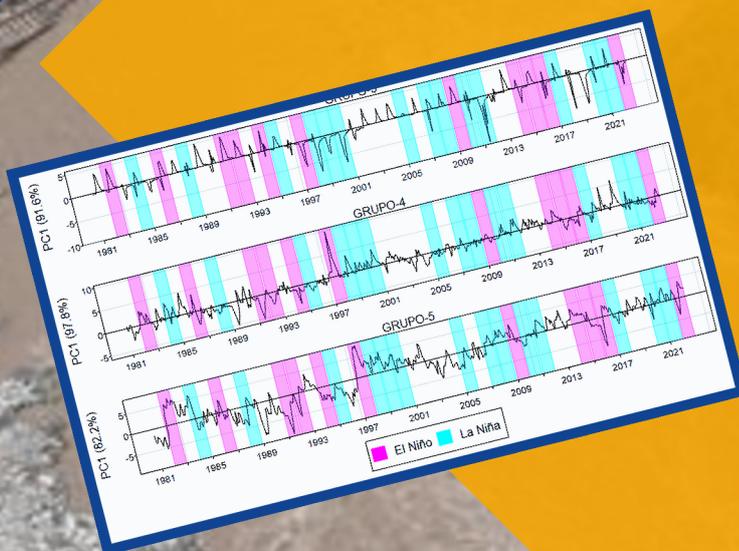


ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES FRENTE A LA OCURRENCIA DE EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR EN EL PERÚ

Harold Omar Llauca Soto
Waldo Sven Lavado Casimiro



Dirección de Hidrología
Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
FEBRERO 2025

**ESTUDIO DE LA
SENSIBILIDAD DE
CAUDALES MEDIOS
MENSUALES
FRETE A LA
OCURRENCIA DE
EL NIÑO-
OSCILACIÓN DEL
SUR EN EL PERÚ**



ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES FRENTE A LA OCURRENCIA DE EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR EN EL PERÚ

Presidente Ejecutivo

Raquel Hilianova Soto Torres

Director de Hidrología

Oscar Gustavo Felipe Obando

Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

Waldo Sven Lavado Casimiro

Autores:

Harold Omar Llauca Soto

Waldo Sven Lavado Casimiro

Diseño y Diagramación por:

Harold Omar Llauca Soto

Primera Edición: diciembre de 2024

Depósito Legal N° 2025-01174

Estudio disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3827>

© Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Jr. Cahuide 785. Jesús María, Lima – Perú. Teléfono (01) 614-1414

www.gob.pe/senamhi

Todos los derechos reservados

Prohibida la reproducción de este estudio por cualquier medio, total o parcialmente sin permiso expreso.

Referencia sugerida:

Llauca, H.O. y Lavado-Casimiro, W.S. (2024). *Estudio de la sensibilidad de caudales medios mensuales frente a la ocurrencia de El Niño-Oscilación del Sur en el Perú*.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/3827>

CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
RESUMEN.....	5
I. INTRODUCCIÓN.....	5
II. ÁREA DE ESTUDIO.....	6
III. DATOS.....	8
3.1. Caudal medio diario.....	8
3.1.1. Estaciones hidrométricas.....	8
3.1.2. Producto PISCO_HyD_ARNOVIC.....	10
3.2. Índices de El Niño-Oscilación del Sur.....	11
3.2.1. Temperatura superficial del mar.....	11
3.2.2. Índice Oceánico El Niño.....	12
3.2.3. Índice Multivariado El Niño.....	12
3.2.4. Índice de Oscilación del Sur.....	13
3.2.5. Índice Costero El Niño.....	13
IV. METODOLOGÍA.....	13
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
3.3. Reconstrucción de caudales observados.....	16
3.4. Sensibilidad del caudal promedio.....	19
3.5. Agrupamiento de estaciones hidrométricas.....	22
3.6. Teleconexión de índices climáticos y el caudal medio mensual.....	23
VI. CONCLUSIONES.....	26
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1. Ubicación de estaciones hidrológicas en el ámbito del dominio de estudio. Tomado de Llauca et al. (2023).	7
Figura 2. Caudales medios diarios observados.....	9
Figura 3. Localización de las regiones de evaluación de la temperatura superficial del mar: Niño 1+2 y Niño 3.4, y Atlántico Tropical.	12
Figura 4. Flujograma de trabajo.	14
Figura 5. Caudales medios diarios observados (magenta) y simulados corregidos (gris).	17
Figura 6. Significancia estadística (α) del cambio del caudal promedio en el periodo avenidas (diciembre – marzo) de años El Niño y La Niña respecto de condiciones neutras de ENOS.....	20
Figura 7. Significancia estadística (α) del cambio del caudal promedio en el periodo estiaje (junio – agosto) de años El Niño y La Niña respecto de condiciones neutras de ENOS.	21
Figura 8. Selección gráfica del número óptimos de grupos para el algoritmo K-means... ..	22
Figura 9. Grupos de estaciones hidrométricas basado en el algoritmo K-means.	23
Figura 10. Serie de tiempo del primer modo de variabilidad de la anomalías de caudal mensual para los cinco grupos de estaciones a nivel nacional; y años ocurrencia de El Niño y La Niña.	24
Figura 11. Coeficiente de correlación cruzada de Spearman entre índices climáticos de ENOS y anomalías de caudal mensual, para retardos de 0 a 12 meses.....	26

ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1. Resumen de estaciones hidrométricas con registro diario de caudal medio.	8
Tabla 2. Límites geográficos de las regiones de evaluación de la temperatura superficial del mar.....	11
Tabla 3. Estadísticos de ajuste del en las simulaciones de caudal con corrección de sesgo.....	19
Tabla 4. Años hidrológicos El Niño y La Niña.	20

ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES FRENTE A LA OCURRENCIA DE EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR EN EL PERÚ

RESUMEN

La temperatura superficial del mar (TSM) juega un rol importante en la variabilidad climática global. Un claro ejemplo es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), cuya fase cálida conocida como El Niño (EN) propicia la generación de lluvias extremas y/o sequías a nivel global. Es sabido que, en el Perú, tanto EN como la fase fría de los ENOS conocida como La Niña (LN) juegan un papel importante sobre la variabilidad de las precipitaciones. Por ejemplo, durante 1982/83 y 1997/98 se generaron fuertes lluvias en el norte peruano y déficit en el sur del país debido a los efectos de EN de magnitud extrema. En ese sentido, este trabajo busca explorar la sensibilidad de los caudales en el Perú frente a la ocurrencia de ENOS. Para ello se recopiló datos mensuales de caudales en 44 estaciones hidrométricas de las tres vertientes hidrográficas (Pacífico, Atlántico y Titicaca) para el periodo 1981-2023. Con ello se evaluó la significancia estadística del cambio del caudal promedio de los periodos de estiaje y avenidas en años de ENOS respecto de años de condiciones neutras de la TSM. Además, se investigó la posible teleconexión entre ENOS y caudales, a través su correlación con índices climáticos. Los resultados muestran que los efectos de ENOS sobre la respuesta hidrológica de cuencas en el Perú es diversa, dependiendo no solo de su fase cálida y fría sino también de su magnitud. Se evidencia también que los caudales mensuales son mucho más sensibles a EN que LN, especialmente en el norte y sur peruano durante el periodo de avenidas. Futuros trabajos abarcarán la exploración de la relación de ENOS frente a extremos hidrológicos.

Palabras clave: *El Niño-Oscilación del Sur; temperatura superficial del mar; sensibilidad hidrológica; caudales mensuales*

I. INTRODUCCIÓN

La temperatura superficial del mar de los océanos (TSM) es un componente fundamental del sistema climático (J.-Z. Wang et al., 2024). Los océanos tropicales y subtropicales son una fuente principal de energía y humedad para la atmósfera, por lo que los lentos cambios de TSM se convierten en un factor clave en la modulación de las variaciones climáticas de baja frecuencia en todo el mundo (J. Wang et al., 2020). El mejor ejemplo de esto es el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) que se desarrolla en las regiones ecuatoriales y tropicales del Océano Pacífico (Silva et al., 2024). Se sabe que el ENOS es una fuente importante de variabilidad climática estacional a interanual en varias regiones del planeta, muchas de las cuales incluso están ubicadas de manera remota (Stuck et al., 2006). A escala local, las señales de variabilidad climática se vuelven más evidentes al promediar las observaciones en el tiempo y el espacio, y los caudales de los ríos son un buen ejemplo de ello ya que resumen el equilibrio hidrológico de toda una cuenca, de modo que sus variaciones se vuelven, en gran medida, independientes del momento y lugar en el que se producen los distintos fenómenos meteorológicos (Hernandez et al., 2022). El contexto peruano no es ajeno a los efectos de el ENOS, existen diversos estudios que confirman su influencia en los cambios en las tasas de precipitación (Moquet et al., 2020; Sulca et al., 2018) y en el comportamiento de la hidrología de cuencas (Lavado-Casimiro & Felipe, 2013).

Este estudio tiene como objetivo describir la influencia de el ENOS sobre los caudales medios mensuales en el territorio peruano. Para esto se emplearán datos observados de caudales de la red hidrométrica nacional, complementada con simulaciones hidrológicas a nivel nacional (Llauca et al., 2023) para el periodo de 1981-2023. Este trabajo busca atribuir cambios en la magnitud de caudal promedio a la variabilidad climática influenciada por el ENOS (Cai et al., 2021).

II. ÁREA DE ESTUDIO

La presencia de la Cordillera de Los Andes origina una compleja topografía en el Perú (Figura 1) e influencia la alteración de los patrones de circulación atmosférica a gran escala (Garreaud, 2009). Por ejemplo, la humedad atmosférica proveniente del Atlántico asciende por la cordillera y conduce altas tasas de lluvia orográfica sobre el flanco oriental de Los Andes, sobre la región Amazónica peruana (Lavado Casimiro *et al.*, 2011).

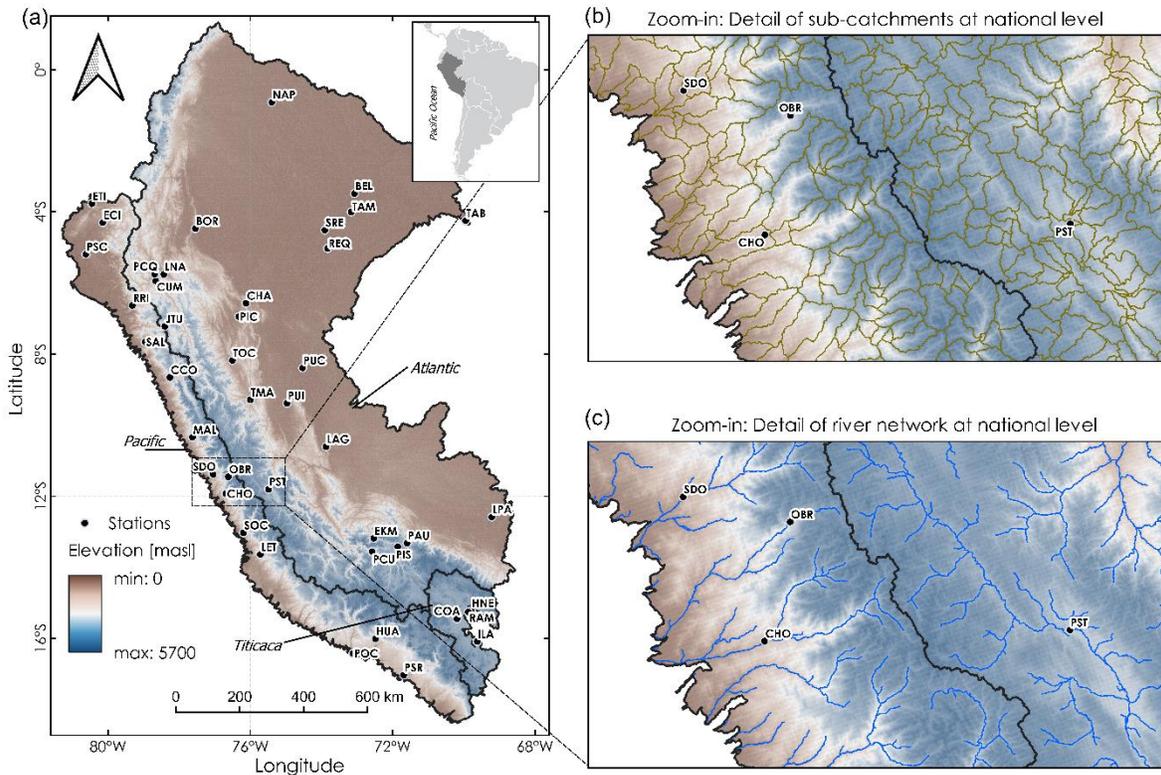


Figura 1. Ubicación de estaciones hidrológicas en el ámbito del dominio de estudio. Tomado de (Llauca et al., 2023).

En el Perú, la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones es alta. Existen condiciones áridas con muy bajas tasas de precipitación anual en las zonas costeras de la vertiente del Pacífico ($< \sim 150$ mm/año), y condiciones semiáridas que prevalecen sobre el flanco occidental de Los Andes ($< \sim 400$ mm/año) (Rau *et al.*, 2019). En cambio, las vertientes del Atlántico y Titicaca se caracterizan por condiciones predominantemente húmedas y semiáridas, respectivamente, con altas tasas de precipitación anual en el flanco oriental de Los Andes (~ 1100 mm/año), en la transición Andes-Amazonía (~ 3200 mm/año) y en la cuenca baja del Amazonas (~ 2550 mm/año) (Aybar *et al.*, 2020).

Asimismo, existe alta variabilidad hidrológica a nivel nacional. De acuerdo con (Lavado-Casimiro & Felipe, 2013), los ríos de la vertiente del Pacífico se caracterizan por su corta longitud y alta pendiente, cuyos picos de lluvia y escurrimiento ocurren simultáneamente. Por el contrario, los ríos de la cuenca amazónica presentan pendientes pronunciadas en Los Andes y casi nulas en la llanura amazónica. En este último caso, los picos de lluvia ocurren dos meses antes de los picos de caudal. Finalmente, la red de

drenaje endorreico del Titicaca se caracteriza por tener pendientes medias, y un mes de desfase entre la respuesta promedio entre lluvias y picos de caudal.

III. DATOS

3.1. Caudal medio diario

3.1.1. Estaciones hidrométricas

Se seleccionaron 44 estaciones hidrométricas de la red del SENAMHI y externos. Se recopilaron los registros de caudales medios diarios en el periodo 1981-2023. La información general de las estaciones seleccionadas se presenta en la Tabla 1. Para cada estación se presenta el nombre de la cuenca donde se ubica, el área de drenaje hasta el punto de control fluviométrico señalado, los valores de caudales mínimo y máximo de la serie disponible, y el porcentaje de datos faltantes (DF) dentro del periodo de estudio.

Tabla 1. Resumen de estaciones hidrométricas con registro diario de caudal medio.

Estación	Abrev.	Lat	Lon	Cuenca	Área [km ²]	Caudal [m ³ /s]		DF.
		[°]	[°]			Min.	Max.	[%]
Huatiapa	HUA	-16.0	-72.5	Camana	13,220.6	39.8	181.1	50.6
Socsi	SOC	-13.0	-76.2	Cañete	5,926.3	0.0	99.5	6.9
Santo Domingo	SDO	-11.4	-77.1	Chancay-Huaral	1,851.0	7.9	29.0	30.6
Racarumi	RRI	-6.6	-79.3	Lambayeque	2,439.9	17.4	52.6	0.8
Salinar	SAL	-7.7	-79.0	Chicama	3,660.2	3.3	132.8	8.0
Obrajillo	OBR	-11.5	-76.6	Chillón	786.0	2.8	7.5	37.4
El Ciruelo	ECI	-4.3	-80.2	Chira	7,014.8	38.1	221.6	3.5
Malvados	MAL	-10.3	-77.6	Fortaleza	1,394.0	0.2	11.8	70.4
Puente Ocona	POC	-16.4	-73.1	Ocoña	15,369.3	64.1	130.3	60.6
Letrayoc	LET	-13.6	-75.7	Pisco	3,089.7	5.3	59.4	10.8
Puente Sanchez Cerro	PSC	-5.2	-80.6	Piura	7,520.0	0.3	455.8	50.4
Condorcero	CCO	-8.7	-78.3	Santa	10,382.3	67.2	223.2	1.8
Puente Santa Rosa	PSR	-17.0	-71.7	Tambo	13,083.3	6.0	84.9	15.1
El Tigre	ETI	-3.8	-80.5	Tumbes	4,781.6	15.4	547.6	3.0
Chosica	CHO	-11.9	-76.7	Rimac	2,307.2	26.2	41.9	41.1
Puente Huancane	HNE	-15.2	-69.8	Huancane	3,388.8	4.6	36.5	18.5
Puente Ramis	RAM	-15.3	-69.9	Intercuenca Ramis	14,856.3	26.6	116.6	24.5
Puente Unocolla	COA	-15.5	-70.2	Coata	4,448.1	3.2	73.9	23.1
Puente llave	ILA	-16.1	-69.6	llave	7,623.5	8.4	84.1	25.1
Amaru Mayu	AMA	-12.6	-69.1	Madre de Dios	34,392.9	1,745.0	6,091.0	83.9
Egemsa Km105	EKM	-13.2	-72.5	Urubamba	2,616.6	81.0	189.1	12.1
Borja	BOR	-4.5	-77.5	Marañón	63,275.7	3,732.0	6,071.0	11.8
Jesus Tunel	JTU	-7.2	-78.4	Crisnejas	910.2	0.8	12.9	2.3
Cumba	CUM	-5.9	-78.7	Maranon	35,672.2	380.8	678.7	79.3
Los Naranjos	LNA	-5.8	-78.4	Maranon	5,793.9	132.2	176.5	82.8
Puente Tocache	TOC	-8.2	-76.5	Huallaga	10,832.2	876.6	1,285.0	37.6

- DF: Porcentaje de datos faltantes en el periodo 1981-2023.

Tabla 1. Resumen de estaciones hidrométricas con registro de caudal medio diario. (*Continuación*)

Estación	Abrev.	Lat	Lon	Cuenca	Área [km ²]	Caudal [m ³ /s]		DF.
		[°]	[°]			Min.	Max.	[%]
Tingo María	TMA	-9.3	-76.0	Huallaga	12,341.1	408.1	701.3	47.2
Picota	PIC	-6.9	-76.3	Huallaga	33,671.3	1,616.0	3,179.0	58.2
Chazuta	CHA	-6.6	-76.1	Huallaga	11,863.6	1,203.0	3,758.0	60.8
Paucartambo	PAU	-13.3	-71.6	Urubamba	2,157.2	25.4	53.6	65.0
Pisac	PIS	-13.4	-71.9	Vilcanota	7,036.5	14.2	133.4	30.9
Puente Cunyac	PCU	-13.6	-72.6	Apurímac	24,656.2	48.7	354.0	68.2
Puente Stuart	PST	-11.8	-75.5	Mantaro	9,222.5	50.1	279.7	29.1
Puerto Inca	PUI	-9.4	-75.0	Pachitea	22,325.2	1,431.0	4,032.0	51.8
Tamshiyacu	TAM	-4.0	-73.2	Amazonas	12,752.8	26,640.0	36,410.0	7.8
Requena	REQ	-5.0	-73.8	Ucayali	87,320.6	5,373.0	13,830.0	44.8
Lagarto	LAG	-10.6	-73.9	Ucayali	145,503.7	4,824.0	7,743.0	78.0
Bellavista	BEL	-3.5	-73.1	Napo	72,520.3	4,264.0	9,036.0	27.0
Puente Corral Quemado	PCQ	-5.8	-78.7	Marañón	8,650.2	219.2	801.1	79.4
La Pastora	LPA	-12.6	-69.2	Madre de Dios	56,242.2	2,793.0	5,503.0	77.3
Napo	NAP	-0.9	-75.4	Napo	27,351.9	1,603.0	2,829.0	62.3
Tabatinga	TAB	-4.3	-70.0	Amazonas	55,535.1	29,800.0	43,520.0	12.2
Pucallpa	PUC	-8.4	-74.5	Ucayali	46,726.1	8,091.0	11,600.0	54.2
San Regis	SRE	-4.5	-73.9	Marañón	178,776.5	15,320.0	20,100.0	43.5

- *DF: Porcentaje de datos faltantes en el periodo 1981-2023.*

En la Figura 2 se presentan las series de tiempo de caudales medios diarios recopilados en este estudio.

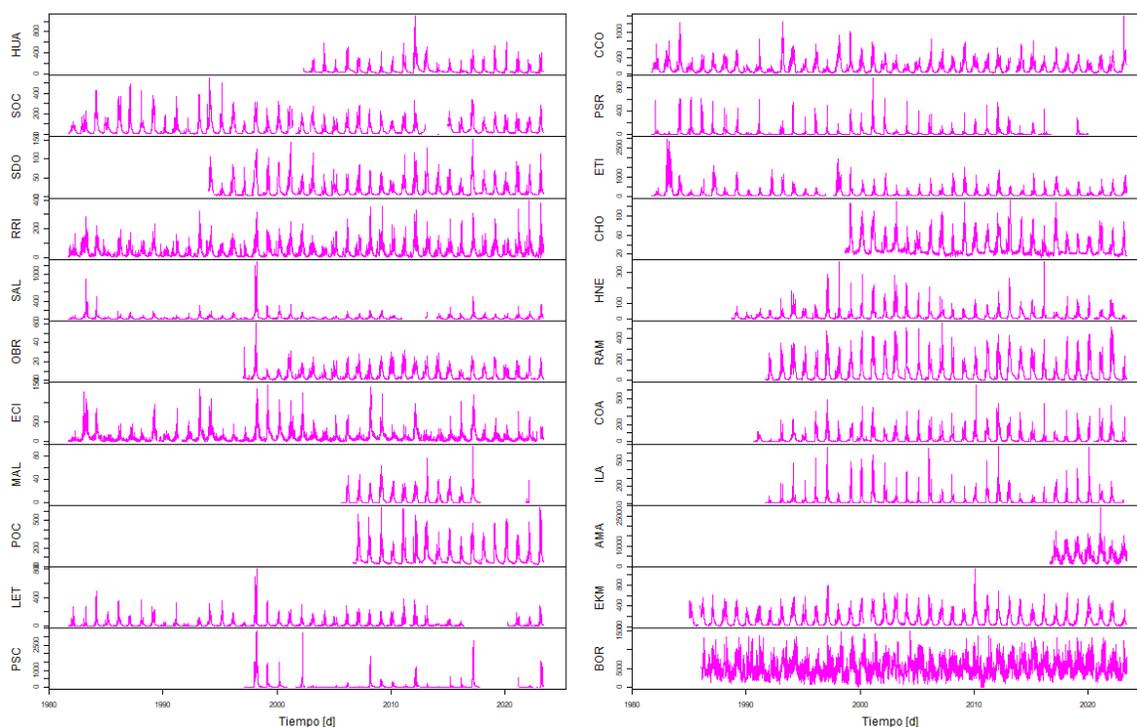


Figura 2. Caudales medios diarios observados.

Se observan series con amplio registro de datos entre 1981-2023, como es el caso de las estaciones SOC, RRI, ECI, CCO, PSR, EKM, etc; y otras con escasos datos observados como PCQ, LPA, LNA, LAG y AMA.

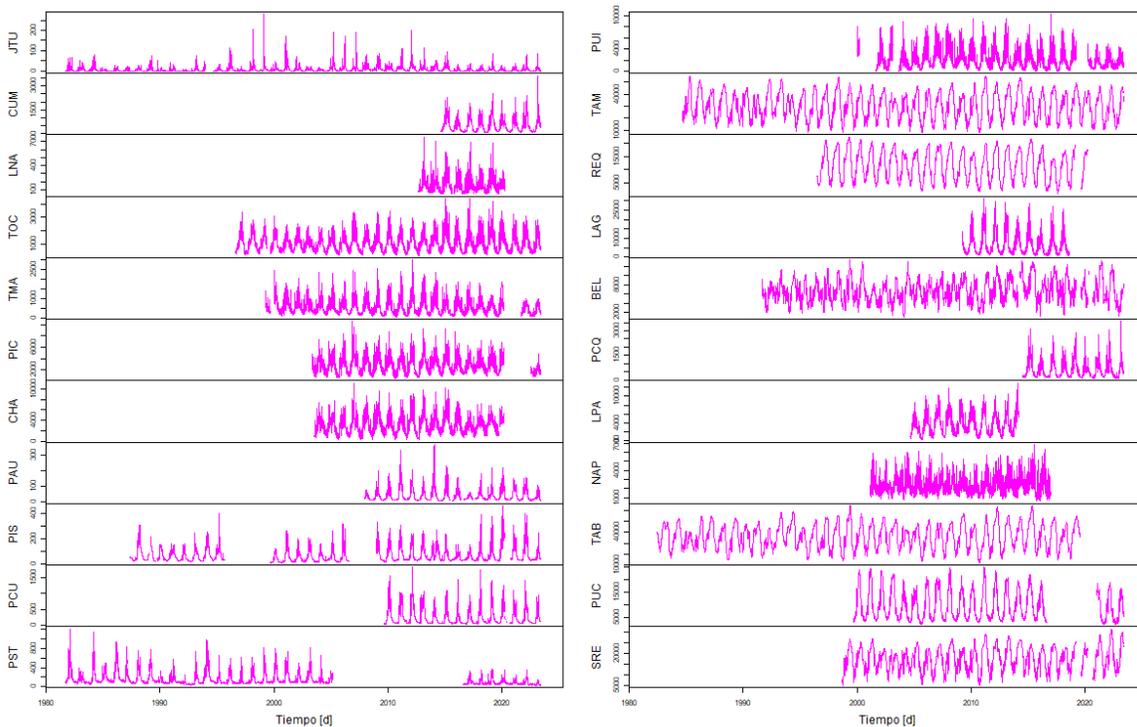


Figura 2. Caudales medios diarios observados. (Continuación).

3.1.2. Producto PISCO_HyD_ARNOVIC

El SENAMHI desarrolló un conjunto de datos de caudales medios diarios simulados en cerca de 12 mil tramos de río a nivel nacional, denominado PISCO_HyD_ARNOVIC (Llauca *et al.*, 2023). Este producto tiene como finalidad proporcionar información hidrológica de caudales medios diarios en zonas con acceso limitado o nulo de estaciones hidrológicas en el Perú, y fue elaborado empleando los datos de precipitación diaria del producto PISCO (0.1° de resolución horizontal) y el modelo acoplado ARNOVIC+RAPID. Este modelo hidrológico nacional fue calibrado y validado utilizando 43 de las 44 estaciones hidrológicas utilizadas en este estudio. El conjunto de datos simulados PISCO_HyD_ARNOVIC (v1.0) puede ser descargado libremente desde: <https://www.hydroshare.org/resource/f723d6c762ca45b6936dd9489bc44842/>.

3.2. Índices de El Niño-Oscilación del Sur

3.2.1. Temperatura superficial del mar

La temperatura superficial del mar (TSM) se refiere a la temperatura del agua en la capa superior del océano, generalmente medida en los primeros metros de la superficie. Esta temperatura puede variar según la ubicación geográfica, la estación del año, las corrientes oceánicas y otros factores. Para obtener datos específicos sobre la TSM en un lugar y momento particular, se pueden utilizar instrumentos como boyas o satélites especializados. Para este estudio se utilizó el producto Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>) el cual es un conjunto de datos derivado de *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset* (ICOADS) con información desde 1854 hasta la actualidad. La versión 5 (v5) es la más reciente de ERSST y cuenta con una resolución horizontal de 2°x 2°, e incorpora información de la TSM proveniente de los flotadores Argo, la concentración de hielo *Hadley Centre Ice-SST versión 2* (HadISST2) y datos ICOADS.

Para evaluar la influencia de la TSM sobre la hidrología de cuencas en Perú se seleccionaron las regiones del Pacífico Costa Norte (Niño 1+2) y Pacífico Central (Niño 3.4). Adicionalmente se incorporó la región del Atlántico Tropical (AT) dada la relevancia para la modulación de las lluvias en la cuenca Amazónica descrita por (Lavado Casimiro et al., 2012; Lou et al., 2024). Los límites y ubicación de las regiones Niño 1+2, Niño 3.4 y AT se muestran en la Tabla 2 y la Figura 3, respectivamente.

Tabla 2. Límites geográficos de las regiones de evaluación de la temperatura superficial del mar.

Región	Descripción	Latitudes [°]	Longitudes [°]
Niño 1+2	Pacífico Costa Norte del Perú	0°S - 10°S	80°W - 90°W
Niño 3.4	Pacífico Central	5°N - 5°S	120°W - 170°W
AT	Atlántico Tropical	10°N - 20°N	20°W - 60°W

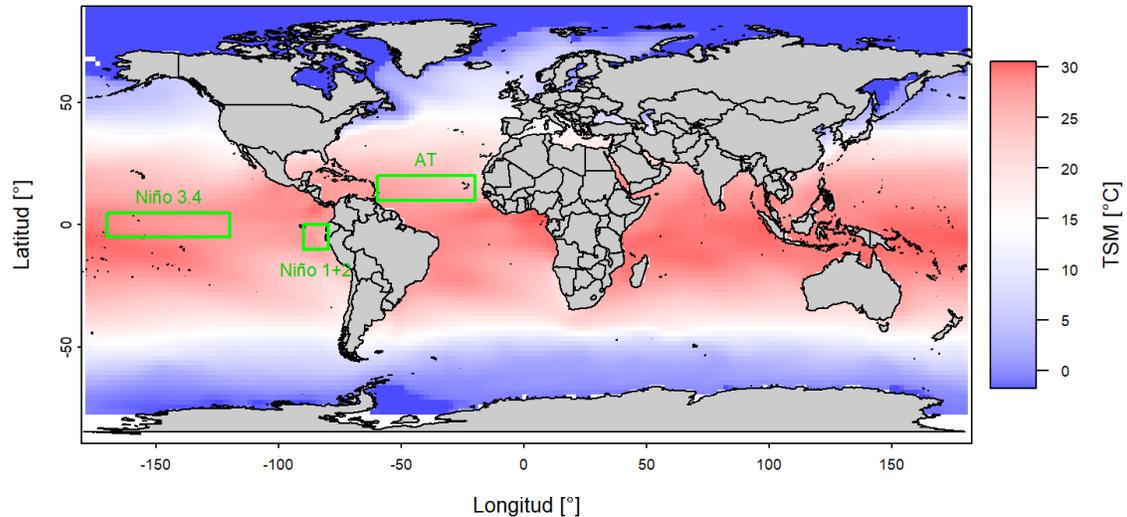


Figura 3. Localización de las regiones de evaluación de la temperatura superficial del mar: Niño 1+2 y Niño 3.4, y Atlántico Tropical.

3.2.2. Índice Oceánico El Niño

El Índice Oceánico El Niño (ONI en inglés) es una medida de El Niño-Oscilación del Sur que es calculado a partir de la media móvil de tres meses de las anomalía de la TSM del producto ERSST.v5 en la región Niño 3.4, basado en períodos base centrado de 30 años y actualizados cada 5 años. La serie de tiempo del índice ONI se muestra en la Figura 4. Valores de ONI inferiores a -0.5 se categorizan como condiciones frías o LN; mientras que valores superiores a 0.5 son indicativo de condiciones cálidas o EN. Los datos del índice ONI se encuentran disponibles en: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

3.2.3. Índice Multivariado El Niño

El índice bimestral multivariado de El Niño-Oscilación del Sur (MEI) es la serie de tiempo de la función ortogonal empírica que combina cinco variables diferentes (presión al nivel del mar (SLP), temperatura de la superficie del mar (SST), componentes zonales y meridionales del viento a nivel superficial y la radiación de onda larga saliente (OLR)) sobre la región del Pacífico tropical (30 °S-30 °N y 100 °E-70 °W). los datos del índice MEI se encuentran disponibles en: <https://psl.noaa.gov/enso/mei/data/meiv2.data>. Valores de MEI inferiores a -0.5 se categorizan como condiciones frías o LN; mientras que valores superiores a 0.5 son indicativo de condiciones cálidas o EN.

3.2.4. Índice de Oscilación del Sur

El Índice de Oscilación del Sur (SOI en inglés) es una serie temporal que se utiliza para caracterizar los patrones de presión a nivel del mar (SLP) a gran escala en el Pacífico tropical. Se utilizan los valores medios mensuales de SLP en Tahití [T] y Darwin [D]. Consiste en [T-D], que es una medida de los fenómenos a gran escala, mientras que [T+D] es una medida de los fenómenos a pequeña escala y/o transitorios que no forman parte de la Oscilación del Sur a gran escala. El SOI está vinculado a la variabilidad de la TSM tropical a gran escala y, como tal, es una medida de la parte oscilación del sur del fenómeno ENOS. Los períodos prolongados de SOI negativo corresponden a los eventos de EN, que se caracterizan por TSM cálidas en el Pacífico tropical oriental y central. Los datos del índice SOI se encuentran disponibles en: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>.

3.2.5. Índice Costero El Niño

El Índice Costero El Niño (ICEN) fue establecido por la Comisión Multisectorial encargada del Estudio del Fenómeno El Niño (ENFEN) para el diagnóstico de El Niño y La Niña en el Perú (ENFEN, 2012; Takahashi et al., 2014). Es calculado a partir de la media móvil de 3 meses de las anomalía de la TSM en la región Niño 1+2 con respecto a la climatología de 1981-2010; utilizando, hasta enero de 2020, los datos de Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v3b real-time (Huang et al., 2017), y en la actualidad ERSST v5. Los datos del índice ICEN se encuentran disponibles en: <http://met.igp.gob.pe/datos/icen.txt>. Se categoriza las condiciones como frías (ICEN < -1) o cálidas (ICEN > 0.4). En el caso de frías con magnitudes de débil, moderada y fuerte, y en el caso de cálidas con magnitudes débil, moderada, fuerte y extraordinaria (ENFEN, 2012; Takahashi et al., 2014).

IV. METODOLOGÍA

En base a la revisión a la revisión literatura científica, la Figura 6 muestra la metodología de trabajo.

$$KGE = 1 - \sqrt{\left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + (r_p - 1)^2} \quad ; \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_i^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2} \quad ; \quad (2)$$

donde: *sim* es el valor simulado; *obs* es el valor observado; *i* es el paso de tiempo; y el número total de datos; μ es el valor promedio; σ es la varianza; r_p es el coeficiente de correlación lineal de Pearson; y *Q* es el caudal medio mensual.

- Se recopilieron datos mensuales de la TSM para las regiones Niño 1+2, Niño 3.4 y AT para el periodo 1981-2023; así como los índices ONI, MEI, SOI e ICEN. Para identificar los años El Niño (fase cálida, EN) y La Niña (fase fría, LN) se utilizaron los índices ONI, MEI e ICEN, y se calculó la mediana de cada uno, para cada año hidrológico desde septiembre 1981 hasta agosto 2023. Luego se clasificaron los años hidrológicos con base al siguiente criterio:

$$\begin{array}{l}
 \text{LN} \left\{ \begin{array}{l} -0.5 < \text{ONI} \\ -0.5 < \text{MEI} \\ -1.0 < \text{ICEN} \end{array} \right. \\
 \\
 \text{EN} \left\{ \begin{array}{l} 0.5 > \text{ONI} \\ 0.5 > \text{MEI} \\ 0.4 > \text{ICEN} \end{array} \right.
 \end{array}$$

- Se verificó el cambio estadístico de los valores promedio del caudal mensual en años hidrológicos categorizados como EN, LN respecto de años de condiciones de Fase Neutra (FN) de ENOS. La inspección del cambio estadístico de la media se realizó en ventanas de tiempo anual y estacional; este último seleccionando los meses más lluviosos (DEFM) y meses de estiaje (JJA). Se aplicó el test no paramétrico de Mann-Whitnet para evaluar la hipótesis nula de la no existencia de diferencias entre medias a tres niveles de significancia estadística (0.1, 0.05 y 0.01), similar a (Isla, 2018).
- Se empleó el coeficiente de Pardé (Ecuación 3) para calcular la contribución del caudal medio mensual al caudal medio anual durante el año hidrológico promedio (1981-

2023). De esta manera se caracterizan los ciclos anuales del escurrimiento las cuencas en estudio. Luego, se aplicó el método de agrupamiento *K-means*, similar a (Hernandez et al., 2022), para identificar grupos de estaciones con similar estacionalidad de caudales, empleando las series de coeficientes de Pardé normalizados.

$$Pardé = \frac{Q_{mensual,t}}{Q_{anual}} \quad ; \quad (3)$$

- Se realizó el Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad del análisis e identificar los modos de variabilidad que expliquen la mayor varianza de cada grupo de estaciones con similar ciclo anual de escurrimiento. Con la finalidad de reducir el efecto de la estacionalidad se utilizaron las anomalías de caudal mensual en la climatología 1991-2020. Finalmente se seleccionó la primera componente de cada grupo.
- Se evaluó la teleconexión entre índices de ENOS y el caudal medio mensual mediante la correlación no paramétrica de Spearman (r_s , Ecuación 4) entre los índices climáticos y la primera componente principal de las anomalías del caudal mensual de cada grupo. Debido a que la conexión entre ENOS y la respuesta hidrológica de las cuencas no necesariamente es inmediata, se calculó la correlación cruzada de Spearman para retardos de 0 a 12 meses.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad ; \quad (4)$$

donde d es la diferencia entre los rangos de los valores correspondientes de las dos variables para el i -ésimo par de datos; y n es el número total de par de datos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3. Reconstrucción de caudales observados

La Figura 5 muestra las series de tiempo de caudales medios mensuales observados en estaciones hidrométricas (magenta) y simulados con corrección del sesgo (gris) para el

periodo 1981 - 2023. Los resultados presentan buena correspondencia temporal entre las observaciones y simulaciones.

En general, las simulaciones corregidas reconstruyen adecuadamente la magnitud del caudal mensual en los periodos de estiaje (julio - agosto) y avenidas (diciembre – marzo). Además, las curvas de crecimiento y agotamiento de los hidrogramas simulados se ajustan a los observados, y replican la estacionalidad del flujo. En estaciones con cortos registros de datos observados (p. ej. MAL, AMA, LNA, LAG, PCQ y LPA), las simulaciones con corrección de sesgo permiten extender la información de caudales para evaluar y comprender la dinámica de la respuesta hidrológica en puntos de interés a nivel nacional. En estaciones de la llanura amazónica norte la simulación hidrológica supone todavía reto pese a la post-corrección del sesgo, similar a lo reportado en las estaciones NAP, BOR y BEL por (Llauca et al., 2021). Sin embargo, las simulaciones corregidas estas zonas pueden representar la variabilidad general del flujo, por lo que en términos tasas de cambio es posible inferir ciertos resultados.

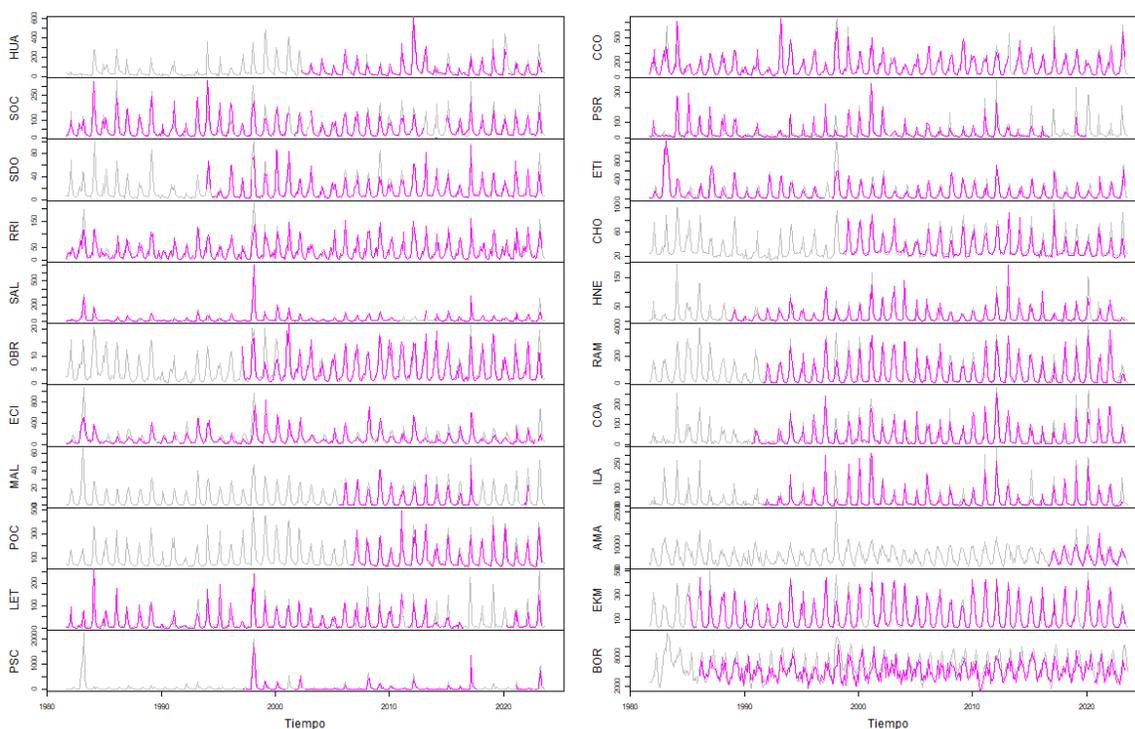


Figura 5. Caudales medios diarios observados (magenta) y simulados corregidos (gris).

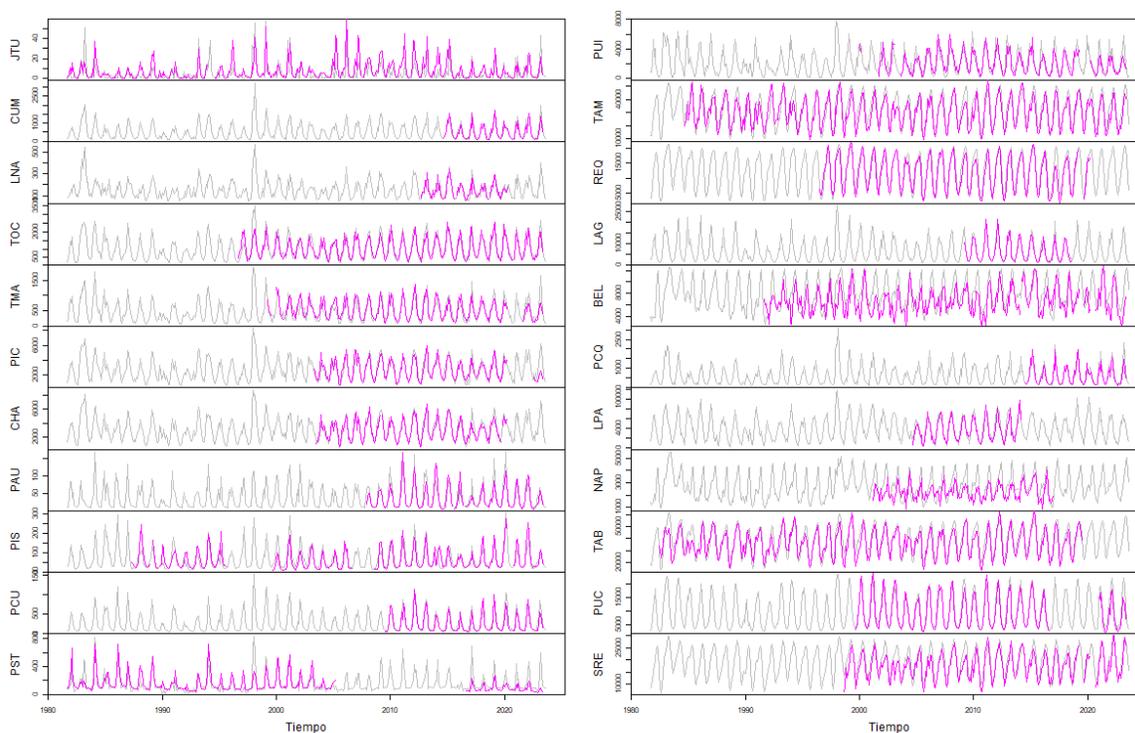


Figura 7. Caudales medios mensuales observados (magenta) y simulados corregidos (gris). (Continuación).

Los estadísticos de ajuste entre las series de caudales observados y simulados con corrección del sesgo se presentan en la Tabla 3. Las métricas de KGE y NSE miden el rendimiento del modelo con un único valor numérico dentro del rango de menos infinito y uno. Un valor cercano a uno indica una mejor precisión del modelo, mientras que a medida que aumenta la distancia a uno, la precisión del modelo se deteriora. Las series de caudal mensual tienen una mediana de $KGE=0.84$ y $NSE=0.71$, indicando así un buen desempeño para el conjunto de estaciones seleccionadas. Si bien, en términos del NSE, se tiene valores insatisfactorios ($NSE < 0$) en las estaciones NAP, BOR, y BEL, estos presentan valores aceptables de KGE (por encima 0.5, a excepción de la estación NAP). Es importante precisar que las métricas de KGE y NSE no son comparables entre sí pese a tomar valores dentro del mismo rango. KGE contempla el ajuste de errores de sesgo (media), variabilidad del flujo (varianza), y temporalidad (correlación lineal) tal como se describe en la Ecuación 1; mientras que NSE sólo contempla sesgos en torno a la media de las observaciones, por lo que consideramos que el estadístico de KGE es más robusto para reflejar adecuadamente el desempeño de las simulaciones (Kiraz et al., 2023; Knoben et al., 2019; Mizukami et al., 2019).

Tabla 3. Estadísticos de ajuste del en las simulaciones de caudal con corrección de sesgo.

Estación	KGE	NSE	Estación	KGE	NSE
HUA	0.79	0.59	JTU	0.51	0.21
SOC	0.77	0.54	CUM	0.84	0.7
SDO	0.86	0.73	LNA	0.74	0.55
RRI	0.87	0.75	TOC	0.77	0.53
SAL	0.7	0.56	TMA	0.7	0.42
OBR	0.84	0.68	PIC	0.75	0.52
ECI	0.66	0.36	CHA	0.8	0.63
MAL	0.68	0.75	PAU	0.75	0.51
POC	0.82	0.68	PIS	0.75	0.53
LET	0.63	0.34	PCU	0.82	0.73
PSC	0.61	0.57	PST	0.67	0.3
CCO	0.89	0.78	PUI	0.63	0.26
PSR	0.51	0.12	TAM	0.83	0.66
ETI	0.73	0.45	REQ	0.88	0.82
CHO	0.84	0.74	LAG	0.82	0.67
HNE	0.76	0.63	BEL	0.61	0.04
RAM	0.83	0.77	PCQ	0.84	0.72
COA	0.8	0.59	LPA	0.81	0.66
ILA	0.7	0.49	NAP	0.41	-0.49
AMA	0.67	0.34	TAB	0.84	0.65
EKM	0.9	0.8	PUC	0.91	0.86
BOR	0.52	-0.02	SRE	0.82	0.59

3.4. Sensibilidad del caudal promedio

Del total de 42 años hidrológicos (septiembre – agosto) evaluados entre 1981-2023; la Tabla 4 detalla los años identificados como EN (12 años) y LN (14 años). Estos años guardan relación con los años reportados por Berri et al. (2019), incluyendo por ejemplo los eventos EN extremos de 1981/82 y 1997/98; reportados por la comisión del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN). Los años restantes (16 años) son considerados como años de condiciones neutras de la TSM o FN.

Tabla 4. Años hidrológicos El Niño y La Niña.

El Niño (EN)			La Niña (LN)		
1982	1997	2016	1984	2000	2011
1986	2002	2023	1988	2005	2017
1991	2009	-	1995	2007	2020
1992	2014	-	1998	2008	2021
1994	2015	-	1999	2010	-

La Figura 6 presenta la significancia estadística (α) del cambio del caudal promedio del periodo de avenidas en años EN o LN respecto de años de FN. Valores positivos indican que el caudal promedio es estadísticamente superior durante EN o LN respecto de condiciones neutras de ENOS, mientras que valores negativos indican lo contrario. Durante EN se evidencian diferencias positivas altamente significativas ($\alpha=0.01$) en estaciones de la costa norte (ETI, ECI, PSC, RRI y SAL), y del flanco oriental de los Andes norte (LNA, BOR y NAP). En contraste, existen diferencias negativas significativas (para valores de α igual a 0.01 y 0.05) en algunas estaciones de los Andes sur (PIS, EKM y PAU) y la vertiente del Titicaca (HNE, RAM y COA).

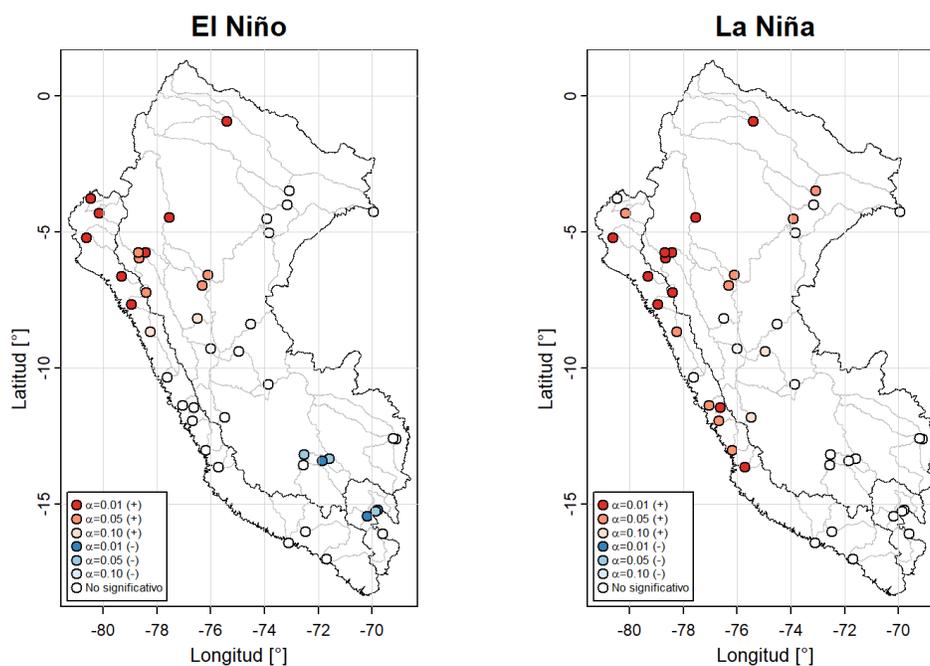


Figura 6. Significancia estadística (α) del cambio del caudal promedio en el periodo avenidas (diciembre – marzo) de años El Niño y La Niña respecto de condiciones neutras de ENOS.

Respecto de LN (Figura 6), se observan incrementos del caudal promedio del periodo de avenidas en estaciones de los sectores norte (p. ej. PSC, RRI, SAL, etc.) y centro de la vertiente del Pacífico (p. ej. SDO, OBR y CHO), y del noroeste de la vertiente del Atlántico. Nótese que a diferencia de años EN, la estación ETI ubicada en la costa norte no muestra cambios positivos significativos. Además, estaciones de los Andes Sur y vertiente del Titicaca no presenta cambios significativos.

Similar a lo anterior, la Figura 7 muestra el comportamiento del caudal promedio en el periodo de estiaje (julio – agosto). Los resultados muestran que durante años EN, no se observan tendencias espaciales definidas de caudales superiores o inferiores respecto de años en condiciones normales de la TSM. Casos particulares de incremento se tienen en la estación ETI y CCO en la vertiente del Pacífico; BOR y NAP en la vertiente del Atlántico; y disminución en PIS. Sin embargo, durante años LN se presentan cambios positivos muy significativos en estaciones ubicadas predominantemente sobre la costa central (SDO, OBR y CHO), y costa sur (POC).

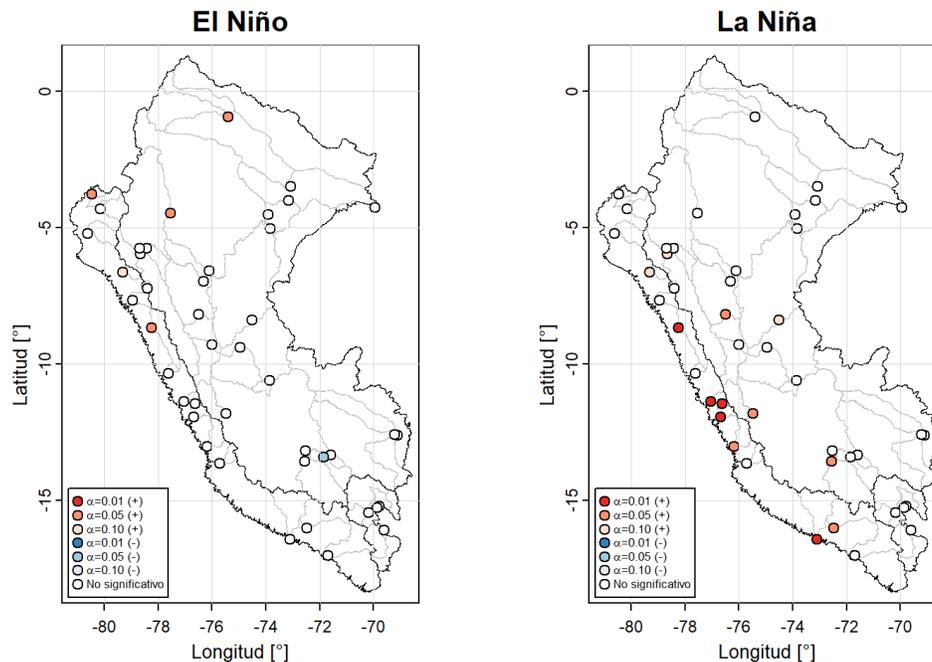


Figura 7. Significancia estadística (α) del cambio del caudal promedio en el periodo estiaje (junio – agosto) de años El Niño y La Niña respecto de condiciones neutras de ENOS.

3.5. Agrupamiento de estaciones hidrométricas

La Figura 8 muestra la selección del número de grupos de estaciones para la aplicación del algoritmo K-means. De acuerdo con la inflexión de la curva WCSS para un número de cinco grupos (eje X), se selecciona este valor como número óptimo de grupos.

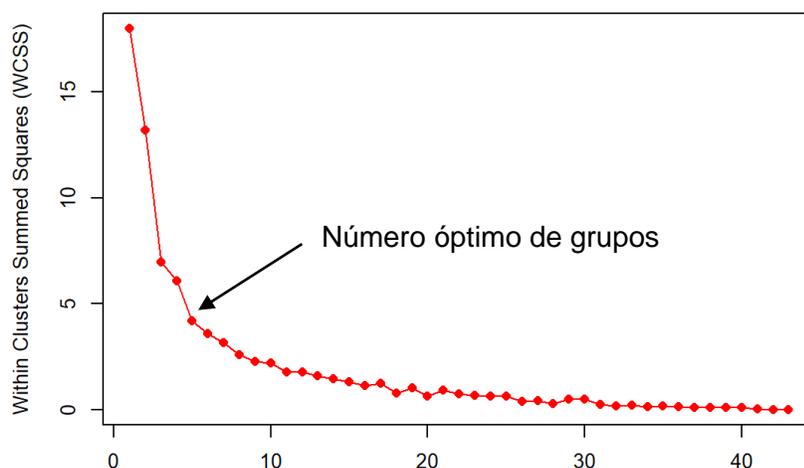


Figura 8. Selección gráfica del número óptimos de grupos para el algoritmo K-means.

Las estaciones hidrométricas agrupadas se presentan en la Figura 9. Los grupos muestran congruencia espacial acorde las vertientes hidrográficas. Por ejemplo, los grupos 1, 2 y 3 congregan estaciones del tramo norte (ETI, ECI, PSC, RRI y SAL), centro (CCO, MAL, SDO, OBR, CHO, SOC y LET) y sur (HUA, POC y PSR) de la vertiente del Pacífico, respectivamente. El grupo 4 comprende estaciones del sector sur de la vertiente del Atlántico (AMA, LPA, PAU, EKM, PIS y PCU) y estaciones de la vertiente del Titicaca (ILA, HNE, RAM y COA). Finalmente el grupo 5 concentra estaciones del sector centro y norte de la vertiente del Atlántico (BOR, JTU, CUM, LNA, TOC, TMA, PIC, CHA, REQ, LAG, BEL, PCQ, NAP, TAB, PUC y SRE).

cuenta de una mayor sensibilidad de las anomalías durante de años EN respecto de LN. En las estaciones del grupo 1 se observa que las máximas anomalías positivas coinciden con la ocurrencia de EN extremo (1982/83 y 1997/98) y EN costero de magnitud moderada (2016/17). Caso contrario se da en estaciones del grupo 2 cuyas anomalías negativas guardan correspondencia con los mismos años. En estaciones de los grupos 3 y 4, las anomalías positivas y negativas parecen ocurrir indistintamente de la presencia de EN; mientras que en las estaciones del grupo 5 las máximas anomalías positivas coinciden con años EN extremos de 1982/83 y 1997/98 más no con EN costero de 2016/2017.

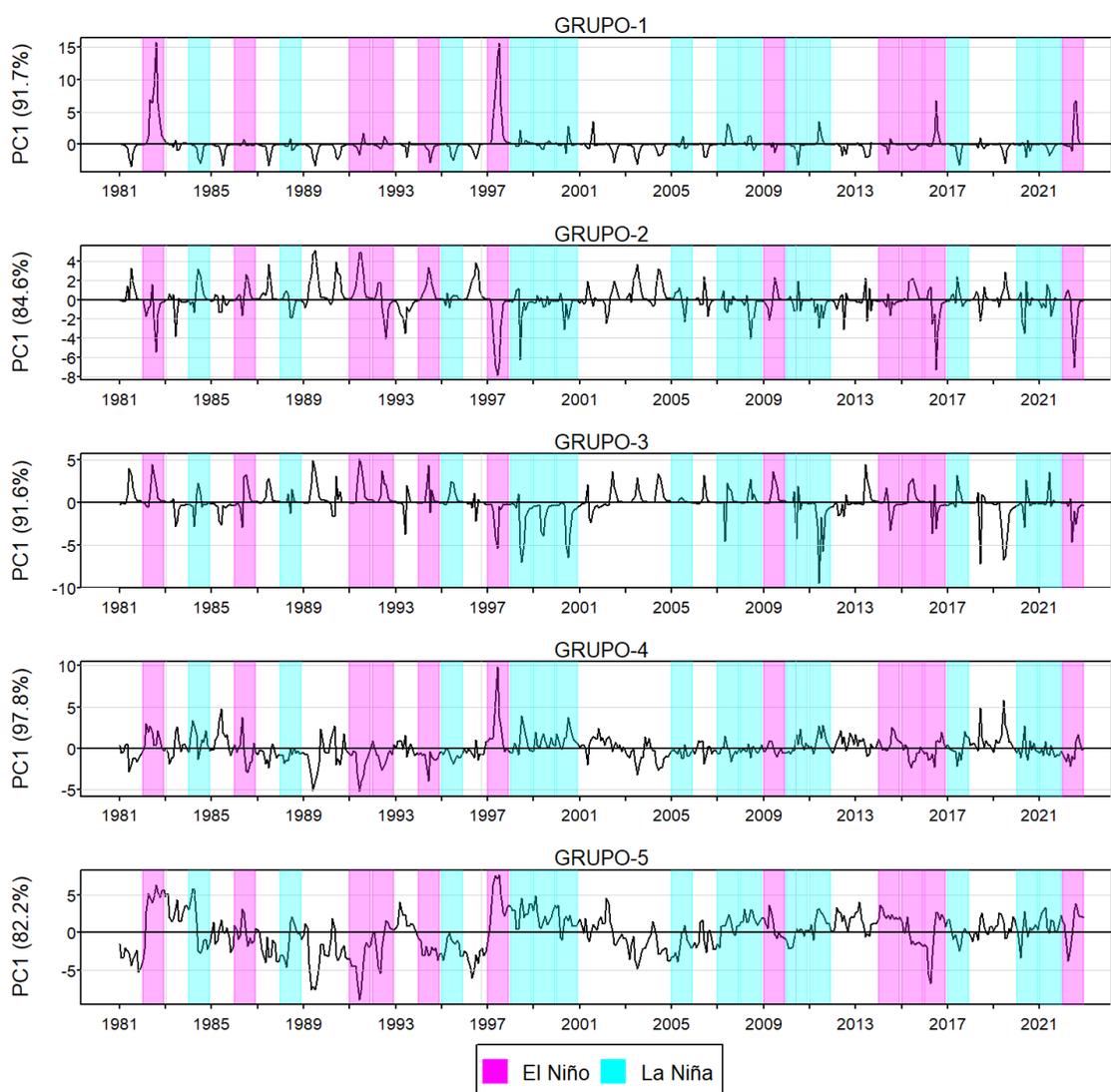


Figura 10. Serie de tiempo del primer modo de variabilidad de la anomalías de caudal mensual para los cinco grupos de estaciones a nivel nacional; y años ocurrencia de El Niño y La Niña.

Los índices climáticos de ENOS son correlacionadas con los primeros modos de variabilidad de las series de anomalías de caudal mensual para inspeccionar el grado de asociación entre ambas variables. Asimismo, para evaluar el efecto retardado de el ENOS y su potencial efecto sobre los caudales en cuencas del Perú se aplica la técnica de correlación cruzada de Spearman para retardos positivos de 0 a 12 meses, y cuyos resultados se muestran en la Figura 11. Notar que en la correlación cruzada, el retardo 0, por ejemplo, está referido a la correlación entre índices ENOS de setiembre (inicio del año hidrológico) y la anomalía del caudal de setiembre del mismo año; mientras que un retardo de 12 meses está referido a la correlación entre índices ENOS de setiembre y la anomalía de caudal de setiembre del siguiente año.

La correlación entre índices climáticos de ENOS y anomalías de caudal mensual es débil ($-0.5 < r_s < 0.5$) en todos de los grupos de estaciones. Sólo en las estaciones del grupo 1 se presenta un $r_s=0.38$ respecto de la TSM Niño 1+2 para un retardo de 7 meses. Este comportamiento esta relacionado con los efectos de EN y LN costeros sobre el norte peruano, y se confirma con las correlaciones positivas observadas para el ICEN. Este último es derivado de las anomalías de la TSM Niño 1+2, por lo que es capaz de describir cómo los cambios en la región Niño 1+2 guardan relación positiva sobre cambios en los caudales hasta con varios meses de desfase. Los índices ONI y MEI muestran ligera tendencia positiva respecto de las anomalías de caudales en los primeros meses de retardo. Sin embargo, no se evidencian relaciones importantes entre ambas variables. Incrementos en los valores de ONI y MEI están relacionados con calentamiento del Pacífico Central, y presencia de lluvias importantes en el norte peruano, y la disminución de las mismas hacia el sur. El índice SOI, por el contrario, muestra un comportamiento opuesto al ONI y MEI, cuyos valores negativos de SOI están asociados con calentamiento del pacífico central.

Los resultados de la correlación cruzada no son concluyentes. No obstante, debido a que está demostrado que el ENOS influye en la variabilidad de las tasas de lluvia en el Perú, y que la relación precipitación-escurrimiento sigue un proceso no lineal, es posible encontrar teleconexiones con otros aspectos hidrológicos más allá de las anomalías caudal promedio.

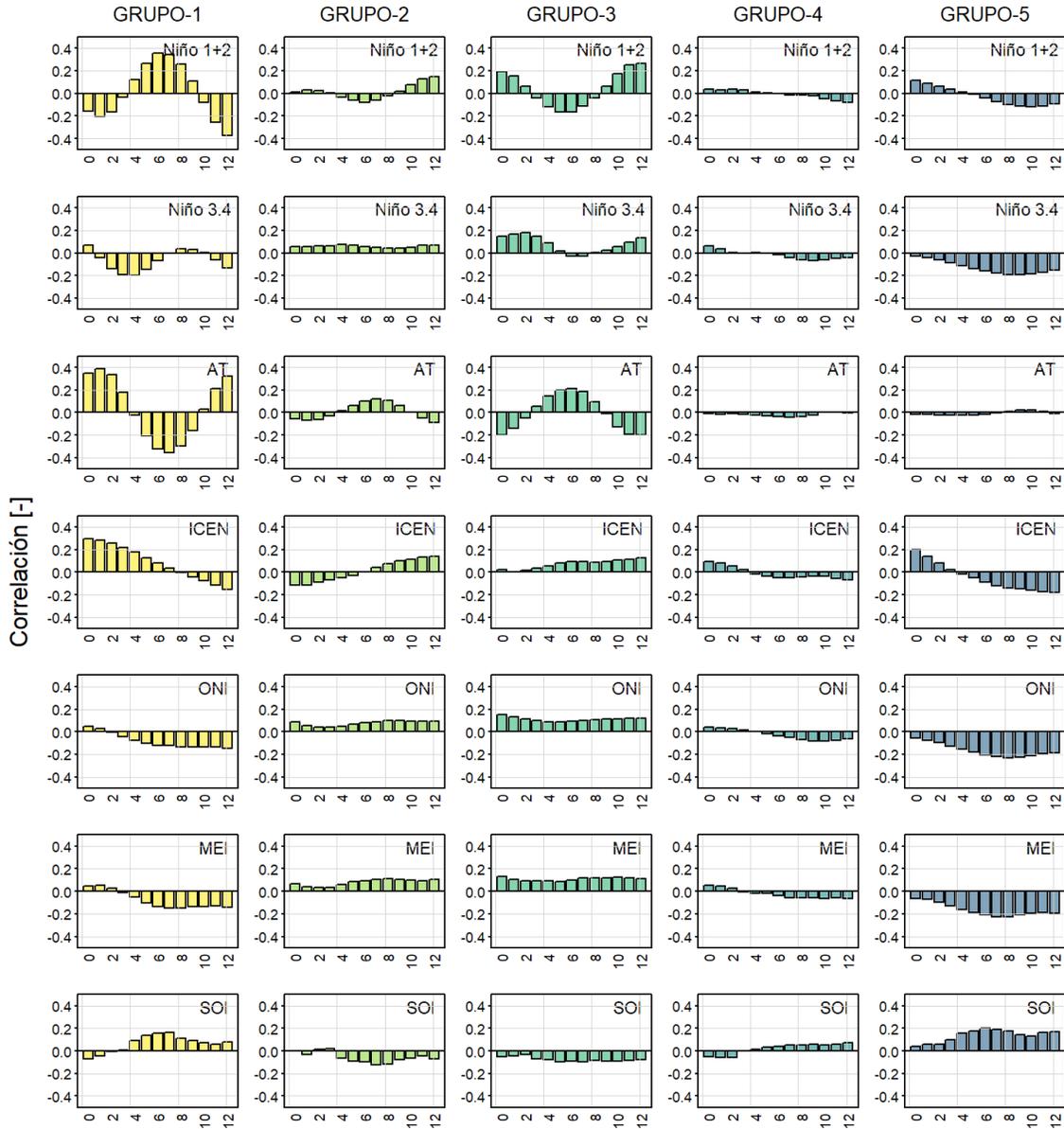


Figura 11. Coeficiente de correlación cruzada de Spearman entre índices climáticos de ENOS y anomalías de caudal mensual, para retardos de 0 a 12 meses.

VI. CONCLUSIONES

El clima en una de las principales forzantes que condicionan la respuesta hidrológica de cuencas en el Perú. El presente estudio evalúa la relación de ENOS frente a la variabilidad de caudales en estaciones hidrométricas de las tres vertientes del país. Los resultados presentados evidencian la influencia de los ENOS en el comportamiento hidrológico promedio de los caudales. Se observó que sus efectos son variables, y

dependen tanto de su fase (El Niño o La Niña) como de su magnitud (especialmente de moderado a extremo). Se evidencia también que El Niño juega un rol importante en la variabilidad hidrológica, propiciando el incremento de caudales en el norte del país, y su disminución sobre los Andes sur. No obstante, este estudio se limita a evaluar el comportamiento hidrológico en términos del caudal promedio, utilizando información de caudales reconstruidos a partir de modelamiento hidrológico. Futuros trabajos incidirán en los efectos de ENOS sobre la variabilidad de los extremos hidrológicos.

Finalmente, se espera que los resultados obtenidos en el presente estudio contribuyan al entendimiento de los efectos de El Fenómeno El Niño y La Niña sobre la hidrología de cuencas del Perú, con énfasis sobre la predicción estacional del comportamiento de caudales.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Berri, G. J., Bianchi, E., & Müller, G. V. (2019). El Niño and La Niña influence on mean river flows of southern South America in the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 64(8), 900–909. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1609681>
- Cai, W., Santoso, A., Collins, M., Dewitte, B., Karamperidou, C., Kug, J.-S., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Stuecker, M. F., Taschetto, A. S., Timmermann, A., Wu, L., Yeh, S.-W., Wang, G., Ng, B., Jia, F., Yang, Y., Ying, J., Zheng, X.-T., ... Zhong, W. (2021). Changing El Niño–Southern Oscillation in a warming climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 628–644. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00199-z>
- Farmer, W. H., Over, T. M., & Kiang, J. E. (2018). Bias correction of simulated historical daily streamflow at ungauged locations by using independently estimated flow duration curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5741–5758. <https://hess.copernicus.org/articles/22/5741/2018/>
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3–11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- Hernandez, D., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., & Ricchetti, F. (2022). Hydrologic sensitivities and ENSO variability across hydrological regimes in central Chile (28°–41°S). *Water Resources Research*, 58(9). <https://doi.org/10.1029/2021wr031860>

- Isla, F. I. (2018). ENSO-triggered floods in South America: correlation between maximum monthly discharges during strong events. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2018, 1–13. <https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2018-107/>
- Kiraz, M., Coxon, G., & Wagener, T. (2023). A signature-based hydrologic efficiency metric for model calibration and evaluation in gauged and ungauged catchments. *Water Resources Research*, 59(11). <https://doi.org/10.1029/2023wr035321>
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. En *Catchment hydrology/Modelling approaches*. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-327-supplement>
- Lavado Casimiro, W. S., Labat, D., Guyot, J. L., & Ardoin-Bardin, S. (2011). Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon--Andes basin. *Hydrological processes*, 25(24), 3721–3734. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.8097>
- Lavado Casimiro, W. S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J. C., & Guyot, J. L. (2012). Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 625–642. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>
- Lavado-Casimiro, & Felipe. (2013). ENSO impact on hydrology in Peru. *Advances in engineering education*. <https://adgeo.copernicus.org/articles/33/33/2013/>
- Llauca, H., Lavado-Casimiro, W., Montesinos, C., Santini, W., & Rau, P. (2021). PISCO_HyM_GR2M: A Model of Monthly Water Balance in Peru (1981–2020). *Water*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/w13081048>
- Llauca, H., Leon, K., & Lavado-Casimiro, W. (2023). Construction of a daily streamflow dataset for Peru using a similarity-based regionalization approach and a hybrid hydrological modeling framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101381. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101381>
- Lou, W., Sun, C., Kucharski, F., Li, J., & Liu, Y. (2024). Amazon drought amplifies SST warming in the North Tropical Atlantic. *Climate Dynamics*, 62, <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07400-1>
- Mizukami, N., Rakovec, O., Newman, A. J., Clark, M. P., Wood, A. W., Gupta, H. V., & Kumar, R. (2019). On the choice of calibration metrics for “high-flow” estimation using hydrologic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6), 2601–2614. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2601-2019>
- Moquet, J.-S., Morera, S., Turcq, B., Poitrasson, F., Roddaz, M., Moreira-Turcq, P., Espinoza, J. C., Guyot, J.-L., Takahashi, K., Orrillo-Vigo, J., Petrick, S., Mounic, S., & Sondag, F. (2020). Control of seasonal and inter-annual rainfall distribution on the Strontium-Neodymium isotopic compositions of suspended particulate matter and implications for tracing ENSO events in the Pacific coast (Tumbes basin, Peru). *Global and Planetary Change*, 185(103080), 103080. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103080>
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Ruelland, D., Frappart, F., Lavado, W., Dewitte, B., & Felipe, O. (2019). Assessing multidecadal runoff (1970–2010) using regional hydrological modelling under data and water scarcity conditions in Peruvian Pacific catchments. *Hydrological processes*, 33(1), 20–35. <https://doi.org/10.1002/hyp.13318>

- Silva, M. E. S., Taschetto, A. S., & De Souza, E. B. (2024). Editorial: Pacific multi-decadal variability and Enso impact on South American climate. *Frontiers in earth science*, 12. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1430406>
- Stuck, J., Güntner, A., & Merz, B. (2006). ENSO impact on simulated South American hydro-climatology. *Advances in Geosciences*, 6, 227–236. <https://adgeo.copernicus.org/articles/6/227/2006/>
- Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J.-C., Vuille, M., & Lavado-Casimiro, W. (2018). Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 38(1), 420–435. <https://doi.org/10.1002/joc.5185>
- Wang, J., Wang, X., Lei, X. H., Wang, H., Zhang, X. H., You, J. J., Tan, Q. F., & Liu, X. L. (2020). Teleconnection analysis of monthly streamflow using ensemble empirical mode decomposition. *Journal of Hydrology*, 582, 124411. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124411>
- Wang, J.-Z., Geng, T., Cai, W., Wang, G., Xie, M., Wu, L., & Chen, Z. (2024). Diverse responses of strong positive SST and rainfall Indian Ocean dipole events under greenhouse warming. *Journal of climate*, 37(16), 4133–4151. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-23-0631.1>