

Dinámica de la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca y en la frecuencia e intensidad de los episodios de sequía en la región de Puno 2023

Evapotranspiration dynamics in the Lake Titicaca area and the frequency and intensity of drought episodes in the Puno region 2023

Carlos Carcausto Quispe^{1*} 

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Resumen

Este estudio analiza la dinámica de la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca y su relación con la frecuencia e intensidad de los episodios de sequía en la Región de Puno. La metodología empleada se clasifica como aplicada y correlacional, con un enfoque descriptivo para examinar la posible influencia de factores atmosféricos, como temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, en la evapotranspiración. Los hallazgos destacan una fuerte correlación (coeficiente de 0,9626) entre la temperatura atmosférica media mensual y la evapotranspiración, revelando que aproximadamente el 96,26 % de la variabilidad en la evapotranspiración puede explicarse por las variaciones en la temperatura atmosférica. Se observa una variabilidad estacional, con marzo registrando la temperatura más alta y una precipitación significativa, mientras que junio exhibe condiciones más frescas con una disminución en la precipitación. Se introduce el Índice de Sequía de Reconstrucción de Precipitación Estándar (SPI), que proporciona una representación detallada de las fluctuaciones en la disponibilidad de precipitación a lo largo del tiempo. Este índice abarca desde condiciones extremadamente secas hasta húmedas, permitiendo una comprensión profunda de los patrones de sequía en la región. En relación con la humedad relativa del aire, se encuentra una correlación extremadamente baja de 0,0002 con la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca, indicando una relación prácticamente inexistente. Menos del 0,02 % de la variabilidad en la evapotranspiración puede atribuirse a la humedad relativa del aire, sugiriendo que este factor tiene una influencia mínima en los patrones de evapotranspiración en la Región de Puno.

Palabras clave: cambio climático, evapotranspiración, factores atmosféricos, Lago Titicaca, sequía.

Abstract

This study analyzes the dynamics of evapotranspiration in the Lake Titicaca area and its relationship with the frequency and intensity of drought episodes in the Puno Region. The methodology employed is classified as applied and correlational, with a descriptive approach to examine the possible influence of atmospheric factors such as temperature, solar radiation, relative humidity, and wind speed on evapotranspiration. The findings highlight a strong correlation (coefficient of 0.9626) between the monthly average atmospheric temperature and evapotranspiration, revealing that approximately 96.26 % of the variability in evapotranspiration can be explained by variations in atmospheric temperature. Seasonal variability is observed, with March recording the highest temperature and significant precipitation, while June exhibits cooler conditions with a decrease in precipitation. The Standardized Precipitation Index (SPI) is introduced, providing a detailed representation of fluctuations in precipitation availability over time. This index spans from extremely dry to wet conditions, allowing for a deep understanding of drought patterns in the region. Regarding relative humidity, an extremely low correlation of 0.0002 with evapotranspiration in the Lake Titicaca area is found, indicating a practically nonexistent relationship. Less than 0.02 % of the variability in evapotranspiration can be attributed to relative humidity, suggesting that this factor has minimal influence on evapotranspiration patterns in the Puno Region.

Keywords: climate change, evapotranspiration, atmospheric factors, Lake Titicaca, drought.

Recibido: 04 en. 2024

Aceptado: 25 mzo. 2024

Publicado: 31 mzo. 2024

*Autor para correspondencia: ccarcausto@unap.edu.pe

Cómo citar:

Carcausto Quispe, C. (2024). Dinámica de la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca y en la frecuencia e intensidad de los episodios de sequía en la región de Puno 2023. *Revista de Investigaciones*, 13(1), 13-25. <https://doi.org/10.26788/ri.v13i1.5753>.

Introducción

La investigación aborda la dinámica de la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca y su relación con la frecuencia e intensidad de los episodios de sequía en la Región de Puno. Este problema de investigación reviste una gran importancia, al contribuir al entendimiento de los impactos del cambio climático en una región vital. Enmarcado dentro del área de investigación ambiental, la línea de hidrología y el tema de cambio climático, este estudio se alinea con los objetivos de los programas de la Escuela de Posgrado. El propósito de la investigación fue analizar la influencia de factores atmosféricos, como la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, en la evapotranspiración y su conexión con la sequía en la mencionada región. Se emplearán métodos de recopilación de datos de estaciones meteorológicas, índices de sequía reconocidos y técnicas de modelado climático. En respuesta al desafío global del cambio climático, diversos estudios han abordado la evapotranspiración y su relación con la disponibilidad de recursos hídricos y la agricultura. Christian et al. (2019) desarrollaron una metodología para identificar sequías repentinas, destacando un punto crítico en las Grandes Llanuras y regiones adyacentes. Huerta (2012) evaluó la vulnerabilidad de los recursos hídricos en Perú frente al cambio climático, utilizando un enfoque probabilístico de Budyko. (Mejía Muñoz, 2023) calculó la evapotranspiración en Cuautitlán Izcalli, México, relevante para la agricultura. Otros estudios, como el de (Lasprilla & Torres Prieto, 2022), investigaron el impacto de las casas de malla en la evapotranspiración, proporcionando información valiosa para la gestión de recursos hídricos. Además, Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz (2021) analizaron los efectos del cambio climático en la evapotranspiración potencial y los periodos de crecimiento en México, mientras que Macías-Carranza & Cabello Pasini (2021) caracterizó las regiones vinícolas de Baja California en relación con variables climáticas. Revueltas et al. (2020) identificaron cambios en el clima local en microcuencas del norte de Colombia, resaltando la importancia de la vegetación en la regulación hídrica. Estos estudios proporcionan una comprensión integral de la evapotranspiración y

su papel crucial en la gestión de recursos hídricos y agricultura frente al cambio climático.

El estudio de Degano et al. (2021) se centra en la calibración del producto de evapotranspiración potencial 'MOD16A2' en la Región Pampeana Argentina, corrigiendo la sobreestimación sistemática mediante regresión lineal y datos de veinticuatro estaciones in situ, lo que resulta en una notable mejora en la precisión del producto corregido. Mientras tanto, Abbasi et al. (2021) identificaron tres largos periodos de sequía en la cuenca del lago Urmia a lo largo de 53 años, resaltando la importancia de predecir y monitorear eventos extremos como la sequía. Liu et al. (2021) investigaron los impactos del cambio climático en la evapotranspiración de referencia del cultivo en la cuenca del lago Poyang, encontrando una disminución promedio anual de la evapotranspiración, lo que subraya la necesidad de considerar el cambio climático en la gestión de recursos hídricos. Por otro lado, Qian Ge (2023) destacó la eficacia de los métodos de control del nivel de agua en embalses durante sequías graduales y por etapas, aplicados en el lago Dianchi en Yunnan. Torres-batlí & Pillcoz (2020) observó un aumento en las pérdidas de evapotranspiración en áreas cultivadas en la cuenca del lago Poopó, señalando el impacto significativo de actividades humanas y cambios climáticos. Finalmente, Vega (2018) analizó la variabilidad de las sequías en el Perú y su relación con el fenómeno del ENSO, evidenciando tendencias diversas en diferentes regiones del país, lo que destaca la necesidad de comprender y gestionar adecuadamente estos eventos climáticos extremos. En su estudio, Martínez (2018) se adentró en la dinámica de la evapotranspiración en el Valle del Cauca durante el periodo 2000-2015, utilizando el producto MOD16 y herramientas como el Índice de Evapotranspiración Estandarizado (SETI) y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para evaluar el riesgo de sequía. Sus hallazgos subrayaron la utilidad del producto MOD16 para comprender la evapotranspiración real y potencial en la región, aunque señalaron la necesidad de ajustes en zonas específicas. Además, confirmaron la efectividad de la combinación de SETI y SPI para identificar la amenaza de sequía meteorológica en relación con la disponibilidad de agua. Por otro

lado, Arnold et al. (2021) exploraron la relación entre indicadores isotópicos y la aridez en el contexto del colapso de Tiwanaku en los Andes del centro-sur, evidenciando un prolongado período de sequía hasta el siglo XIII que coincidió con dicho colapso. Sus resultados destacan la importancia de los patrones de circulación oceánica y atmosférica en el cambio climático andino, resaltando el papel clave de la sequía en eventos históricos como el mencionado.

Para la evaluación de la evapotranspiración, se emplean diversos métodos, entre los cuales se destacan los enfoques de Blaney-Criddle, Turc, Penman y Thornthwaite. Estos métodos se fundamentan en el uso de fórmulas que establecen la relación entre la evapotranspiración potencial (ETP) y factores climáticos, que varían en su complejidad y abarcan la temperatura, precipitación, radiación solar incidente, velocidad del viento, entre otros. En virtud de que estos métodos son generalmente reconocidos y conocidos, no se considera necesario proporcionar una explicación detallada de cada uno. No obstante, se presentará una descripción más detallada del método de Thornthwaite, dado que es comúnmente empleado en hidrogeología. Este método calcula un índice de calor mensual (i) a partir de las temperaturas, lo cual se utilizará como referencia principal para el análisis (Montaner & Sánchez, 1988).

$$i = (1/5)^{1.514}$$

Donde:

i = Es el índice de calor mensual.

t = Es la temperatura media mensual.

Obteniendo el índice de calor anual (I) como la suma de los 12 valores del índice de calor mensual para meses teóricos de 30 días y 12 horas diarias de sol.

$$I = \sum i$$

Donde:

i = Índice de calor anual.

A partir de estos datos se propone la fórmula:

$$ETP = 1,6(10t/I)^a$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial mensual no corregida en mm/día.

a = Función compleja de I igual a:

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1,972 \times 10^{-5} I + 0,4923$$

t = Temperatura media mensual en °C

corrección para n° días del mes y n° de horas de sol.

$$ETP = ETP_{sin\ corr} \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{d}{30}\right)$$

ETP = Evapotranspiración potencial corregida.

N = Número máximo de horas de sol, depende del mes y la latitud (tabla 2), para la cual se necesita hallar “ N ” y “ d ”:

$$Si\ f = \frac{N}{12}$$

Donde:

f = Factor de reducción.

d = Número de días del mes (se coloca el número de días correspondiente a cada mes hasta completar los 12).

La definición basada en la desviación de las condiciones normales implica que las sequías pueden ocurrir en cualquier región hidroclimatológica y en cualquier momento del año con igual probabilidad. Para fines prácticos, la sequía puede clasificarse en categorías tales como meteorológica, hidrológica, agrícola y subterránea, según propuesto por (Senamhi, 2017).

La sequía meteorológica surge mayormente debido a un déficit prolongado de precipitaciones que afecta extensas áreas y se expresa como una falta relativa en comparación con las condiciones climáticas normales. Este déficit de agua repercute en el ciclo hidrológico y conduce a la aparición de diversos tipos de sequías. Por otro lado, la sequía hidrológica se manifiesta cuando el déficit de precipitación se prolonga, resultando en una

insuficiencia de esorrentía, aguas subterráneas o niveles de reservorios, persistiendo incluso después de que cese la sequía meteorológica. Asimismo, la sequía agrícola surge por la falta de agua en el suelo combinada con una elevada evaporación, lo que genera una humedad insuficiente para el crecimiento de los cultivos. Dado que las necesidades hídricas varían según el cultivo, no es factible establecer umbrales de sequía agrícola universales. Por último, la sequía subterránea, como una categoría independiente, se produce cuando los sistemas de aguas subterráneas sufren una reducción en las recargas, seguida por una disminución en los niveles y las descargas de aguas subterráneas debido a una recarga insuficiente en los acuíferos (Senamhi, 2017).

La sequía se refiere a un período prolongado de déficit de precipitación que resulta en una escasez de agua en comparación con la demanda normal de una región. La sequía puede tener graves consecuencias para la agricultura, la disponibilidad de agua potable, la biodiversidad y la economía de una región. La evaluación de la sequía implica el uso de índices de sequía, como el Índice de Palmer o el Índice de Sequía de Reconstrucción de Precipitación Estándar (SPI), que cuantifican la gravedad y la duración de los déficits de precipitación, también es la prolongada falta de agua en una determinada zona (Garay, 2022).

Episodios de Sequía y Índice de Severidad de Sequía Estandarizado (SPEI)

El análisis de episodios de sequía implica la evaluación de condiciones climáticas extremas a lo largo del tiempo. El Índice de Severidad de Sequía Estandarizado (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) es una herramienta que considera tanto la precipitación como la temperatura para cuantificar la severidad de las sequías. Su ecuación es:

$$SPEI = \frac{X_i - \mu}{\sigma}$$

Donde:

X_i = Valor climático en el periodo i .

μ = Media.

σ = Desviación estándar.

El SPEI proporciona una medida robusta de la intensidad y duración de los episodios de sequía, lo que facilitará la evaluación de la vulnerabilidad de la Región de Puno a este fenómeno climático.

Interpretación:

SPI Positivo:

SPI = 0,5 a 1,0: Condiciones de humedad moderada.

SPI > 1,0: Condiciones más húmedas de lo normal.

SPI Negativo:

SPI = -0,5 a -1,0: Condiciones de sequía moderada.

SPI < -1,0: Condiciones más secas de lo normal.

Tabla 1

Valores e interpretación del SPI

Valor SPI	Interpretación
≥2,0	Extremadamente mojado.
1,5 a 1,99	Muy mojado.
1,0 a 1,49	Moderadamente mojado.
0,99 a -0,99	Casi normal.
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco.
-1,5 a -1,99	Muy seco.
≤-2,0	Extremadamente seco.

Fuente: Tomado de Garay (2022).

Métodos

Ámbito o Lugar de Estudio

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Ciencias Físicas de la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura de la Universidad Nacional del Altiplano en Puno, Perú, ubicado a una altitud de 3832 metros sobre el nivel del mar. Las coordenadas geográficas son -15.824245° de latitud y -70.013445° de longitud. La elección de este lugar se fundamenta en la necesidad de analizar la posible influencia de factores atmosféricos, como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, en la frecuencia e intensidad de los episodios de sequía en la Región de Puno, que ha experimentado sequías en los últimos años debido a su clima frígido.

Periodo de estudio o frecuencia de muestra

El tamaño de la muestra para estos análisis dependió de la disponibilidad de datos y de la metodología utilizada. Para el análisis de evapotranspiración, se utilizaron datos históricos y actuales de estaciones meteorológicas, por lo que el tamaño de la muestra estuvo influenciado por la cantidad y calidad de estos datos. Para el análisis de sequía, se aplicaron índices a los datos de precipitación, y el tamaño de la muestra dependió de la cantidad de años de datos disponibles y de la resolución temporal deseada.

Método de investigación

El presente estudio de investigación se clasifica como aplicado y adopta un enfoque descriptivo correlacional (Tamayo Tamayo, 2003).

La investigación, de naturaleza aplicada y enfoque descriptivo correlacional, busca examinar rigurosamente las interrelaciones entre las variables atmosféricas y la dinámica de la evapotranspiración en la zona del Lago Titicaca. Se emplea una metodología cuantitativa con la plataforma SENAMHI como herramienta fundamental para acceder a datos climáticos y atmosféricos a nivel nacional.

Variables Analizadas

El enfoque cuasi experimental no manipula deliberadamente variables independientes, sino que se basa en la medición de datos provenientes de fuentes terrestres, como la plataforma Giovanni de la NASA, reconociendo la complejidad y variabilidad de las condiciones del mundo real, dichos datos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2
Temperatura media mensual de Puno periodo 2023 a 3819 msnm

Mes	Temperatura media mensual °C	ETP (cm/mes)
Enero	9,4	4,66
Febrero	10,7	4,93
Marzo	10,8	5,71
Abril	8	4,28
Mayo	6,4	3,63
Junio	5,1	2,85
Julio	6,9	3,95
Agosto	7,3	4,07
Septiembre	8,9	4,64
Octubre	12	6,23
Noviembre	12,1	5,86
Diciembre	12,9	6,34

Nota: Latitud 15°49'13.4", Longitud 69°58'26.9".

El método Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial (ETP) se basa en el cálculo de un índice de calor mensual (i) a partir de las temperaturas medias mensuales (Montaner

y Sánchez 1988). Asimismo, los resultados obtenidos de las operaciones realizadas, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados obtenidos utilizando valores medios mensuales y diarios

Temperaturas medias del año 2023	Temperaturas medias mensual	Índice de calor mensual	ETP sin corr	(N)	$\int = \frac{N}{2}$	#días del mes	n° de días del mes (d/30)	ETP (cm/mes)
Enero	9,4	2,60	4,82	11,25	0,94	31	1,03	4,66
Febrero	10,7	3,16	5,48	11,58	0,97	28	0,93	4,93
Marzo	10,8	3,21	5,53	12,00	1,00	31	1,03	5,71
Abril	8	2,04	4,10	12,52	1,04	30	1,00	4,28
Mayo	6,4	1,45	3,28	12,85	1,07	31	1,03	3,63
Junio	5,1	1,03	2,62	13,05	1,09	30	1,00	2,85
Julio	6,9	1,63	3,54	12,95	1,08	31	1,03	3,95
Agosto	7,3	1,77	3,74	12,63	1,05	31	1,03	4,07
Setiembre	8,9	2,39	4,56	12,22	1,02	30	1,00	4,64
Octubre	12	3,76	6,14	11,78	0,98	31	1,03	6,23
Noviembre	12,1	3,81	6,19	11,37	0,95	30	1,00	5,86
Diciembre	12,9	4,20	6,60	11,15	0,93	31	1,03	6,34
(I) Índice de calor anual $\alpha = 1,00$						ETP anual 57,165		

El objetivo planteado de evaluar el impacto de la temperatura media mensual en relación con la precipitación media mensual se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Temperatura media mensual y precipitación año 2023 en Puno a 3819 msnm

Mes	Temperatura media mensual °c	Precipitación mm/día
Enero	9,4	4,20
Febrero	10,7	5,09
Marzo	10,8	4,42
Abril	8	0,31
Mayo	6,4	0,77
Junio	5,1	0,00
Julio	6,9	0,21
Agosto	7,3	0,08
Septiembre	8,9	0,02
Octubre	12	1,07
Noviembre	12,1	2,37
Diciembre	12,9	1,94

Nota: Latitud 15°49'13.4", Longitud 69°58'26.9".

Así también para calcular la correlación de la velocidad del viento con la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca, se extrajeron datos

de la plataforma SENAMHI para el año 2023 y se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5

Velocidad del viento media mensual y evapotranspiración media mensual de año 2023 en Puno a 3819 msnm

Mes	Velocidad del viento m/s	Evapotranspiración (cm/mes)
Enero	3,33	4,66
Febrero	2,7063	4,93
Marzo	2,858	5,71
Abril	2,33	4,28
Mayo	2,47	3,63
Junio	2,66	2,85
Julio	2,69	3,95
Agosto	2,75	4,07
Septiembre	3,03	4,64
Octubre	3,33	6,23
Noviembre	3,337	5,86
Diciembre	3,091	6,34

Nota: Latitud 15°49'13.4", Longitud 69°58'26.9".

El Índice de Sequía de Reconstrucción de Precipitación Estándar (SPI) se calcula mediante un proceso detallado que implica la normalización de datos de precipitación. Aquí se presenta una descripción paso a paso del cálculo:

Se obtienen datos mensuales de la precipitación tomados de la plataforma SENAMHI, para el año 2023, luego se calcula la media (μ) y la desviación estándar (σ) de la serie temporal de precipitación. Estos valores se utilizan para la normalización, seguidamente se debe restar la media (μ) de cada valor mensual de precipitación para obtener las desviaciones con respecto a la media y luego calculamos la normalización por la desviación estándar esto se obtiene dividiendo cada desviación mensual por la desviación estándar (σ).

Se calcula el SPI para el Periodo Específico:

Se utiliza la fórmula del SPI: , donde X_i es la precipitación en el periodo i , μ es la media y σ es la desviación estándar.

Se repite el proceso para diferentes periodos:

Se calcula el SPI para diversos periodos, como 1, 3, 6, 12 meses. (Iwata et al., 2012).

Tabla 6

Velocidad del viento media mensual del año 2023

Mes	Media	Desviación estándar	Anomalías de precipitación mensual
Enero	4,20	8,62	-0,01
Febrero	5,09	8,42	0,07
Marzo	4,42	5,97	0,01
Abril	0,31	0,96	0,02
Mayo	0,77	2,95	-0,03
Junio	0,00	0,00	0,00
Julio	0,21	1,17	-0,02
Agosto	0,08	0,37	0,03
Septiembre	0,02	0,11	-0,02
Octubre	1,07	3,50	0,01
Noviembre	2,37	3,97	0,00
Diciembre	1,94	3,13	0,00
Acumulación de anomalías			0,06

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 6, se utilizó una tabla de la magnitud del SPI, como se presenta en la Tabla 7, para determinar la intensidad húmeda o seca sobre el área de estudio del lago Titicaca-Puno.

Tabla 7

Interpretación por colores

Valor SPI	Interpretación	Color
2 a más	Extremadamente mojado	
1,5 a 1,99	Muy mojado	
1,0 a 1,49	Moderadamente mojado	
0,99 a -0,99	Casi normal	
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco	
-1,5 a -1,99	Muy seco	
menor a -2,0	Extremadamente seco	

Dentro del tercer objetivo específico, enfocado en evaluar la correlación negativa entre la humedad relativa del aire y la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca, se llevó a cabo un análisis mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente, que varía entre -1 y +1, cuantifica la relación lineal entre dos variables. En el caso de una correlación negativa, donde una variable tiende a aumentar mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo. La fórmula utilizada se basa en la covarianza de ambas variables dividida por el producto de sus desviaciones estándar. Este enfoque cuantitativo nos proporciona una medición objetiva de la relación inversa entre la humedad relativa del aire y la evapotranspiración en la zona del Lago Titicaca. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 8.

Tabla 8

Resultados obtenidos utilizando valores medios mensuales de la humedad relativa y Evapotranspiración en Puno a 3819 msnm en el Periodo 2023

Mes	Humedad relativa (%)	Evapotranspiración (cm/mes)
Enero	9,4	78,8
Febrero	10,7	82,6
Marzo	10,8	81,2
Abril	8	71,5
Mayo	6,4	78,4
Junio	5,1	77,6
Julio	6,9	79,7
Agosto	7,3	77,5
Septiembre	8,9	76,8
Octubre	12	75,9
Noviembre	12,1	73,9
Diciembre	12,9	78,3

Este enfoque metodológico permitió obtener una comprensión más profunda de los factores que inciden en la evapotranspiración en la región, destacando la relación inversa con la humedad relativa del aire. La recolección de datos se llevó a cabo de manera integral, registrando temperaturas, precipitación, velocidad del viento y humedad relativa cada hora durante todo el año 2023, y seleccionando las medias mensuales para su evaluación y análisis. La plataforma SENAMHI fue empleada exclusivamente para la obtención y análisis de datos atmosféricos, reconocida por su capacidad detallada y global en la recopilación de información climática. La metodología se centró en la extracción y manipulación de datos de SENAMHI para evaluar las relaciones entre las variables atmosféricas y su impacto en la evapotranspiración, así como en la frecuencia e intensidad de episodios de sequía en la Región de Puno.

Prueba estadística

Para el análisis de correlación se usó la prueba estadística más utilizada para evaluar las relaciones entre variables que es el coeficiente de correlación de Pearson para determinar si existe una relación lineal entre dos variables (Hernandez Sampieri et al., 2014). En la aplicación de pruebas estadísticas inferenciales, se utilizaron datos recopilados de SENAMHI, empleando variables clave como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Se calculó la evapotranspiración mediante el método Thornthwaite y se aplicaron índices de sequía, como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). Además, se utilizó el programa DView para analizar relaciones y patrones significativos en la región del Lago Titicaca, siendo este un referente crucial en la comparación de datos meteorológicos. Este enfoque integral permitió obtener insights valiosos sobre la dinámica atmosférica pasada en la Región de Puno y sus implicaciones en la evapotranspiración y sequía.

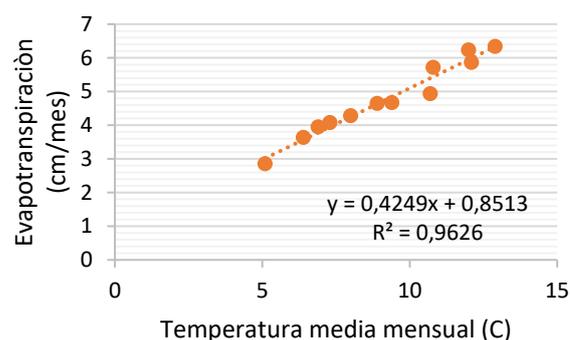
Resultados y Discusión

En el análisis histórico de la temperatura atmosférica y la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca, se utilizaron datos de SENAMHI para evaluar correlaciones. Este examen reveló insights sobre cómo las variaciones pasadas de

la temperatura afectaron la evapotranspiración en la región, profundizando la comprensión de los patrones climáticos y sus impactos en la dinámica hidrológica de Puno. La Figura 1 muestra una alta correlación ($R^2 = 0,9626$) entre la temperatura atmosférica media mensual y la evapotranspiración, indicando que el 96,26 % de la variabilidad en la evapotranspiración puede explicarse por las variaciones en la temperatura. Este hallazgo subraya la relación significativa entre la temperatura y la evapotranspiración, destacando su importancia en los procesos hidrológicos y la disponibilidad de agua. Estos resultados son esenciales para comprender el impacto del clima en la evapotranspiración y su influencia en la disponibilidad de agua, con implicaciones importantes para la gestión de recursos hídricos.

Figura 1

Relacion de la temperatura atmosferica y la evapotranspiracion, 2023



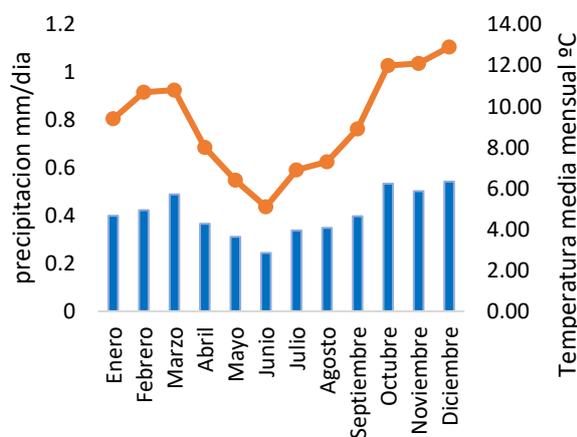
Temperatura media mensual y evapotranspiración correspondiente del año 2023, (Tarqui, 2014) enfatiza la eficacia de los modelos Penman-Monteith y Thornthwaite para estimar la evapotranspiración potencial (ETp) en zonas tropicales, mientras que Chacpi Cerna (2019) destaca el buen ajuste de los modelos empíricos de Hargreaves y Turc en Mataquita-Jangas, resaltando su utilidad en agricultura. Por otro lado, Ortiz & Chile A. (2020) muestran que métodos basados en temperatura y radiación solar subestiman la ETo en el Valle de Tumbaco, Pichincha, Ecuador, en julio y agosto, evidenciando la importancia de considerar la velocidad del viento en los modelos para mejorar la precisión de las estimaciones.

La Figura 2 presenta un análisis detallado de las condiciones climáticas mensuales para 2023,

resaltando que marzo tuvo la temperatura media más alta (10,8°C) y la precipitación media más alta (5,71 mm/día), mientras que junio mostró las condiciones más frescas con 5,1°C y 2,85 mm/día, respectivamente. En diciembre, la temperatura media fue de 12,9°C con una precipitación media de 6,34 mm/día. Estos datos son cruciales para la planificación agrícola y la gestión del agua.

Figura 2

Precipitación media mensual y temperatura media mensual del año 2023



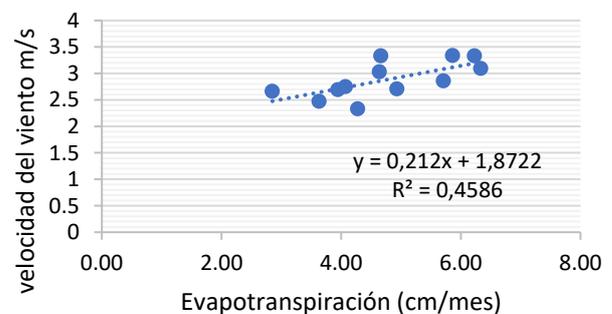
La comparación entre los resultados del análisis climático mensual para 2023 y el estudio de Becerra & Pardo (2022), sobre la evaporación en la microcuenca del río Coñaque, Ecuador, resalta la variabilidad estacional y su influencia en la disponibilidad de agua. Mientras marzo exhibe altas temperaturas y precipitación significativa, junio muestra condiciones más frescas y una reducción en la lluvia. La investigación de Becerra & Pardo (2022) se centra en la microcuenca, considerando la variabilidad en la precipitación y su impacto en la evaporación. Ambos estudios subrayan la importancia de comprender las variaciones climáticas para la gestión del agua y la agricultura, destacando la relevancia de combinar enfoques para una comprensión integral de los procesos climáticos y sus efectos en una región específica.

En la Figura 3, se destaca una relación significativa entre la velocidad media mensual del viento y la evapotranspiración, con un coeficiente de correlación de 0,4586, indicando que alrededor del 45,86 % de la variabilidad en la evapotranspiración puede ser atribuida a la variabilidad en la velocidad

del viento. Se observan patrones estacionales en esta relación, sugiriendo que la influencia del viento en la evapotranspiración varía a lo largo del año. Este análisis proporciona información crucial para comprender la regulación de los procesos hidrológicos en la región del Lago Titicaca, siendo de relevancia para la gestión del agua y la agricultura. La identificación de tendencias en la correlación abre oportunidades para investigaciones adicionales sobre la interacción entre la velocidad del viento y la evapotranspiración, ampliando la comprensión de los fenómenos climáticos locales.

Figura 3

Velocidad media mensual en relación de la evapotranspiración media mensual

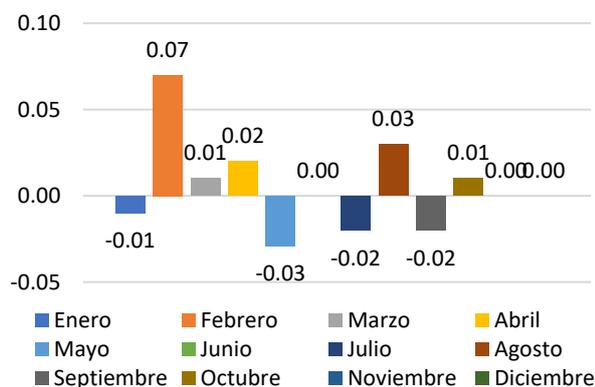


Nuestros resultados revelan una conexión moderada entre la velocidad media mensual del viento y la evapotranspiración en la región del Lago Titicaca, destacando su papel en los procesos hidrológicos. Mientras tanto, (Ortiz & Chile A., 2020) enfatizan la importancia de considerar la velocidad del viento en la estimación precisa de la evapotranspiración en el Valle de Tumbaco, Ecuador. Ambos estudios resaltan la necesidad de incorporar la velocidad del viento en los modelos hidrológicos para una gestión más precisa del agua y la agricultura, proporcionando una perspectiva integral sobre su influencia en diferentes contextos climáticos y geográficos. Esta discusión subraya la complementariedad entre ambos estudios y su relevancia para mejorar la precisión de las estimaciones de evapotranspiración y la gestión hídrica.

La Figura 4 muestra el Índice de Sequía de Reconstrucción de Precipitación Estándar (SPI), que abarca valores de 0,99 a -0,99, crucial para evaluar condiciones de sequía y humedad. Los

valores positivos indican exceso de precipitación, mientras que los negativos señalan déficits, ofreciendo una medida de la intensidad de las condiciones climáticas en diferentes momentos. El SPI proporciona una representación detallada de las fluctuaciones en la disponibilidad de precipitación, esencial para comprender los patrones de sequía en la región.

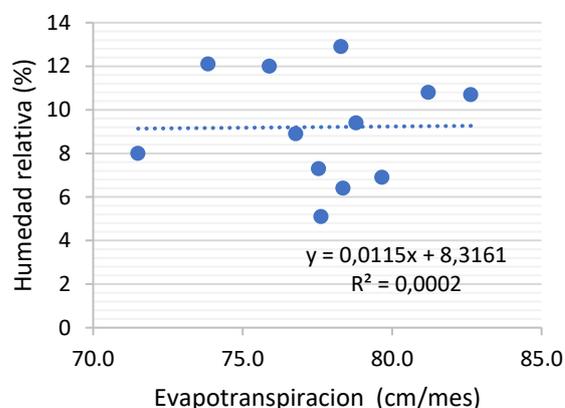
Figura 4
 Índice de Sequía de Reconstrucción de Precipitación Estándar (SPI)



Los resultados de diferentes estudios ofrecen diversos enfoques para evaluar y monitorear la sequía, utilizando índices y métodos variados para analizar la variabilidad espacial y temporal de las condiciones en distintas regiones. Se introduce el Índice de Sequía de Reconstrucción de Precipitación Estándar (SPI), que abarca desde condiciones extremadamente secas hasta húmedas, proporcionando una comprensión profunda de los patrones de sequía. Mientras Abbasi et al. (2021) se centra en la predicción de sequías utilizando el modelo ARIMA y el SPEI para analizar tendencias a lo largo de 53 años, Martínez (2018) aborda la variación espacio-temporal de la evapotranspiración real en el Valle del Cauca mediante el SETI y el SPI. Aunque comparten el uso de índices como SPI o SPEI para evaluar la sequía, sus objetivos y enfoques difieren ligeramente, con Abbasi et al. (2021) y Martínez (2018) centrándose en períodos específicos y la relación entre evapotranspiración y sequía en ubicaciones particulares. Estos enfoques combinados contribuyen a una comprensión más completa de las condiciones de sequía y sus variaciones en el tiempo y el espacio.

La Figura 5 revela una correlación extremadamente débil (0,0002) entre la humedad relativa del aire y la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca, sugiriendo una influencia mínima o nula de la humedad en la evapotranspiración. En contraste, la investigación resalta una fuerte correlación ($R^2 = 0,9626$) entre la temperatura atmosférica mensual y la evapotranspiración en la misma área, subrayando la importancia de la temperatura en estos procesos. Estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar contextos regionales para interpretar las relaciones climáticas.

Figura 5
 Relación de la humedad relativa y la evapotranspiración



La comparación entre los resultados de esta investigación, que revela una correlación extremadamente débil entre la humedad relativa del aire y la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca, y Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz (2021), que aborda el impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y el periodo de crecimiento en México, ofrece perspectivas contrastantes. Mientras que los resultados de esta investigación sugieren una influencia mínima o nula de la humedad relativa del aire en la evapotranspiración, Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz (2021) destaca cambios significativos en la evapotranspiración potencial en México debido al aumento de temperatura y la reducción de la humedad relativa proyectada. Esta divergencia resalta la importancia de considerar contextos específicos y condiciones climáticas regionales al interpretar las relaciones entre la humedad y la evapotranspiración.

Conclusiones

Relación de la temperatura atmosférica con la tasa de evapotranspiración en el área del Lago Titicaca de la Región de Puno se destaca la fuerte correlación entre la temperatura atmosférica media mensual y la evapotranspiración, con un coeficiente de correlación del 96,26 % de la variabilidad en la evapotranspiración esto explica que existen variaciones en la temperatura atmosférica.

La variabilidad estacional, evidenciando que marzo registra la temperatura media mensual más alta, acompañada por una precipitación significativa, mientras que junio exhibe condiciones más frescas y una disminución en la precipitación. Se introduce el Índice de Sequía de Reconstrucción de Precipitación Estándar (SPI), ofreciendo una visión detallada de las fluctuaciones en la disponibilidad de precipitación a lo largo del tiempo. Este índice abarca desde condiciones extremadamente secas hasta húmedas, permitiendo una comprensión profunda de los patrones de sequía.

Los resultados revelan una correlación extremadamente baja de 0,02 % entre la humedad relativa del aire y la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca, indicando una relación prácticamente inexistente entre estas dos variables. La escasa influencia detectada, representada por menos del 0,02 % de la variabilidad en la evapotranspiración, sugiere que la humedad relativa del aire no desempeña un papel significativo en los patrones de evapotranspiración en la Región de Puno.

Agradecimientos

Estación de los Uros en Puno, así como al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), por su colaboración invaluable al proporcionar los datos meteorológicos fundamentales para llevar a cabo esta investigación.

Conflicto de interés

Declaro que no existe ningún conflicto de intereses en relación con la investigación presentada en este artículo. No tengo afiliaciones, financiamientos

ni relaciones que puedan influir en la objetividad y la integridad de los resultados y conclusiones presentados. Mi único propósito es contribuir al avance del conocimiento científico de manera imparcial y transparente.

Referencias

- Abbasi, A., Khalili, K., Behmanesh, J., & Shirzad, A. (2021). Estimation of ARIMA model parameters for drought prediction using the genetic algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(10). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07140-0>
- Arnold, T. E., Hillman, A. L., Abbott, M. B., Werne, J. P., McGrath, S. J., & Arkush, E. N. (2021). Drought and the collapse of the Tiwanaku Civilization: New evidence from Lake Orurillo, Peru. *Quaternary Science Reviews*, 251, 106693. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106693>
- Becerra, J., & Pardo, M. A. (2022). *Cálculo de la evaporación de agua en la microcuenca agrícola del río Coñaque, Ecuador*.
- Chacpi Cerna, L. K. (2019). *Modelos para estimar la evapotranspiración de referencia con las ecuaciones de Hargreaves y Turc, respecto de la ecuación estándar Penman-Monteith. Sector Mataquita-Jangas-Huaraz 2013* (p. 109).
- Christian, J. I., Basara, J. B., Otkin, J. A., Hunt, E. D., Wakefield, R. A., Flanagan, P. X., & Xiao, X. (2019). A methodology for flash drought identification: Application of flash drought frequency across the United States. *Journal of Hydrometeorology*, 20(5), 833-846. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0198.1>
- Degano, M. F., Rivas, R. E., Carmona, F., Faramiñán, A., & Olivera Rodríguez, P. (2021). Calibration of the potential evapotranspiration product "MOD16A2" for the Argentinian Pampas region. *Boletín Geológico y Minero*, 132(1-2), 167-174. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.017>

- Garay. (2022). *Aplicación de modelación hidrológica para analizar sequías en escenario de cambio climático*.
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6.a ed.). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Huerta, A. (2012). *Vulnerabilidad de la disponibilidad de los recursos hídricos en el Perú frente al cambio climático: Análisis probabilístico de Budyko* (Número 511, p. 7995788).
- Iwata, T., Nishiyama, N., Nagano, K., Izumi, N., Tsukioka, T., Chung, K., Hanada, S., Inoue, K., Kaji, M., & Suehiro, S. (2012). Preoperative serum value of sialyl Lewis X predicts pathological nodal extension and survival in patients with surgically treated small cell lung cancer. *Journal of Surgical Oncology*, 105(8), 818-824. <https://doi.org/10.1002/jso.23002>
- Lasprilla, R., & Torres Prieto, E. A. (2022). ¿Do mesh houses influence reference evapotranspiration (ET₀)? 47-54.
- Liu, Z., Lu, J., Huang, J., Chen, X., & Zhang, L. (2021). Projection of Reference Crop Evapotranspiration under Future Climate Change in Poyang Lake Watershed, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(2006), 1-17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002020](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002020)
- Macías-Carranza, V., & Cabello Pasini, A. (2021). Climatología y evapotranspiración en valles vitivinícolas de Baja California. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 849-863. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2816>
- Martinez. (2018). *Estimación de la variación espacio temporal de la evapotranspiración real en el valle del Cauca y su relación con la amenaza de sequía meteorológica, entre los años 2000 al 2015*.
- Mejía Muñoz, M. (2023). *Tendencia de la evapotranspiración en Cautitlán Izcalli, México y su importancia en las actividades agrícolas*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Montaner, M., & Sánchez, E. (1988). Aproximación, Por El Método De Thornthwaite, Al Cálculo De La Infiltración De La Lluvia Útil. *Papeles de Geografía*, 14, 223-235.
- Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Revista Terra Latinoamericana*, 39, 1-19. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>
- Ortiz, R. S., & Chile A., M. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 70-79. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1450>
- Qian Ge, et al. (2023). *Optimal Determination and Dynamic Control Analysis of the Plateau Lakes*.
- Revueltas, J. E., Zabaleta, A., Mercado, T., & Aguirre, S. (2020). Changes in local climate and its effects on micro-basins water regulation in Magdalena, Northern Colombia. *Información Tecnológica*, 31(6), 193-205. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000600206>
- Senamhi. (2017). *Atlas de sequías hidrológicas de la región hidrográfica del Titicaca*.
- Tamayo Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica*.
- Tarqui, C. E. C. (2014). *Universidad Mayor De San Andres: Memoria De Trabajo Dirigido "Gobierno Autonomo Municipal De Viacha"* (Número 48, pp. 1-115).
- Torres-batl, J., & Pillco-zol, R. (2020). *Mapping Evapotranspiration, Vegetation and Precipitation Trends in the Catchment of the Shrinking Lake Poopó*.

Vega, F. (2018). *Variabilidad Espacio - Temporal de las Sequías en el Perú y el peligro asociado al Fenómeno del Niño* (Vol. 1). Universidad Nacional Agraria La Molina.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought

index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>