)61900-2.
- [11] E. Shamir *et al.*, "Climate Change Projections of Potential Evapotranspiration for the North American Monsoon Region," *Hydrology*, vol. 11, no. 6, Jun. 2024, doi: 10.3390/hydrology11060083.
- [12] J. Zhao, H. Zhong, and C. Wang, "Estimation of Reference Crop Evapotranspiration in the Yellow River Basin Based on Machine Learning and Its Regional and Drought Adaptability Analysis," *Agronomy*, vol. 15, no. 5, May 2025, doi: 10.3390/agronomy15051237.
- [13] ..., D. Dommengot, P. Grothe, E. Guilyardi, Y. G. Ham, and ..., "El Niño–southern oscillation complexity," *Nature*, vol. 559, no. 7715, pp. 535–545, 2018, [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0252-6>
- [14] A. Timmermann *et al.*, "El Niño–southern oscillation complexity," *Nature*, vol. 559, no. 7715, pp. 535–545, 2018, [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0252-6>
- [15] B. G. Mark *et al.*, "Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes," *Glob. Planet. Change*, vol. 159, pp. 61–76, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.gloplacha.2017.10.003.
- [16] G. J. Berri, E. Bianchi, and G. V. Müller, "El Niño and la Niña influence on mean river flows of southern South America in the 20th century," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 64, no. 8, pp. 900–909, 2019, doi: 10.1080/02626667.2019.1609681.
- [17] E. Van Schaik *et al.*, "Changes in surface hydrology, soil moisture and gross primary production in the Amazon during the 2015/2016 El Niño," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 373, no. 1760, 2018, doi: 10.1098/rstb.2018.0084.
- [18] C. Jiménez-Saenz, L. Pulgarin-Morales, and T. Krueger, "The water-energy nexus under ENSO variability in four Colombian hydropower basins," *International Journal of River Basin Management*, 2024, doi: 10.1080/15715124.2024.2428383.
- [19] D. Peña, A. A. Téllez, and F. Jurado, "Reliability Assessment of Ecuador's Power System: Metrics, Vulnerabilities, and Strategic Perspectives," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 12, Jun. 2025, doi: 10.3390/en18123059.
- [20] UNOPS and Electoperu, "UNOPS y Electoperu impulsan la modernización del sistema eléctrico del Perú con inversiones por más de USD 183 millones," 2025.
- [21] E. Planlar, H. K. Kamu, C. Konur, S. No, E. Planlari, and H. Kiral, "İrem ÇAĞLAR 1, İzzet ARI 2, Halis KIRAL 3," vol. i, pp. 197–212, 2025.
- [22] L. Giráldez, Y. Silva, R. Zubieta, and J. Sulca, "Change of the rainfall seasonality over central peruvian andes: Onset, end, duration and its relationship with large-scale atmospheric circulation," *Climate*, vol. 8, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/cli8020023.
- [23] A. L. Povis, A. Zaravia, J. Colonio, and A. Vásquez, "Potential zones for rainwater reserve in the face of climate change in a high Andean watershed," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 30–47, 2025, doi: 10.12911/22998993/197262.
- [24] J. Apaéstegui, C. Romero, M. Vuille, J. Sulca, and A. Ampuero, "Moisture Sources and Rainfall δ18O Variability over the Central Andes of Peru—A Case Study from the Mantaro River Basin," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, May 2023, doi: 10.3390/w15101867.
- [25] B. G. Mark *et al.*, "Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes," *Glob. Planet. Change*, vol. 159, no. October 2017, pp. 61–76, 2017, doi: 10.1016/j.gloplacha.2017.10.003.
- [26] G. Trasmonte, R. Chavez, B. Segura, and J. L. Rosales, "Frost risks in the Mantaro river basin," *Advances in Geosciences*, vol. 14, pp. 265–270, Apr. 2008, doi: 10.5194/adgeo-14-265-2008.
- [27] MINEM, "MINEM_191 centrales hidroeléctricas op... Minas - Plataforma del Estado Peruano.pdf," 2025.
- [28] Electoperu, "PLAN DE CONTINGENCIA CENTRO DE PRODUCCIÓN MANTARO - ELECTOPERU S. A.," 2022.
- [29] M. Custodio, R. Peñaloza, S. Ochoa, H. De la Cruz, C. Rodríguez, and W. Cuadrado, "Microbial and potentially toxic elements risk assessment in high Andean river water based on Monte Carlo simulation, Peru," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-48853-4.
- [30] Autoridad Nacional del Agua, "5. Informe_Tecnico_Resultados_Mon.Cuenca_Del_Mantaro_Mayo_2018 .Pdf," 2018.

- [31] INGEMMET, “Estudio Geodinámico De La Cuenca Del Río Mantaro (Departamentos: Junín-Huancavelica),” 1980.
- [32] ANA, “Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Crisnejas,” *Autoridad Nacional del Agua*, p. 291, 2015, [Online]. Available: <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/36>
- [33] L. Giráldez, Y. Silva, R. Zubieta, and J. Sulca, “Change of the Rainfall Seasonality Over Central Peruvian Andes: Onset, End, Duration and its Atmospheric Circulation,” 2020.
- [34] SENAMHI, “Escenarios de Cambio climático en la cuenca del Mantaro para el año 2100,” p. 56, 2009, [Online]. Available: <http://www.minam.gob.pe>
- [35] SENAMHI, “Escenarios de Cambio climático en la cuenca del Mantaro para el año 2100,” 2019. [Online]. Available: <http://www.minam.gob.pe>
- [36] Z. H. Dahri, F. Ludwig, E. Moors, B. Ahmad, A. Khan, and P. Kabat, “An appraisal of precipitation distribution in the high-altitude catchments of the Indus basin,” *Science of the Total Environment*, vol. 548–549, pp. 289–306, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.001.
- [37] M. Kronenberg *et al.*, “The Projected Precipitation Reduction over the Central Andes may Severely Affect Peruvian Glaciers and Hydropower Production,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 270–277. doi: 10.1016/j.egypro.2016.10.072.
- [38] S. del Aguila and F. Espinoza-Montes, “Impact of climate change on future discharges from a high Andean basin in Peru to 2100,” *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 15, no. 1, pp. 111–155, Jan. 2024, doi: 10.24850/jtyca-15-01-03.
- [39] S. C. Wongchuig, C. R. Mello, and S. C. Chou, “Projections of the impacts of climate change on the water deficit and on the precipitation erosive indexes in Mantaro River Basin, Peru,” *J. Mt. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 264–279, Feb. 2018, doi: 10.1007/s11629-017-4418-8.
- [40] V. Mendoza, M. Pazos, R. Garduño, and B. Mendoza, “Thermodynamics of climate change between cloud cover, atmospheric temperature and humidity,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-00555-5.
- [41] C. Torres, L. Suárez, C. Schmitt, R. Estevan, and D. Helmig, “Measurement of light absorbing particles in the snow of the Huaytapallana glacier in the central Andes of Peru and their effect on albedo and radiative forcing,” *Optica Pura y Aplicada*, vol. 51, no. 4, pp. 1–14, 2018, doi: 10.7149/OPA.51.4.51004.
- [42] ANA, “Plan de gestión de recursos hídricos en la cuenca del Mantaro - Situación en el mediano plazo 2030,” 2021.
- [43] E. Morán-Tejeda, J. Luis Ceballos, K. Peña, J. Lorenzo-Lacruz, and I. J. López-Moreno, “Recent evolution and associated hydrological dynamics of a vanishing tropical Andean glacier: Glaciar de Conejeras, Colombia,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 22, no. 10, pp. 5445–5461, Oct. 2018, doi: 10.5194/hess-22-5445-2018.
- [44] A. Mustafa, M. Szydłowski, and S. Qarani Aziz, “Optimizing Impervious Surface Distribution and Rainwater Harvesting for Urban Flood Resilience in Semi-Arid Regions,” *Urban Science*, vol. 9, no. 12, Dec. 2025, doi: 10.3390/urbansci9120523.
- [45] M. Custodio, W. Cuadrado, R. Peñaloza, R. Montalvo, S. Ochoa, and J. Quispe, “Human risk from exposure to heavy metals and arsenic in water from rivers with mining influence in the Central Andes of Peru,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, Jul. 2020, doi: 10.3390/w12071946.
- [46] Z. Zou, L. Shu, X. Min, and E. C. Mabedi, “Clogging of infiltration basin and its impact on suspended particles transport in unconfined sand aquifer: Insights from a laboratory study,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 5, May 2019, doi: 10.3390/w11051083.
- [47] S. Pizarro, M. Custodio, R. Solórzano-Acosta, D. Contreras, and P. Verástegui-Martínez, “Water Storage–Discharge Relationship with Water Quality Parameters of Carhuacocha and Vichecocha Lagoons in the Peruvian Puna Highlands,” *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.3390/w16172505.
- [48] L. Wei, L. Jiheng, G. Junhong, B. Zhe, F. Lingbo, and H. Baodeng, “The Effect of Precipitation on Hydropower Generation Capacity: A Perspective of Climate Change,” *Front. Earth Sci. (Lausanne)*, vol. 8, no. September, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3389/feart.2020.00268.
- [49] B. D. Richter and G. A. Thomas, “Restoring environmental flows by modifying dam operations,” *Ecology and Society*, vol. 12, no. 1, 2007, doi: 10.5751/ES-02014-120112.
- [50] E. Gabor, E. Beilicci, and R. Beilicci, “Advanced Hydroinformatic Tools for Modelling of Reservoirs Operation,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/471/4/042002.