Revista esprint Investigación

https://rei.esprint.tech
Vol. 5 N° Esp.1, Edición Especial 2026 (452-468) ISSN: 2960-8317
Estudios de Sostenibilidad y Desarrollo

Artículo de revisión

Influencia de la distribución temporal y espacial de la precipitación en el balance hídrico de la cuenca San Pedro (Norte Potosí, Bolivia) mediante teledetección

Influence of the temporal and spatial distribution of precipitation on the water balance of the San Pedro basin (North Potosí, Bolivia) using remote sensing

Humberto Álvarez Cabrera*
Universidad Técnica de Oruro
Oruro - Bolivia
halvarezc2002@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-3766-8585

***Correspondencia:**
halvarezc2002@gmail.com

Cómo citar este artículo:
Álvarez, H. (2026). Influencia de la distribución temporal y espacial de la precipitación en el balance hídrico de la cuenca San Pedro (Norte Potosí, Bolivia) mediante teledetección. *Esprint Investigación, 5*(Esp.1), 452-468. https://doi.org/10.61347/ei.v5iEsp.1.337

Recibido: *20 de mayo de 2026*
Aceptado: *22 de junio de 2026*
Publicado: *4 de julio de 2026*

Copyright: Derechos de autor 2026 Humberto Álvarez Cabrera.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen: La investigación analizó la influencia de la distribución temporal y espacial de la precipitación sobre el balance hídrico de la cuenca San Pedro, ubicada en el norte de Potosí, Bolivia. El estudio se justificó debido a que la disponibilidad de agua en cuencas altoandinas depende de la variabilidad de las lluvias, las condiciones fisiográficas del territorio, la evapotranspiración y la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo. El objetivo fue determinar la influencia de la distribución temporal y espacial de la precipitación sobre el balance hídrico de la cuenca San Pedro, mediante técnicas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica y análisis estadístico. Se empleó un enfoque cuantitativo, con alcance correlacional y explicativo, utilizando información de precipitación, evapotranspiración, modelos digitales de elevación y el método de Holdridge. Los resultados evidenciaron que la precipitación presentó una marcada estacionalidad, con concentración de lluvias en pocos meses del año y un patrón temporal relativamente estable. Además, la distribución espacial estuvo condicionada por la altitud y el relieve, registrándose mayores precipitaciones en las zonas occidentales y de mayor elevación. Sin embargo, el balance hídrico mostró déficit de agua en varias subcuencas, asociado con la evapotranspiración, la limitada capacidad de almacenamiento del suelo y la rápida escorrentía característica de zonas montañosas. Se concluye que la distribución de la precipitación constituye un factor determinante del comportamiento hidrológico de la cuenca y que la aplicación de herramientas de teledetección y análisis geoespacial proporciona información relevante para la planificación territorial y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Palabras clave: Balance hídrico, cuenca, precipitación, teledetección.

Abstract: *This research analyzed the influence of the temporal and spatial distribution of precipitation on the water balance of the San Pedro basin, located in northern Potosí, Bolivia. The study was justified because water availability in high Andean basins depends on rainfall variability, the physiographic conditions of the territory, evapotranspiration, and soil water storage capacity. The objective was to determine the influence of the temporal and spatial distribution of precipitation on the water balance of the San Pedro basin through remote sensing techniques, Geographic Information Systems, and statistical analysis. A quantitative approach with correlational and explanatory scope was applied, using precipitation data, evapotranspiration data, digital elevation models, and the Holdridge method. The results showed that precipitation presented marked seasonality, with rainfall concentrated in only a few months of the year and a relatively stable temporal pattern. In addition, the spatial distribution of precipitation was conditioned by altitude and relief, with higher rainfall values recorded in the western and higher-elevation areas. However, the water balance showed water deficit in several sub-basins, associated with evapotranspiration, limited soil water storage capacity, and rapid runoff typical of mountainous areas. It is concluded that precipitation distribution is a determining factor in the hydrological behavior of the basin and that the application of remote sensing and geospatial analysis tools provides relevant information for territorial planning and sustainable water resource management.*

Keywords*: Basin, precipitation, remote sensing, water balance.*

1. Introducción

La precipitación constituye el principal factor climático para la disponibilidad de agua en una cuenca hidrográfica. Su distribución temporal y espacial controla procesos fundamentales como la infiltración, la escorrentía superficial, la recarga de acuíferos y la evapotranspiración, los cuales determinan el comportamiento del balance hídrico (Luna-Romero et al., 2018; Barry & Chorley, 2009).

En regiones andinas, la interacción entre la circulación atmosférica, la topografía y la altitud genera una elevada heterogeneidad en la distribución de las lluvias. Esta condición produce diferencias importantes en la oferta hídrica entre distintos sectores de una misma cuenca (Venturini & Krepper, 2017). En este sentido, la estimación de los recursos hídricos disponibles resulta fundamental para evaluar la sostenibilidad hídrica de una cuenca (Ureña et al., 2020; Platt, 2010).

La cuenca San Pedro, ubicada en el norte del departamento de Potosí, representa una unidad hidrográfica estratégica para el abastecimiento de agua, la producción agrícola, la ganadería campesina y la conservación de los ecosistemas altoandinos (Pérez & Balderrama, 2022). Su relieve presenta una amplia variación altitudinal que condiciona la distribución espacial de la precipitación.

Al respecto, Barry & Chorley (2009) señalan que la topografía constituye uno de los principales factores que explican las diferencias espaciales de las lluvias. De forma complementaria, Olivera-Villarroel et al. (2021) destacan que, en la Cordillera Oriental de Bolivia, el ascenso orográfico de masas de aire húmedo provenientes de la Amazonía favorece la formación de precipitaciones, generando condiciones hidrológicas heterogéneas dentro de una misma cuenca.

Diversos estudios desarrollados en Bolivia y otros países andinos evidencian que la variabilidad y el cambio climáticos están modificando el comportamiento de la precipitación y, en consecuencia, la disponibilidad de agua. Montenegro et al. (2025) identificaron una disminución de la precipitación y un déficit hídrico importante en varias regiones de Bolivia, situación que incrementa el riesgo de sequías y afecta la disponibilidad de recursos hídricos (Rodríguez & Pérez, 2017).

De manera similar, Medina (2021) demostró que los cambios en los patrones de precipitación alteran los caudales y reducen el almacenamiento de agua en embalses de abastecimiento. Por su parte, Drenkhan & Castro (2023) advierten que la creciente inseguridad hídrica en los Andes tropicales exige fortalecer el conocimiento científico sobre el comportamiento de las cuencas, como base para diseñar estrategias de adaptación frente a los cambios ambientales.

A pesar de la importancia de la cuenca San Pedro para el desarrollo regional, todavía existe escasa información que relacione de manera integrada la distribución temporal y espacial de la precipitación con el comportamiento del balance hídrico. La limitada densidad de estaciones meteorológicas y las dificultades de acceso a zonas de alta montaña restringen la disponibilidad de información continua para comprender la dinámica hidrológica de la cuenca (Duque-Sarango et al., 2019).

Aunque diferentes investigaciones han demostrado que las tendencias espaciales y temporales de la precipitación se reflejan directamente en el comportamiento del balance hídrico y de los caudales (Venturini & Krepper, 2017), aún son escasos los estudios aplicados específicamente a la cuenca San Pedro. Esta limitación evidencia la necesidad de integrar análisis geoespaciales, series temporales e información satelital para evaluar con mayor precisión la disponibilidad hídrica del territorio.

En este contexto, la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica constituyen herramientas de gran utilidad para complementar la información meteorológica. Estas permiten

analizar la distribución espacial de la precipitación, identificar patrones de variabilidad y relacionarlos con las características fisiográficas del territorio (Zeballos et al., 2014).

De la misma forma, la integración de información geoespacial con métodos de evaluación del balance hídrico facilita una mejor comprensión de la disponibilidad de agua. Además, fortalece los procesos de planificación y gestión de los recursos hídricos en territorios expuestos a variabilidad climática y presión sobre sus fuentes de agua (Del Jesus et al., 2020; Gaspari et al., 2021).

La presente investigación tiene como objetivo determinar la influencia de la distribución temporal y espacial de la precipitación sobre el balance hídrico de la cuenca San Pedro, en el norte de Potosí, mediante técnicas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica y análisis estadístico descriptivo. Este propósito responde a la necesidad de generar evidencia científica que contribuya a la gestión integrada de los recursos hídricos y a la planificación territorial.

En función de lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la influencia de la distribución espacial y temporal de la precipitación en el balance hídrico de la cuenca San Pedro? Para responder a esta interrogante, el estudio emplea métodos basados en Sistemas de Información Geográfica, teledetección y estadística descriptiva, con el fin de analizar la relación entre la variabilidad pluviométrica, las características fisiográficas y la disponibilidad de agua en la cuenca.

2. Metodología

La cuenca del río San Pedro se ubicó en el norte del departamento de Potosí, entre las coordenadas geográficas 18°34'05" de latitud sur y 66°04'52" de longitud oeste, en un rango de altitud de 1650 a 5000 m s. n. m. Forma parte de la vertiente amazónica, debido a que sus aguas drenan hacia el sistema hidrográfico del río Grande y, posteriormente, hacia la cuenca del Amazonas.

El área de estudio comprendió territorios de varios municipios del norte de Potosí, entre ellos Colquechaca, Macha y Pocoata, además de diversas comunidades rurales. Su red hidrográfica estuvo conformada por varios cursos de agua que confluyen para formar el río San Pedro, entre los cuales destacan los ríos Macha, Pocoata y Colquechaca como tributarios principales (Pérez & Balderrama, 2022).

Debido a la variabilidad altitudinal del área de estudio, las condiciones climáticas e hidrológicas presentaron una marcada heterogeneidad. El relieve fue predominantemente accidentado, con montañas, serranías, valles interandinos y quebradas profundas, factores que influyeron directamente en la distribución espacial de la precipitación.

Estas condiciones favorecieron la disponibilidad de recursos hídricos utilizados para el consumo humano, el riego agrícola familiar, la ganadería campesina y algunos procesos industriales vinculados con la actividad minera presente en la zona (Pérez & Balderrama, 2022).

Debido a la escasa distribución de estaciones meteorológicas en el área de estudio, fue necesario recurrir a geoportales de información geoespacial, lo que permitió disponer de datos climáticos, topográficos e hidrográficos suficientes para el análisis espacial y temporal de la cuenca, como se detalla en la tabla 1.

Tabla 1

Fuente de datos e información requerida para la investigación

Elementos	Fuente de datos	Resolución
Datos de precipitación	NASA GPM IMERG	0,1° ≈ 10 km
Temperatura máxima, mínima y media	TerraClimate	1/24° ≈ 4,6 km
Evapotranspiración real (AET)	TerraClimate	1/24° ≈ 4,6 km
Red hidrográfica	HydroSHEDS	15 arc-seg. ≈ 500 m
Límites municipales	GeoBolivia-IGM	Escala 1:50.000
Modelo digital de elevación (DEM)	NASA Earthdata, SRTM	Resolución espacial: 30 m

Enfoque, tipo y métodos de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que las variables analizadas fueron medidas y procesadas mediante datos numéricos. El estudio fue de tipo no experimental, ya que no se manipularon las variables, sino que se analizaron a partir de información climática, hidrográfica y geoespacial previamente disponible.

Asimismo, la investigación tuvo un alcance aplicado, porque se orientó al análisis de un fenómeno natural real relacionado con la disponibilidad hídrica de la cuenca San Pedro. También presentó un alcance correlacional y explicativo, debido a que buscó establecer la relación entre la distribución temporal y espacial de la precipitación y el comportamiento del balance hídrico.

En cuanto a su temporalidad, el estudio se consideró longitudinal retrospectivo, puesto que analizó información climática correspondiente a un periodo determinado. Esta clasificación resultó más adecuada que la transversal, debido a que el análisis incluyó el comportamiento temporal de la precipitación. Los métodos, técnicas, herramientas e instrumentos empleados en la investigación se organizaron de acuerdo con los objetivos específicos, como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2

Distribución metodológica en base a objetivos específicos

Objetivo específico	Método	Técnica	Herramienta	Instrumento
Caracterizar la distribución espacial y temporal de la precipitación en el área de estudio.	Deductivo, analítico, geoespacial y estadístico	Interpolación, análisis de series temporales y delimitación hidrográfica mediante Pfafstetter	ArcGIS Pro, Google Earth Pro, RStudio y Excel 2016	Raster de precipitación, mapa temático de distribución de precipitación y gráficos estadísticos
Evaluar el comportamiento del balance hídrico en el área de estudio.	Deductivo, analítico, geoespacial y método de Holdridge	Índice de balance hídrico y fórmula de Holdridge	ArcGIS Pro, Google Earth Pro, RStudio y Excel 2016	Mapa temático de precipitación, mapa temático de PET y mapa de balance hídrico

Mediante el método deductivo, la investigación partió de principios generales de la hidrología y la climatología para explicar el comportamiento del sistema estudiado (Hernández Sampieri et al., 2014). El método analítico permitió descomponer la unidad de estudio en sus principales componentes: precipitación, evapotranspiración, relieve y balance hídrico.

De esta manera, fue posible comprender la influencia individual de cada componente en la dinámica hidrológica de la cuenca (Bernal Torres, 2016). Por su parte, el método geoespacial permitió analizar el comportamiento espacial de las variables hidrológicas mediante Sistemas de Información Geográfica (Longley et al., 2015).

El método estadístico se utilizó para evaluar el comportamiento de las variables mediante procedimientos descriptivos e inferenciales (Montgomery & Runger, 2018). Además, el método de Holdridge se aplicó como procedimiento climático para estimar la disponibilidad de agua a partir de la relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación (Holdridge, 1967). La interpolación se empleó como procedimiento geoestadístico para estimar valores de precipitación en zonas sin observaciones directas, a partir de datos conocidos en puntos cercanos. Entre los métodos más utilizados se encuentran IDW, Kriging y Spline, los cuales permiten representar espacialmente variables climáticas continuas (Chang, 2019).

El análisis de series temporales se utilizó para examinar el comportamiento de la precipitación a través del tiempo. Esta técnica permitió identificar tendencias, variaciones estacionales, ciclos y posibles anomalías en la serie climática analizada (Box et al., 2015). Asimismo, el índice de balance hídrico se aplicó como indicador cuantitativo de disponibilidad de agua en la cuenca. Este índice permitió relacionar los aportes por precipitación con las pérdidas asociadas a la evapotranspiración, facilitando la interpretación del déficit o excedente hídrico (Dingman, 2015).

La técnica de Pfafstetter se empleó para la delimitación y codificación jerárquica de las unidades hidrográficas. Esta metodología organiza las unidades de drenaje según la conectividad de la red fluvial y la dirección del flujo del agua, lo que facilita el análisis de cuencas y subcuencas a diferentes escalas. Su aplicación permitió estandarizar la delimitación de las unidades de estudio e integrar información geoespacial proveniente de Sistemas de Información Geográfica y modelos digitales de elevación. Para este caso, la técnica fue considerada como apoyo para la organización hidrográfica de la cuenca y no como técnica directa de análisis de precipitación (Agência Nacional de Águas, 1989).

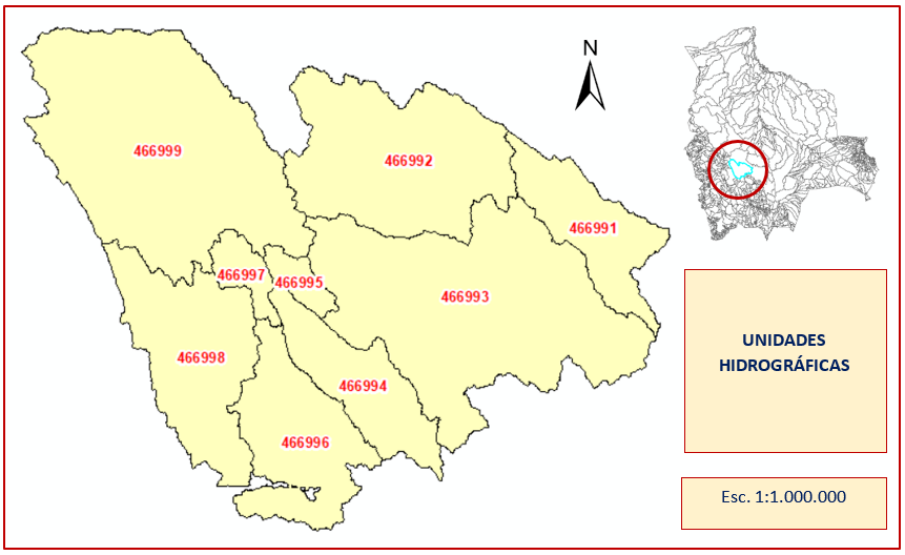
3. Resultados

Inicialmente, se identificó la cuenca San Pedro a partir de una base de datos geográfica de tipo vectorial. Posteriormente, se delimitó el área de estudio en nueve unidades hidrográficas o subcuencas, mediante procedimientos técnicos propios de los Sistemas de Información Geográfica. Luego, se realizó la codificación numérica de las unidades hidrográficas, considerando el nivel de codificación registrado en la cartografía fuente.

Este procedimiento permitió organizar espacialmente las cuencas, intercuencas y cuencas internas en relación con la red de drenaje. La delimitación y codificación se efectuaron siguiendo los criterios metodológicos de Pfafstetter, los cuales permiten establecer una jerarquía hidrográfica y facilitar el análisis espacial de las unidades de drenaje. En la figura 1 se presentan las subcuencas codificadas de la cuenca San Pedro:

Figura 1

Mapa de Identificación de unidades hidrográficas en la cuenca San Pedro



Nota. Elaboración propia en base a Cartografía Nacional de Cuencas (Luna & Chura, 2017).

La cuenca del río San Pedro presentó un área total de 11.112,39 km², subdividida en nueve unidades hidrográficas de nivel 6 según la metodología de Pfafstetter, como se observa en la tabla 3. La distribución espacial de estas unidades fue heterogénea, lo que evidencia la existencia de subcuencas con condiciones fisiográficas diferenciadas y dinámicas hidrológicas particulares.

Tabla 3

Áreas de las unidades hidrográficas

Código nivel 6	Área (km²)	Porcentaje (%)
466991	711,67	6
466992	1.676,19	15
466993	2.725,51	25
466994	720,09	6
466995	148,18	1
466996	1.001,02	9
466997	194,15	2
466998	1.207,97	11
466999	2.727,62	25
Total	11.112,39	100

Nota. Fuente. Elaboración propia en base a Cartografía Nacional de Cuencas (Luna & Chura, 2017).

Las unidades hidrográficas 466993 y 466999 constituyeron las de mayor extensión, con 2.725,51 km² y 2.727,62 km², respectivamente. Cada una representó el 25 % del área total de la cuenca y, en conjunto, concentraron aproximadamente el 50 % de la superficie analizada. Debido a su mayor extensión, estas unidades pudieron desempeñar un papel relevante en la captación de precipitación, la generación de escorrentía superficial, la recarga hídrica y el aporte de caudales hacia el cauce principal.

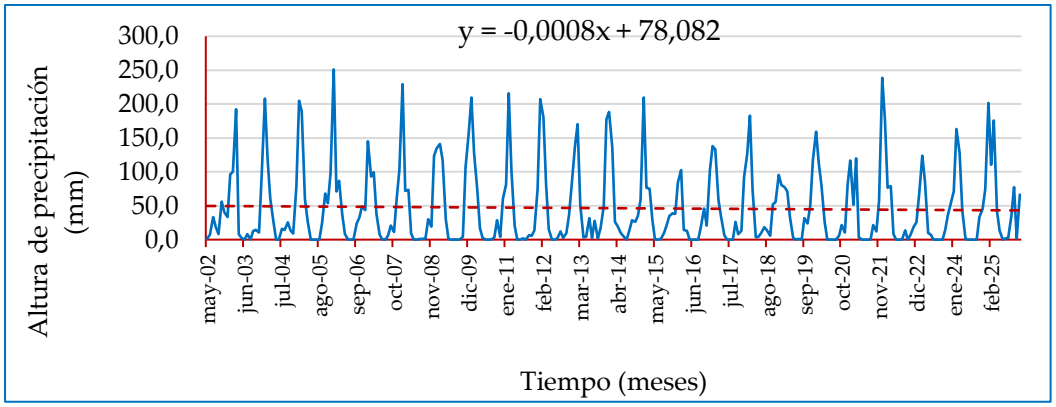
Esta relación entre superficie de drenaje y respuesta hidrológica ha sido señalada en estudios de modelado precipitación-escorrentía en microcuencas agrícolas (Mozo et al., 2020). Las subcuencas 466992 y 466998 representaron el 15 % y el 11 % del área total, respectivamente, aportando en conjunto el 26 % de la superficie de la cuenca. Por su extensión, estas unidades también pudieron contribuir de manera importante a la generación de escorrentía y al comportamiento general del balance hídrico.

Por otra parte, las subcuencas 466996, 466991 y 466994 presentaron superficies intermedias, equivalentes al 9 %, 6 % y 6 % del área total, respectivamente. Estas unidades pudieron generar aportes hídricos moderados, dependiendo de sus condiciones fisiográficas, cobertura del suelo y distribución espacial de la precipitación. Las subcuencas 466997 y 466995 correspondieron a las unidades de menor extensión superficial, con el 2 % y el 1 % del área total, respectivamente. En consecuencia, su aporte relativo al balance hídrico general de la cuenca fue menor; sin embargo, su importancia local no debe descartarse, especialmente en áreas con alta pendiente, concentración de drenaje o usos específicos del agua.

Para analizar la distribución temporal de la precipitación, se efectuó un análisis de series temporales con datos mensuales correspondientes a un período de 23 años, como se presenta en la figura 2. Este procedimiento permitió identificar la variabilidad interanual y estacional de la precipitación en la cuenca del río San Pedro:

Figura 2

Distribución temporal de la precipitación



Nota. (Harris et al., 2020; Fick & Hijmans, 2017)

La serie mensual de precipitación comprendió el período 2003–2025 y presentó una tendencia ligeramente negativa, con una pendiente de -0,0008. Este valor indica una disminución mínima de la precipitación durante el período de estudio; sin embargo, para afirmar que dicha tendencia no fue significativa, sería necesario incorporar una prueba estadística de tendencia y su respectivo valor de significancia.

En términos generales, el régimen pluviométrico mostró un comportamiento relativamente estable, aunque con variaciones cíclicas marcadas entre períodos de lluvia intensa y períodos de escasa

precipitación. Se observaron valores máximos superiores a 240 mm y valores mínimos cercanos o inferiores a 100 mm, lo que evidencia una marcada variabilidad mensual.

A partir de los índices estacionales presentados en la tabla 4, se identificó que la mayor concentración de lluvia ocurrió durante cuatro meses consecutivos. En contraste, los meses centrales del año presentaron aportes mínimos de precipitación, lo que confirma una distribución temporal altamente desigual del régimen pluviométrico.

Tabla 4

Índices estacionales de precipitación

Mes	Índice estacional (%)	Interpretación
1	332,7	Precipitación muy alta
2	272,9	Precipitación alta
3	178,6	Precipitación moderada
4	47,9	Inicio del descenso pluviométrico
5	6,0	Mes muy seco
6	1,5	Mínimo anual de precipitación
7	3,6	Mes muy seco
8	10,6	Mes seco
9	27,5	Inicio de la recuperación pluviométrica
10	51,2	Incremento gradual de la precipitación
11	74,8	Inicio de la temporada lluviosa
12	192,5	Lluvias importantes

Nota. (Harris et al., 2020; Fick & Hijmans, 2017).

Para el análisis de la distribución temporal de la precipitación, se aplicó la Función de Autocorrelación (ACF) a una serie conformada por 284 observaciones mensuales. Este procedimiento permitió evaluar el grado de asociación entre los valores de precipitación registrados en distintos retardos temporales, con el propósito de identificar patrones de persistencia, estacionalidad o periodicidad en la serie (Box et al., 2015). El coeficiente de autocorrelación para un retardo $k$se estimó mediante la siguiente expresión:

$$r_k = \frac{\sum_{t-1}^{n-k}(x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t-1}^{n}(x_t - x)^2}$$

Donde

r_k: representó el coeficiente de autocorrelación para el retardo k;

x_t: correspondió a la precipitación observada en el tiempo t;

$\bar{x}$: representó la media de la serie;

x_{t+k}: correspondió a la precipitación observada $k$períodos después;

n: representó el número total de observaciones

Los coeficientes obtenidos tomaron valores entre -1 y +1. Para evaluar su significancia estadística, se utilizó un intervalo de confianza aproximado del 95 %, definido por la siguiente expresión: $\pm\frac{1.96}{\sqrt{n}}$

Considerando un total de 284 observaciones, el límite de significancia fue:

$$\pm\frac{1.96}{\sqrt{284}} \approx 0.116$$

Por lo tanto, se consideraron estadísticamente significativos los coeficientes de autocorrelación que superaron aproximadamente el umbral de ±0,12. En el análisis realizado, se obtuvo un coeficiente de autocorrelación promedio cercano a 0,70, lo que evidenció una autocorrelación positiva en la serie de precipitación mensual. Este resultado indicó que los valores de precipitación presentaron cierto grado de dependencia temporal, es decir, que los registros mensuales no se comportaron de manera completamente aleatoria. La presencia de autocorrelación positiva sugiere la existencia de patrones de persistencia y estacionalidad en el régimen pluviométrico de la cuenca San Pedro.

Barry & Chorley (2009) señalan que la precipitación presenta una marcada variabilidad espacial, determinada por la circulación atmosférica, la topografía, la distancia al mar y la disponibilidad de humedad. En este contexto, el relieve constituye uno de los principales factores que explican las diferencias locales en la distribución de las lluvias. De manera complementaria, Venturini & Krepper (2017) indican que los patrones espaciales de precipitación responden a la interacción entre procesos meteorológicos y características fisiográficas de las cuencas, tales como la elevación, la orientación del relieve y la ubicación geográfica.

En correspondencia con estos planteamientos, el relieve y las características topográficas constituyeron elementos fisiográficos fundamentales para el análisis de la distribución espacial de la precipitación. En este sentido, la cuenca San Pedro presentó una variabilidad altitudinal evidente, la cual condicionó los patrones climáticos y la distribución espacial de las lluvias. La figura 3 muestra la distribución de la variación altitudinal en la cuenca San Pedro. Esta información permitió relacionar las diferencias de altitud con los cambios espaciales de la precipitación y, posteriormente, con el comportamiento del balance hídrico en las distintas unidades hidrográficas.

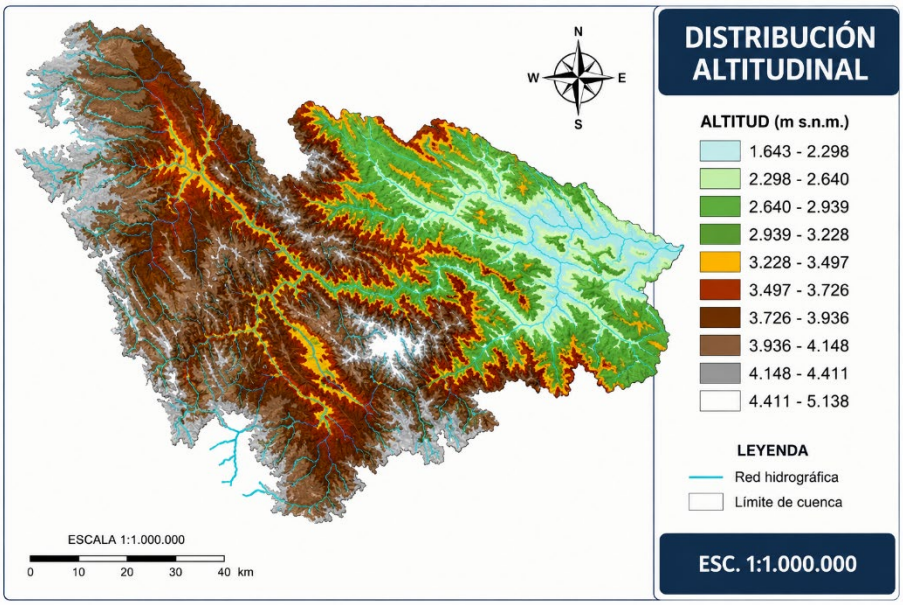
El mapa de distribución altitudinal muestra que la cuenca San Pedro presentó un relieve altamente heterogéneo, con altitudes comprendidas entre aproximadamente 1.643 y 5.138 m s. n. m. Esta condición evidencia un gradiente topográfico característico de las cuencas altoandinas del norte del departamento de Potosí. La amplitud altitudinal reflejó la presencia de montañas, serranías, valles interandinos y cauces fluviales, los cuales conforman un paisaje de elevada complejidad fisiográfica. Las mayores elevaciones, superiores a 4.100 m s. n. m., representadas por tonos gris claro y blanco, se localizaron principalmente en los sectores occidental, suroccidental y en algunas áreas centrales de la cuenca.

En contraste, las altitudes más bajas, comprendidas entre 1.643 y 2.640 m s. n. m., representadas por colores celestes y verdes claros, se concentraron hacia los sectores oriental y nororiental. En estas áreas predominaron valles relativamente amplios y pendientes menos pronunciadas. La variación

altitudinal observada constituyó uno de los principales factores fisiográficos que explican la distribución espacial de la precipitación dentro de la cuenca San Pedro. Esto se debe a que la elevación modifica las condiciones atmosféricas locales al influir en la temperatura, la presión atmosférica, la condensación del vapor de agua y la circulación de masas de aire húmedo (Barry & Chorley, 2009).

Figura 3

Mapa de distribución altitudinal de la cuenca San Pedro



Nota. Elaboración propia en base a Modelo de Elevación Digital SRTM (NASA Jet Propulsion Laboratory, 2013; Farr et al., 2007).

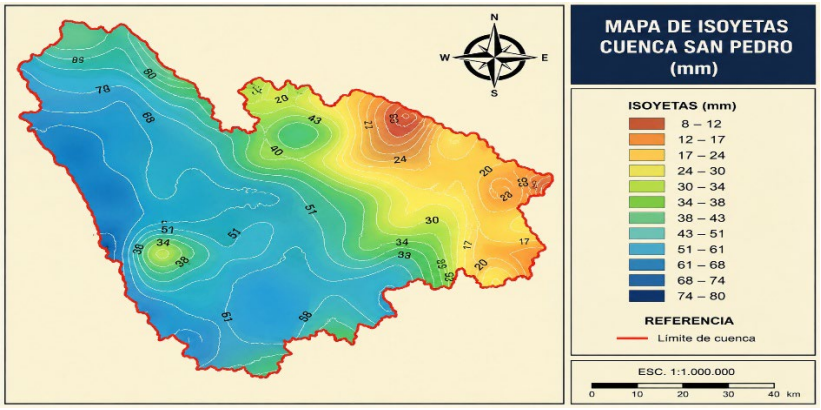
Cuando las masas de aire húmedo ingresan a la región andina, el relieve favorece su ascenso sobre las montañas. Durante este proceso, el aire experimenta una disminución de temperatura por expansión adiabática, lo que facilita la condensación del vapor de agua y la formación de nubes, fenómeno conocido como precipitación orográfica.En consecuencia, las zonas ubicadas en laderas de barlovento y en sectores de mayor elevación tienden a registrar acumulaciones de precipitación superiores en comparación con áreas de menor altitud o localizadas a sotavento (Olivera-Villarroel et al., 2021). Además, la disminución de la temperatura con la altitud puede favorecer la condensación y reducir parcialmente las pérdidas por evaporación.

La cuenca San Pedro se localizó en la región andina del norte de Potosí, dentro de un marco geográfico montañoso perteneciente a la Cordillera Oriental de Bolivia. Esta ubicación determinó que la circulación atmosférica regional estuviera influenciada, principalmente durante la temporada lluviosa, por el transporte de masas de aire húmedo provenientes de la Amazonía. La interacción entre estas masas de aire húmedo y el relieve andino intensificó los procesos de ascenso orográfico. Por ello, la distribución espacial de la precipitación en la cuenca estuvo estrechamente condicionada por la topografía, la altitud y la orientación del relieve (Olivera-Villarroel et al., 2021).

El mapa de isoyetas evidenció una marcada variabilidad espacial de la precipitación dentro de la cuenca San Pedro. Las isolíneas mostraron un patrón de incremento gradual desde el sector oriental hacia los sectores occidental y suroccidental de la cuenca. Los valores más bajos se concentraron en el extremo oriental, donde las isoyetas registraron aproximadamente entre 20 y 35 mm. En contraste, hacia el centro y, principalmente, hacia el occidente, se observaron valores superiores a 60 mm, con máximos cercanos a 70–74 mm.

Figura 5

Mapa de isoyetas



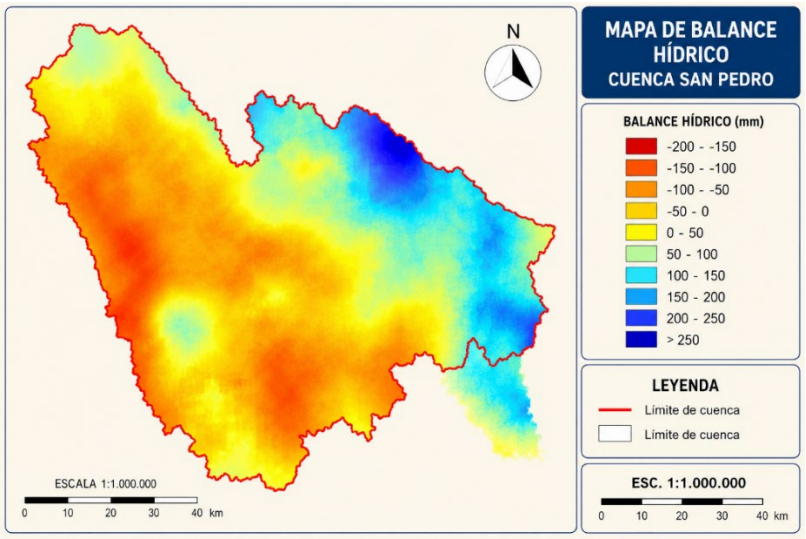
Nota. Elaboración propia en base a Modelo de Elevación Digital SRTM (NASA Jet Propulsion Laboratory, 2013; Farr et al., 2007).

Este patrón espacial coincidió con la distribución altitudinal de la cuenca, lo que sugiere una relación entre el relieve y la variación de la precipitación. En este sentido, las zonas de mayor altitud tendieron a presentar mayores acumulaciones pluviométricas, probablemente asociadas a procesos de ascenso orográfico. Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca San Pedro presentó una distribución espacial heterogénea de la precipitación, determinada principalmente por la configuración del relieve. Esta condición favoreció una disponibilidad diferenciada de recursos hídricos dentro de la misma unidad hidrográfica.

En las áreas occidentales coincidieron las mayores elevaciones y los mayores valores de precipitación. Por ello, estos sectores constituyeron zonas relevantes para la generación de escorrentía superficial, la recarga hídrica y el aporte de caudales hacia la red de drenaje. Por el contrario, los sectores orientales, caracterizados por menores elevaciones y menores precipitaciones, presentaron una contribución relativamente menor al escurrimiento superficial. Además, estas áreas podrían mostrar mayor susceptibilidad a déficits hídricos durante la estación seca.

Figura 6

Mapa de balance hìdrico



Nota. Elaboración propia en base a Modelo de Elevación Digital SRTM (NASA Jet Propulsion Laboratory, 2013; Farr et al., 2007)

De acuerdo con el método de Holdridge (1967), el balance hídrico constituye un procedimiento de cálculo que relaciona el aporte de agua por precipitación con la demanda atmosférica expresada mediante la evapotranspiración potencial. En este sentido, los valores elevados del índice indican una mayor disponibilidad relativa de agua, mientras que los valores bajos reflejan condiciones de déficit hídrico.

Según la clasificación de disponibilidad de agua de Holdridge, los índices de balance hídrico menores a 0,80 representan condiciones de déficit hídrico. En el mapa de la Figura 6 se observó que este déficit, representado por tonalidades naranjas, se concentró principalmente en las zonas central, occidental y sur de la cuenca San Pedro. Las unidades hidrográficas delimitadas mediante la técnica de Pfafstetter que presentaron mayores problemas de déficit hídrico fueron 466994, 466995, 466996, 466997, 466998 y 466999. Estos resultados evidencian una distribución espacial desigual de la disponibilidad de agua dentro de la cuenca.

En estas zonas, la precipitación orográfica tiende a ser mayor que en el sector oriental de la cuenca. Sin embargo, el concepto de balance hídrico desarrollado por Thornthwaite (1948) señala que la disponibilidad de agua no depende únicamente de la precipitación, sino también de la evapotranspiración y del almacenamiento de humedad en el suelo. Cuando el almacenamiento hídrico del suelo resulta insuficiente para satisfacer la demanda atmosférica, se produce déficit hídrico, incluso en regiones con precipitaciones relativamente altas. Esta condición es relevante en cuencas andinas, donde la pendiente, la cobertura del suelo y la capacidad de infiltración influyen directamente en la retención de agua.

En concordancia con ello, Beven (2012) explica que, en cuencas montañosas, la topografía controla fuertemente la generación de escorrentía. Las pendientes pronunciadas reducen el tiempo de residencia del agua y limitan el almacenamiento en el suelo, aun bajo condiciones de precipitación elevada. Por lo tanto, la precipitación orográfica no garantiza necesariamente una alta disponibilidad hídrica. En la cuenca San Pedro, factores como la fuerte pendiente, los suelos poco desarrollados y la rápida escorrentía superficial pudieron reducir la disponibilidad de agua en el suelo, generando déficits hídricos en varias unidades hidrográficas.

Por otra parte, en el sector oriental de la cuenca, representado por tonalidades celestes, el índice de balance hídrico fue mayor a 0,80. Este resultado indicó condiciones de estabilidad hídrica, de acuerdo con la clasificación de Holdridge, lo que sugiere una mayor disponibilidad relativa de agua en comparación con las zonas central, occidental y sur.

4. Discusión

La distribución temporal de la precipitación en la cuenca San Pedro evidenció una tendencia ligeramente negativa durante el período 2003–2025. Sin embargo, esta tendencia debe interpretarse con cautela, debido a que su significancia estadística requiere el respaldo de una prueba específica de tendencia. El régimen pluviométrico mostró una marcada estacionalidad y una alta concentración de lluvias en pocos meses del año. Este comportamiento confirma una distribución temporal desigual de la precipitación, característica frecuente en cuencas andinas sometidas a variabilidad climática regional.

Estos resultados coinciden con lo señalado por Venturini y Krepper (2017), quienes identificaron fases alternadas de incremento y disminución de la precipitación en la cuenca del río de La Plata. Dicho comportamiento evidencia que los patrones pluviométricos responden a procesos regionales

complejos y no únicamente a condiciones locales. De manera similar, Montenegro et al. (2025) sostienen que la persistencia de ciclos de sequía y la posible intensificación de eventos asociados a El Niño podrían afectar la disponibilidad hídrica futura en Bolivia. Esta evidencia resulta coherente con la concentración estacional de lluvias observada en la cuenca San Pedro.

Los resultados también mostraron una autocorrelación temporal positiva de la precipitación, con un valor de ACF = 0,715. Este resultado indicó una elevada persistencia del régimen pluviométrico, lo que sugiere que los valores mensuales de precipitación mantienen dependencia temporal. Esta condición coincide con lo planteado por Luna y Chura (2017), quienes señalan que las modificaciones en las condiciones climáticas generan escenarios complejos para la gestión del agua en cuencas productivas. Por tanto, la persistencia temporal de la precipitación debe considerarse en la planificación hídrica y agropecuaria.

En relación con la distribución espacial, los resultados evidenciaron un incremento de la precipitación desde el sector oriental hacia las áreas occidentales y suroccidentales de mayor altitud. Este patrón confirma la influencia del relieve en la generación de precipitación orográfica dentro de la cuenca. Estos hallazgos concuerdan con Zeballos et al. (2014), quienes demostraron que la dinámica hidrológica en ecosistemas altoandinos está estrechamente vinculada con la topografía. La interacción entre relieve, humedad atmosférica y procesos climáticos condiciona la distribución espacial del agua en territorios de montaña.

Asimismo, los resultados son consistentes con Pizarro-Tapia et al. (2011), quienes observaron que las variaciones espaciales y temporales de la precipitación influyen directamente en la generación de caudales en cuencas andinas. En este sentido, la precipitación constituye un factor clave para explicar la respuesta hidrológica de la cuenca San Pedro. La importancia de la precipitación como variable fundamental del comportamiento hidrológico también coincide con Ureña et al. (2020). Estos autores demostraron que una adecuada estimación espacial de las lluvias permite modelar de mejor manera los caudales líquidos y la producción de sedimentos en cuencas andinas.

En la cuenca San Pedro, las subcuencas occidentales, caracterizadas por mayores valores de precipitación, constituyeron las principales zonas de generación de escorrentía y aporte hídrico. Este resultado confirma la relación entre distribución pluviométrica, relieve y respuesta hidrológica. No obstante, la aplicación del método de Holdridge evidenció condiciones de déficit hídrico en gran parte de las subcuencas centrales, occidentales y meridionales. Este hallazgo resulta relevante, debido a que algunas de estas zonas registraron precipitaciones relativamente elevadas.

Esta aparente contradicción se explica porque la disponibilidad hídrica no depende únicamente del volumen precipitado. De acuerdo con Duque-Sarango et al. (2019), el balance hídrico también está condicionado por la evapotranspiración, la infiltración, la pendiente y la capacidad de almacenamiento del suelo. En este sentido, Spennemann (2015) destacó que la humedad del suelo cumple un papel regulador en la evapotranspiración y en la precipitación regional. Por ello, las zonas montañosas con lluvias importantes pueden presentar déficit hídrico cuando el almacenamiento edáfico es limitado o la escorrentía superficial es elevada.

Los resultados también se relacionan con los escenarios de cambio climático analizados por Medina (2021) y Del Jesus et al. (2020). Estos autores identificaron incrementos de temperatura, modificaciones en los patrones de precipitación y una reducción progresiva de la disponibilidad hídrica en sistemas andinos. En este contexto, la presencia de extensas áreas con déficit hídrico en la cuenca San Pedro constituye una señal de vulnerabilidad frente a futuros cambios climáticos. Esta condición podría

afectar especialmente a las actividades agropecuarias, los ecosistemas altoandinos y las comunidades que dependen del recurso hídrico estacional.

En conjunto, los resultados permiten sostener que la distribución espacial y temporal de la precipitación constituye un factor explicativo central del balance hídrico en la cuenca San Pedro. Sin embargo, la disponibilidad efectiva de agua estuvo condicionada por la interacción entre precipitación, relieve, evapotranspiración, almacenamiento edáfico y variabilidad climática regional. Por tanto, una mayor precipitación no necesariamente se tradujo en una mayor disponibilidad hídrica. En cuencas andinas de relieve complejo, la pendiente, la rápida escorrentía y la limitada capacidad de retención del suelo pueden reducir la permanencia del agua en el sistema hidrológico.

5. Conclusiones

La investigación evidenció que la distribución temporal y espacial de la precipitación influyó de manera significativa en el comportamiento del balance hídrico de la cuenca San Pedro. La concentración de lluvias en pocos meses del año y las diferencias espaciales de precipitación entre las unidades hidrográficas condicionaron la disponibilidad de agua y explicaron la presencia de zonas con estabilidad hídrica y otras con déficit.

Los resultados obtenidos fueron consistentes con estudios desarrollados en cuencas andinas, los cuales señalan que el relieve, la altitud y la distribución de la precipitación controlan la disponibilidad hídrica. Sin embargo, una mayor precipitación no siempre se tradujo en mayor disponibilidad efectiva de agua, debido a la influencia de la evapotranspiración, la pendiente del terreno, la escorrentía superficial y la limitada capacidad de almacenamiento del suelo.

El análisis temporal mostró que el régimen de precipitación mantuvo un comportamiento relativamente estable durante el período 2003–2025, aunque con una marcada estacionalidad. No obstante, los posibles efectos del cambio climático podrían modificar la intensidad, duración y distribución de las lluvias, especialmente mediante el incremento de la temperatura y la mayor frecuencia de eventos extremos, como sequías o precipitaciones intensas.

La aplicación conjunta de técnicas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica y análisis estadístico permitió evaluar de manera eficiente la dinámica hidrológica de la cuenca San Pedro. Estas herramientas resultaron pertinentes para el análisis de territorios con limitada disponibilidad de estaciones meteorológicas, ya que facilitaron la integración de información climática, topográfica e hidrográfica en el estudio del balance hídrico.

En conjunto, los hallazgos aportan evidencia técnica para fortalecer la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca San Pedro. Además, pueden orientar la planificación territorial, la priorización de zonas vulnerables al déficit hídrico y el diseño de estrategias de adaptación frente a la variabilidad climática en contextos altoandinos.

Referencias

Agência Nacional de Águas. (1989). *Codificação de bacias hidrográficas pelo método de Otto Pfafstetter: Aplicação na ANA.* https://n9.cl/2ue08i

Barry, R., & Chorley, R. (2009). *Atmosphere, weather and climate* (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203871027

Bernal, C. (2016). *Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales (4.ª ed.). Pearson Educación*. https://n9.cl/61tyhj

Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. https://n9.cl/9ql4v

Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G., & Ljung, G. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). Wiley. https://n9.cl/9plxc

Celemín, J. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial: Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía, 18*(1), 11–31. https://n9.cl/1642p

Chang, K. (2019). *Introduction to geographic information systems* (9th ed.). McGraw-Hill Education. https://n9.cl/w3bs2

del Jesus, M., Paz, J., Navas, S., Turienzo, E., Diez-Sierra, J., & Peña, N. (2020). Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de los países andinos. *Ingeniería del Agua, 24*(4), 17. https://doi.org/10.4995/ia.2020.12135

Dingman, S. (2015). *Physical hydrology* (3rd ed.). Waveland Press. https://n9.cl/9k50z7

Drenkhan, F., & Castro, S. (2023). Una aproximación hacia la seguridad hídrica en los Andes tropicales: Desafíos y perspectivas. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente, 12*, A-006. https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202302.a006

Duque-Sarango, P., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B., & Delgado-Fernández, M. (2019). Estimación del balance hídrico de una cuenca andina tropical. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, 29*(1), 56–69. https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05

Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodríguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics, 45*(2), RG2004. https://doi.org/10.1029/2005RG000183

Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology, 37*(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Gaspari, F., Díaz-Gómez, A., & Montealegre-Medina, F. (2021). Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua, 12*(1), 74–112. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-01-03

Harris, I., Osborn, T., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data, 7*, Article 109. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill España. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008

Holdridge, L. (1967). *Life zone ecology* (Rev. ed.). Tropical Science Center. https://n9.cl/06lra

Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). Wiley. https://n9.cl/t97jtp

Luna, V., & Chura, Ch., (2017). *Estudio de balance hídrico enfocado a cuencas productivas de Bolivia: Cuenca piloto del río Keka*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Unidad de Estudios e Investigación Hidrológica. https://n9.cl/nhbf0

Luna-Romero, A., Ramírez, I., Sánchez, C., Conde, J., Agurto, L., & Villaseñor, D. (2018). Distribución espacio-temporal de la precipitación en la cuenca del río Jubones, Ecuador: 1975–2013. *Scientia Agropecuaria, 9*(1), 63–70. https://n9.cl/11ry2n

Montenegro, E., Villazón, M., & Avilés, D. (2025). Análisis de tendencias y evaluación del comportamiento de la precipitación con relación a la ocurrencia de sequías en Cochabamba-Bolivia. *Revista Investigación & Desarrollo, 24*(2), 23–29. https://doi.org/10.23881/idupbo.024.2-3i

Montgomery, D., & Runger, G. (2018). *Applied statistics and probability for engineers* (7th ed.). Wiley. https://n9.cl/wr00k

Mozo, J., Varni, M., Ares, M., & Chagas, C. (2020). Modelado hidrológico de la precipitación-escorrentía en una microcuenca agrícola del partido de Azul, Buenos Aires. *Ciencia del Suelo, 38*(1), 121–132. https://n9.cl/krv02m

NASA Jet Propulsion Laboratory. (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission global 1 arc second* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL1.003

Olivera-Villarroel, S., Andrade-Velásquez, M., & Medrano-Pérez, O. (2021). Exposición a cambios en el clima en Bolivia. *Tecnología y Ciencias del Agua, 12*(6), 90–144. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-03

Pérez, C., & Balderrama, M. (2022). *Planificación hídrica de la cuenca Pampa Huari: Plan Director de la Cuenca Pampa Huari*. Programa Bolivia WATCH, Stockholm Environment Institute y Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Estado Plurinacional de Bolivia. https://n9.cl/15fd9t

Pizarro-Tapia, R., Cabrera-Jofre, C., Morales-Calderón, C., & Flores-Villanelo, J. (2011). Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glaciar en la producción de agua (1963–2006). *Tecnología y Ciencias del Agua, 2*(3), 5–19. https://n9.cl/lo93ai

Platt, T. (2010). Desde la perspectiva de la isla: Guerra y transformación en un archipiélago vertical andino: Macha (norte de Potosí, Bolivia). *Chungará (Arica), 42*(1), 297–324. https://doi.org/10.4067/S0717-73562010000100037

Rodríguez, A., & Pérez, A. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista EAN, 82*, 179–200. https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647

Spennemann, P. (2015). *Estudio sobre la variabilidad temporal y espacial de la humedad del suelo sobre Sudamérica, y su rol en modular la evapotranspiración y la precipitación en distintas escalas temporales* [Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad de Buenos Aires. https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n5751_Spennemann

Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review, 38*, 55–94. https://doi.org/10.2307/210739

Ureña, J., Saavedra, O., & Perales, M. (2020). Estimación de sedimentos en la cuenca Pilcomayo usando un producto de precipitación combinado con sensores abordo de satélites. *Investigación & Desarrollo, 20*(1), 67–80. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312020000100005

Venturini, V., & Krepper, C. (2017). Caracterización de la distribución espacial y temporal de las precipitaciones de la cuenca del río de La Plata. *Tecnología y Ciencias del Agua, 8*(6), 63–75. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-05

Zeballos, G., Soruco, Á., Cusicanqui, D., Joffré, R., & Rabatel, A. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología en Bolivia, 49*(3), 14–26. https://n9.cl/2lep2

Transparencia

Conflicto de interés

El autor declara que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

El autor financia completamente la investigación.

Contribución de autoría

Humberto Álvarez Cabrera: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

El autor intervino de manera activa en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del texto final del artículo.