





Artículo

Evaluación de Productos de Precipitación Satelital sobre la Cuenca del Lago Titicaca

Efrain Lujano¹ , Renny Daniel Diaz² , Bernardino Tapia³ , Apolinario Lujano⁴ ¹*Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.*²*Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco, Perú.*³*Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú.*⁴*Autoridad Nacional del Agua, Puno, Perú.*

Recibido em: 7 de Setembro de 2022 - Aceito em: 24 de Maio de 2023

Resumen

Los productos de precipitación satelital (PPS), proporcionan una fuente alternativa para aplicaciones hidrometeorológicas principalmente en áreas donde los datos de precipitación son limitados. Sin embargo, es necesario evaluar los PPS para cuantificar la incertidumbre en la estimación de la precipitación. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de los PPS GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN sobre la cuenca del Lago Titicaca (CLT). Para la evaluación de los PPS se utilizaron tres métricas de desempeño que evaluaron la precisión (coeficiente de correlación, CC), error (raíz del error cuadrático medio, RMSE) y sesgo (sesgo porcentual, PBIAS). Los resultados indican que PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS son los productos que muestran una mayor concordancia con las mediciones de pluviómetros, pero con un gran sesgo para PERSIANN-CCS. Los hallazgos proporcionan una idea del rendimiento de PPS en la CLT que contribuye a posibles direcciones de mejora de los algoritmos para un mejor servicio en aplicaciones hidrometeorológicas.

Palavras-chave: Cuenca del Lago Titicaca, GSMaP, PERSIANN, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR, precipitación satelital.

Evaluation of Satellite Precipitation Products over the Lake Titicaca Basin

Abstract

Satellite precipitation products (PPS) provide an alternative source for hydrometeorological applications mainly in areas where precipitation data is limited. However, it is necessary to evaluate the PPS to quantify the uncertainty in the precipitation estimate. This study aimed to evaluate the performance of the PPS GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR and PERSIANN over the Lake Titicaca basin (CLT). For the evaluation of the PPS, three performance metrics were used that evaluated the precision (correlation coefficient, CC), error (root mean square error, RMSE) and bias (percentage bias, PBIAS). The results indicate that PERSIANN-CDR and PERSIANN-CCS are the products that show a greater agreement with the measurements of rain gauges, but with a great bias for PERSIANN-CCS. The findings provide insight into the performance of PPS in the CLT that contributes to possible directions for improvement of the algorithms for better service in hydrometeorological applications.

Keywords: Lake Titicaca Basin, GSMaP, PERSIANN, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR, satellite precipitation.

1. Introducción

La precipitación es la variable hidrológica transcendental que conecta la atmósfera con los procesos superficiales de la tierra y juega un papel dominante en el sistema climático (Ramesh, 2012). Su uso es primordial

para la gestión de cuencas hidrográficas, el monitoreo de sequías (Wei *et al.*, 2021), la gestión del riesgo de inundaciones (Alves *et al.*, 2016), la modelización hidrológica (Try *et al.*, 2020), la gestión del recurso hídricos y el pronóstico de inundaciones. El método más directo y de mayor precisión para medir la precipitación es a través de

los pluviómetros (Ryazanova *et al.*, 2021). Sin embargo, la limitada red de pluviómetros en países en vías de desarrollo como Perú, hacen posible una distribución desigual de las mediciones puntuales y no puedan capturar la variabilidad espaciotemporal de los regímenes de precipitación (Buarque *et al.*, 2011).

En la CLT, la baja densidad de estaciones meteorológicas genera una deficiente representación espacial de la precipitación. La discontinuidad en las mediciones, la no homogeneidad de los datos, y la distribución irregular de sitios de medición, incrementan la problemática en la obtención de información base para estudios hidrometeorológicos. Por consiguiente, surge la necesidad de contar con mediciones precisas y continuas de la precipitación en regiones a gran altitud como la CLT. Considerando la escasez e irregularidad de la red de pluviómetros y la dificultad de encontrar y mantener nuevas ubicaciones de pluviómetros, la posibilidad de estimar la precipitación a partir de mediciones satelitales es extremadamente atractivo (Buarque *et al.*, 2011).

Los avances recientes en las técnicas de recuperación de precipitaciones por teledetección basadas en satélites permiten medir las precipitaciones a escala mundial (Lu y Yong, 2020). Además, los PPS se están volviendo más precisos y confiables debido a la combinación de datos de múltiples satélites con mediciones de pluviómetros y mejoras en los algoritmos de recuperación (Liu, 2023). Estos PPS proporcionan una valiosa fuente alternativa para aplicaciones hidrometeorológicas principalmente en áreas donde los datos de precipitación son limitados. Aunque están sesgados, contienen información útil sobre los patrones espacio-temporales (Baez-Villanueva *et al.*, 2020) y cubren gran parte del mundo (Deng *et al.*, 2019). En comparación con las mediciones de pluviómetros que requieren un tiempo considerable para recopilar y verificar la calidad de los datos, las estimaciones obtenidas por satélite están disponibles rápidamente (Buarque *et al.*, 2011) a múltiples escalas de tiempo que incluye por ejemplo al Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (Huffman *et al.*, 2007), la familia de productos Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks (PERSIANN) (Nguyen *et al.*, 2019, 2020; Sadeghi *et al.*, 2021), Global Precipitation Measurement (GPM) (Hou *et al.*, 2014) y Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) (Kubota *et al.*, 2007; Levizzani *et al.*, 2020). No obstante una evaluación de los PPS es muy necesario para los usuarios finales como para los desarrolladores de algoritmos (Deng *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2020).

Varios estudios a nivel mundial han reportado la evaluación de los PPS en áreas con topografía variada y compleja, por ejemplo, en Pakistán Arshad *et al.* (2021) evaluaron los PPS GPM-IMERG y TRMM-3B42, en China Jiang *et al.* (2016) se enfocaron en evaluar el conjunto de datos TMPA y CMORPH, mientras que una eva-

luación integral de la confiabilidad de diecisiete productos de precipitación basados en satélite, reanálisis y medidores (IMERG-F, GSMaP-G, TMPA 3B42, CMORPH-CRT, PERSIANN-CDR, CHIRPS, IMERG-E, IMERG-L, GSMaP-RT, TMPA-RT, PERSIANN-RT, ERA5, ERA-Interim, MERRA2, GPCC, CPC, y CRU) fueron reportado por Wei *et al.* (2021). De igual manera, Zhou *et al.* (2020) revelaron el rendimiento de los productos IMERG y GSMaP en China, mientras que Abd Elhamid *et al.* (2020) evaluaron los registros de lluvias del TRMM y RFE en Sudán. Por su parte, Eini *et al.* (2021) se enfocaron en evaluar el rendimiento de tres PPS sobre Irán, entre ellos SM2RAIN-ASCAT, PERSIANN-CCS y CMORPH, Liu *et al.* (2020) evaluaron los PPS GSMaP, IMERG y CHIRPS en Indonesia, Wang *et al.* (2022) se centraron en estudiar el PPS GSMaP en las montañas Qilian, al noroeste de China, mientras que una evaluación preliminar de la estimación de precipitaciones de GSMaP-NRT y GSMaP-Gauge-NRT sobre China continental fue realizado por Lu y Yong (2020).

Estudios similares, también se han informado sobre América del Sur como en Rozante *et al.* (2010) que incluyeron en su estudio los datos de TRMM, CMORPH e HYDRO, evaluaciones solamente del TRMM (Hobouchian *et al.*, 2017) y también incluyendo datos del TRMM, GPM y GSMaP (Rozante *et al.*, 2018), CMORPH (Ruiz, 2009), TRMM, CMORPH, HYDRO y CoSh (Salio *et al.*, 2015) y una evaluación de productos de precipitación CHIRPSv2, CMORPHv1, ERA5, ERA5-Land, IMERG, MSWEPv2.8, PERSIANN-CCS y PERSIANN-CDR sobre Colombia (Valencia *et al.*, 2023). En Perú, estas prácticas son poco realizadas y en particular se utilizaron el conjunto de datos TRMM y GPM (Asurza *et al.*, 2018) o solamente TRMM (Cabrera *et al.*, 2016; Lujano *et al.*, 2015; Mantas *et al.*, 2015; Zubieta *et al.*, 2018). Sin embargo, una evaluación a largo plazo del rendimiento de los PPS GSMaP-Gauge-NRT (GSMaP-G-NRT en adelante), PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN, que incorporen diferentes escalas de tiempo, intensidades de precipitación y diferentes altitudes, aun no se ha realizado sobre la CLT.

Debido a que en los últimos años se dispone de varios conjuntos de datos de precipitaciones satelitales globales, enfocamos nuestro estudio en la pregunta principal de investigación: ¿Cuál es la precisión y confiabilidad de los productos de precipitación satelital utilizados para estimar la precipitación en la cuenca del Lago Titicaca? Para proporcionar respuestas razonables, este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de los productos de precipitación satelital GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN sobre la cuenca del Lago Titicaca a diferentes escalas tiempo, intensidades de precipitación y diferentes altitudes. Los resultados de la investigación servirán para comprender el rendimiento de los PPS e identificar los PPS más adecuados en sitios con

limitada disponibilidad de datos en la CLT. Los usuarios finales podrán utilizar como una fuente alternativa de mediciones de pluviómetros, y los desarrolladores de algoritmos puedan mejorar y rectificar errores si es necesario. Además, este estudio proporciona respuestas razonables sobre la confiabilidad de los productos de precipitación satelital GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN para aplicaciones hidrometeorológicas en la CLT.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la región hidrográfica de Titicaca Perú - Bolivia. Se caracteriza como un sistema de cuenca endorreica, rodeada por la cordillera oriental y occidental, bordeando el límite oeste con la

región hidrográfica del Pacífico mientras que por el este con la región hidrográfica del Amazonas. La CLT cubre aproximadamente 53919.1 km², con un rango de elevación según el modelo digital de elevación (DEM) de 3796 - 6405 m.s.n.m. (promedio 4190.2 m.s.n.m.; Fig. 1). La mayor parte de la cuenca presenta una topografía plana, con pendientes predominantes menor a 10 % (50% del área total), seguido de pendientes entre 10 a 20% (22% del área total), entre 20 a 30% (15% del área total) y mayor a 30% (13% del área total).

Según la clasificación climática del Perú, la CLT tiene un tipo de clima predominante lluvioso con otoño e invierno seco (SENAMHI, 2020). Para el periodo de análisis (2003-2016), la CLT tuvo una precipitación media anual de 683.3 mm, el 59.5 % de la precipitación anual se da en verano (diciembre - enero - febrero, DEF), mientras que un 2.3 % se da en invierno. (junio - julio - agosto,

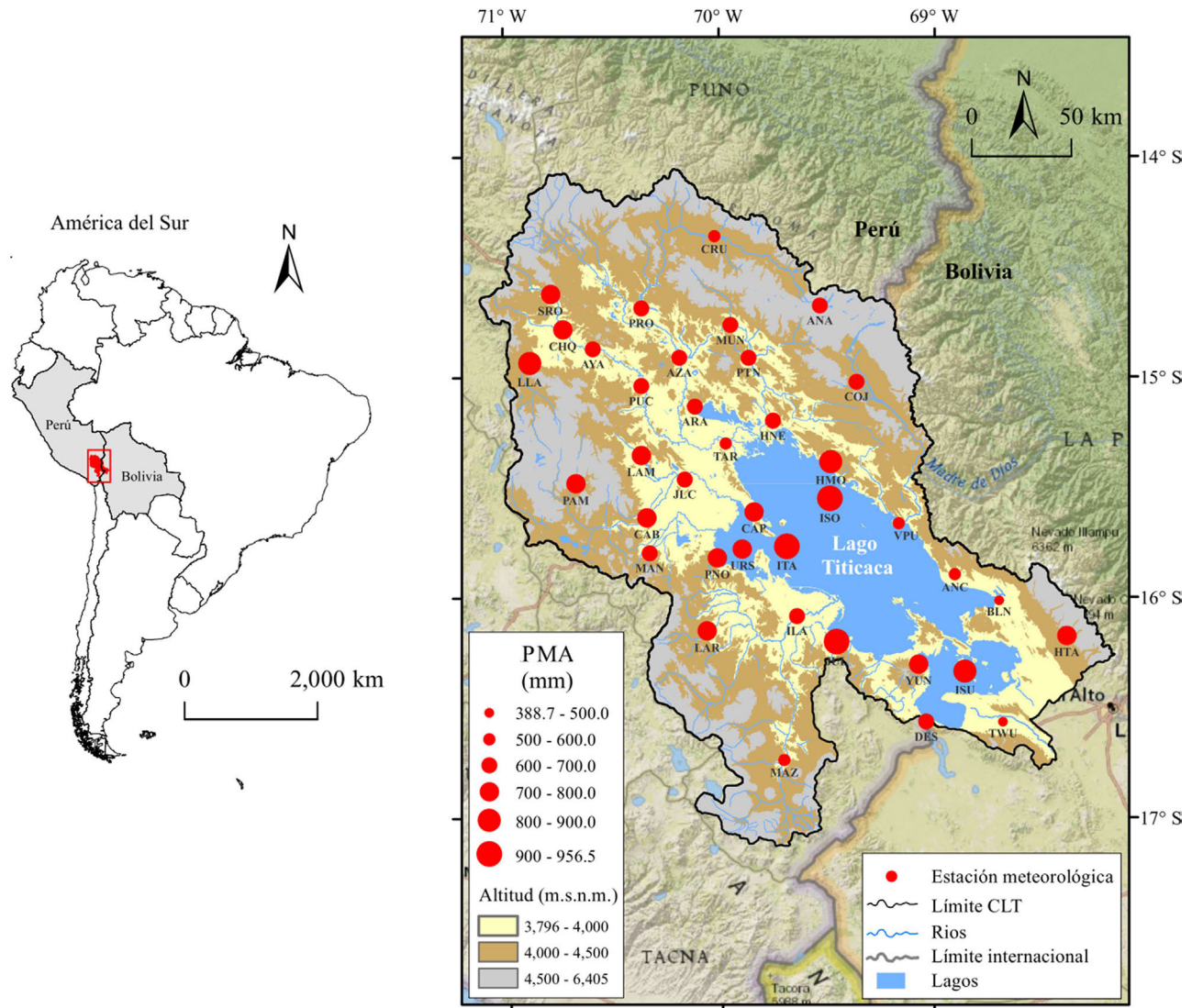


Figura 1 - Distribución espacial de la altitud y ubicación de estaciones meteorológicas en el área de estudio

JJA). En los periodos de transición de húmedo a seco (marzo - abril - mayo, MAM) se dá un 22.1 %, mientras que en el periodo de transición de seco a húmedo (setiembre - octubre - noviembre, SON) se dá el 16.1 % de la precipitación total anual.

2.2. Datos

2.2.1. Información cartográfica

El modelo digital de elevación (DEM) fue generado por el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la NASA a una resolución espacial de ~90 m y se obtuvieron de la plataforma Google Earth Engine (GEE), ID de la imagen CGIAR/SRTM90_V4 (Jarvis *et al.*, 2008).

2.2.2. Mediciones de pluviómetros

Las mediciones de pluviómetros, se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) Perú y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) Bolivia para 38 estaciones meteorológicas convencionales (Fig. 1 y Tabla 1). El periodo de tiempo fue de enero de 2003 a diciembre de 2016.

2.2.3. Productos de precipitación satelital (PPS)

Se utilizaron datos de cuatro PPS para el periodo enero de 2003 a diciembre de 2016. De los cuales, tres PPS fueron desarrollados a partir de sistemas de información de detección remota de precipitaciones utilizando redes neuronales artificiales (PERSIANN; Hsu *et al.*, 1997), entre ellos, Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN), PERSIANN-Cloud Classification System (PERSIANN-CCS; Hong *et al.*, 2004) y PERSIANN-Climate Data Record (PERSIANN-CDR; Ashouri *et al.*, 2015) obtenidos del portal de datos del Centro de Hidrometeorología y Detección Remota (CHRS) (Nguyen *et al.*, 2019) y un PPS Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP). La Tabla 2 resume las características de fuente de datos, resolución, cobertura espacial y temporal, y latencia.

PERSIANN utiliza la técnica de aprendizaje automático conocida como redes neuronales artificiales para determinar la relación entre la temperatura de la cima de la nube detectada remotamente por sensores infrarrojos (IR) de onda larga en satélites de órbita geoestacionaria (GEO), y las tasas de precipitación, con corrección de polarización a partir de lecturas de microondas pasivas (PMW) medidas por satélites en órbita terrestre baja (LEO) (Hsu *et al.*, 1997). Creado a partir del algoritmo PERSIANN, PERSIANN-CCS extrae las características de las nubes locales y regionales a partir de datos IR como única entrada para estimar la precipitación con una resolución más alta (0.04°) que PERSIANN (Hong *et al.*, 2004). PERSIANN-CDR proporciona estimaciones de precipitación diaria a resolución espacial de 0.25° y tiene como objetivo abordar

Tabla 1 - Características de las estaciones meteorológicas.

N°	Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m. s.n.m.)	SENAMHI
1	Ananea (ANA)	-14.68	-69.53	4653	Perú
2	Arapa (ARA)	-15.14	-70.12	3892	Perú
3	Ayaviri (AYA)	-14.87	-70.59	3921	Perú
4	Azángaro (AZA)	-14.91	-70.19	3840	Perú
5	Cabanillas (CAB)	-15.64	-70.35	3877	Perú
6	Capachica (CAP)	-15.62	-69.84	3827	Perú
7	Chuquibambilla (CHQ)	-14.79	-70.73	3899	Perú
8	Cojata (COJ)	-15.03	-69.36	4325	Perú
9	Crucero (CRU)	-14.36	-70.02	4131	Perú
10	Desaguadero (DES)	-16.57	-69.04	3813	Perú
11	Huancané (HNE)	-15.2	-69.75	3860	Perú
12	Huaraya Moho (HMO)	-15.39	-69.48	3818	Perú
13	Ilave (ILA)	-16.09	-69.65	3837	Perú
14	Isla Soto (ISO)	-15.55	-69.49	3820	Perú
15	Isla Suana (ISU)	-16.34	-68.86	3809	Perú
16	Isla Taquile (ITA)	-15.77	-69.69	3818	Perú
17	Juli (JUL)	-16.2	-69.46	3814	Perú
18	Juliaca (JLC)	-15.47	-70.17	3828	Perú
19	Lampa (LAM)	-15.36	-70.37	3929	Perú
20	Laraquero (LAR)	-16.15	-70.07	3952	Perú
21	Llalli (LLA)	-14.94	-70.89	4211	Perú
22	Los Uros (URS)	-15.78	-69.9	3825	Perú
23	Mañazo (MAN)	-15.8	-70.33	3910	Perú
24	Mazocruz (MAZ)	-16.74	-69.71	3963	Perú
25	Muñani (MUN)	-14.77	-69.95	3923	Perú
26	Pampahuta (PAM)	-15.48	-70.68	4292	Perú
27	Progreso (PRO)	-14.69	-70.37	3952	Perú
28	Pucara (PUC)	-15.04	-70.37	3869	Perú
29	Puno (PNO)	-15.82	-70.02	3831	Perú
30	Putina (PTN)	-14.91	-69.87	3853	Perú
31	Santa Rosa (SRO)	-14.62	-70.79	3944	Perú
32	Taraco (TAR)	-15.3	-69.98	3817	Perú
33	Yunguyo (YUN)	-16.31	-69.08	3864	Perú
34	Hichucota (HTA)	-16.18	-68.38	4460	Bolivia
35	Villa Puni (VPU)	-15.67	-69.17	3835	Bolivia
36	El Belen (BLN)	-16.02	-68.7	3833	Bolivia
37	Ancoraimas (ANC)	-15.9	-68.9	3833	Bolivia
38	Tiawanacu (TWU)	-16.57	-68.68	3863	Bolivia

la necesidad de un conjunto de datos de precipitación global consistente, a largo plazo para estudiar los cambios y las tendencias en la precipitación, especialmente los eventos de precipitación extrema, debido al cambio climático y

Tabla 2 - Resumen de PPS seleccionados.

PPS	Fuente de datos	Cobertura espacial	Cobertura temporal	Resolución	Latencia
PERSIANN-CDR	IR	60° N-60° S	1/1/1983 - presente	0.25°/1 d	6 meses
PERSIANN-CCS	IR	60° N-60° S	1/1/2003 - presente	0.04°/1 h	1 hora
PERSIANN	IR, PMW	60° N-60° S	1/3/2000 - presente	0.25°/1 h	2 días
GSMaP-G-NRT	IR, PMW	60° N-60° S	1/4/2000 - presente	0.10°/1 h	4 horas

Nota: Los datos de precipitación diaria GSMaP-G-NRT son el promedio en el tiempo de un día y se almacenan en mm/h. Por lo tanto, debe multiplicarse por 24 cuando desee una integración de lluvia por día. PERSIANN-CCS es un PPS en tiempo real, PERSIANN y GSMaP-G-NRT casi en tiempo real, mientras que PERSIANN-CDR posterior al proceso.

la variabilidad natural, se genera a partir del algoritmo PERSIANN utilizando datos IR históricos de Gridded Satellite B1 (GridSat-B1) y se ajusta utilizando el producto mensual del Proyecto de Climatología de Precipitación Global (GPCP) (Ashouri *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2019, 2020; Sadeghi *et al.*, 2021). GPCP es un conjunto de datos de recuperaciones combinadas de radiómetros pasivos de microondas (PMW) e infrarrojos (IR), y observaciones de pluviómetros (Gruber y Levizzani, 2008). La precipitación mensual del GPCP incluye el análisis de pluviómetros proporcionado por el Centro de Climatología de Precipitaciones Globales (GPCC; Rudolf *et al.*, 1994). La mayoría de las mediciones de referencia son independientes del conjunto de datos Global Precipitation Climatology Centre (GPCC).

Por otro lado, GSMaP es un producto de medición de precipitación global (GPM) de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), con una resolución temporal de una hora y resolución espacial 0.1° (Levizzani *et al.*, 2020). GSMaP proporciona productos de precipitación global de radiómetros de microondas en una órbita terrestre baja y de radiómetros IR en satélites geoestacionarios (Liu *et al.*, 2020). El producto utilizado es el Global Rainfall Map in Near-real-time Gauge-calibrated Rainfall Product (GSMaP-Gauge-NRT) Version 6 y se puede acceder a través del sitio web “JAXA Global Rainfall Watch”. Para GSMaP-Gauge-NRT, se creó un modelo de parámetros de error de precipitación basado en la base de datos histórica de GSMaP-Gauge, los mismos que se usaron para ajustar la estimación y mejorar la precisión de GSMaP-NRT casi en tiempo real, GSMaP-Gauge-NRT no utiliza directamente la medición de calibre, esto hace que sea independiente de las mediciones de calibre terrestre (Lu y Yong, 2020).

2.3. Método

Se realizó un proceso de control de calidad de las mediciones de pluviómetros que consistió en la verificación de límites físicos específicos para el territorio peruano, consistencia interna, y consistencia espacial (Vera *et al.*, 2021). Además, se verificó la homogeneidad en las series de tiempo mediante una inspección visual y el método absoluto. El método absoluto consistió en aplicar de manera independiente la prueba no paramétrica de

CUSUM a los datos de precipitación de 38 estaciones meteorológicas. Para un tiempo de cambio desconocido, CUSUM comprueba si los promedios en dos partes de una serie de tiempo son diferentes (Chiew y Siriwardena, 2005). La homogeneidad se comprobó con datos mensuales luego del relleno de datos faltantes (Tomas-Burguera *et al.*, 2019; Woldesenbet *et al.*, 2017). Las pruebas de homogeneidad, en general, son más robustas cuando se utilizan con datos mensuales (Tomas-Burguera *et al.*, 2019).

Los datos faltantes se rellenaron a través del algoritmo de aprendizaje automático bosques aleatorios incorporado en el paquete MICE (Generates Multivariate Imputations by Chained Equations) para el proyecto R (van Buuren y Groothuis-Oudshoorn, 2011). El porcentaje de datos de precipitación diaria que faltaba en las series de tiempo estaban por debajo del 9 %. Del total de estaciones meteorológicas, 30 tenían el 100 % de datos, seis el 99 %, uno el 96 %, y uno el 91 %. Los datos diarios se agregaron a mensuales y la homogeneidad de las mediciones de pluviómetros se verificaron mediante la prueba no paramétrica de CUSUM con un nivel de confianza del 95 % y nivel de significancia del 5 %. Para este procedimiento se utilizó el programa TREND, que tiene el propósito de facilitar pruebas estadísticas para analizar tendencias, cambios, y aleatoriedad en datos hidrometeorológicos (Chiew y Siriwardena, 2005). Todas las estaciones meteorológicas analizadas tenían una serie de datos homogénea para el período 2003-2016.

La evaluación del rendimiento de los PPS se realizó con datos sin completar y en escalas de tiempo diaria, mensual, por categorías de intensidad, y diferentes altitudes. Se utilizó el enfoque de cuadrícula a punto (Hounguè *et al.*, 2021; Ramadhan *et al.*, 2022; Valencia *et al.*, 2023), es decir, los datos de los PPS fueron extraídos de la cuadrícula de pixel a partir de los puntos de coordenadas de 38 estaciones meteorológicas. No se realizó una corrección de sesgo de los PPS.

Para todas las evaluaciones, se emparejaron los datos extraídos de los diferentes PPS con las mediciones de pluviómetros. Los datos diarios se agregaron a datos mensuales, también se clasificaron por intensidades de precipitación diaria en cuatro categorías según el estándar de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2014), con

ligeras modificaciones (Tan *et al.*, 2015; Tan y Duan, 2017; Zhou *et al.*, 2020): (1) < 1 mm/día (nula o pequeña); (2) $1 \text{ mm} \leq$ precipitación < 2.5 mm/día (ligera); (3) $2.5 \text{ mm} \leq$ precipitación < 10 mm/día (moderada); (4) ≥ 10 mm/día (fuerte). No se consideró la categoría de precipitación ≥ 50 mm/día (extremo) por la poca frecuencia de mediciones del pluviómetro en ese rango. Para evaluar el rendimiento a diferentes altitudes, los puntos de estaciones meteorológicas se dividieron en siete categorías de altitudes: (1) 3809 a 3825 m.s.n.m.; (2) 3812 a 3850 m.s.n.m.; (3) 3850 a 3900 m.s.n.m.; (4) 3900 a 3950 m.s.n.m.; (5) 3950 a 4000 m.s.n.m.; (6) 4000 a 4300 m.s.n.m. y (7) 4300 a 4653 m.s.n.m. En la primera categoría, todas las estaciones meteorológicas se encuentran ubicadas en islas del LT, que representarían a superficies cubierta por agua y el resto de estaciones ubicadas sobre área terrestre.

Se utilizaron tres métricas de desempeño (Tabla 3) que evaluaron la precisión (coeficiente de correlación, CC), error (raíz del error cuadrático medio, RMSE) y sesgo (sesgo porcentual, PBIAS) de los PPS frente a las mediciones de pluviómetros. Este proceso se realizó mediante el uso del paquete hydroGOF disponible para el entorno de programación R (Zambrano-Bigiarini, 2020). El CC denota el grado de correlación entre los PPS y las mediciones del pluviómetro con valores que van de -1 a 1. En general, para una correlación lineal positiva Crovador *et al.* (2021) clasifica como un ajuste débil cuando el $CC < 0.5$, moderado entre 0.5 y 0.7, y fuerte para valores de $CC > 0.7$. La RMSE mide el grado de error, mientras que el PBIAS el sesgo.

3. Resultados y Discusión

3.1. Evaluación diaria

La distribución espacial del CC, RMSE y PBIAS en escala diaria para los PPS (GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN) difiere significativamente de las mediciones de pluviómetros (Fig. 2). El CC fue débil en general, con valores entre 0.14 y 0.49. PERSIANN-CDR mostró la mejor concordancia, seguido

de PERSIANN-CCS. PERSIANN-CDR superó ligeramente a PERSIANN-CCS en el 68% de cuadrículas de pixel. GSMaP-G-NRT tuvo el CC más bajo. Aunque GSMaP-G-NRT fue más confiable en China (Lu y Yong, 2020), en la CLT todavía tiene margen de mejora. PERSIANN fue más concordante que GSMaP-G-NRT en aproximadamente el 63% de las cuadrículas. Todos los PPS evaluados tuvieron baja precisión en comparación con los pluviómetros en escala diaria. Resultados similares fueron reportados por Liu *et al.* (2020), Zhou *et al.* (2020), Tan *et al.* (2015) y Valencia *et al.* (2023). PERSIANN-CDR tuvo el menor error (RMSE: 3.89-6.24 mm/día), mientras que PERSIANN-CCS tuvo el mayor (RMSE: 8.31-13.71 mm/día). Los PPS en tiempo real tuvieron un sesgo mayor que los posteriores al proceso. Se encontró que a mayor resolución espacial el rendimiento de los PPS fue menor.

GSMaP-G-NRT subestimó en la mayoría de cuadrículas (89%), con un rango de PBIAS de -76.3% a -4.6%, y sobrestimó en el 11%, especialmente en PTN, TWU, HTA y BLN. GSMaP muestra baja precisión en estaciones de gran altitud y su desempeño es deficiente en áreas de alta altitud según estudios anteriores (Wang *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2020). En contraste, PERSIANN-CCS sobrestimó significativamente la precipitación, con un rango de PBIAS de 72.6% a 369.2%, mientras que PERSIANN-CDR sobrestimó en la mayoría de las cuadrículas (89%) con un rango de PBIAS de 0.2% a 163.1%. Sin embargo, PERSIANN-CDR subestimó la precipitación en algunas cuadrículas (11%) cerca y en zonas del LT, como ITA, ISO, ISU y JUL. PERSIANN mostró una sobrestimación en el 79 % de las cuadrículas, con un rango de PBIAS de 2.4% a 114.6%, y subestimó en el 21% de las cuadrículas, principalmente en zonas del LT como ITA, ISO, ISU, URS y JUL, así como en áreas cercanas a LT como YUN, HMO y CAP. En general, los PPS en tiempo real presentan un sesgo mayor que los PPS posteriores al proceso y los PPS casi en tiempo real en la CLT.

En la Fig. 3 se presenta una serie de diagramas de dispersión y tres métricas de desempeño de cuatro PPS

Tabla 3 - Métricas estadísticas de desempeño para evaluar los PPS.

Métricas	Ecuación	Unidad	Valor óptimo
Coeficiente de correlación (CC)	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$	-	1
Raíz del error medio cuadrático (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (S_i - O_i)^2}$	mm	0
Sesgo porcentual (PBIAS)	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100$	%	0

Nota: S es la precipitación de satelital; O la precipitación observada; \bar{S} y \bar{O} denotan los valores promedio de S y O respectivamente; n indica el número de pares de datos.

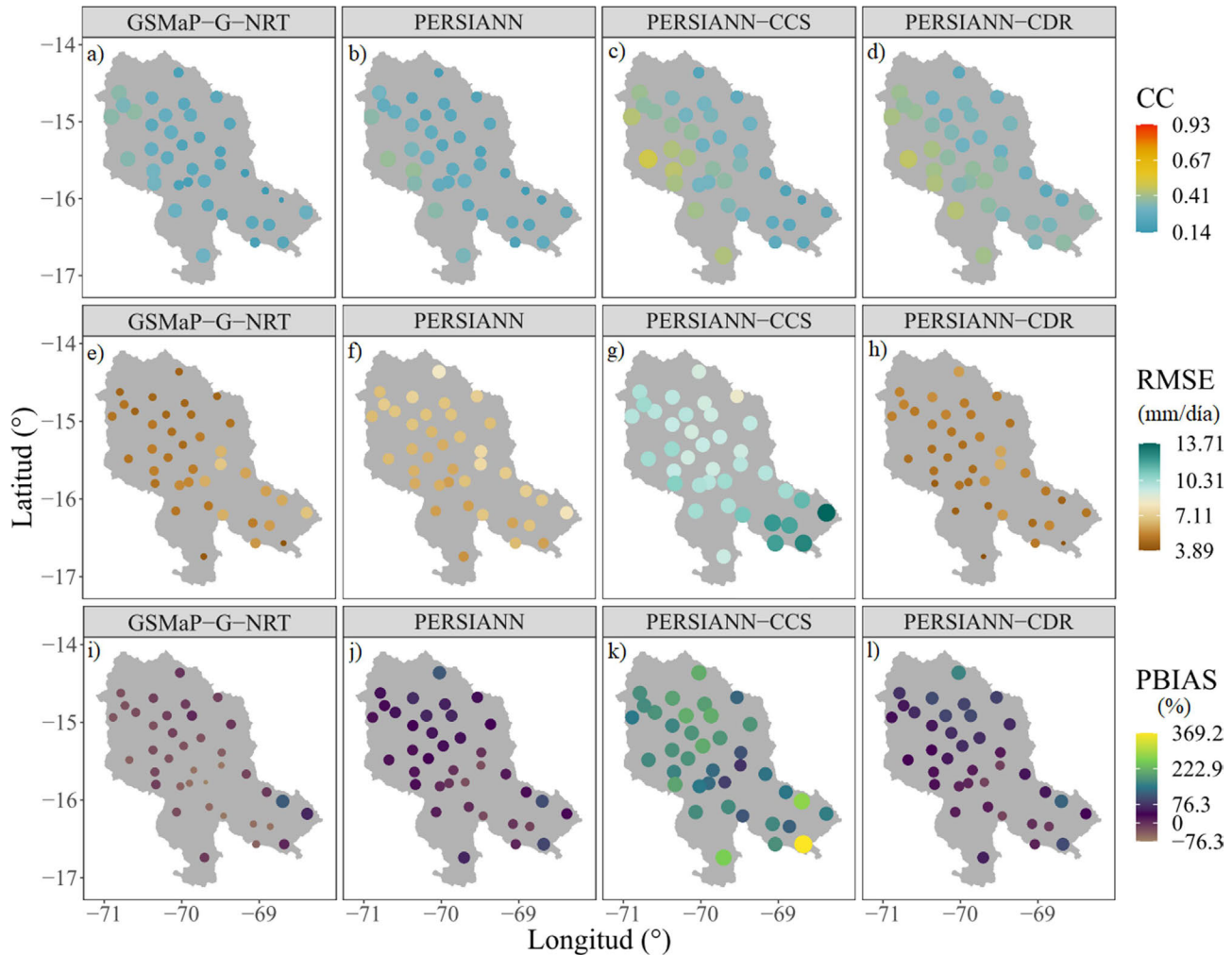


Figura 2 - Distribución espacial del CC (a, b, c, d), RMSE (e, f, g, h) y PBIAS (i, j, k, l) entre estimaciones de los PPS frente a las mediciones de pluviómetros por cada estación meteorológica a escala de tiempo diaria.

frente a las mediciones de pluviómetros en una escala de tiempo diaria. PERSIANN-CCS mostró la mayor precisión con un valor del CC = 0.66, seguido de PERSIANN-CDR (CC = 0.60), GSMaP-G-NRT (CC = 0.56) y PERSIANN (CC = 0.54). En cuanto al RMSE, PERSIANN-CCS tuvo los valores más altos, seguido de PERSIANN, PERSIANN-CDR y GSMaP-G-NRT. En términos de sesgo, PERSIANN-CCS sobrestimó significativamente los eventos de precipitación con un PBIAS = 165.7%, seguido de PERSIANN-CDR (PBIAS = 41.5%) y PERSIANN (PBIAS = 24.7%). Por otro lado, GSMaP-G-NRT subestimó los eventos de precipitación diaria en la CLT. El desempeño de los PPS es generalmente deficiente en áreas de gran altitud y funcionan mejor en latitudes bajas que en latitudes altas (Zhou *et al.*, 2020). Esto se evidencia en la CLT, que se encuentra en una zona de gran altitud, donde los PPS mostraron un bajo rendimiento en las métricas de desempeño.

3.2. Evaluación mensual

La Fig. 4 presenta la distribución espacial del CC y RMSE en una escala mensual en la CLT. Notablemente, los PPS exhibieron correlaciones más altas que en una escala diaria. En general, PERSIANN-CDR mostró la mejor concordancia (CC > 0.70 en el 100% de las cuadrículas evaluadas), seguido de PERSIANN-CCS (92%), PERSIANN (87%) y GSMaP-G-NRT (74%). Los productos basados en IR tuvieron una mejor calidad que los basados en microondas. En cuanto al RMSE, PERSIANN-CDR fue el mejor (29.0-83.2 mm/mes), seguido de GSMaP-G-NRT (25.5-95.6 mm/mes), PERSIANN (44.6-84.0 mm/mes) y PERSIANN-CCS (92.3-192.7 mm/mes). PERSIANN-CDR se destaca por su ajuste utilizando datos mensuales del GPCP. En general, los PPS corregidos por calibre funcionan mejor que otros PPS (Zhou *et al.*, 2020). El desempeño mensual fue superior al diario, lo que concuerda con Zhou *et al.* (2020), Tan *et al.* (2015) y Valencia *et al.* (2023).

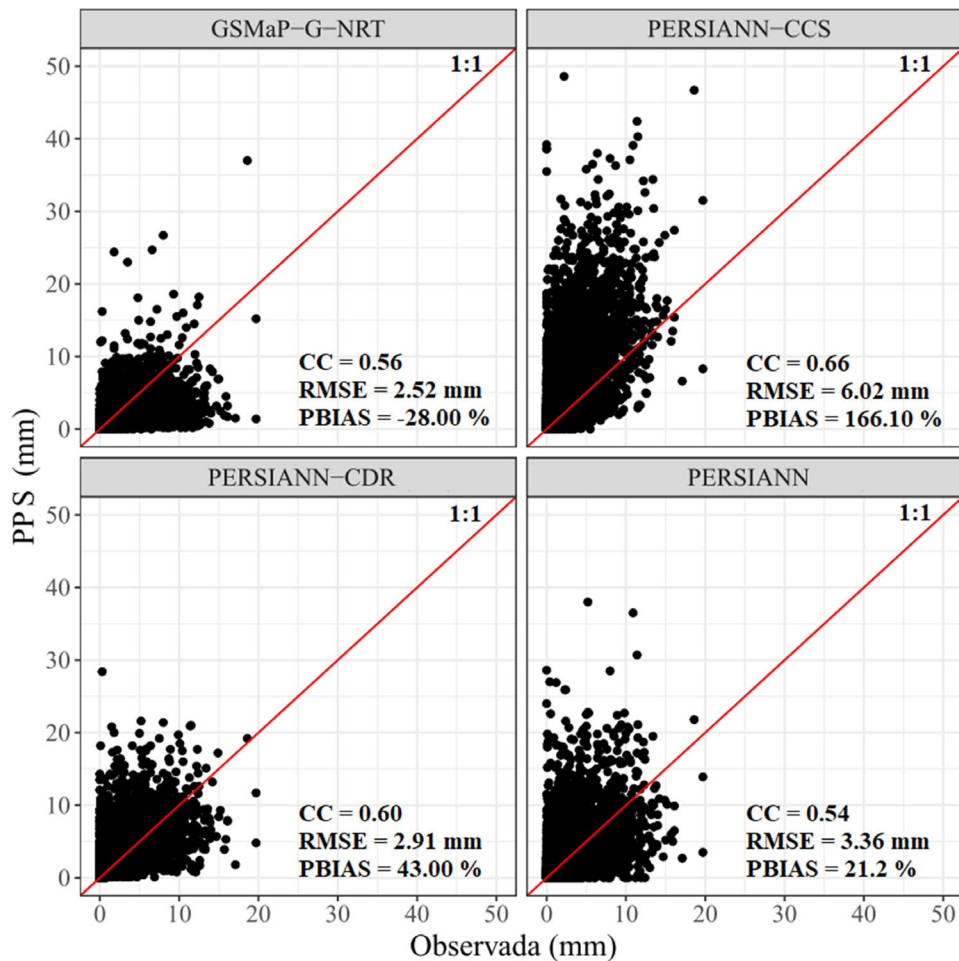


Figura 3 - Diagrama de dispersión de las estimaciones de los PPS GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN frente a mediciones de pluviómetros en la CLT a escala diaria.

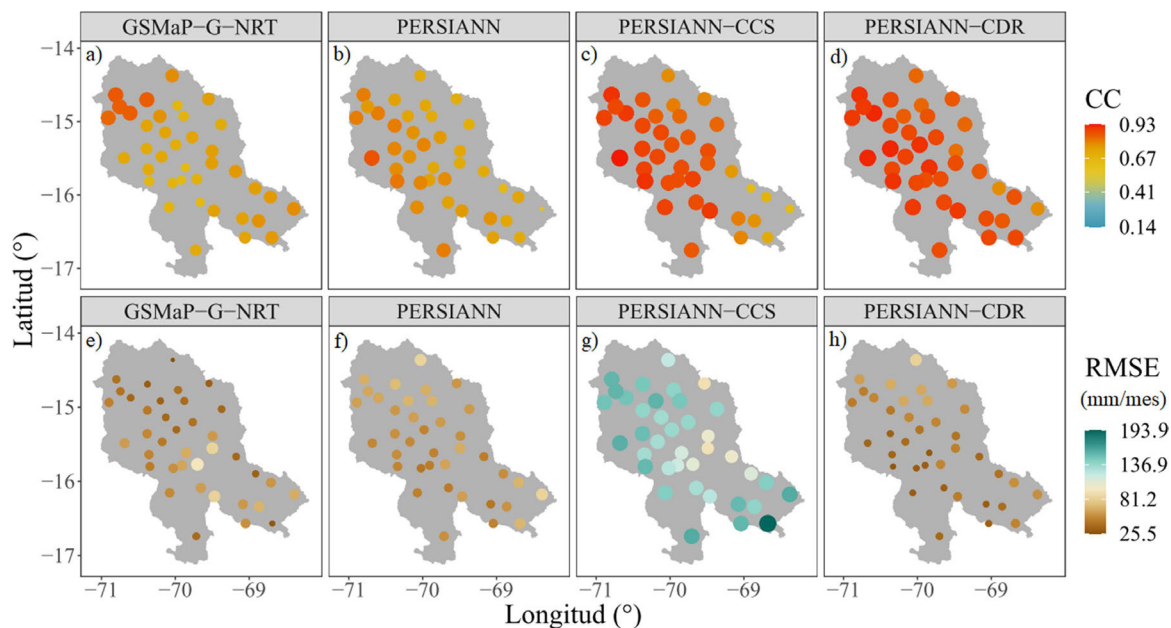


Figura 4 - Distribución espacial del CC (a, b, c, d) y RMSE (e, f, g, h) entre estimaciones de los PPS frente a las mediciones de pluviómetros por cada estación meteorológica a escala de tiempo mensual.

En la Fig. 5 se muestran los resultados de la evaluación mensual de los PPS en comparación con las mediciones de pluviómetros. PERSIANN-CDR fue el más preciso ($CC = 0.93$), seguido de PERSIANN-CCS ($CC = 0.91$) y GSMaP-G-NRT ($CC = 0.85$). PERSIANN tuvo la menor precisión ($CC = 0.81$). Los valores de RMSE fueron más altos para PERSIANN-CCS (127.63 mm/mes), seguido de PERSIANN (45.78 mm/mes) y GSMaP-G-NRT (36.26 mm/mes). PERSIANN-CDR tuvo el valor más bajo de RMSE (35.27 mm/mes). En cuanto al PBIAS, PERSIANN-CCS sobrestimó significativamente la precipitación (161.3%), seguido de PERSIANN-CDR (42.6%) y PERSIANN (20.0%). GSMaP-G-NRT subestimó la precipitación mensual para la CLT (-27.20%).

En resumen, al analizar los diagramas de dispersión diarios (Fig. 3) y mensuales (Fig. 5), se observó que los puntos de dispersión del PPS PERSIANN-CDR estaban más cercanos a la línea 1:1 en comparación con los PPS PERSIANN-CCS, GSMaP-G-NRT y PERSIANN. Esto indica que PERSIANN-CDR mostró una mejor concordancia con las mediciones de pluviómetro. Además, se en-

contró que PERSIANN-CDR tenía un valor de RMSE más bajo en comparación con los otros PPS, aunque presentaba un sesgo significativo. Los PPS y las mediciones de pluviómetros mostraron una correlación alta, pero un gran error y sesgo.

La Fig. 6 muestra la evolución estacional de la precipitación promedio mensual sobre la CLT. En comparación con los datos observados, todos los PPS muestran características unimodales con un pico en enero y un período húmedo que cubre de diciembre a marzo, sin embargo, los PPS PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN son los que exhibieron mayores valores de precipitación (sobrestimaron) de enero a diciembre, a excepción de PERSIANN que fue menor (subestimó) en julio, agosto y setiembre. Para GSMaP-G-NRT, se observaron mayores valores de precipitación en comparación con las mediciones de pluviómetros durante el periodo seco (junio, julio y agosto) (sobrestimación), mientras que se observaron valores menores (subestimación) durante el periodo de lluvias y de transición. En la CLT, PERSIANN-CCS y GSMaP-G-NRT exhibieron mayores sesgos.

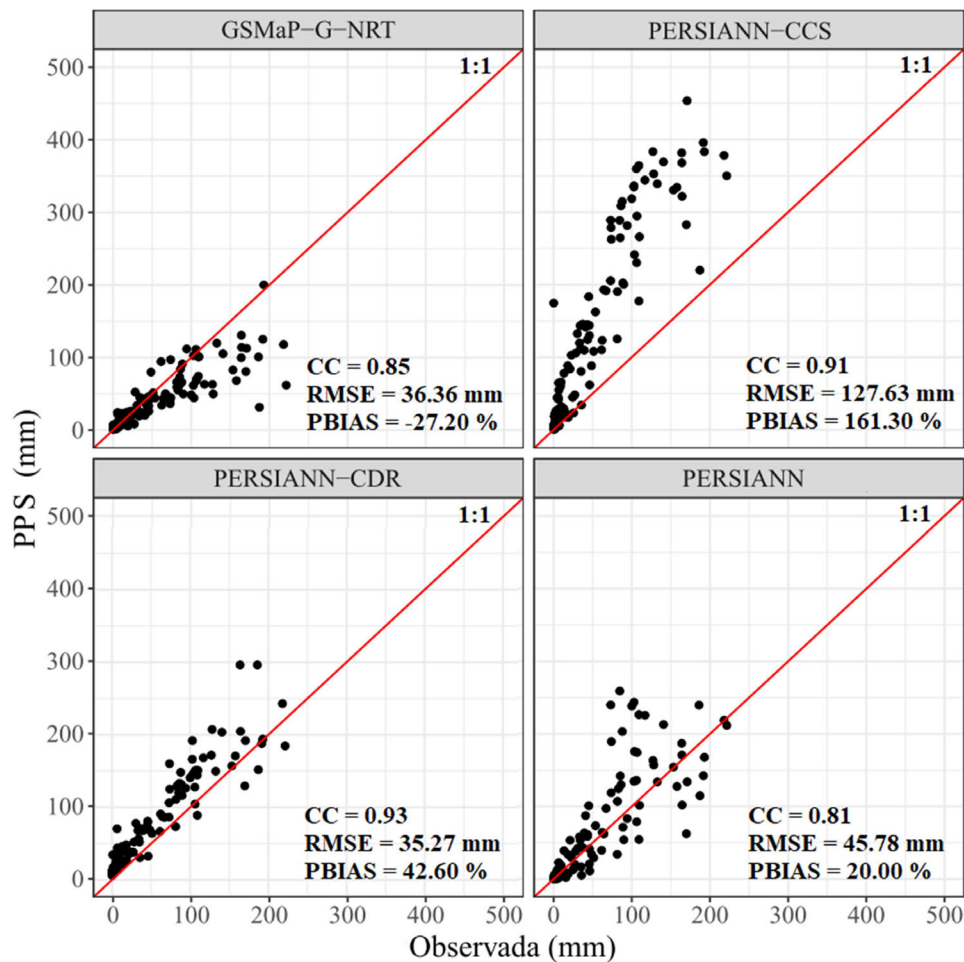


Figura 5 - Diagrama de dispersión de las estimaciones de los PPS GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN frente a mediciones de pluviómetros en la CLT a escala de tiempo mensual.

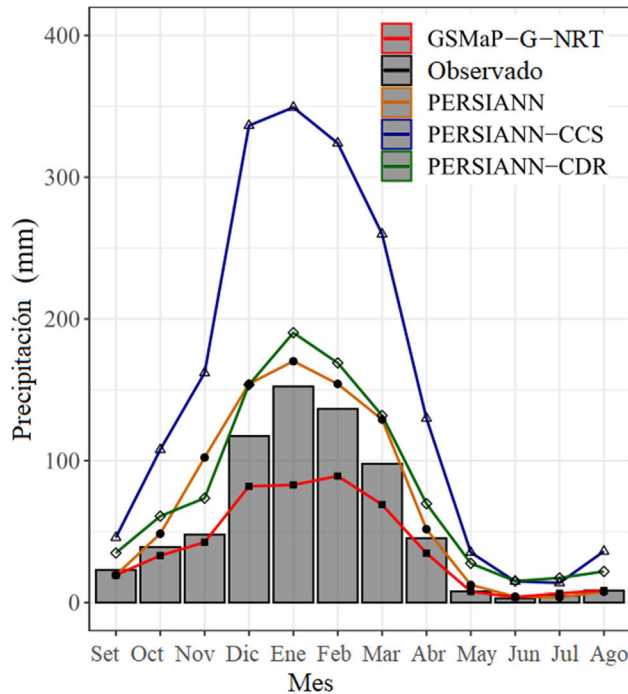


Figura 6 - Variabilidad estacional de la precipitación promedio mensual para el periodo 2003-2016 sobre la CLT. Mediciones de pluviómetros (barra gris) y los PPS (líneas).

3.3. Evaluación de la intensidad de precipitación

La capacidad de los PPS para reproducir la cantidad de precipitación nula o pequeña (< 1 mm/día), ligera ($1 \text{ mm} \leq \text{precipitación} < 2.5$ mm), moderada ($2.5 \text{ mm} \leq \text{precipitación} < 10$ mm) y fuerte (≥ 10 mm/día) se presentan en esta sección. Para intensidades < 1 mm/día, el CC tiende a aumentar para altitudes < 4000 m.s.n.m., y a disminuir para altitudes > 4000 m.s.n.m. Los PPS muestran mayor capacidad para capturar precipitaciones nulas o pequeñas en todas las altitudes, con CC más altos para intensidades < 1 mm/día en comparación con eventos ≥ 1 mm/día (Fig. 7). Estos hallazgos coinciden con los informados por Valencia *et al.* (2023) sobre la mayor capacidad para detectar eventos de precipitación < 1 mm/día.

Los errores aumentan de menor a mayor intensidad para los cuatro PPS. PERSIANN-CCS es mejor para caracterizar precipitaciones ≥ 2.5 mm/día en todas las altitudes. PERSIANN muestra mayores valores de RMSE al capturar precipitaciones fuertes en zonas del LT y altitudes > 4000 m.s.n.m., mientras que GSMaP-G-NRT tiene menores errores para precipitaciones nulas o pequeñas. En todas las altitudes, los PPS sobrestiman los eventos de precipitación nula o pequeña, con PERSIANN-CCS presentando la mayor sobrestimación en este rango. En altitudes > 4300 m.s.n.m., todos los PPS subestiman la precipitación > 10 mm/día. GSMaP-G-NRT tiende a subestimar la precipitación moderada en todas las altitudes y sobrestima la precipitación ligera en ciertos rangos altitudinales,

sin embargo, PERSIANN-CCS sobrestima la precipitación ligera y moderada en todas las altitudes. PERSIANN y PERSIANN-CDR tienden a sobrestimar la cantidad de precipitación ligera y moderada en altitudes mayores a 3850 m.s.n.m. En altitudes de 3809 a 3850 m.s.n.m. PERSIANN y PERSIANN-CDR subestiman (sobrestiman) la precipitación moderada (ligera), incluyendo zonas del LT y próximas a él (Fig. 7).

En general, los PPS muestran mayor concordancia en intensidades < 1 mm/día, pero con un sesgo significativo. El rendimiento de los PPS varía de una altitud a otra, de una intensidad a otra, y de una resolución espacial a otra. Las diferencias del rendimiento también están relacionadas con las diferencias en la resolución espacial (Xu *et al.*, 2022).

3.4. Efectos de la topografía

En relación a los efectos de la topografía, se analizó la precisión de los PPS en la CLT con datos de precipitación diaria. La altitud de todas las estaciones varía entre 3809 y 4653 m.s.n.m. Para determinar el efecto de la altitud, todas las estaciones fueron divididas en siete categorías utilizando la altura como parámetro de separación. En general, el CC tiende a aumentar ligeramente con la altitud para todos los PPS, pero disminuye en altitudes superiores (4300-4653 m.s.n.m) (Fig. 8a). GSMaP-G-NRT mostró un mejor rendimiento en todas las altitudes en comparación con otros PPS (Lu y Yong, 2020), aunque en la CLT obtuvo puntajes bajos de concordancia.

El PBIAS (Fig. 8c) tiende a aumentar con la altitud en la CLT. En Colombia, PERSIANN-CDR muestra un aumento en la sobrestimación con la altitud, mientras que PERSIANN-CCS muestra una disminución en la sobrestimación a medida que aumenta la altitud (Valencia *et al.*, 2023). Esto coincide con el comportamiento de los tres productos PERSIANN, que sobrestiman la precipitación a altitudes superiores a 3850 m.s.n.m. pero disminuyen a altitudes superiores a 4300 m.s.n.m. PERSIANN-CCS sobrestima la precipitación en todas las altitudes, mientras que GSMaP-G-NRT tiende a subestimarla. PERSIANN-CDR y PERSIANN subestiman la precipitación en las cuadrículas del LT y sobrestiman en las áreas terrestres.

La precipitación media anual (PMA) en la CLT para el periodo 2003 y 2016 (Fig. 1 y Fig. 9) varía de 388.7 a 956.5 mm/año según las mediciones de pluviómetros, mientras que los PPS tienen rangos diferentes. PERSIANN-CCS tiene una PMA de 1202 a 1664.7 mm/año, PERSIANN de 540.1 a 1511.2 mm/año, PERSIANN-CDR de 561.0 a 1664.7 mm/año y GSMaP-G-NRT de 223.5 a 2708.0 mm/año. PERSIANN-CCS muestra los valores más altos, mientras que GSMaP-G-NRT muestra los valores más bajos. GSMaP-G-NRT tiene valores de PMA superiores en el lado este de la CLT, mientras que PERSIANN-CDR y PERSIANN tienen un gradiente de precipitación de norte a sur y de noreste a suroeste. PER-

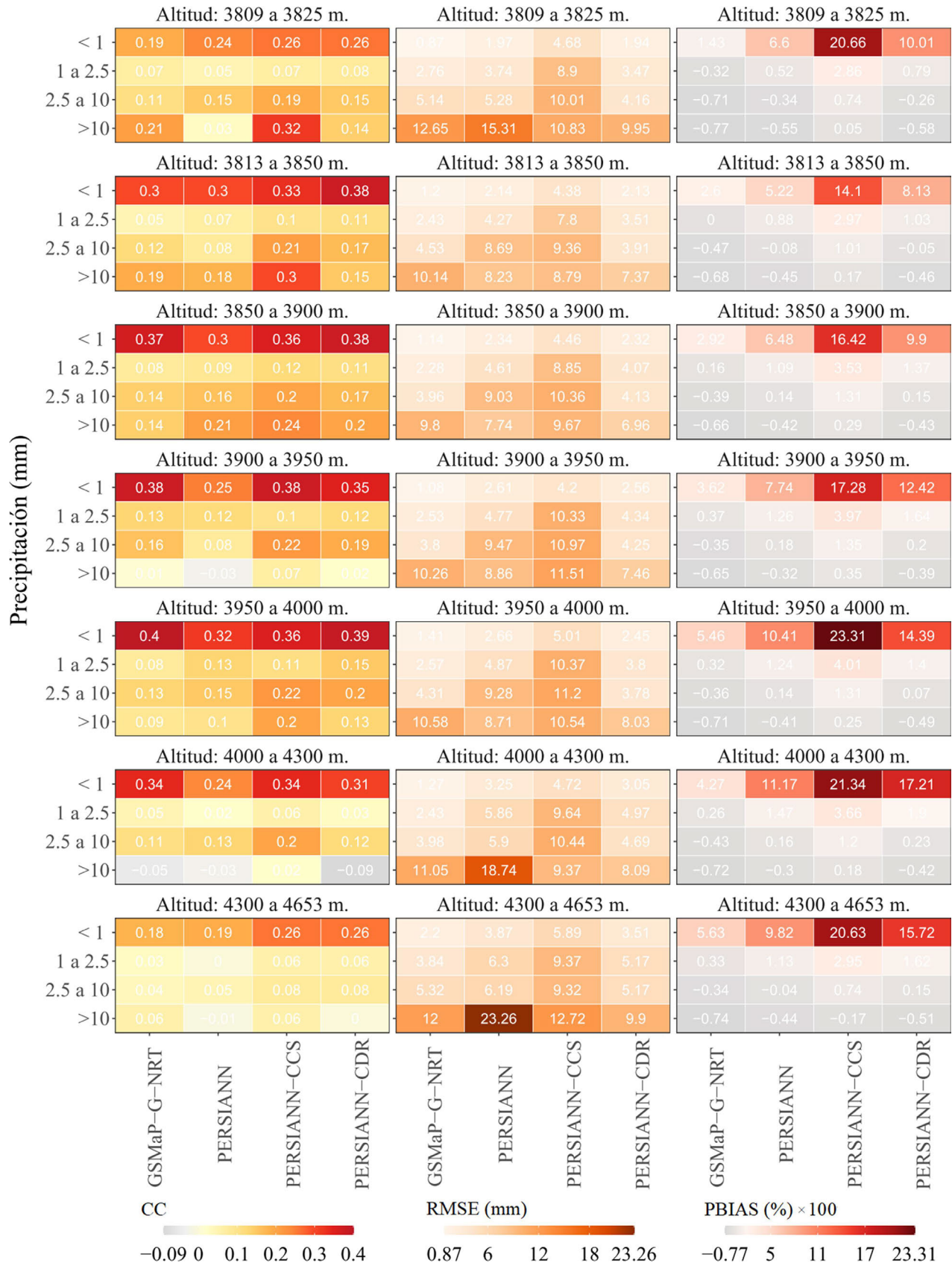


Figura 7 - Métricas de desempeño para diferentes intensidades de precipitación a escala de tiempo diaria y diferentes altitudes.

SIANN-CCS muestra un gradiente de oeste a este, mientras que GSMaP-G-NRT muestra un gradiente de noreste a suroeste. PERSIANN-CDR, PERSIANN y GSMaP-G-NRT concentraron valores más bajos de precipitación en zonas del LT y al suroeste de la CLT, pero fue evidentemente más bajo para GSMaP-G-NRT y PERSIANN. En comparación con las mediciones de pluviómetros (Fig. 8c y Fig. 8d) se confirma que PERSIANN-CDR, PERSIANN y GSMaP-G-NRT subestimaron las cantidades de precipitación en zonas del LT. PERSIANN-CCS captura el gradiente de precipitación en la zona suroeste del LT, pero con un sesgo significativo. La disminución de la precipitación en el LT por parte de PERSIANN-CDR, PERSIANN y GSMaP-G-NRT contradice la mayor cantidad de precipitación en el área cubierta por agua (Fig. 1, Fig. 8d y Fig. 9). Los PPS muestran una tendencia de mayor precipitación con el aumento de la altitud, lo cual difiere de las mediciones de pluviómetros.

La relación entre la altitud y la precipitación no es significativa ($r = 0.02$) en los datos observados, pero la mayoría de los PPS muestran que la precipitación tiende a aumentar con la altitud y ser menor en la zona del LT. La relación altitud-precipitación es significativa para PER-

SIANN-CDR ($r = 0.48$), PERSIANN ($r = 0.47$) y GSMaP-G-NRT ($r = 0.46$), pero no para PERSIANN-CCS ($r = 0.08$).

4. Conclusiones

Los PPS GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN se evaluaron en base a mediciones de pluviómetros en la CLT para el periodo 2003-2016 en escalas de tiempo diaria, mensual, intensidades de precipitación y diferentes altitudes. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

Todos los PPS evaluados simulan básicamente los patrones temporales de precipitación validados por las mediciones de pluviómetros y se desempeñaron mejor a escala de tiempo mensual. En todas las evaluaciones, PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS son los productos que muestran la mayor concordancia con las mediciones de pluviómetros. GSMaP-G-NRT mostró el rendimiento más bajo.

En la escala de tiempo diaria y mensual, los resultados mostraron que PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS estaban más de acuerdo con las mediciones de pluviómetros.

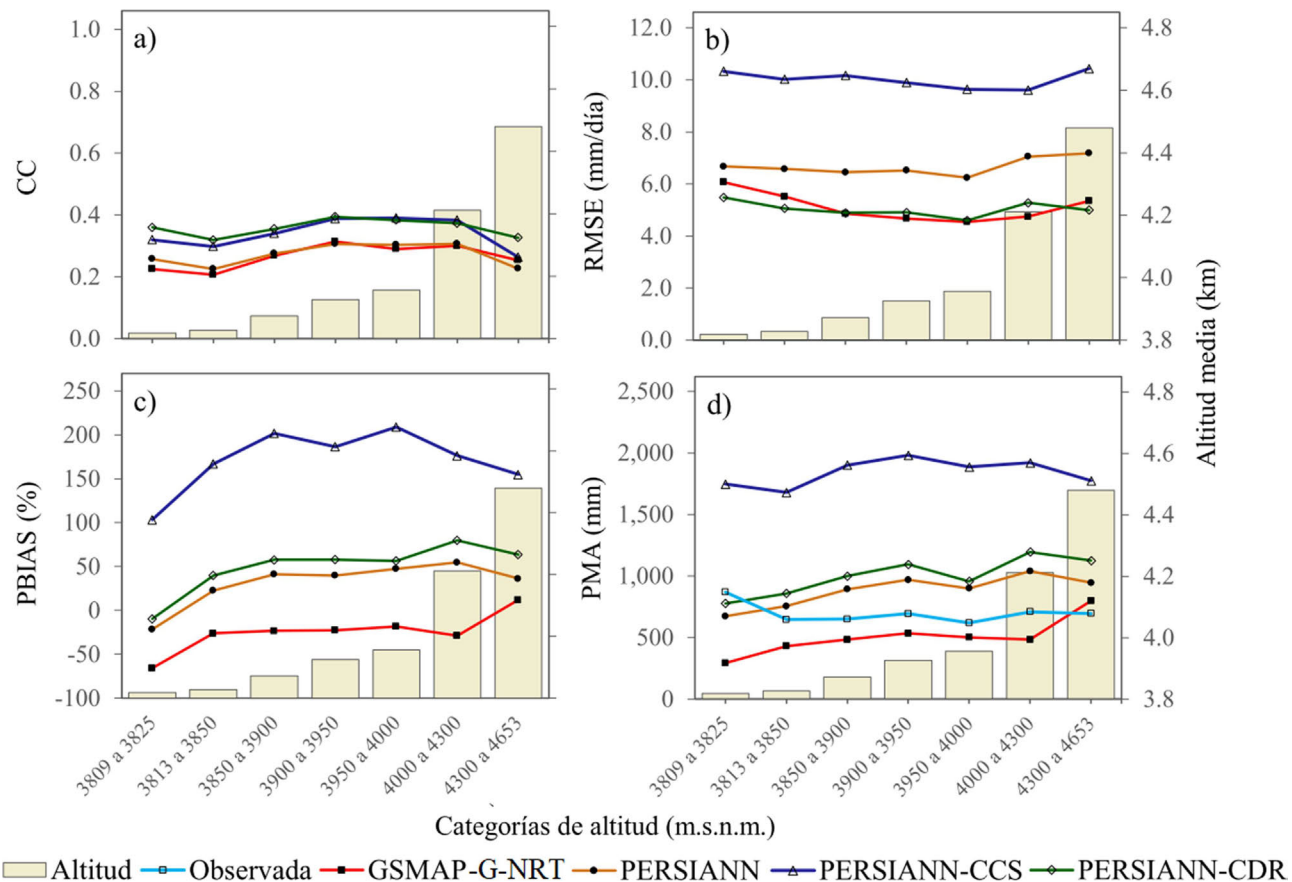


Figura 8 - Métricas de desempeño de los PPS con mediciones de pluviómetros para diferentes categorías de altitud. La cantidad de estaciones para cada categoría de altitud son cuatro (3809 a 3825), doce (3813 a 3850), ocho (3850 a 3900), cinco (3900 a 3950), tres (3950 a 4000), tres (4000 a 4300) y tres (4300 a 4.653) m.s.n.m.

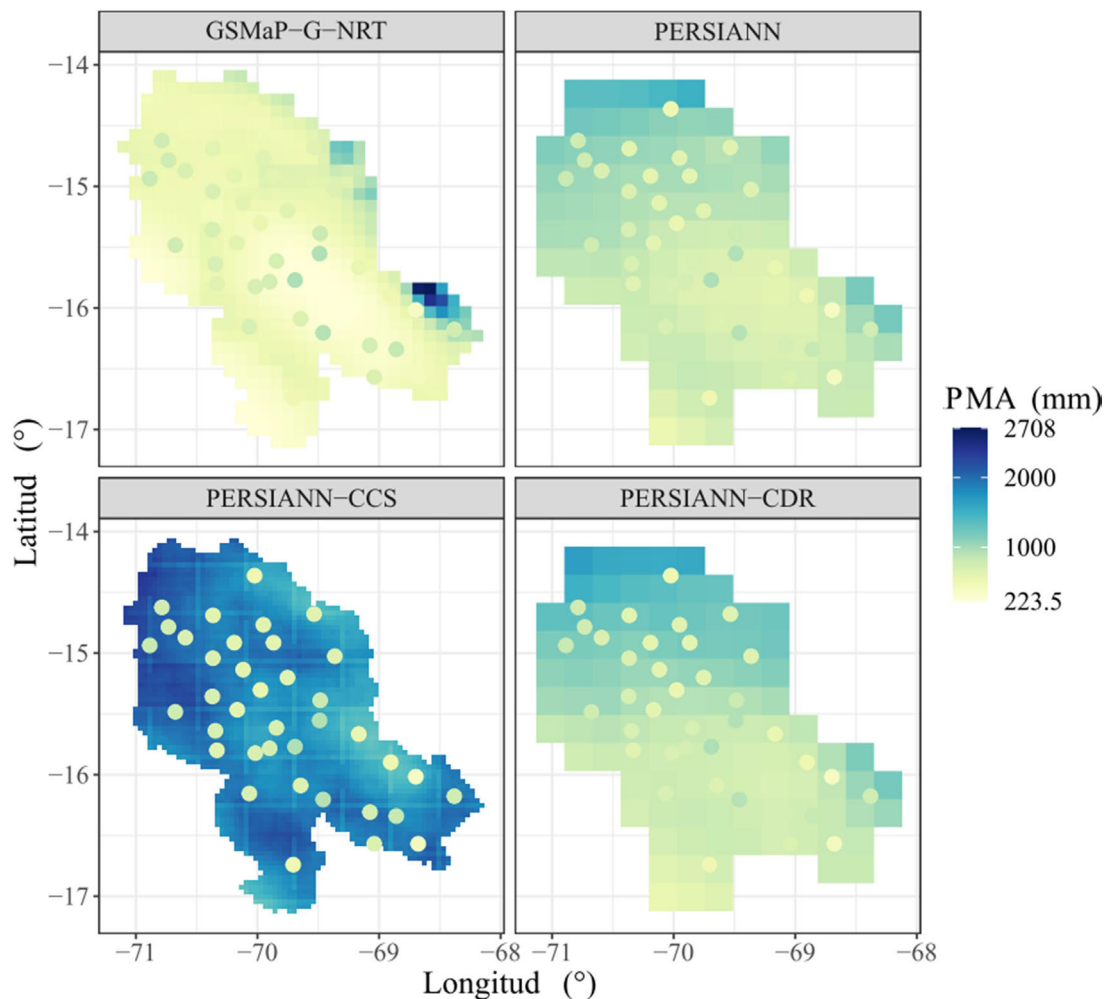


Figura 9 - Variabilidad espacial de la precipitación media anual (PMA) de los PPS y mediciones de pluviómetros para el periodo 2003-2016 sobre la CLT.

tros, pero este último con un gran sesgo. PERSIANN-CCS de alta resolución espacial exhibió grandes sobrestimaciones en medir la cantidad de precipitación, mientras que mayores subestimaciones fueron exhibidas por GSMaP-G-NRT.

En todas las altitudes, el rendimiento de los PPS PERSIANN-CDR, PERSIANN-CCS, PERSIANN y GSMaP-G-NRT fueron más concordantes para intensidades < 1 mm/día de lo que para intensidades ≥ 1 mm/día, pero con un gran sesgo. La precisión de los PPS también puede verse afectada por la intensidad de la lluvia.

Para todos los PPS evaluados, el rendimiento tiende a incrementarse ligeramente con la altitud, y disminuye a mayores altitudes (4325 a 4653 m.s.n.m.). En menores altitudes GSMaP-G-NRT, PERSIANN y PERSIANN-CDR registraron menores cantidades de precipitación, lo que significa que las mediciones de precipitación de los PPS crecen con el aumento de la altitud, lo cual no es consistente con las mediciones de pluviómetros.

Los hallazgos de esta investigación proporcionan una idea del rendimiento de los PPS en la CLT que contribuyen a posibles direcciones de mejora de los algoritmos para un mejor servicio en aplicaciones hidrometeorológicas.

En general, PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS son básicamente los mejores conjuntos de datos y tienen el potencial de ser una fuente alternativa en la CLT, pero se debe tener en cuenta el porcentaje de sesgo. En general existe un margen de error de los PPS que se puede mejorar mediante una corrección del sesgo con mediciones de pluviómetros o mediante el desarrollo de productos grillados incluyendo PPS con mediciones de pluviómetro, y de esta manera utilizar como una fuente confiable en sitios con poca información o sin mediciones.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al SENAMHI Perú (Servicio Nacional de Meteorología e

Hidrología del Perú) y al SENAMHI Bolivia (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia) por proporcionar los datos de los pluviómetros utilizados en este estudio. A UCI CHRS Data Portal - PERSIANN por proporcionar los PPS PERSIANN-CDR, PERSIANN-CCS y PERSIANN y a JAXA/EORC por proporcionar el conjunto de datos de GSMaP-G-NRT.

Referencias

- ABD ELHAMID, A.M.I.; ELTAHAN, A.M.H.; MOHAMED, L.M.E.; HAMOUDA, I.A. Assessment of the two satellite-based precipitation products TRMM and RFE rainfall records using ground based measurements. **Alex. Eng. J.**, v. 59, n. 2, p. 1049-1058, 2020. [doi](#)
- ALVES, A.; SANCHEZ, A.; GERSONIUS, B.; VOJINOVIC, Z.A. Model-based framework for selection and development of multi-functional and adaptive strategies to cope with urban floods. **Procedia Engineering**, v. 154, p. 877-884, 2016. [doi](#)
- ARSHAD, M.; MA, X.; YIN, J.; ULLAH, W.; ALI, G.; *et al.* Evaluation of GPM-IMERG and TRMM-3B42 precipitation products over Pakistan. **Atmospheric Research**, v. 249, n. 105341, 2021. [doi](#)
- ASHOURI, H.; HSU, K.L.; SOROOSHIAN, S.; BRAITHWAITE, D.K.; KNAPP, K.R.; *et al.* PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multi-satellite observations for hydrological and climate studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, p. 69-83, 2015. [doi](#)
- ASURZA, F.; RAMOS, C.; LAVADO, W. Assessment of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Global Precipitation Measurement (GPM) products in hydrological modeling of the Huancane river basin, Peru. **Scientia Agropecuaria**, v. 9, n. 1, p. 53-62, 2018. [doi](#)
- BAEZ-VILLANUEVA, O.M.; ZAMBRANO-BIGIARINI, M.; BECK, H.E.; MCNAMARA, I.; RIBBE, L.; *et al.* A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, n. 111606, 2020. [doi](#)
- BUARQUE, D.C.; DE PAIVA, R.C.D., CLARKE, R.T.; MENDES, C.B.A. comparison of Amazon rainfall characteristics derived from TRMM, CMORPH and the Brazilian national rain gauge network. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, p. 1-12, 2011. [doi](#)
- CABRERA, J.; YUPANQUI, R.T.; RAU, P. Validation of TRMM daily precipitation data for extreme events analysis. The case of Piura watershed in Peru. **Procedia Engineering**, v. 154, p. 154-157, 2016. [doi](#)
- CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L. **TREND Trend/Change Detection Software**. Canberra: CRC for Catchment Hydrology, 2005.
- CROVADOR, C.A.; DOMBROWSKI, N.; SYRING, F.H.; BAUER, G.; DOS REIS, L.M.; *et al.* Avaliação de séries de velocidade do vento de produtos de reanálises climáticas para o Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 689-701, 2021. [doi](#)
- DENG, P.; ZHANG, M.; BING, J.; JIA, J.; ZHANG, D. Evaluation of the GSMaP - Gauge products using rain gauge observations and SWAT model in the Upper Hanjiang River Basin. **Atmospheric Research**, v. 219, p. 153-165, 2019. [doi](#)
- EINI, M.R.; OLYAEI, M.A.; KAMYAB, T.; TEYMOORI, J.; BROCCA, L.; *et al.* Evaluating three non-gauge-corrected satellite precipitation estimates by a regional gauge interpolated dataset over Iran. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 38, n. 100942, 2021. [doi](#)
- GRUBER, A.; LEVIZZANI, V. **Assessment of Global Precipitation Products**. Geneva: World Climate Research Programme Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Radiation Panel, 2008.
- HOBOUCHIAN, M.P.; SALIO, P.; GARCÍA SKABAR, Y.; VILA, D.; GARREAUD, R. Assessment of satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes. **Atmospheric Research**, v. 190, p. 43-54, 2017. [doi](#)
- HONG, Y.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S.; GAO, X. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 43, p. 1834-1853, 2004. [doi](#)
- HOU, A.Y.; KAKAR, R.K.; NEECK, S.; AZARBARZIN, A.A.; KUMMEROW, C.D.; *et al.* The global precipitation measurement mission. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 5, p. 701-722, 2014. [doi](#)
- HOUNGUÈ, N.R.; OGBU, K.N.; ALMORADIE, A.D.S.; EVERS, M. Evaluation of the performance of remotely sensed rainfall datasets for flood simulation in the trans-boundary Mono River catchment, Togo and Benin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 36, n. 100875, 2021. [doi](#)
- HSU, K.; GAO, X.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 36, p. 1176-1190, 1997. [doi](#)
- HUFFMAN, G.J.; ADLER, R.F.; BOLVIN, D.T.; GU, G.; NELKIN, E.J.; *et al.* The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2007. [doi](#)
- JARVIS, A.; REUTER, H.I.; NELSON, A.; GUEVARA, E. **Hole-filled SRTM for the Globe. Version 4**. Software CGIAR-CSI SRTM 90 m Database, 2008.
- JIANG, S.H.; ZHOU, M.; REN, L.L.; CHENG, X.R.; ZHANG, P.J. Evaluation of latest TMPA and CMORPH satellite precipitation products over Yellow River Basin. **Water Science and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 87-96, 2016. [doi](#)
- KUBOTA, T.; SHIGE, S.; HASHIZUME, H.; AONASHI, K.; TAKAHASHI, N.; *et al.* Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP project: production and validation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 7, p. 2559-2275, 2007. [doi](#)
- LEVIZZANI, V.; KIDD, C.; KIRSCHBAUM, D.B.; KUMMEROW, C.D.; NAKAMURA, K.; *et al.* **Satellite Precipitation Measurement**. Berlin: Springer, 2020.
- LIU, C.Y.; ARYASTANA, P.; LIU, G.R.; HUANG, W.R. Assessment of satellite precipitation product estimates over Bali Island. **Atmospheric Research**, v. 244, n. 105032, 2020. [doi](#)

- LIU, Z. Accuracy of satellite precipitation products in data-scarce Inner Tibetan Plateau comprehensively evaluated using a novel ground observation network. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 47, n. 101405, 2023. doi
- LU, D.; YONG, B. A preliminary assessment of the gauge-adjusted near-real-time GSMaP precipitation estimate over Mainland China. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 1-17, 2020. doi
- LUJANO, E.; FELIPE, O.G.; LUJANO, A.; QUISPE, J.P. Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú. **Revista de Investigaciones Altoandinas**, v. 17, n. 2, p. 221-228, 2015. doi
- MANTAS, V.M.; LIU, Z.; CARO, C.; PEREIRA, A.J.S.C. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 132-145, 2015. doi
- NGUYEN, P.; OMBADI, M.; GOROOH, V.A.; SHEARER, E.J.; SADEGHI, M.; *et al.* PERSIANN dynamic infrared-rain rate (PDIR-now): A near-real-time, quasi-global satellite precipitation dataset. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 12, p. 2893-2906, 2020. doi
- NGUYEN, P.; SHEARER, E.J.; TRAN, H.; OMBADI, M.; HAYATBINI, N.; *et al.* The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. **Scientific Data**, v. 6, n. 180296, p. 1-10, 2019. doi
- RAMADHAN, R.; YUSNAINI, H.; MARZUKI, M.; MUHARSYAH, R.; SURYANTO, W.; *et al.* Evaluation of GPM IMERG performance using gauge data over Indonesian maritime continent at different time scales. **Remote Sensing**, v. 14, n. 5, p. 1-24, 2022. doi
- RAMESH, T. **Floods in a Changing Climate: Extreme Precipitation**. New York: Cambridge University Press, 2012.
- RYAZANOVA, A.; VOROPAY, N.; DYUKAREV, E. Bias-corrected monthly precipitation data over South Siberia for 1979-2019. **Data in Brief**, v. 38, n. 107440, 2021. doi
- ROZANTE, J.R.; MOREIRA, D.S.; DE GONCALVES, L.G.G.; VILA, D.A. Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885-894, 2010. doi
- ROZANTE, J.R.; VILA, D.A.; CHIQUETTO, J.B.; FERNANDES, A.A.; ALVIM, D.S. Evaluation of TRMM/GPM blended daily products over Brazil. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 1-17, 2018. doi
- RUDOLF, B.; HAUSCHILD, H.; RUETH, W.; SCHNEIDER, U. Terrestrial precipitation analysis: Operational method and required density of point measurements. **Global Precipitation and Climate Change**, v. 26, p. 173-186, 1994. doi
- RUIZ, J.J. Evaluación de diferentes metodologías para la calibración de las estimaciones de precipitación CMORPH sobre Sudamérica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 4, p. 473-488, 2009. doi
- SADEGHI, M.; NGUYEN, P.; NAEINI, M.R.; HSU, K.; BRAITHWAITE, D.; *et al.* PERSIANN-CCS-CDR, a 3-hourly 0.04° global precipitation climate data record for heavy precipitation studies. **Scientific Data**, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2021. doi
- SALIO, P.; HOBOUCHIAN, M.P.; GARCÍA, Y.; VILA, D. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 146-161, 2015. doi
- SENAMHI. **CLIMAS DEL PERÚ - Mapa de Clasificación Climática Nacional**. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2020.
- TAN, M.L.; DUAN, Z. Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, 2017. doi
- TAN, M.L.; IBRAHIM, A.L.; DUAN, Z.; CRACKNELL, A.P.; CHAPLOT, V. Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over Malaysia. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1504-1528, 2015. doi
- TOMAS-BURGUERA, M.; VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERÍA, S.; REIG, F.; LATORRE, B. Reference 634 crop evapotranspiration database in Spain (1961-2014). **Earth Syst. Sci. Data**, v. 11, p. 1917-1930, 2019. doi
- TRY, S.; TANAKA, S.; TANAKA, K.; SAYAMA, T.; OEURNG, C.; *et al.* Comparison of gridded precipitation datasets for rainfall-runoff and inundation modeling in the Mekong River Basin. **PLoS ONE**, v. 15, n. 1, p. 1-13, 2020. doi
- VALENCIA, S.; MARÍN, D.E.; GÓMEZ, D.; HOYOS, N.; SALAZAR, J.F.; *et al.* Spatio-temporal assessment of gridded precipitation products across topographic and climatic gradients in Colombia. **Atmospheric Research**, v. 285, n. 106643, 2023. doi
- VAN BUUREN, S.; GROOTHUIS-OUDSHOORN, K. Mice: Multivariate imputation by chained equations in R. **Journal of Statistical Software**, v. 45, n. 3, p. 1-67, 2011. doi
- VERA, L.; VILLEGAS, E.; ORIA, C.; ARBOLEDA, F. **Control de Calidad de Datos de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas Automáticas en el Centro de Procesamiento de Datos del SENAMHI**. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2021.
- WANG, H.; ZANG, F.; ZHAO, C.; LIU, C.A. GWR downscaling method to reconstruct high-resolution precipitation dataset based on GSMaP-Gauge data: A case study in the Qilian Mountains, Northwest China. **Science of the Total Environment**, v. 810, n. 152066, 2022. doi
- WEI, L.; JIANG, S.; REN, L.; WANG, M.; ZHANG, L.; *et al.* Evaluation of seventeen satellite-, reanalysis-, and gauge-based precipitation products for drought monitoring across mainland China. **Atmospheric Research**, v. 263, n. 105813, 2021. doi
- WOLDESENBET, T.A.; ELAGIB, N.A.; RIBBE, L.; HEINRICH, J. Gap filling and homogenization of climatological datasets in the headwater region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 4, p. 2122-2140, 2017. doi
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Observation of present and past weather; state of the ground. In: **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. Geneva: WMO, p. 460, 2014.
- XU, X.; FREY, S.K.; MA, D. Hydrological performance of ERA5 and MERRA-2 precipitation products over the Great Lakes Basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 39, n. 100982, 2022. doi

ZAMBRANO-BIGIARINI, M. **hydroGOF: Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series**. R package software version 0.4-0, 2020.

ZHOU, Z.; GUO, B.; XING, W.; ZHOU, J.; XU, F.; *et al.* Comprehensive evaluation of latest GPM era IMERG and GSMaP precipitation products over mainland China. **Atmospheric Research**, v. 246, n. 105132, 2020. doi

ZUBIETA, R.; LAQUI, W.; LAVADO, W. Hydrological modeling using observed and satellite precipitation datasets for the Ilave River basin, 2011-2015 period, Puno, Peru. **Tecnología y Ciencias Del Agua**, v. 9, n. 5, p. 85-101, 2018. doi

Recursos de Internet

CHRS DATA PORTAL, <https://chrsdata.eng.uci.edu/>.

JAXA GLOBAL RAINFALL WATCH, <http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>.

GOOGLE EARTH ENGINE, <https://earthengine.google.com/>.
SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ, <https://www.senamhi.gob.pe/>.

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DE BOLIVIA, <https://www.senamhi.gob.bo/>.

GLOBAL PRECIPITATION CLIMATOLOGY CENTRE, <http://kunden.dwd.de/GPCC/Visualizer>.

TREND, <https://toolkit.ewater.org.au/Tools/TREND>



License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.