

Inicio y fin de la temporada de lluvias sobre la vertiente del lago Titicaca

Onset and cessation of the rainy season on the Lake Titicaca slope

Niell Wilson Rivas Meza^{1,a}, Erick Vladimir Lobo Reyes^{1,b}, Issaak Rafael Vásquez Romero^{1,c}, Joselito Jersin Robles Silvestre^{1,d}, Néstor Montalvo Arquíñigo^{1,e}

Recibido: 30/07/2024 - Aprobado: 13/09/2024 – Publicado: 13/12/2024

RESUMEN

Esta investigación busca identificar el inicio y el fin de la temporada lluviosa, así como las tendencias en las métricas de días lluviosos, lluvia de la temporada húmeda e intensidad de la precipitación en la vertiente del lago Titicaca. Se analizaron la variación espacial y temporal de la temporada de lluvias mediante las series de lluvia extraídas de la base de datos gridded PISCOp V2.1 y de 18 estaciones meteorológicas en el periodo 1981-2012, que luego fueron validadas con datos de lluvias registradas y mediante indicadores estadísticos de desempeño. Se identificaron el inicio y el fin de la temporada lluviosa para cada año hidrológico y se cuantificaron las métricas de días lluviosos. De igual forma, las series temporales revelaron que, en general, no presentan tendencias estadísticamente significativas, lo cual está respaldado por el análisis de tendencias de las series derivadas de los datos gridded. Por tanto, las series temporales permitieron identificar el inicio y el fin de la temporada lluviosa, que no muestran tendencias significativas, excepto en la estación Crucero, donde se observa una tendencia creciente en el inicio y decreciente en el fin de la temporada. Los datos gridded y observados muestran una buena concordancia en la mayoría de las estaciones, además de que los indicadores de desempeño (RMSE, NS, R, R²) confirman esta similitud entre las series de lluvia media climatológica de las estaciones Crucero, Desaguadero, Huancané y Pampahuta. En cuanto al análisis de tendencias de las métricas, se observó una disminución significativa en la cantidad de días lluviosos y en la lluvia de la temporada húmeda en la estación Crucero, lo que indica un acortamiento del periodo lluvioso en esta estación.

Palabras claves: temporada lluviosa, vertiente del Titicaca, base de datos gridded, análisis de tendencias, temporada.

ABSTRACT

This research seeks to identify the beginning and end of the rainy season, trends in rainy day metrics, wet season rainfall, and rainfall intensity on the slope of Lake Titicaca. The spatial and temporal variation of the rainy season was analyzed using the rainfall series extracted from the PISCOp V2.1 grid database and from 18 meteorological stations in the period 1981-2012, which were then validated with recorded rainfall data and through statistical performance indicators. The beginning and end of the rainy season have been identified for each hydrological year and the metrics of rainy days have been quantified. Likewise, the time series revealed that, in general, they do not present statistically significant trends, which is supported by the analysis of trends of the series derived from the gridded data. Therefore, the time series allowed us to identify the beginning and end of the rainy season; who do not present significant trends, except in the Cruise season, increasing at the beginning and decreasing at the end of the season. The gridded and observed data show good agreement in most stations, in addition to the performance indicators (RMSE, NS, R, R²) that confirm this similarity between the climatological average rainfall series of the Crucero, Desaguadero, and Huancané stations. and Pampahuta. Regarding the analysis of trends in the metrics, it showed a significant decrease in the number of rainy days and in the rain of the wet season at the Crucero station, indicating a shortening of the rainy period at this station.

Keywords: rainy season, Titicaca Lake, gridded database, trend analysis, season.

1 Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

a Autor para correspondencia: wivas@lamolina.edu.pe - ORCID:<https://orcid.org/0009-0003-2507-4743>

b E-mail: erickloboreyes@gmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4973-8404>

c E-mail: ivasquez@lamolina.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1044-2246>

d E-mail: joselitorobles@lamolina.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9245-9289>

e E-mail: nmontalvo@lamolina.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7449-9452>

I. INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones son un factor crucial que determina la elección y el rendimiento de los cultivos, así como el éxito de otras actividades socioeconómicas en las comunidades de la vertiente del lago Titicaca. La variabilidad en el inicio, el fin y la duración del periodo lluvioso afecta las fechas de siembra, el crecimiento de los cultivos, el rendimiento y la producción de alimentos. Otro factor que influye es la geomorfología (León et al., 2022; Hughes et al., 2010; Burn et al., 2004). El aumento de la población es una preocupación para la estabilidad alimentaria y la conservación de los recursos naturales. Esto implica la necesidad de un mejor manejo de los recursos por parte de los pobladores (Quispe et al., 2021).

Para evaluar si la estacionalidad está experimentando cambios a gran escala y buscar posibles impulsores, se requiere un método aplicable de forma general para identificar el inicio y el fin de la estación húmeda. Se han realizado numerosos estudios previos (Sigalla et al., 2023; Dunning et al., 2016; Zakwan et al., 2021) que examinan la naturaleza del inicio y fin de las precipitaciones, aunque en su mayoría se han centrado en escalas nacionales o regionales, aplicando modelos como el HadCM3 (Velásquez et al., 2019).

Un factor clave que puede influir en la variabilidad de las precipitaciones es el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Chambi et al., 2023), que afecta significativamente los patrones climáticos globales y locales. Durante los eventos de El Niño, se ha observado una disminución en las precipitaciones en la vertiente del lago Titicaca, lo que agrava los desafíos en la producción agrícola y la disponibilidad de agua. Por lo tanto, es esencial entender cómo los eventos ENOS interactúan con los patrones locales de precipitación para planificar estrategias de mitigación efectivas. En este estudio, se analizan los patrones de variación en el inicio, la duración y el fin de la temporada de lluvias en la vertiente del Titicaca.

II. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

Comprende la vertiente del lago Titicaca (meseta del Collao), entre las latitudes 14°00' S - 17°40' S y longitudes 68°48' O y 71°08' O; y altitud variable entre 3796 y 5824 m.s.n.m. (Figura 1).

Esta vertiente, de 48,910.64 km², cuenta con 18 unidades hidrográficas: 12 cuencas (Azángaro, Callacame, Caño, Coata, Huancané, Ilave, Ilpa, Mauri, Mauri Chico, Pucará, Suches y Ushusuma) y 6 intercuenas (ANA, 2008). Además, posee una extensa red fluvial, cuyos principales ríos son: Suches, Huancané, Ramis, Coata, Ilave y Desaguadero.

La precipitación en esta zona ocurre entre noviembre y marzo, según el análisis regional de máximas lloviznas, utilizando momentos con valores acumulados anuales de 500 mm a 900 mm (Lavado et al., 2016). Las temperaturas máximas absolutas oscilan entre 14 °C y 18 °C, mientras que las mínimas varían entre -7 °C y 3.0 °C.

2.2 Datos de estaciones meteorológicas

Se emplearon series temporales de lluvia con resolución diaria de la base de datos gridded PISCOp V2.1 (Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations), desarrollada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para el periodo 1981-2016 (con actualizaciones en curso), con una resolución espacial de 0.1°. El área fue discretizada en 463 celdas, y se extrajeron las series de lluvia para los centroides de dichas celdas.

De forma complementaria, para validar los resultados derivados de la información sintética gridded, se utilizaron registros de precipitación acumulada diaria de 18 estaciones meteorológicas ubicadas en la vertiente del lago Titicaca. De esta manera, se obtuvieron series temporales completas (mayores a 30 años), específicamente para el periodo común de análisis, de 1981 a 2012. No obstante, cabe señalar que solo los registros de las estaciones Crucero, Desaguadero, Huancané y Pampahuta no presentaban vacíos en el periodo de análisis, mientras que las series de las catorce estaciones restantes contenían vacíos, aunque estos no superan el 3% del total de datos (Tabla 1).

2.3 Determinación de métricas de la estación lluviosa

Para identificar el punto de inicio y fin de la temporada lluviosa se aplicó el método formulado en la estacionalidad de las precipitaciones africanas de 1996 hasta 2009 (Liebmann et al. 2012). El proceso consta de dos etapas: 1) la determinación de la anomalía de lluvia climatológica acumula da diaria $C(d)$, correspondiente a un análisis de periodo extendido; y 2) la determinación de la anomalía de lluvia acumulada diaria $A(D)$, correspondiente al análisis de un año hidrológico específico.

Para calcular la anomalía climatológica $C(d)$, hasta el día, se usó la Ec. 1.

$$C(d) = \sum_{i=1}^d (R_i - \bar{R}) \quad (1)$$

donde R_i es la lluvia media climatológica para cada día del año hidrológico (i varía desde el 1 de setiembre al 31 de agosto), y \bar{R} es la lluvia media diaria climatológica. El día con anomalía climatológica mínima (d_{min}) es definido como el inicio de la temporada lluviosa de periodo extendido, mientras que el día de máximo valor (d_{max}) es el fin de dicha temporada. Para el cálculo de la anomalía de lluvia acumulada diaria $A(D)$, hasta el día, se utilizó la Ec. 2.

$$A(D) = \sum_{j=d_{min}-45}^D (P_j - R) \quad (2)$$

donde P_j es la lluvia en el día j , $A(D)$ es calculado para cada día del año hidrológico, desde $d_{min}-45$ hasta $d_{max}+45$; donde el mínimo valor representa el inicio de la temporada lluviosa del año específicamente analizado, y el máximo valor corresponde a su fin.

Una vez que fueron determinados el inicio y fin de la temporada lluviosa para cada año, se hizo el cálculo de las métricas: 1) días lluviosos, 2) lluvia de la temporada húmeda e 3) intensidad de lluvia.

Donde la métrica «días lluviosos» se obtuvo al calcular el número de días con lluvia mayor o igual a 1 mm, contabilizados entre el inicio y fin de la temporada lluviosa. La métrica «lluvia de la temporada húmeda» se determinó sumando la cantidad de lluvia asociada a los días donde se supera el valor de 1 mm. Y la métrica «intensidad de lluvia» es el resultado de la división entre la lluvia de la temporada húmeda y los días lluviosos.

2.4 Análisis de tendencias

Para detectar las tendencias en las series de tiempo se aplicaron dos procedimientos estadísticos no paramétricos de gran robustez: 1) la prueba de Mann-Kendall (MK) (Wilks 2012) y 2) el estimador de la pendiente de Sen.

2.4.1 Prueba de Mann-Kendall

Esta prueba es empleada en la detección de tendencias monotónicas en series de tiempo. La hipótesis nula, H_0 , plantea que los datos provienen de una población con observaciones independientes e idénticamente distribuidos (serie estacionaria, sin presencia de tendencia), mientras que la hipótesis alternativa, H_A , es que los datos siguen una tendencia monotónica. El estadístico de esta prueba está dado por la Ec. 3.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \tag{3}$$

Donde n es el número de datos de la serie; $\text{sgn}(X_j - X_k) = 1$ si $(X_j - X_k) > 0$, $\text{sgn}(X_j - X_k) = 0$ si $(X_j - X_k) = 0$, y $\text{sgn}(X_j - X_k) = -1$ si $(X_j - X_k) < 0$. S tiene una media de $E(S) = 0$, y su varianza es:

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^J t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right] \tag{4}$$

donde, J es el número de grupos de medidas iguales y t_j es el número de datos iguales en el grupo j -ésimo. Los valores p son evaluados usando la variable normal estandarizada:

$$z = \begin{cases} (S-1)/\sigma, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sigma, & S < 0 \end{cases} \tag{5}$$

El nivel de significancia adoptado aquí, fue de , por lo que valores p menores que 5% fueron evidencia para rechazar estadísticamente la hipótesis nula.

2.4.2 Estimador de la pendiente de Sen

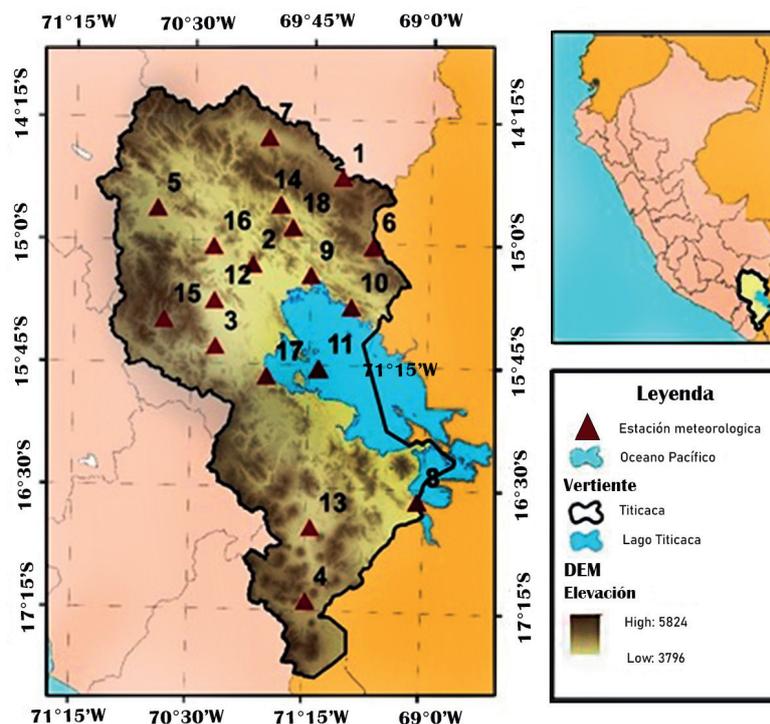
Esta prueba fue empleada para cuantificar la tendencia en las series, como un cambio por unidad de tiempo, bajo un modelo lineal; primero se calculan una serie de pendientes lineales con la Ec. 6.

$$d_k = \frac{X_j - X_i}{j - i} \tag{6}$$

donde $1 \leq i < j \leq n$, X son los datos en el tiempo y n es el número de datos. Para seguidamente estimar la pendiente con la mediana de d_k

Dada la extensión de las series de datos del presente estudio, los análisis fueron efectuados con el soporte del paquete estadístico «trend» (herramientas `mk.test` y `sens.slope`), el cual se halla incorporado en el programa de acceso libre R (Allaire, 2012).

Figura 1
Área, altitudes y ubicación de las estaciones meteorológicas del estudio



III. RESULTADOS

3.1 Anomalía de lluvia climatológica acumulada diaria

Se determinaron las curvas de anomalía climatológica para cada uno de los 463 puntos con datos gridded, lo que permitió identificar el inicio y el fin de la temporada lluviosa en el periodo extendido (1981-2012). Una vez delimitado el periodo húmedo, se cuantificó la lluvia acumulada ocurrida en ese lapso de tiempo y se representó espacialmente (Figura 2).

3.2 Comparación de inicio y fin de temporada lluviosa de periodo extendido y lluvia acumulada de las series PISCO y SENAMHI

Se utilizaron las series de datos de las estaciones Crucero, Desaguadero, Huancané y Pampahuta, así como las series de las 14 estaciones restantes (Tabla 1). Gráficamente, en el lado izquierdo se muestra la dispersión de las series de lluvia media climatológica de las estaciones Crucero, Desaguadero, Huancané y Pampahuta, junto con las series equivalentes obtenidas de los datos PISCO (Figura 3); mientras que en el lado derecho se presentan las curvas de anomalía climatológica.

Los indicadores de desempeño (raíz del error cuadrático medio, RMSE; Nash-Sutcliffe, NS; coeficiente de correlación, R; y coeficiente de determinación, R²) se utilizaron para medir el grado de similitud entre las series de lluvia media climatológica determinadas a partir de los datos observados y los datos sintéticos (Diaconescu et al., 2014) (Tabla 2).

Las curvas de anomalía climatológica muestran que, por ejemplo, en el caso de la estación Crucero, la temporada lluviosa en el periodo extendido inicia el día 61 y termina el día 216, con una lluvia acumulada de 627.2 mm. De manera similar, el inicio obtenido con los datos PISCO (para la celda con centroide en 14.35° S y 70.05° O, que abarca la ubicación

de la estación Crucero) es el día 55, mientras que el fin es el día 209, con una lluvia acumulada de 536.2 mm (Tabla 3).

3.3 Comparación de métricas de la temporada lluviosa de las series PISCO y SENAMHI

A partir de la evaluación del inicio y fin de la temporada lluviosa de cada año hidrológico, se cuantificaron las métricas de días lluviosos. Aquí se muestra la curva de anomalía climatológica del periodo extendido junto con la curva de anomalía de lluvia diaria del año hidrológico 2011-2012 (datos incompletos) de la estación Desaguadero, ambas obtenidas a partir de los datos observados del SENAMHI (Figura 4).

En la Figura 5 se observa una concordancia entre los resultados obtenidos para las estaciones Desaguadero, Huancané y Pampahuta; sin embargo, en el caso de la estación Crucero, destacan diferencias notables.

3.4 Identificación de tendencias en las series de las métricas de la temporada lluviosa

A partir de las series temporales del inicio y fin de la temporada lluviosa, días lluviosos, lluvia de la temporada húmeda e intensidad de lluvia, se muestran las tendencias mediante la prueba de MK y el estimador de la pendiente de Sen para las estaciones Crucero, Desaguadero, Huancané y Pampahuta (Tablas 4 y 5).

Las series del inicio y fin de la temporada lluviosa proporcionaron evidencia estadísticamente significativa sobre la tendencia creciente en el inicio de dicha temporada en la estación Crucero. A medida que pasan los años, la temporada lluviosa en esta zona comienza más tarde. También se encontró evidencia en el fin de la temporada lluviosa, con una tasa de cambio negativa —descrita también por la serie PISCO—, lo que indica que el final de la temporada lluviosa es cada vez más temprano. Esto sugiere que, en la estación Crucero, el periodo lluvioso se ha reducido con el tiempo (Figura 6).

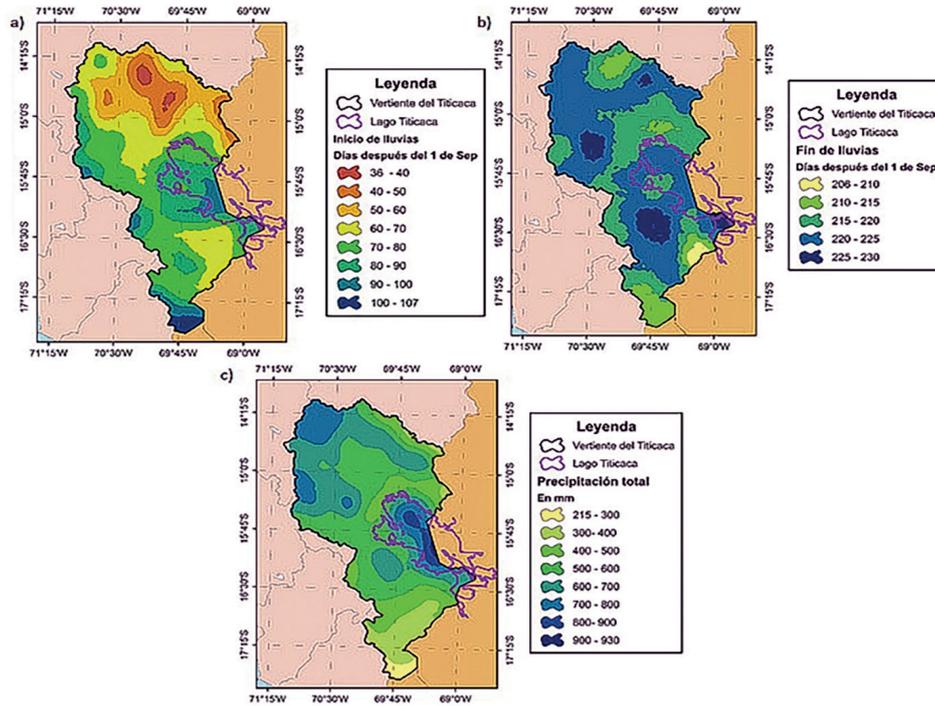
Tabla 1

Ubicación y altitud de las estaciones meteorológicas empleadas en este estudio

Nro.	Estación	Latitud (° S)	Longitud (° O)	Altitud (m s. n. m.)
1	Ananea	-14.6	-69.56	4660
2	Arapa	-15.14	-70.12	3830
3	Cabanillas	-15.64	-70.35	3920
4	Capazo	-17.19	-69.74	4530
5	Chuquibambilla	-14.8	-70.73	3971
6	Cojata	-15.02	-69.36	4344
7	Crucero	-14.36	-70.03	4183
8	Desaguadero	-16.57	-69.04	3808
9	Huancané	-15.2	-69.75	3890
10	Huaraya Moho	-15.39	-69.49	3890
11	Isla Taquile	-15.77	-69.69	3850
12	Lampa	-15.36	-70.36	3892
13	Mazo Cruz	-16.74	-69.72	4003
14	Muñani	-14.77	-69.95	3948
15	Pampahuta	-15.48	-70.68	4400
16	Pucará	-15.03	-70.37	3900
17	Puno	-15.82	-70.02	3812
18	Putina	-14.91	-69.87	3878

Figura 2

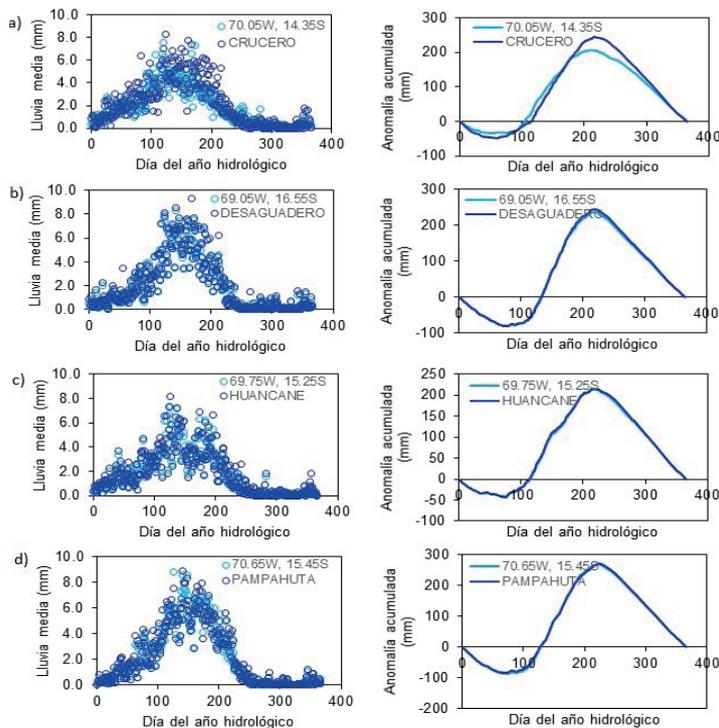
Variación espacial del inicio, fin y de lluvia acumulada de la temporada lluviosa de periodo extendido



Nota: a) Variación espacial del inicio de la temporada lluviosa de periodo extendido (1981-2012) b) variación espacial del fin de la temporada lluviosa de periodo extendido (1981-2012), y c) variación de la lluvia acumulada de la temporada lluviosa de periodo extendido (1981-2012).

Figura 3

Series de lluvia media climatológica



Nota: Estaciones de: (a) Desaguadero, (b) Huanané y (c) Pampahuta, (d) conjuntamente con las series equivalentes obtenidas con los datos PISCO (lado izquierdo). Curvas de anomalía climatológica de periodo extendido (lado derecho). Las series fueron obtenidas a partir de 31 años hidrológicos (periodo 1981-2012).

Tabla 2

Indicadores estadísticos para medir el nivel de similitud entre las series de lluvia media climatológica de cuatro estaciones

Estación	RMSE	NS	R	R ²
Crucero	1.1	0.688	0.838	0.702
Desaguadero	0.307	0.981	0.992	0.984
Huancané	0.338	0.964	0.984	0.968
Pampahuta	0.382	0.972	0.986	0.973

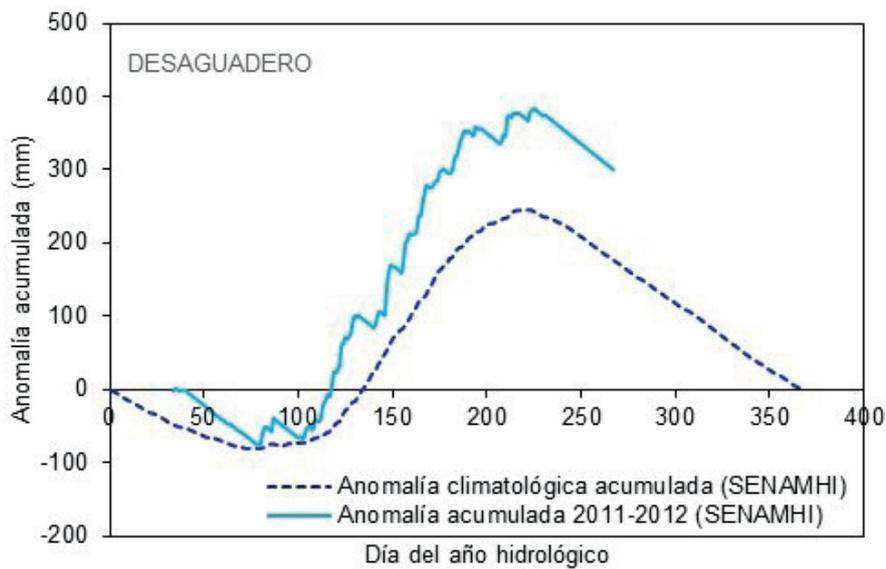
Tabla 3

Inicio, fin y lluvia de la temporada lluviosa de periodo extendido

Estación	Inicio	Fin	Lluvia (mm)
Crucero SENAMHI	61	216	627.2
Crucero PISCO	55	209	536.2
Desaguadero SENAMHI	79	222	623.6
Desaguadero PISCO	79	219	596.1
Huancané SENAMHI	76	217	524.1
Huancané PISCO	76	216	504.3
Pampahuta SENAMHI	66	223	706
Pampahuta PISCO	74	223	683.1

Figura 4

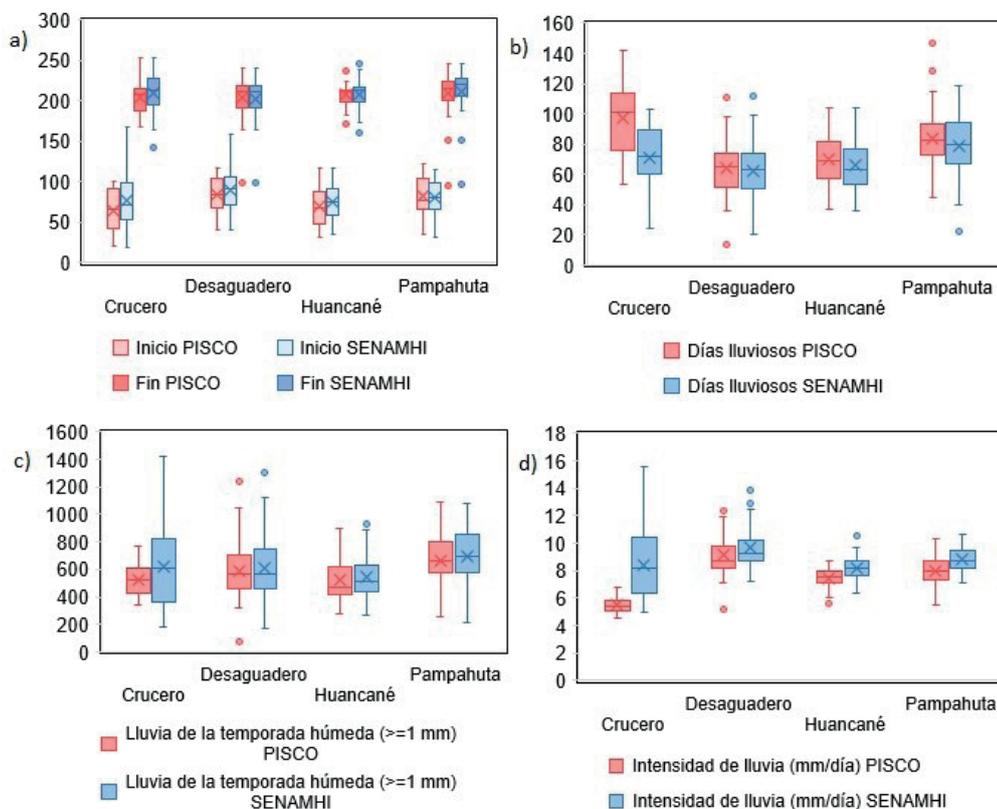
Curva de anomalía climatológica de periodo extendido y curva de anomalía de lluvia diaria del año hidrológico 2011-2012 de la estación Desaguadero



Nota: Para ese año hidrológico, el inicio de lluvia fue el día 80 y el fin el día 225, los días lluviosos que superaron 1 mm fueron en total 80, la lluvia de la temporada húmeda resultó 755.9 mm, y consecuentemente la intensidad de lluvia fue de 9.4 mm/día.

Figura 5

Diagramas de caja de las series de tiempo (periodo 1981-2012, 31 años hidrológicos) de inicio y fin de la temporada lluviosa



Nota: (a) inicio y fin de lluvia, (b) días lluviosos, (c) lluvia de la temporada húmeda, (d) intensidad de lluvia; en las estaciones Crucero, Desaguadero, Huancané y Pampahuta.

Tabla 4

Análisis de tendencias de las series temporales de inicio y fin de la temporada lluviosa, de cuatro estaciones. El periodo de análisis es 1981-2012 (31 años hidrológicos)

Estación		Inicio PISCO	Inicio SENAMHI	Fin PISCO	Fin SENAMHI
Crucero	Pendiente Sen	0.6	2	-1.1	-1.6
	S	83	160	-155	-235
	Valor p	0.163	0.0069	0.0088	0.0001
	MK-95%	NS	S	S	S
Desaguadero	Pendiente Sen	0.8	1.1	-0.1	-0.1
	S	94	107	-21	-21
	Valor p	0.1137	0.0714	0.7336	0.7337
	MK-95%	NS	NS	NS	NS
Huancané	Pendiente Sen	0.8	0.8	-0.4	-0.4
	S	74	85	-67	-70
	Valor p	0.2142	0.1531	0.261	0.2403
	MK-95%	NS	NS	NS	NS
Pampahuta	Pendiente Sen	0.1	0.5	0.6	0.5
	S	14	55	98	69
	Valor p	0.825	0.3583	0.0988	0.2471
	MK-95%	NS	NS	NS	NS

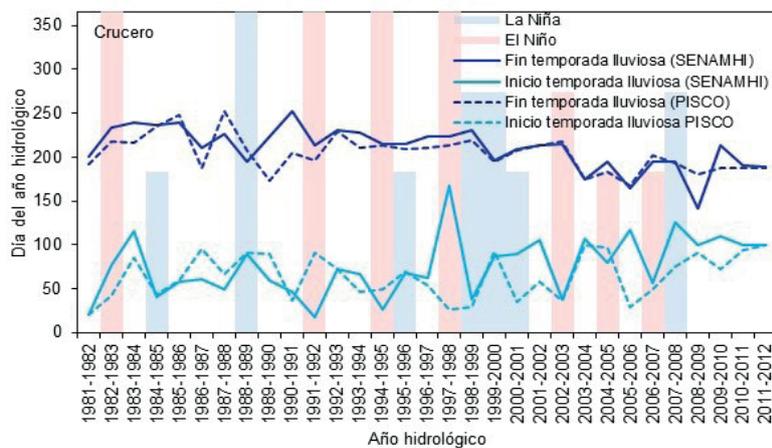
Tabla 5

Análisis de tendencias de las series temporales de las métricas días lluviosos, lluvia de la temporada húmeda e intensidad de lluvia. El periodo de análisis es 1981-2012 (31 años hidrológicos)

	Estación	Días Lluviosos PISCO	Días Lluviosos SENAMHI	Lluvia de la temporada húmeda (≥ 1 mm) PISCO	Lluvia de la temporada húmeda (≥ 1 mm) SENAMHI	Intensidad de lluvia (mm/día) PISCO	Intensidad de lluvia (mm/día) SENAMHI
Crucero	Pendiente Sen	-1.2	-1	-4	-23.5	0.01	-0.22
	S	-112	-130	-77	-247	63	-297
	Valor p	0.0591	0.0282	0.1965	0	0.292	0
	MK-95%	NS	S	NS	S	NS	S
Desaguadero	Pendiente Sen	-0.4	-0.4	-2.6	-3.7	0.02	0.01
	S	-41	-39	-39	-53	47	19
	Valor p	0.4963	0.5181	0.5184	0.3768	0.4343	0.7597
	MK-95%	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Huancané	Pendiente Sen	-0.3	-0.4	-3.3	-3.3	-0.02	-0.02
	S	-51	-50	-65	-63	-93	-59
	Valor p	0.3952	0.4046	0.2767	0.292	0.1179	0.3242
	MK-95%	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Pampahuta	Pendiente Sen	0	0.2	5.7	4.3	0.06	0.02
	S	-2	16	73	43	147	46
	Valor p	0.9864	0.7987	0.221	0.4753	0.0131	0.4443
	MK-95%	NS	NS	NS	NS	S	NS

Figura 6

Series temporales de inicio y fin de la temporada lluviosa de la estación Crucero, obtenidas a partir del análisis de datos observados del SENAMHI y datos grillados PISCO



3.5 Asociación con eventos ENOS

Para verificar el patrón sugerido, según el cual durante los eventos de El Niño en la vertiente del Titicaca se producen sequías hidrológicas con reducciones anuales de lluvia, se examinaron las series temporales del inicio y fin de la temporada lluviosa, junto con las demás métricas (Figura 6). Sin embargo, aunque se esperaba observar que en los años de El Niño de fuerte intensidad (por ejemplo, 1997-1998), las series de lluvia de la temporada húmeda mostrarán mínimos locales significativos (incluyendo el mínimo absoluto), no fue posible corroborar esta situación como un patrón característico.

IV. DISCUSIÓN

Existe un notable grado de similitud entre las series de lluvia del producto grillado y las series de valores observados de las estaciones meteorológicas estudiadas. Con esta validación, ha sido posible representar la distribución espacial del inicio y fin de la temporada lluviosa en el periodo extendido (1981-2012), así como la lluvia acumulada durante ese lapso. Respecto a la tendencia del inicio y fin de la temporada lluviosa en el área de influencia de la estación Crucero, se encontró evidencia estadísticamente significativa de una tendencia decreciente

en la cantidad de días lluviosos de la temporada húmeda, situación reflejada también en la serie PISCO, ya que la pendiente de Sen resultó similar en magnitud a la obtenida con los datos de SENAMHI. Sin embargo, al comparar el valor p con el nivel de significancia adoptado, esta tendencia no fue significativa.

Asimismo, existe una tendencia estadísticamente significativa en la lluvia de la temporada húmeda en la estación Crucero, la cual ha venido reduciéndose a una tasa de 23.5 mm por año, comportamiento que no fue reflejado por la serie PISCO. También se observó una tendencia decreciente en la intensidad de lluvia en dicha estación, que tampoco fue evidenciada de manera coherente por la serie PISCO. Por otro lado, se identificó otra tendencia en la serie PISCO para la estación Pampahuta en cuanto a la intensidad de la lluvia, pero tal evidencia no fue confirmada por los datos observados de SENAMHI.

En la cuenca, el inicio de la temporada lluviosa ocurre más temprano en la zona norte de la vertiente, posiblemente influenciada por la topografía y la cercanía a fuentes de humedad, mientras que este inicio es más tardío en el sur (límite con Tacna y Chile), en el oeste (zonas de alta montaña) y en el centro del lago Titicaca, donde las condiciones climáticas y la elevación juegan un papel crucial. Este patrón puede estar asociado con la interacción de sistemas de baja presión y la circulación atmosférica regional, que modulan la llegada de las lluvias. El patrón del fin de la temporada lluviosa no es tan claro y muestra mayor variabilidad espacial, ya que ocurre más temprano en una zona aislada al sur del lago Titicaca, lo que podría estar relacionado con cambios en las corrientes de aire y la reducción de la humedad disponible, coincidiendo con el estudio de Schwarb et al. (2011). Al norte de esta zona, el fin de la temporada lluviosa es más tardío, lo que sugiere una variabilidad espacial compleja influenciada por múltiples factores climáticos y geográficos.

Las zonas con mayor acumulación de lluvia durante la temporada lluviosa se encuentran en el centro del lago Titicaca (>800 mm) y al noroeste; estas áreas se benefician de la confluencia de corrientes de aire húmedo y de una topografía favorable para la condensación de la humedad atmosférica. Por otro lado, la menor cantidad de lluvia se presenta en el sur de la vertiente, en la zona colindante con Tacna, Chile y Bolivia, posiblemente debido a la sombra pluviométrica y la influencia de corrientes de aire seco provenientes de estas regiones, lo que muestra similitudes con el estudio de Zubieta et al. (2017).

El estudio también señala que no hay tendencias estadísticamente significativas en las métricas de lluvia, salvo en algunos casos, como el de la estación Crucero. En esta estación, se evidenció una tendencia creciente en el inicio de la temporada lluviosa y una tendencia decreciente en el fin, lo que indica un acortamiento del período lluvioso. Este comportamiento se refleja en los resultados del análisis de tendencias realizado sobre las series obtenidas con datos PISCO, lo que sugiere cambios locales en los patrones climáticos que podrían estar asociados a variaciones en la circulación atmosférica y el calentamiento global.

No se ha corroborado una asociación entre las series de inicio y fin de la temporada lluviosa y los eventos ENOS. Aunque se esperaba que los eventos El Niño de alta intensidad tuvieran un impacto claro en la reducción de la precipitación anual, los resultados no mostraron un patrón consistente. Esto indica que la relación entre los eventos ENOS y las precipitaciones en la vertiente del lago Titicaca es compleja y podría estar influenciada por otros factores climáticos no considerados en este estudio.

V. CONCLUSIONES

El análisis de las series temporales de lluvia acumulada diaria y las curvas de anomalía climatológica permitió identificar de manera precisa el inicio y fin de la temporada lluviosa en la vertiente del lago Titicaca durante el período 1981-2012. Las temporadas lluviosas no muestran tendencias significativas en su inicio y fin, excepto en la estación Crucero, donde se evidenció una tendencia creciente en el inicio y una tendencia decreciente en el fin de la temporada lluviosa.

La comparación de los datos grillados de PISCO con los datos observados de las estaciones de SENAMHI mostró una buena concordancia en la mayoría de las estaciones, lo que valida el uso de la base de datos PISCO para estudios climatológicos en esta región. Los indicadores de desempeño (RMSE, NS, R, R²) confirmaron la similitud entre las series de lluvia media climatológica de las estaciones Crucero, Desaguadero, Huancané y Pampahuta.

El análisis de tendencias de las métricas de días lluviosos, lluvia de la temporada húmeda e intensidad de lluvia reveló una disminución significativa en la cantidad de días lluviosos y en la lluvia de la temporada húmeda en la estación Crucero. Este comportamiento sugiere un acortamiento del período lluvioso en esta estación, lo que tiene implicancias importantes para la gestión de recursos hídricos en la región.

Aunque se esperaba encontrar una correlación clara entre los eventos El Niño de fuerte intensidad y una reducción significativa de la lluvia durante la temporada húmeda, el análisis no corroboró esta expectativa de manera consistente. Esto indica que la relación entre los eventos ENOS y las precipitaciones en la vertiente del lago Titicaca es compleja y requiere un análisis más detallado para ser comprendida en su totalidad.

VI. REFERENCIAS

- Allaire, J. J. (2012). Obtenido de R-Project: <https://www.r-project.org/>
- ANA. (2008). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú: resumen ejecutivo*
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1880>
- Burn, D. H., Abdul Aziz, O. I., & Pietroniro, A. (2004). A Comparison of Trends in Hydrological Variables for Two Watersheds in the Mackenzie River Basin. *Canadian Water*

Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques, 29(4), 283–298. <https://doi.org/10.4296/cwrj283>

- Chambi Echegaray, G., Herencia Félix, B. G., Cabrera Carranza, C. F., Malca Casavilca, N., Torres Guerra, J., Jesus Matos, H., Rendon Schneir, E., & Montero Chirito, J. C. (2023). La vulnerabilidad de las ciudades de Piura frente a las inundaciones producto del incremento de lluvias en episodios de El Niño. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 26(51), e25373. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25373>
- Diaconescu, E.P., Gachon, P., Scinocca, J. et al. Evaluation of daily precipitation statistics and monsoon onset/retreat over western Sahel in multiple data sets. *Clim Dyn* 45, 1325–1354 (2015). <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-014-2383-2>
- Dunning, C. M., E. C. L. Black, and R. P. Allan (2016), The onset and cessation of seasonal rainfall over Africa, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 121, 11,405–11,424, <https://doi.org/10.1002/2016JD025428>
- Fernández-Palomino, C.A., Lavado-Casimiro, W.S. Regional maximum rainfall analysis using L-moments at the Titicaca Lake drainage, Peru. *Theor Appl Climatol* 129, 1295–1307 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1845-3>
- Hughes, D. & Kapangaziwiri, Evison & Sawunyama, Tendai. (2010). Hydrological Model Uncertainty Assessment in Southern Africa. *Journal of Hydrology*, 387, 3-4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.010>
- 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>
- León Ruiz, C., Garay Vásquez, J. A., Garay Vera, H. E., Goicochea Chávez, O., Mendoza Rosales, T., & Torres Guerra, J. A. (2022). Geomorfología como herramienta de zonificación: Caso Chalaypampa, Angares – Huancavelica. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 25(50), 51-57. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24234>
- Liebmann, B., Bladé, I., Kiladis, G. N., Carvalho, L. M. V., B. Senay, G., Allured, D., Leroux, S., & Funk, C. (2012). Seasonality of African Precipitation from 1996 to 2009. *Journal of Climate*, 25(12), 4304-4322. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/25/12/jcli-d-11-00157.1.xml>
- Quispe Roque, D. M., & Ayamamani Collanqui, P. (2022). Representaciones sociales de la relación hombre-naturaleza: mirada del poblador rural del Titicaca. *Mundo Agrario*, 22(51), e178. <https://doi.org/10.24215/15155994e178>
- Sigalla, O.Z., Valimba, P., Selemani, J.R. et al. Analysis of spatial and temporal trend of hydro-climatic parameters in the Kilombero River Catchment, Tanzania. *Sci Rep* 13, 7864 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35105-8>
- Schwarb, Manfred & Na, D & Konzelmann, Th & Rohrer, Mario & Salzmann, Nadine & Lopez, B & Silvestre, Elizabeth. (2011). A data portal for regional climatic trend analysis in a Peruvian High Andes region. *Adv. Sci. Res.* 6. 219-226. <http://dx.doi.org/10.5194/asr-6-219-2011>
- Velásquez Intriago, F., Cabrera Carranza, C., Alcántara Boza, F., & Lucas Vidal, L. (2019). Pronóstico de precipitación sobre la cuenca aportante al embalse La Esperanza aplicando modelo climático HadCM3. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 22(43), 29-36. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/16683>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Amsterdam: Third Edition.
- Zakwan, M., Ahmad, Z. Trend analysis of hydrological parameters of Ganga River. *Arab J Geosci* 14, 163 (2021). <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-021-06453-4>
- Zubieta, R., Saavedra, M., Silva, Y. et al. Spatial analysis and temporal trends of daily precipitation concentration in the Mantaro River basin: central Andes of Peru. *Stoch Environ Res Risk Assess* 31, 1305–1318 (2017). <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-016-1235-5>

Contribución de autoría

Conceptualización: Niell Wilson Rivas Meza; Curación de datos: Niell Wilson Rivas Meza, Erick Vladimir Lobo Reyes, Issaak Rafael Vasquéz Romero; Análisis formal: Niell Wilson Rivas Meza, Erick Vladimir Lobo Reyes; Investigación: Niell Wilson Rivas Meza, Joselito Jersin Robles Silvestre; Metodología: Niell Wilson Rivas Meza, Joselito Jersin Robles Silvestre; Administración del proyecto: Niell Wilson Rivas Meza; Recursos: Issaak Rafael Vasquéz Romero; Software: Niell Wilson Rivas Meza, Joselito Jersin Robles Silvestre; Supervisión: Issaak Rafael Vasquéz Romero, Joselito Jersin Robles Silvestre, Néstor Montalvo Arquiño; Validación: Issaak Rafael Vasquéz Romero, Joselito Jersin Robles Silvestre; Visualización: Joselito Jersin Robles Silvestre; Redacción - borrador original: Niell Wilson Rivas Meza, Erick Vladimir Lobo Reyes, Issaak Rafael Vasquéz Romero, Joselito Jersin Robles Silvestre; Redacción - revisión y edición: Niell Wilson Rivas Meza, Erick Vladimir Lobo Reyes, Issaak Rafael Vasquéz Romero, Joselito Jersin Robles Silvestre, Néstor Montalvo Arquiño

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses