

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-03-05

Artículos

**Validando productos de precipitación diaria estimados
por sensoramiento remoto con estaciones
pluviométricas en la cuenca Vilcanota, Perú**

**Validating daily precipitation products estimated by
remote sensing with rainfall stations in the Vilcanota
basin, Peru**

Eber Risco¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6046-8332>

Waldo Lavado², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0051-0743>

Pedro Rau³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1004-6729>

Thomas Condom⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4408-8580>

¹Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú / Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CITA), Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Lima, Perú, eber.risco.sence@gmail.com

²Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú / Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima, Perú, wlavado@senamhi.gob.pe

³Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CITA), Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Lima, Perú, prau@utec.edu.pe

⁴Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, INRAE, Grenoble-INP, Institut des Géosciences de l'Environnement, Grenoble, France, of Environmental Geosciences de l'Université Grenoble Alpes, Grenoble, Francia, thomas.condom@ird.fr

Autor para correspondencia: Eber Risco, eber.risco.sence@gmail.com

Resumen

La precipitación representa uno de los elementos más importantes dentro del ciclo del agua para la representación de la oferta hídrica en cuencas hidrográficas. Debido a una inadecuada distribución de estaciones, seguridad, relieve, accesibilidad, etcétera, existe escasez de estos datos en cuencas andinas del Perú. Esto representa uno de los principales inconvenientes que afrontan los investigadores en ciencias de la tierra y ciencia del clima para la representación de manera espacial y temporal de la precipitación. En los últimos años, el avance de las tecnologías permite la estimación de las variables hidrológicas a partir de técnicas de sensoramiento remoto. Estos datos deben ser evaluados con observaciones meteorológicas. En esta investigación se evaluaron 11 productos de precipitación estimada por sensoramiento remoto (PPEDsr) que estiman la precipitación. La evaluación de los PPEDsr se realizó para el periodo 1981-2018 a paso de tiempo: diario, de diez días y mensual. Se utilizaron los estadísticos descriptivos: error medio (ME), correlación de Pearson (R), raíz del error medio cuadrático (RMSE), error absoluto medio (MAE) y BIAS relativo (BIAS). Además, de los estadísticos categóricos: probabilidad de detección (POD), tasa de falsas alarmas

(FAR), índice de éxito crítico (CSI). Los productos MSWEP, CHIRPS, TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR resultaron ser más eficientes para representar la variabilidad espacial de las precipitaciones diarias y acumuladas en la cuenca del Vilcanota. Los datos de sensoramiento remoto mostraron ser útiles para representar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación la cuenca Vilcanota, los resultados sugieren que los datos de sensoramiento remoto podrían ser utilizados para simular el balance hidrológico en cuencas hidrográficas de montaña andinas con escasa información in-situ.

Palabras clave: variabilidad espacio-temporal, MSWEP, CHIRPS.

Abstract

Precipitation represents one of the most important elements within the water cycle for assessing water supply in hydrographic basins. Due to inadequate station distribution, security, terrain, accessibility, etc., there is a scarcity of this data in the Andean basins of Peru. This represents one of the main challenges faced by earth scientists and climatologists in spatially and temporally representing precipitation. In recent years, technological advancements have enabled the estimation of hydrological variables through remote sensing techniques. These data need to be evaluated alongside meteorological observations. This research assessed 11 products of remotely sensed estimated precipitation (RSEP) that estimate precipitation. The evaluation of RSEP was conducted for the period 1981-2018 at daily, ten-day, and monthly time steps. Descriptive statistics were used: mean error (ME), Pearson correlation (R), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and relative bias

(BIAS). Additionally, categorical statistics were employed: Probability of Detection (POD), False Alarm Rate (FAR), Critical Success Index (CSI). The products MSWEP, CHIRPS, TRMM-3B42, PERSIANN-CDR were found to be more efficient in representing the spatial variability of daily and accumulated precipitation in the Vilcanota basin. Remote sensing data proved useful in representing the spatiotemporal variability of precipitation in the Vilcanota basin; the results suggest that remote sensing data could be used to simulate the hydrological functioning of Andean mountainous catchments with limited in-situ information.

Keywords: Spatio-temporal variability, MSWEP, CHIRPS.

Recibido: 04/09/2023

Aceptado: 14/03/2024

Publicado *online*: 27/03/2024

Introducción

La precipitación es uno de los elementos esenciales dentro del ciclo hidrológico (Abdallah & Rosenberg, 2019; Chen, Xu, Wang, & Shen, 2019; Zhang *et al.*, 2019a). Sin embargo, uno de los principales inconvenientes que afrontan los investigadores en ciencias de la tierra es la caracterización de la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones (Kim, Lee, Kim, & Kang, 2019; Marzen, Iserloh, De Lima, Fister, & Ries, 2017). Usualmente, los datos de precipitación se obtiene a partir de mediciones en estaciones pluviométricas (Lakshmi, 2004), esto hace que la representación sea compleja en zonas andinas, ya que la

instalación de estaciones y su gestión es costosa, y se presentan inconvenientes de accesibilidad para la instalación en lugares remotos, que genera una escasez de información tanto espacial como temporal. La escasez de datos ocasiona enormes problemas en la obtención de series continuas de datos de precipitación, e impacta en los análisis hidrológicos y de calidad de agua, los cuales son fundamentales para la gestión de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas (Bisselink, Zambrano-Bigiarini, Burek, & De Roo, 2016; Valverde-Ramírez, De-Campos-Velho, & Ferreira, 2005).

En los últimos años, el avance de las tecnologías permite la estimación de la precipitación mediante técnicas de sensoramiento remoto (Lakshmi, 2004; Tang, Tian, Yan, & Habib, 2015). Varios productos de precipitación estimada a partir de datos de sensoramiento remoto (PPEDsr) están disponibles en las últimas décadas y permiten monitorear la precipitación a escala global. Sin embargo, los PPEDsr son mediciones indirectas a partir de constelaciones de satélites y/o sensores (microondas pasivas e infrarrojas) a bordo de satélites geosíncronicos, y están sujetos a ciertas limitaciones, que ocasionan la captura correcta de eventos de precipitaciones leves y de corto plazo (Gebregiorgis & Hossain, 2013), que pueden introducir errores en las estimaciones de las precipitación en regiones áridas y/o durante las estaciones secas (Satgé *et al.*, 2017).

A partir de la aparición de los PPEDsr se han realizado diversos estudios para evaluar la eficiencia de estos productos sobre diferentes regiones. La manera más usual es mediante la comparación y validación con estaciones pluviométricas (Paredes-Trejo, Barbosa, & Lakshmi-Kumar, 2017; Mahmoud, Hamouda, & Mohamed, 2019; Lekula,

Lubczynski, Shemang, & Verhoef, 2018; Sultana & Nasrollahi 2018; Tan & Santo 2018) y validación de valores extremos (Fang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019b) en áreas con topografías complejas, como las zonas de montaña (Wang, Ding, Zhao, & Wang, 2019; Iqbal & Athar 2018), usando modelos hidrológicos (Satgé, Ruelland, Bonnet, Molina, & Pillco, 2019; Jiang & Bauer-Gottwein, 2019; Zhu *et al.*, 2018) con resultados adecuados, por lo cual se emplean para diversas aplicaciones en el área de los recursos hídricos.

Los PPEDsr se utilizan en estudios de disponibilidad hídrica, modelamiento hidrológico con escasa información (Li, Christakos, Ding, & Wu, 2018; Sun, Yuan, & Yang, 2018) y monitoreo de sequía (Zhong *et al.*, 2019), entre otras aplicaciones. La validación de estos PPEDsr es esencial para darle un sustento crítico y analítico a los datos, para un posterior uso en la evaluación del recurso hídrico, más aún en cuencas con escasos datos medidos.

En tal sentido, el objetivo de este estudio es validar los datos de PPEDsr con estaciones pluviométrica para el periodo 2001-2018 a paso de tiempo diario, diez días y mensual en la cuenca Vilcanota, Perú.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio está representada por la cuenca de Vilcanota, situada entre las latitudes 12.9° y 14.6° sur y longitudes 70.7° y 72.8° oeste (Figura 1). Políticamente se ubica en la región de Cusco, dentro del territorio del Perú. Comprende las provincias de Acomayo, Anta, Calca,

Canas, Canchis, Cusco, Espinar, La Convención, Paruro, Paucartambo, Quispicanchi y Urubamba. La cuenca presenta una variación altitudinal desde los 6 300 msnm en su punto más alto (región andina) hasta los 1 180 msnm en su punto más bajo (región amazónica).

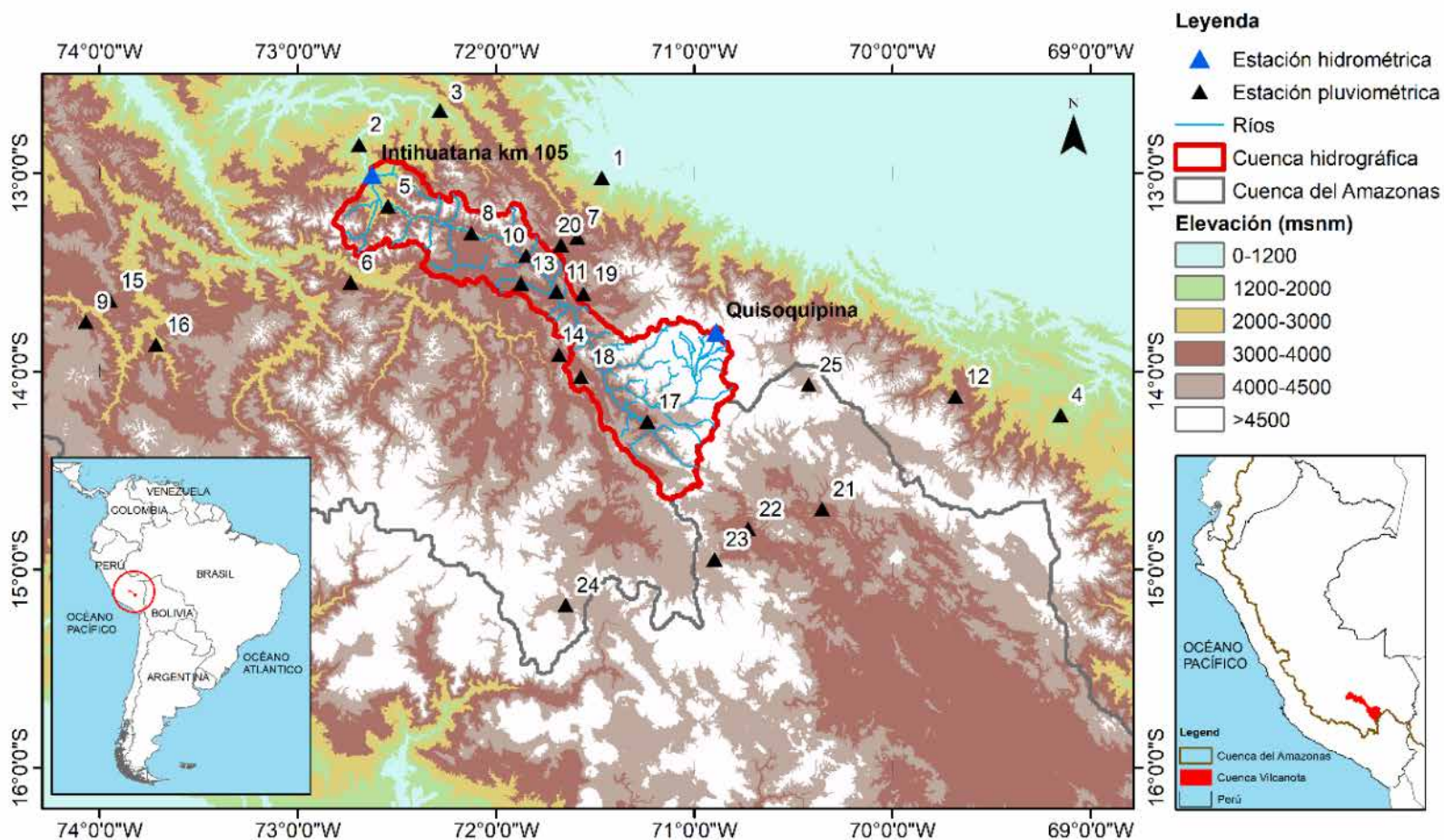


Figura 1. Ubicación del área de estudio, estaciones pluviométricas (SENAMHI) y mapa de elevación de la SRTM-NASA de 30 m (Farr *et al.*, 2007).

Presenta una extensión aproximada de 11 047.85 km² desde el punto más alto de la cuenca hasta la estación Intihuatana km 105. De acuerdo con el mapa de ecosistemas elaborado por el Ministerio de Ambiente (MINAM), en la cuenca predominan ecosistemas de pajonal de puna húmeda (50.6 %), matorral andino (12.74 %), bosque altimontano de Yunga (5.24 %), áreas agrícolas (11.73 %), con área de glaciar (1.8 %) y zona periglaciaria (10.56 %); la cuenca se completa con ecosistemas de humedales, bofedal, bosque relicto altoandino, bosque relicto mesoandino, bosque montano de yunga, bosque basimontano de yunga y área urbana.

La cuenca del río Vilcanota hasta la estación hidrométrica Intihuatana km 105 se muestra en la Figura 1, así como la ubicación espacial de las estaciones pluviométricas, las cuales están codificadas del 1 al 24 (de menor a mayor altitud).

Estaciones pluviométricas

Para la validación de los PPEDsr en la cuenca del Vilcanota se seleccionaron 24 estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI del Perú, ubicadas espacialmente dentro de la cuenca o cercana a ella (Figura 1). Las estaciones fueron codificadas del 1 al 24, siendo el ID igual a 1, la estación con menor altitud (982 msnm); mientras ID igual a 24, la estación con mayor altitud (4331 msnm). Se recopilaron los datos diarios para el periodo de 1981-2018.

La disponibilidad temporal de los datos de precipitación diaria de las 24 estaciones utilizadas se muestra en la Figura 2. Se aprecia que a partir del año 2000 hacia adelante la disponibilidad de datos observados

aumenta. Esto se debe a una mejor gestión y preocupación del estado peruano por la recopilación de los datos observados. Los PPEDsr en su mayoría, a excepción de ERA 5, MSWEP y TRMM, están disponibles a partir del 2000 hacia adelante.

Datos de precipitación diaria para las estaciones y productos de sensoramiento remoto (1981-2018)

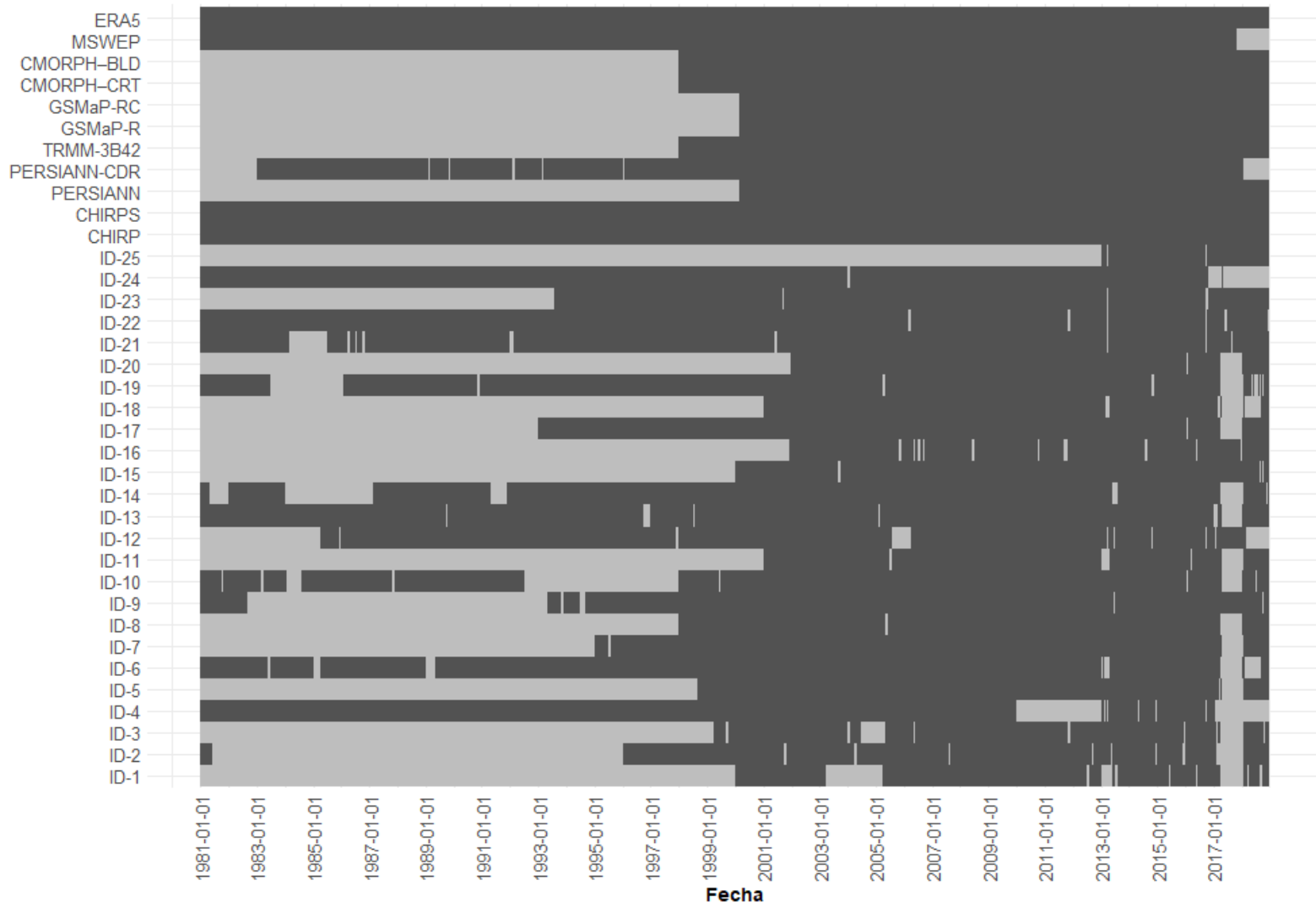


Figura 2. Disponibilidad de datos diarios en las 24 estaciones pluviométricas y en los PPEDsr (ERA5, MSWEP, CMORPH-BLD, CMORPH-CRT, GSMaP-RC, GSMaP-R, TRMM-3B42, PERSIANN-CDR, PERSIANN, CHIRPS, CHIRP). Gris oscuro: presencia de dato; gris claro: ausencia de dato.

Los detalles de cada estación pluviométrica utilizada se muestran en la Tabla 1 con la columna Id (identificador), nombre asignado por SENAMHI, longitud, latitud, elevación en msnm obtenido del modelo digital de elevaciones SRTM de 30 m. La columna de % de nulos representa el porcentaje de valores faltantes para el periodo 2001-2018 en cada estación.

Tabla 1. Ubicación de estaciones pluviométricas (SENAMHI febrero 2020).

ID	Estación	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)	Lagunas (%)
1	Chontachaca	-71.467780	-13.023889	982	20.57
2	Quillabamba	-72.691940	-12.856111	990	9.19
3	Quebrada Yanatile	-72.283610	-12.683611	1 050	11.39
4	Tambopata	-69.152220	-14.220000	1 264	28.49
5	Machu Picchu	-72.545830	-13.166944	2 459	4.67
6	Curahuasi	-72.735000	-13.552500	2 737	9.31
7	Paucartambo	-71.590560	-13.324444	2 924	4.67
8	Urubamba	-72.125240	-13.303589	3 071	5.13
9	Huancapi	-74.070500	-13.750400	3 120	0.73
10	Pisac	-71.849720	-13.416111	3 147	4.55
11	Cay Cay	-71.695480	-13.597756	3 150	7.03
12	Limbani	-69.684170	-14.126944	3 183	9.57
13	Granja Kcayra	-71.875280	-13.556944	3 219	5.58
14	Acomayo	-71.683610	-13.916944	3 227	5.96
15	Vilcashuaman	-73.948890	-13.643611	3 394	1.19
16	Chilcayoc	-73.716940	-13.866944	3 441	9.81
17	Sicuani	-71.237220	-14.253611	3 574	4.38
18	Pomacanchi	-71.572780	-14.028056	3 686	9.17
19	Ccatcca	-71.560280	-13.610000	3 693	6.46
20	Colquepata	-71.673330	-13.363333	3 699	10.09
21	Progreso	-70.355560	-14.694722	3 905	0.99
22	Chuquibambilla	-70.728330	-14.796389	3 910	2.34
23	Llally	-70.898060	-14.948889	4 111	1
24	La Angostura	-71.649440	-15.179722	4 256	12.41

Productos de sensoramiento remoto

Se seleccionaron 11 PPEDsr que se presentan en la Tabla 2. Utilizamos los productos de precipitación obtenido por Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), lanzado en 1997 por National Aeronautics and Space Administration (NASA) y Aerospace Exploration Agency (JAXA) (Simpson, Kummerow, Tao, & Adler, 1996), luego del centro de predicción del clima MORPHing (CMORPH) (Joyce, Janowiak, Arkin, & Xie, 2004); la precipitación estimada usando datos de sensoramiento remoto usando redes neuronales artificiales (PERSIANN) (Sorooshian *et al.*, 2000); la precipitación de la Global Satellite Mapping Precipitation (GSMAP); el producto Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) (Beck *et al.*, 2017), y Climate Hazards Group InfraRed Precipitation (CHIRP) with Station data (CHIRPS) (Funk *et al.*, 2015).

Tabla 2. Principales características de los 11 PPEDsr. Adaptado de Satgé *et al.* (2019).

PPEDsr	Acrónimo	Periodo	Resolución temporal	Resolución espacial	Fuente
Climate Hazard Group InfraRed Precipitation v.2	CHIRP v.2	1981-presente	diario	0.05°	S, R
Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station v.2	CHIRPS v.2	1981-presente	diario	0.05°	S, R, E
CPC MORPHing technique bias corrected v.1	CMORPH-CRT v.1	1998-presente	3 h	0.25°	S, E
CPC MORPHing technique blended v.1	CMORPH-BLD v.1	2000-presente	3 h	0.25°	S, E
Global Satellite Mapping of Precipitation Reanalyse v.6	GSMaP v.6-RE	2000-presente	1 h	0.1°	S, R
Global Satellite Mapping of Precipitation Reanalyse Gauges v.6	GSMaP v.6-RECO	2000-presente	1 h	0.1°	S, R, E
Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks	PERSIANN	2000-presente	6 h	0.25°	S
PERSIANN-Climate Data Record	PERSIANN-CDR	1983-2016	6 h	0.25°	S, E
TRMM 3B42: 3-Hourly Precipitation Estimates	TRMM3B42	1998-presente	3 h	0.25°	S, E
Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation	MSWEP	1979-presente	3 h	0.10°	S, R, E
ERA5 Daily Aggregates - Latest Climate Reanalysis Produced by ECMWF / Copernicus Climate Change Service	ERA 5	1979-presente	Diario	0.25°	R

S = satélite (teledetección)

R = reanálisis

E = estaciones terrestres para la corrección

Los 11 PPEDsr presentan resoluciones espaciales que van de 0.25° (25 km en el Ecuador) a 0.05° (5 km en el Ecuador). Todos los PPEDsr utilizan una combinación de datos satelitales (S) recopilando información de radiómetros pasivos de microondas y datos infrarrojos (IR), excepto el producto ERA5, que se trata de reanálisis atmosférico de la European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) de quinta generación del clima global. Los PPEDsr utilizados difieren en cuanto a la combinación de sensores satelitales y algoritmos, y si los productos incluyen o no reanálisis (R) y/o una corrección con estaciones terrestres (E) en su procesamiento.

La Tabla 2 muestra una descripción general de los 11 PPEDsr utilizados.

Metodología

El marco de este estudio implica tres pasos principales (Figura 3): a) validación de los 11 PPEDsr en relación con la ubicación de 24 estaciones pluviométricas mediante estadísticas descriptivas; b) validación de los 11 PPEDsr en la ubicación de 24 estaciones pluviométricas mediante estadísticas categóricas, y c) clasificación de los PPEDsr con base en los estadísticos descriptivos y categóricos obtenidos.

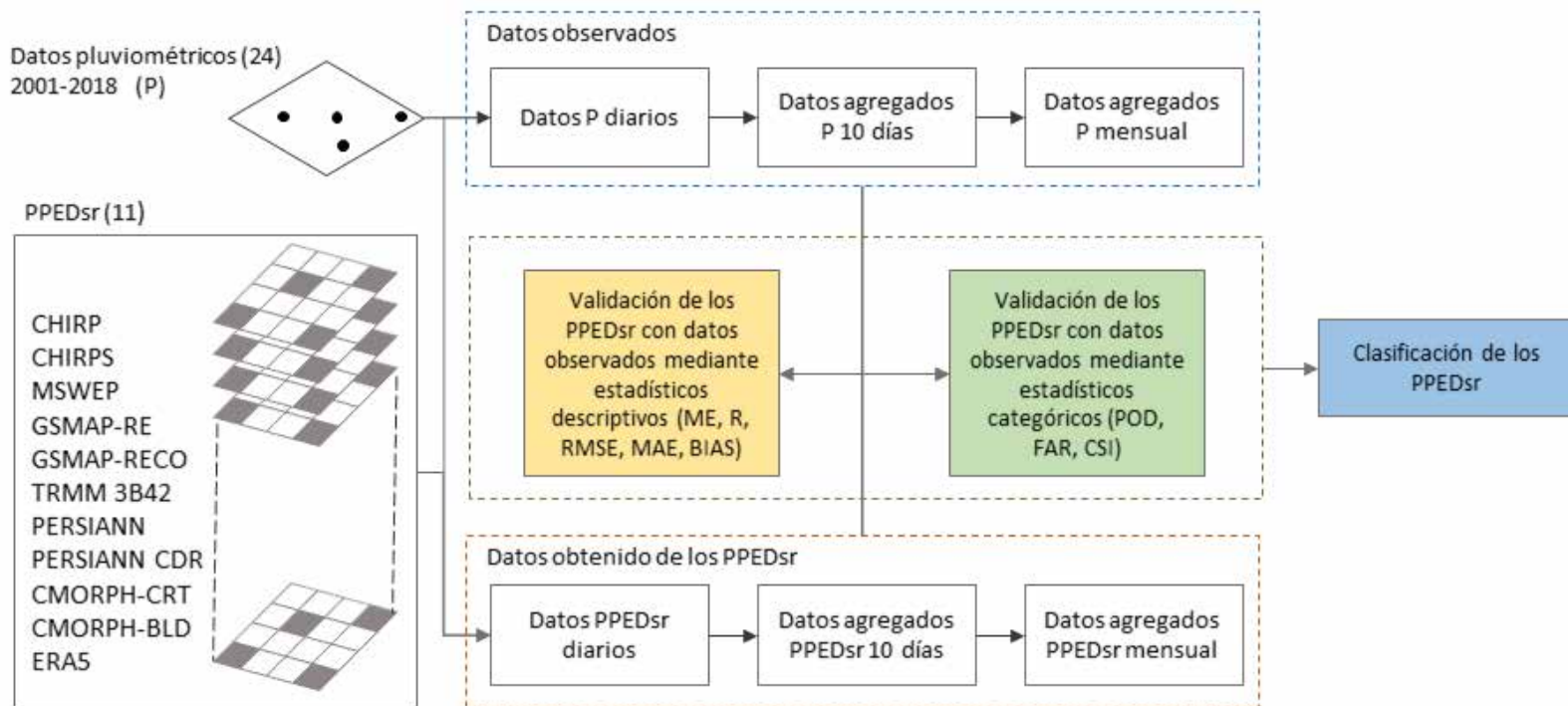


Figura 3. Diagrama de flujo para la validación de los PPEDsr con datos observados en 24 estaciones pluviométricas usando estadísticos descriptivos y categóricos.

Estadísticos descriptivos

Para evaluar y clasificar los PPEDsr en relación con los datos observados en las 24 estaciones pluviométricas se seleccionaron cinco índices estadísticos de acuerdo con lo siguiente (Lekula *et al.*, 2018; Satgé *et al.*, 2016; Satgé *et al.*, 2019; Sultana & Nasrollahi, 2018; Tan & Santo, 2018; Zhang *et al.*, 2019a; Mahmoud *et al.*, 2019): a) error medio (ME), magnitud promediada de las diferencias entre los PPEDsr y los datos observados en las estaciones pluviométricas; b) coeficiente de correlación de Pearson (R), medida de asociación lineal entre los datos PPESsr y sus

pares observados en las estaciones pluviométricas; c) raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los PPEDsr y los datos observados en las estaciones pluviométricas; d) error absoluto medio (MAE), magnitud promediada de las diferencias del error absoluto entre los PPEDsr y los datos observados en las estaciones pluviométricas; y f) BIAS relativo (BIAS) magnitud que mide el sesgo entre los PPEDsr y las estaciones pluviométricas, expresada en porcentaje. Los cálculos de todas estas métricas utilizadas se muestran en la Tabla 3. Cada estación está comparada con el píxel correspondiente en cada PPEDsr; S_i representa el valor del PPEDsr; O_i , el valor la estación pluviométrica, y n es la cantidad de datos.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas para datos continuos utilizadas para comparar los PPEDsr y los datos de las estaciones pluviométricas.

Fuente: adaptado de Jiang y Bauer-Gottwein (2019).

Nombre	Abreviatura	Fórmula	Valor óptimo
Error medio	ME	$\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{n}$	0
Coeficiente de correlación	R	$\frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(S_i - \bar{S}_i))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2}$	1
Raíz del error cuadrático medio	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}$	0
Error absoluto medio	MAE	$\frac{\sum_{i=1}^n S_i - O_i }{n}$	0
Bias relativo	BIAS	$\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\%$	0

Estadísticos categóricos

Utilizamos las estadísticas categóricas para evaluar la capacidad de detección de lluvia de los PPEDsr en relación con los datos observados en las 24 estaciones pluviométricas. Seleccionamos tres índices estadísticos basados en lo siguiente (Jiang & Bauer-Gottwein 2019; Lekula *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019b; Tan & Santo 2018): a) probabilidad de detección (POD), la fracción en el PPEDsr que estimó correctamente los eventos de lluvia medidos en el pluviómetro y va de 0 a 1 con un valor perfecto de 1; b) tasa de falsas alarmas (FAR), la fracción en que el PPEDsr ha detectado eventos de lluvia, pero no hay observación en el pluviómetro, varía de 0 a 1 con un valor perfecto de 0; c) índice de éxito crítico (CSI), una fracción, donde el PPEDsr ha estimado correctamente la precipitación, pero teniendo en cuenta las falsas alarmas en contraste con POD, va de 0 a 1 con un valor perfecto de 1.

Los detalles de las estadísticas categóricas utilizadas se muestran en la Tabla 4, donde A se denomina "éxito", el PPEDsr ha detectado la lluvia con éxito; C es "fracaso", el PPEDsr no pudo detectar la lluvia; B es "falsa alarma", el PPEDsr no pudo detectar un caso sin lluvia, y D es "negativo correcto", el PPEDsr detectó con éxito un caso sin lluvia (Kenabatho, Parida, & Moalafhi, 2017). La Tabla 5 de contingencia ilustra estos cuatro tipos de condiciones. Se utilizó un umbral de 0.5 mm/día que define un día lluvioso, lo cual es consistente con el umbral adoptado por Kenabatho *et al.* (2017).

Tabla 4. Estadísticas categóricas de verificación utilizadas para obtener información detallada sobre el rendimiento de los PPEDsr (Lekula *et al.*, 2018).

Nombre	Abreviatura	Fórmula	Valor óptimo
Probabilidad de detección	POD	$\frac{A}{A + C}$	1
Proporción de falsas alarmas	FAR	$\frac{B}{A + B}$	0
Índice de éxito crítico	CSI	$\frac{A}{A + B + C}$	1

Tabla 5. Tabla de contingencia para la comparación de ocurrencias de eventos de lluvia en las estaciones y PPEDsr (Lekula *et al.*, 2018).

	Frecuencia estación (N _o)	No lluvia en estación
Frecuencia PPEDsr (N _s)	A	B
No lluvia en PPEDsr	C	D

Resultados

Comportamiento de la precipitación en estaciones

Se obtuvieron los valores estimados de lluvia de cada uno de los PPEDsr a partir de las coordenadas de las estaciones pluviométricas; estos valores de los pixeles seleccionados fueron agregados a los datos diarios (de ser el caso), de diez días y mensuales. Además, calculamos por cada estación y cada producto satélite los valores promedio de precipitación para el periodo 2001-2016 (Figura 3). Los valores promedio de

precipitación con los datos de las estaciones pluviométricas (OBS) y de cuatro PPEDsr (CHIRPS, GSMAP-RECO, CMORPH-CRT, MSWEP) para cinco estaciones seleccionadas para cubrir un gran rango altitudinal y distribuidos a lo largo de la zona de estudio de la cuenca Vilcanota. Estos fueron comparados para evaluar el comportamiento estacional de las precipitaciones en el periodo de análisis.

Los PPEDsr muestran que representan de manera adecuada el comportamiento medio en cuanto al patrón estacional y la cantidad de lluvia. En la Figura 4 se muestran estaciones que representan bien las tasas pluviométricas (Chuquibambilla, Granja Kcayra, Sicuani) ubicadas por encima de los 3 000 msnm, en especial los productos GSMAP-RECO y CMORPH-CRT. En la estación Curahuasi se aprecia una mejor cuantificación de la precipitación por los productos GSMAP-RECO y CHIRPS, por lo cual los PPEDsr representan de manera adecuada el patrón promedio o climático. Sin embargo, en cuanto a las tasas de lluvia, varían de acuerdo con la altitud de la estación y muestran una sobreestimación en las de menor altitud; los productos GSMAP-RECO y CHIRPS tienen un mejor comportamiento tanto en el patrón climático como en la tasa de lluvia.

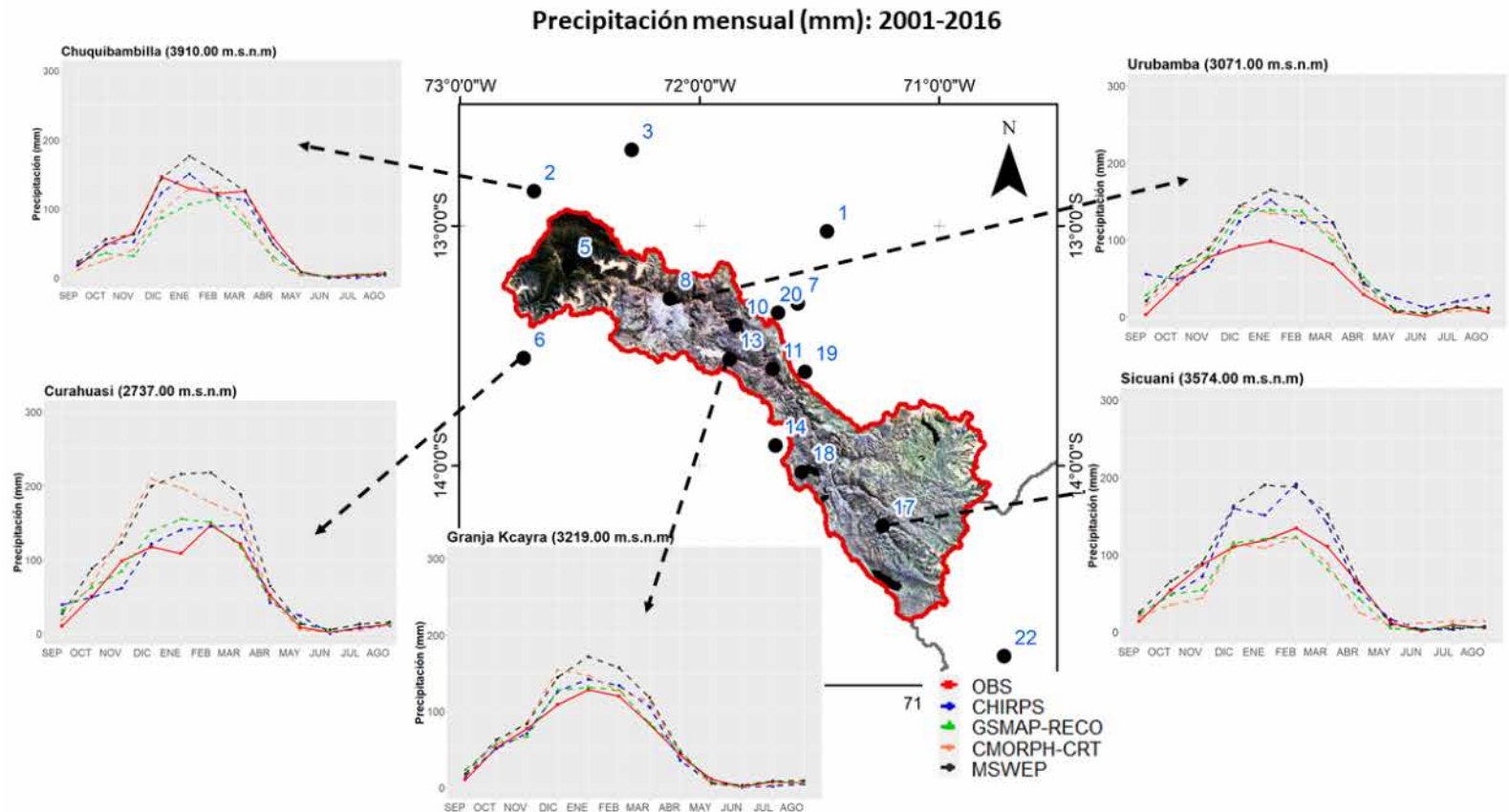


Figura 3. Comportamiento promedio de la precipitación en estaciones y PPEDsr (2001-2016).

Validación de los productos de los PPEDsr

Para validar si los PPEDsr estiman de manera adecuada la cantidad de lluvia se calcularon los estadísticos categóricos ME, R, RMSE, MAE, BIAS, a partir de la ubicación de cada estación y la celda correspondiente en cada PPEDsr.

La Figura 5 muestra el coeficiente de correlación (en rojo, baja correlación; en azul, alta correlación) entre los PPEDsr y las estaciones

pluviométricas para el área de estudio. Las estaciones están ordenadas de menor a mayor altitud (de arriba abajo). En a) se muestra para los datos acumulados diario; en b) se muestra para los datos acumulados a 10 días. Se aprecia claramente una mejora entre a) y b), lo cual indica que los PPEDsr se muestran mejor correlacionados conforme se acumulan los días de lluvia. Los productos CHIRPS y MSWEP son los que más incrementan su correlación al acumularse los días. En promedio, para los datos diarios se aprecia una correlación de 0.4 para la zona de estudio. Para los datos acumulados a diez días, la correlación aumenta a 0.6 en promedio.

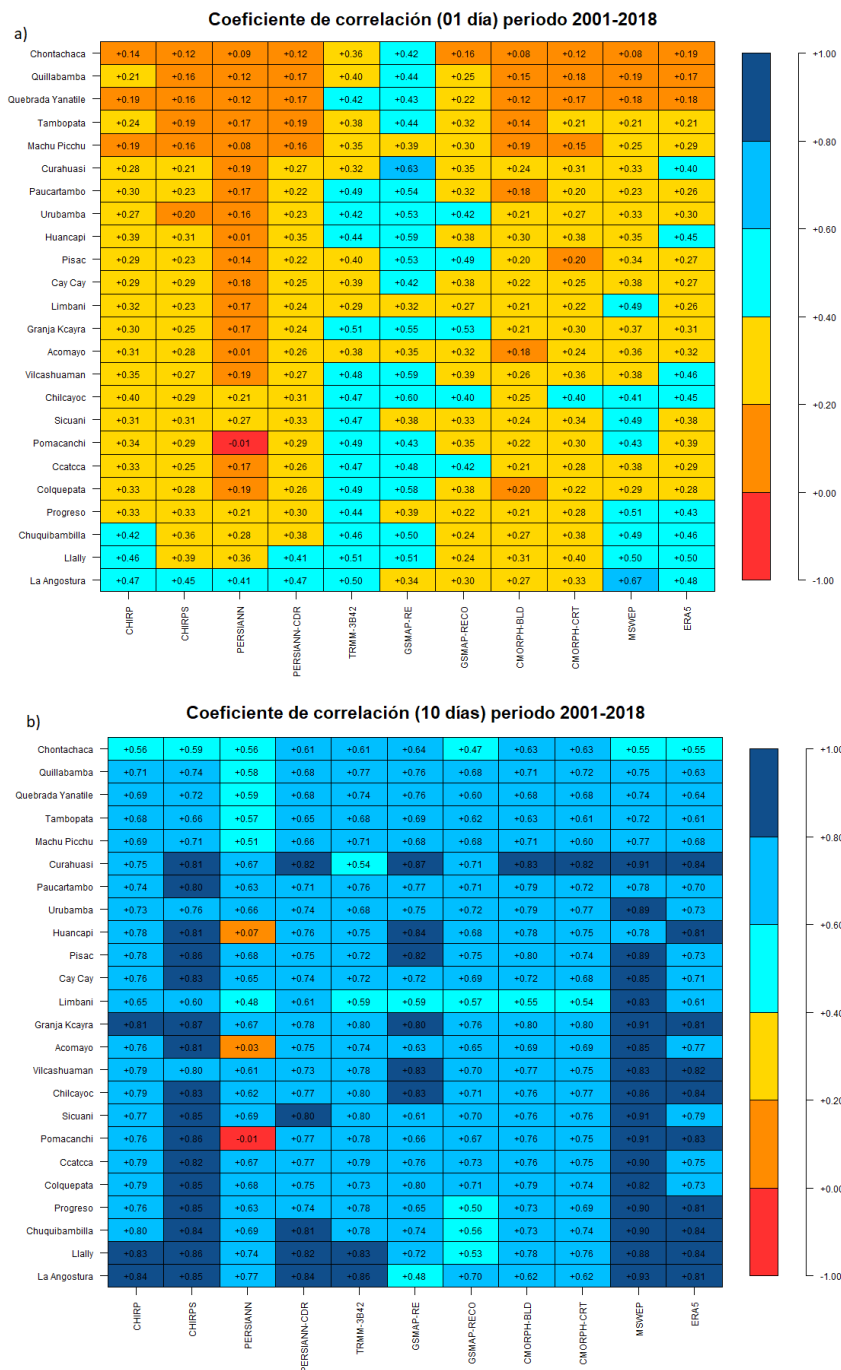


Figura 4. Correlación entre los PPEDsr y las estaciones pluviométricas:
a) para los datos acumulados a diarios; b) para los datos acumulados a 10 días.

El producto PERSIANN presenta baja correlación con las estaciones Huancapi, Acomayo y Pomacanchi. Los datos de dichas estaciones para el producto PERSIANN se removieron para el cálculo de los estadísticos referidos a errores de predicción; se muestran para los datos agregados a diez días.

La Figura 6 muestra el error medio obtenido entre los PPEDsr y las estaciones pluviométricas. En tonalidades celeste se aprecian los valores cercanos a cero (de -10 a 10) de ME; en naranja y rojo, los valores mayores y menores de ME, respectivamente. Los resultados muestran que los productos CHIRP, CHIRPS, TRMM-3B42, GSMAP-RE, GSMAP-RECO, CMORPH-BLD, CMORPH-CRT y MSWEP demuestran en general valores bajos de error de estimación de la lluvia. Los productos PERSIANN, PERSIANN-CDR y ERA5 son los que exponen los errores de estimación más dispares en relación con las estaciones. La estación Chontachaca exhibe valores distintos a la de los PPEDsr en general, pues es la que muestra los mayores errores medios para los PPEDsr.

Error medio (10 días) periodo 2001-2018

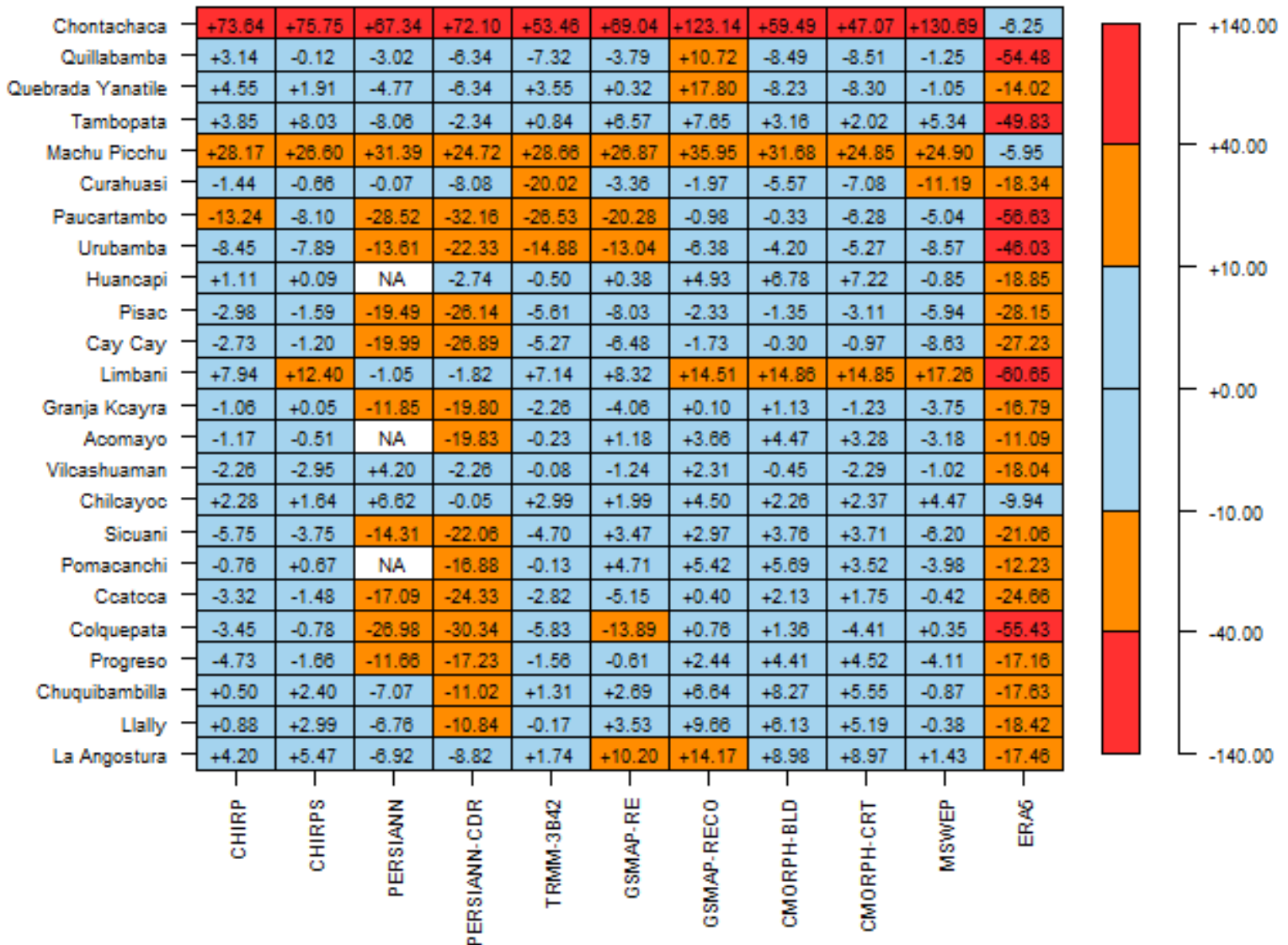


Figura 5. Error medio para los PPEDsr y estaciones pluviométricas.

La Figura 7 muestra la raíz del error medio cuadrático entre los PPEDsr y las estaciones pluviométricas. En tonalidades celeste se aprecian los valores cercanos a cero de RMSE; en amarillo, naranja y rojo, los

valores mayores. Los resultados indican que los productos CHIRP, CHIRPS, TRMM-3B42, GSMAP-RE, GSMAP-RECO, CMORPH-BLD, CMORPH-CRT y MSWEP presentan en general valores cercanos a cero. Los productos PERSIANN, PERSIANN-CDR y ERA5 son los que tienen los valores más altos de RMSE. La estación Chontachaca exhibe un comportamiento peculiar en relación con los datos obtenidos de los PPEDsr. Se aprecia que las estaciones ubicadas a menor altitud (las primeras en el eje Y) muestran los valores relativamente altos de RMSE en todos los productos.

Raíz del error medio cuadrático (10 días) periodo 2001-2018

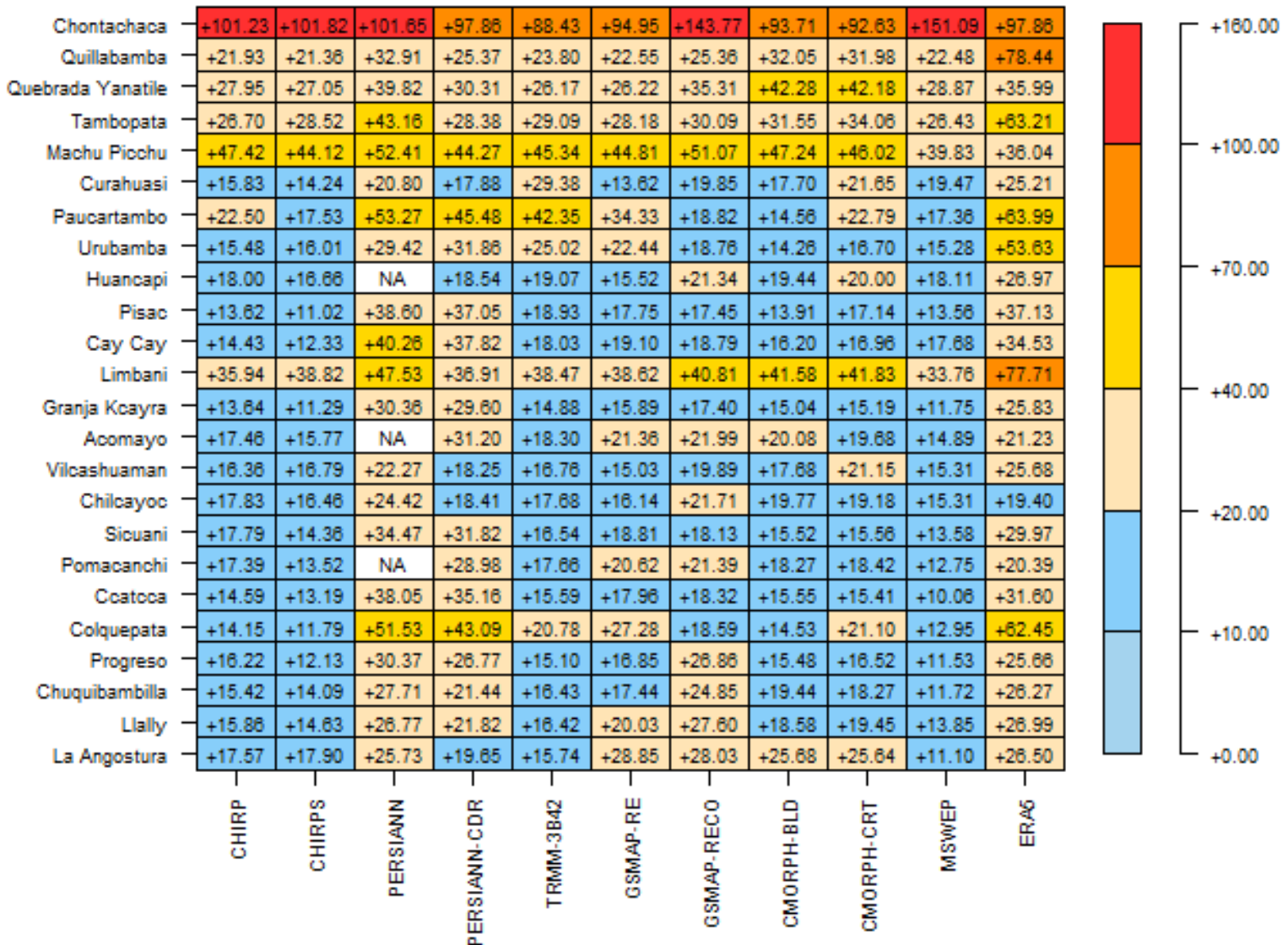


Figura 6. Raíz del error medio cuadrático para los PPEDsr y estaciones pluviométricas.

La Figura 8 muestra el error medio absoluto entre los PPEDsr y las estaciones pluviométricas. En tonalidades celeste se aprecian los valores

cercanos a cero de MAE; en amarillo, naranja y rojo, los valores mayores. Los resultados demuestran que los productos CHIRP, CHIRPS, TRMM-3B42, GSMAP-RE, GSMAP-RECO, CMORPH-BLD, CMORPH-CRT y MSWEP presentan en general valores cercanos a cero. Los productos PERSIANN, PERSIANN-CDR y ERA5 son los que tienen los valores más altos de RMSE. La estación Chontachaca denota un comportamiento particular en relación con los datos obtenidos de los PPEDsr.

Error absoluto medio (10 días) periodo 2001-2018

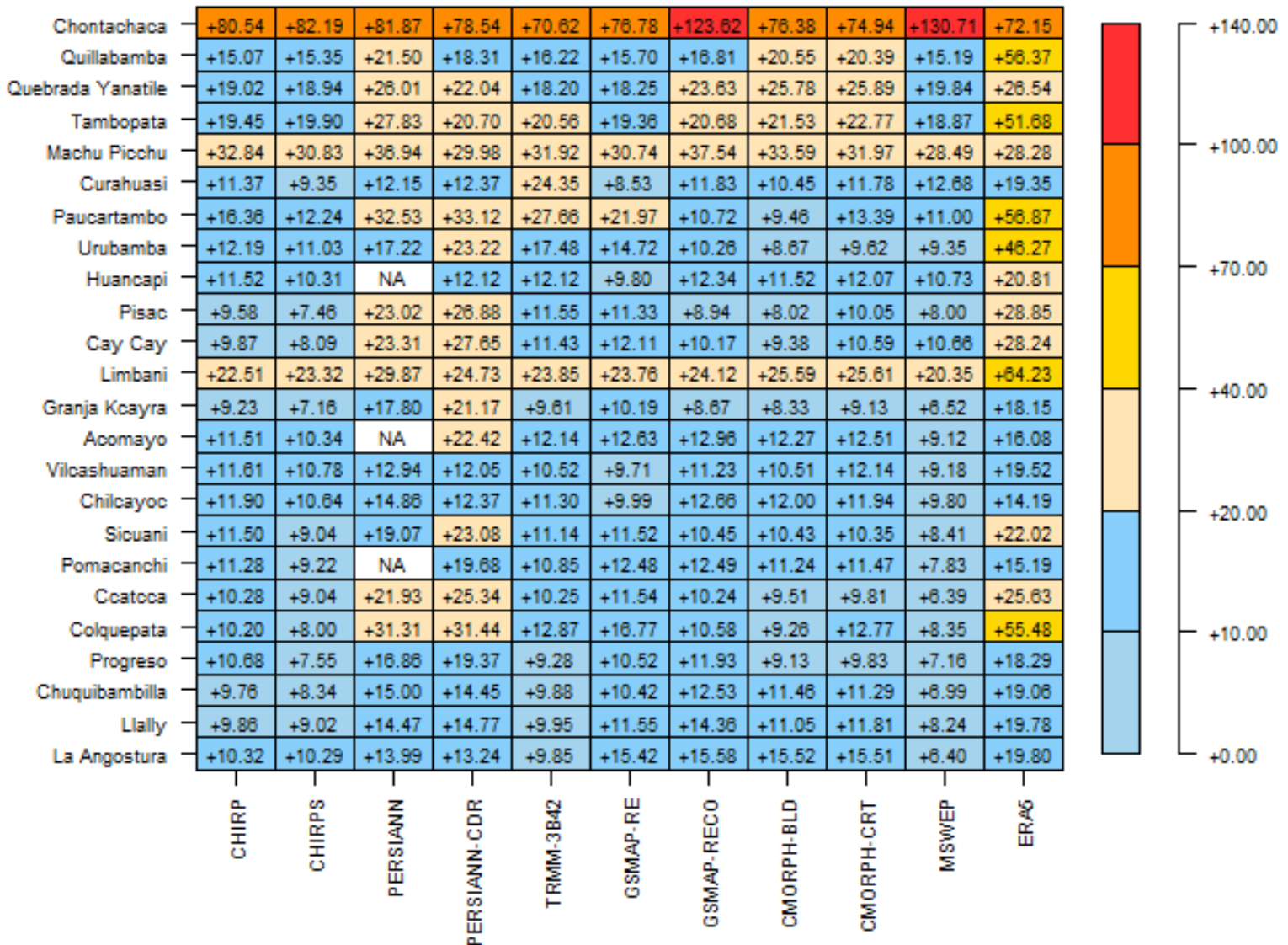


Figura 7. Error absoluto medio para los PPEDsr y estaciones pluviométricas.

La Figura 9 muestra la BIAS entre los PPEDsr y las estaciones pluviométricas. En tonalidades celeste se aprecian los valores cercanos a

cero de BIAS; en naranja y rojo, los valores con sobreestimación o subestimación de la lluvia, respectivamente. Los resultados muestran que los productos CHIRP, CHIRPS, TRMM-3B42 y MSWEP presentan en general valores cercanos a cero en la mayoría de las estaciones. Los productos GSMAP-RE, GSMAP-RECO, CMORPH-BLD y CMORPH-CRT indican valores de BIAS considerables sin ser los peores productos. Los productos PERSIANN, PERSIANN-CDR y ERA5 son los que presentan los valores dispersos de BIAS. La estación Chontachaca tiene un comportamiento peculiar en relación con los datos obtenidos de los PPEDsr.

BIAS (10 días) periodo 2001-2018

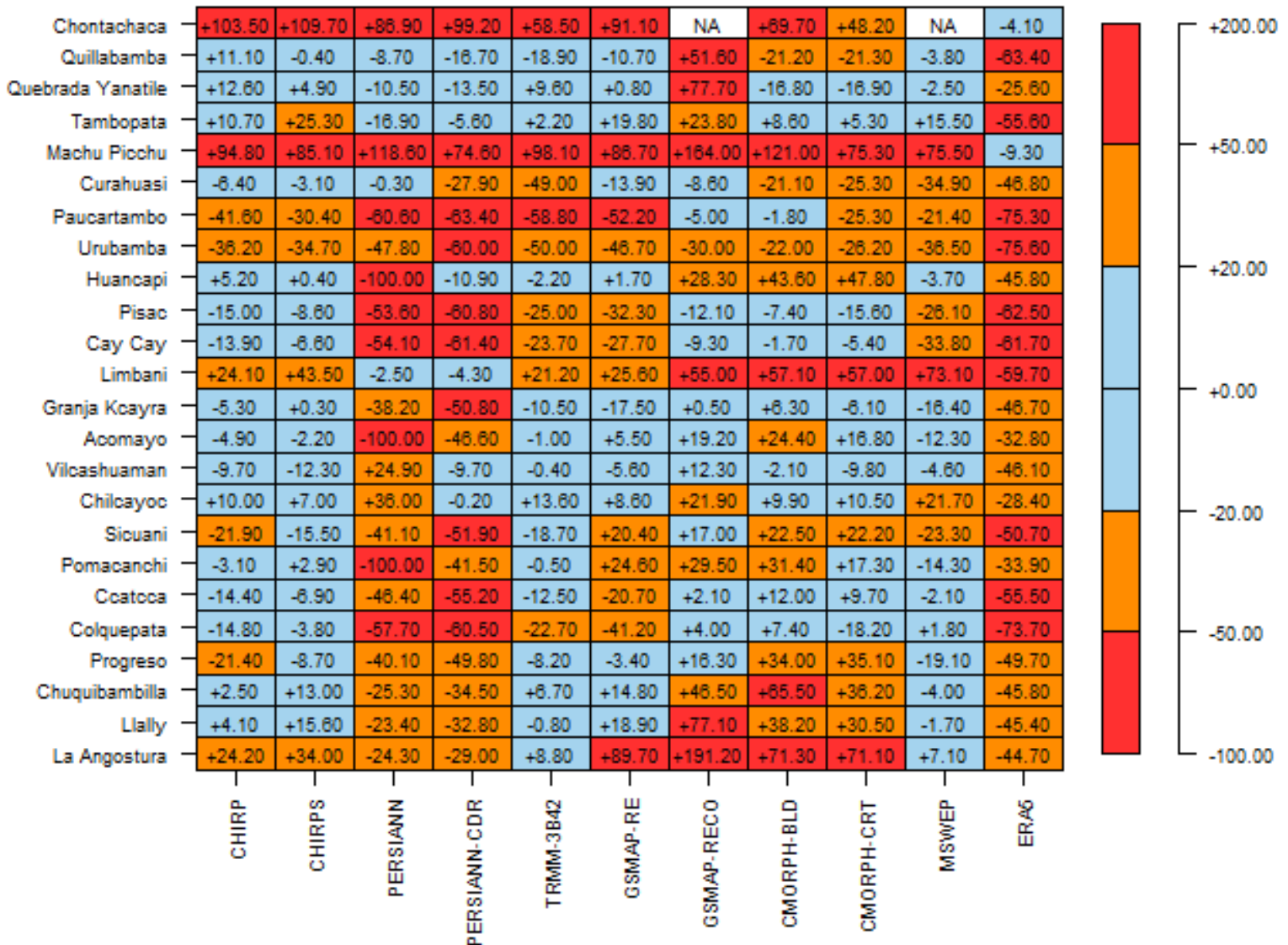


Figura 8. BIAS en porcentaje para los PPEDsr y estaciones pluviométricas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los productos CHIRPS y MSWEP son los que muestran mejor similitud con referencia a los datos

observados en las estaciones pluviométricas, seguido de los productos TRMM-3B42, CHIRP, GSMAP-RE, GSMAP-RECO, CMORPH-BLD, CMORPH-CRT y ERA5; mientras los productos que menor similitud presentan son PERSIANN y PERSIANN-CDR.

Para validar si los PPEDsr tienen una adecuada capacidad de detección de lluvia con base en los datos observados en las estaciones pluviométricas, se obtuvieron los estadísticos categóricos POD, FAR y CSI, obtenidos a partir de la ubicación de cada estación y la celda correspondiente en cada PPEDsr.

La Figura 10 muestra el puntaje de contingencia en términos de POD (en rojo, menos adecuados; en azul, más adecuados, para detección de lluvia) para los PPEDsr de acuerdo con la ubicación de las estaciones pluviométricas para el área de estudio; calculamos para los umbrales de 0 a 20 mm/día (Figura 12); se muestran para los umbrales 0, 2, 4, 8 mm/día (Figura 11). Todos los productos denotan tendencias decrecientes de POD a medida que aumenta el umbral. Los productos MSWEP, ERA5, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42, CHIRP y CHIRPS se presentan mejor que los demás productos. La POD es en promedio 60 % para tasas de lluvia superiores a 2 mm/día, y disminuye gradualmente. Para los productos ERA5, CHIRP y CHIRPS, esta disminución con un umbral de 8 mm/día es fuerte hasta un 15 % en promedio; mientras que para los productos PERSIANN-CDR y TRMM-3B42, el descenso es menor hasta un 25 % en promedio. Los productos MSWEP y ERA5 son los que más consistentes se muestran, con una disminución gradual hasta el 40 % en promedio para las estaciones evaluadas. Todos los productos satelitales tienen un POD bajo (~ 0 %) cuando la intensidad de la lluvia es superior a 20 mm/día, a excepción del producto MSWEP (Figura 10), lo que indica que todos los

PPEDsr (con excepción de MSWEP) generalmente funcionan mal al detectar altas tasas de lluvia, es decir, no pueden resolver de forma adecuada los eventos de lluvia con índices de lluvia altos.

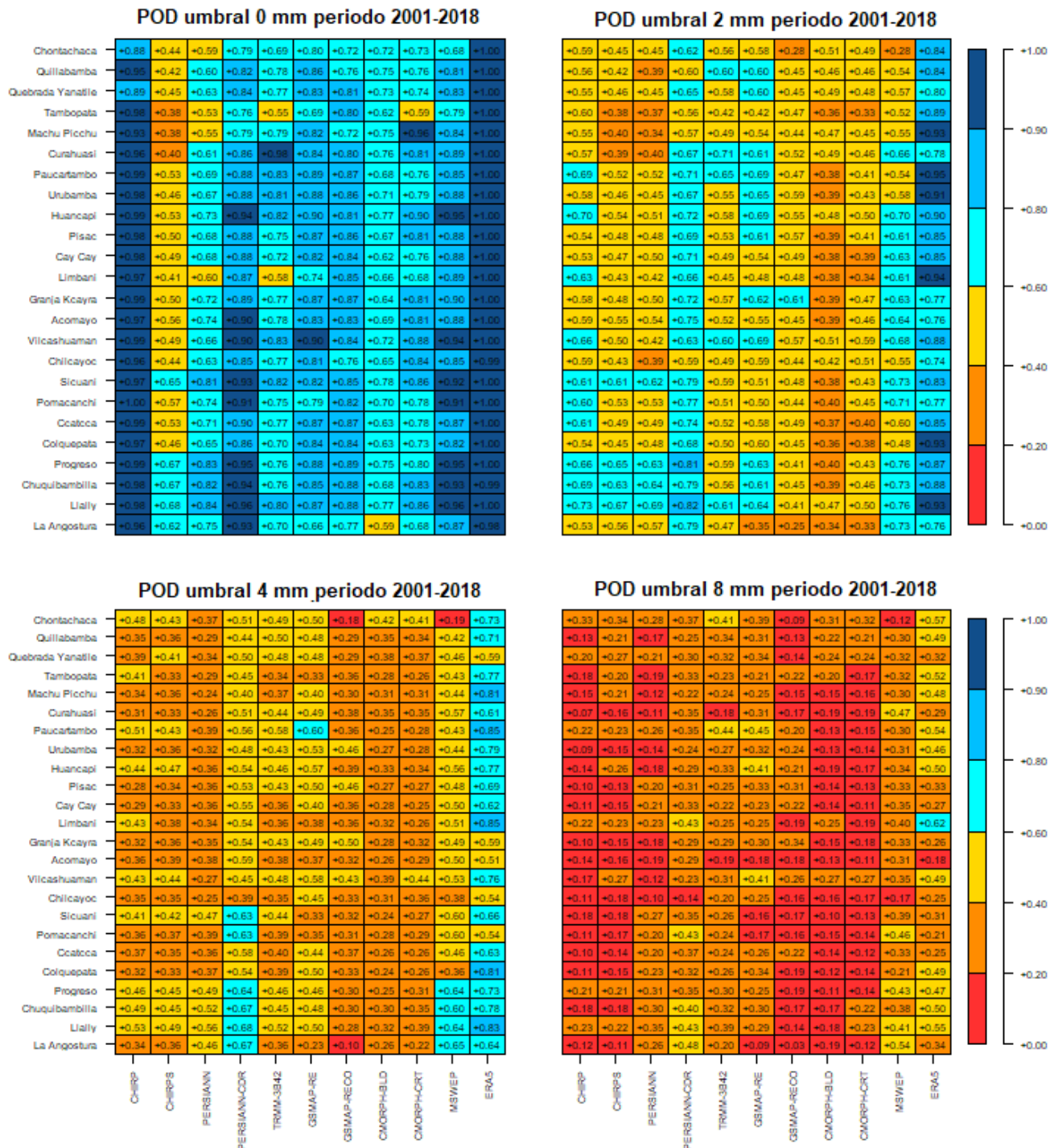


Figura 9. POD para los PPEDsr de acuerdo con la ubicación de las estaciones pluviométricas para diversos umbrales.

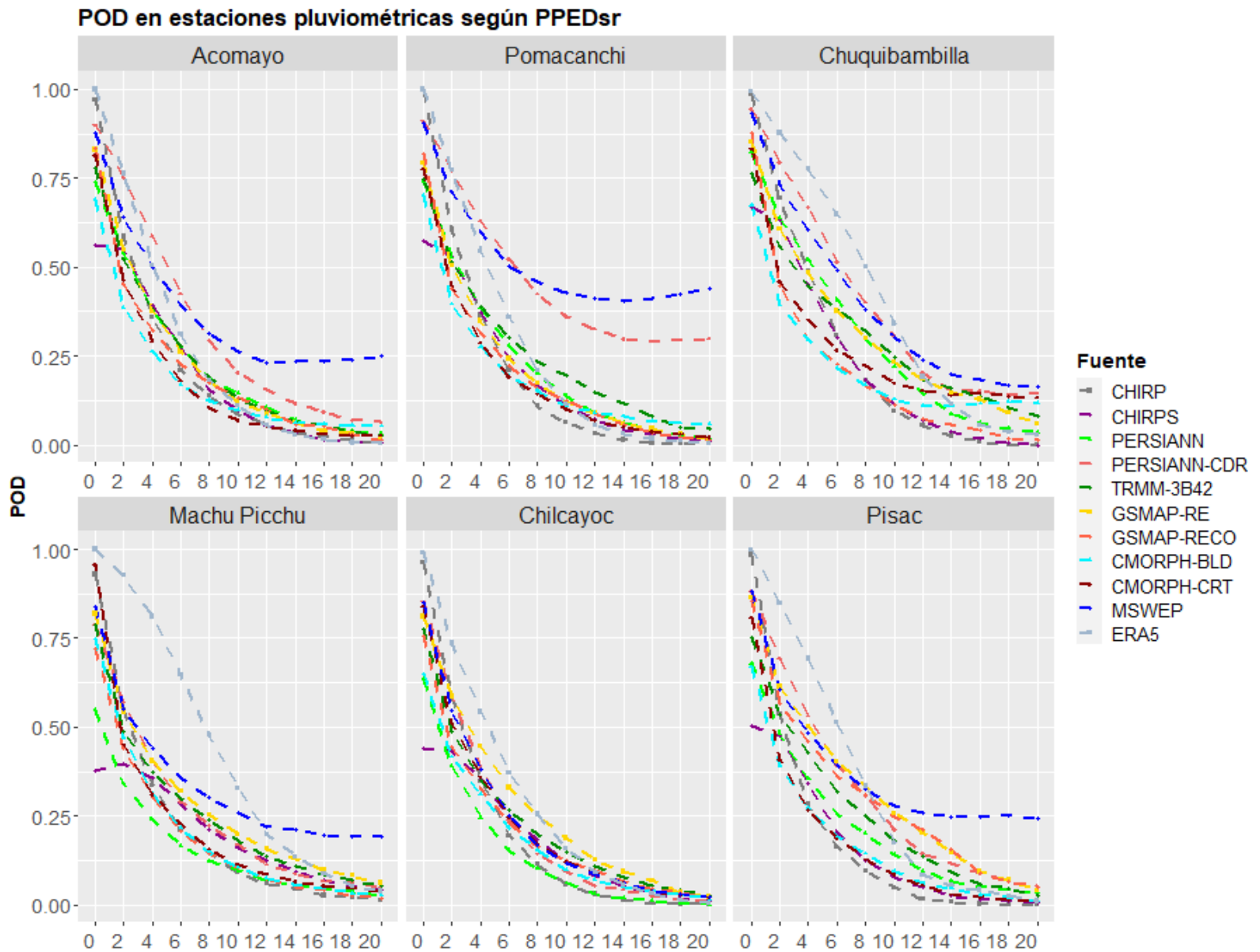


Figura 10. Puntajes de la POD. Los valores de umbrales van de 0 a 20 mm/día, con intervalos de 2 mm/día.

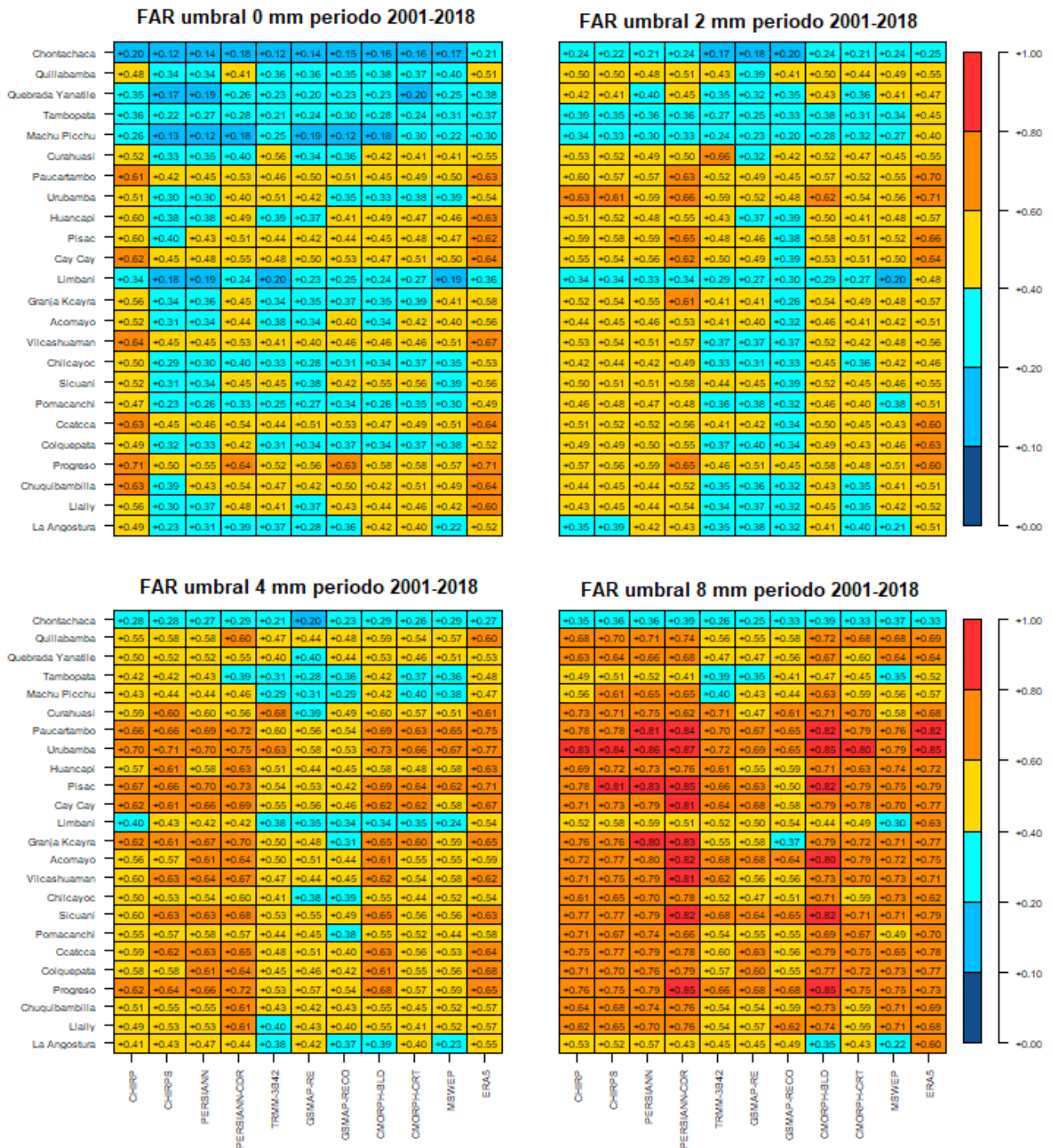


Figura 11. FAR para los PPEDsr de acuerdo con la ubicación de las estaciones pluviométricas para diversos umbrales.

La Figura 12 muestra el puntaje de contingencia en términos de FAR (en rojo, menos adecuados, cercanos a 1; en azul, más adecuados, cercanos a cero, es decir, menos falsas alarmas de lluvia) para los PPEDsr con base en la ubicación de las estaciones pluviométricas para el área de estudio; se calcularon para los umbrales de 0 a 20 mm/día (Figura 13); se muestran para los umbrales 0, 2, 4, 8 mm/día (Figura 12). Todos los productos muestran tendencias crecientes de FAR a medida que aumenta el umbral. Los productos TRMM-3B42, MSWEP, GSMAP-RE, PERSIANN-CDR y GSMAP-RECO se presentan mejor que los demás productos. La FAR es en promedio 50 % para tasas de lluvia superiores a 2 mm/día, y aumenta gradualmente. En los productos MSWEP, GSMAP-RE y PERSIANN-CDR este incremento se muestra menos creciente, y en algunas estaciones disminuye (Figura 13), por lo que son los productos más consistentes en términos de puntaje FAR. Los demás productos satelitales tienen un FAR alto (~100 %) cuando la intensidad de la lluvia es superior a 20 mm/día, lo que indica que estos PPEDsr (con excepción de los mencionados) generalmente funcionan mal al detectar altas tasas de lluvia, es decir, no pueden resolver de modo adecuado los eventos de lluvia con índices de lluvia altos.

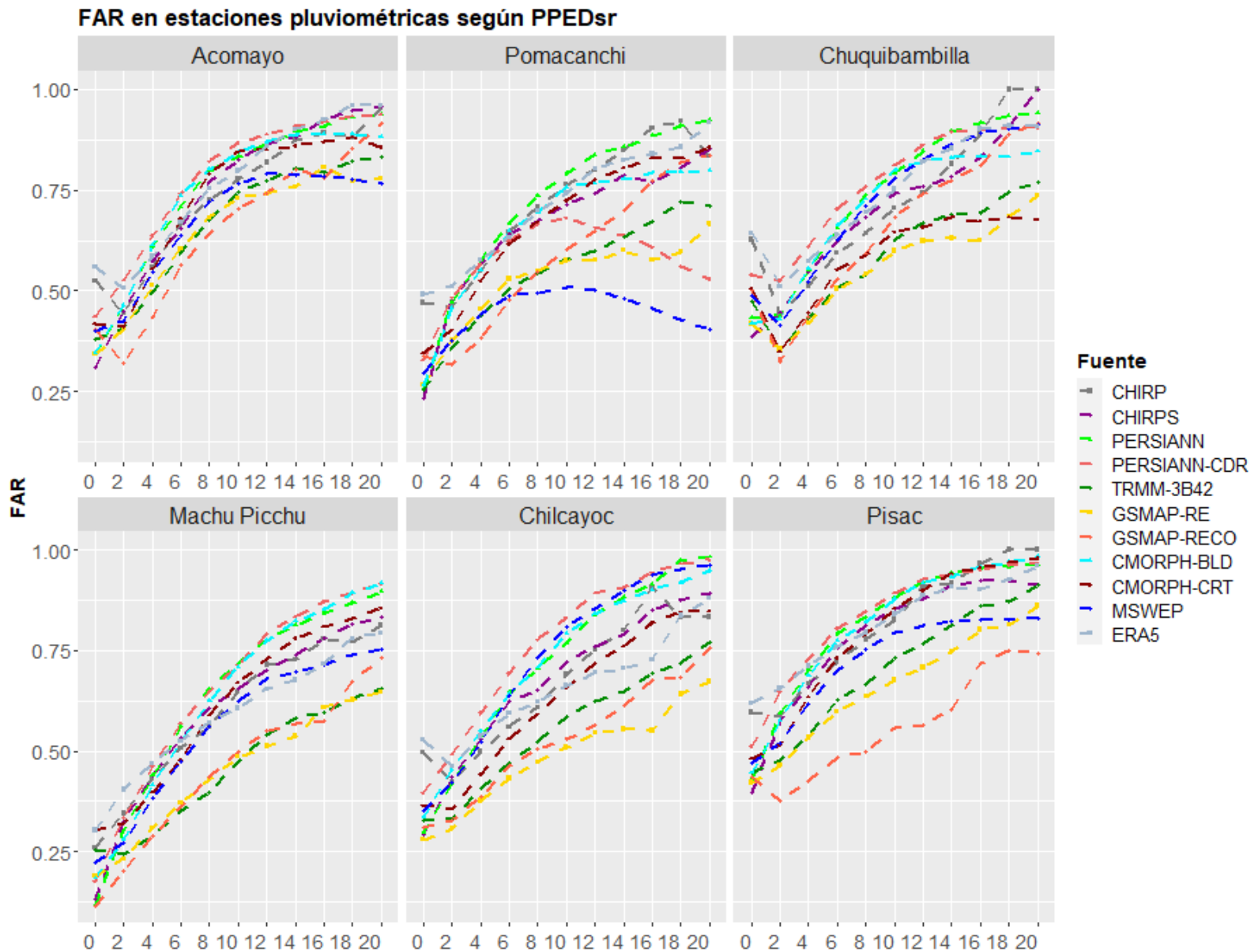
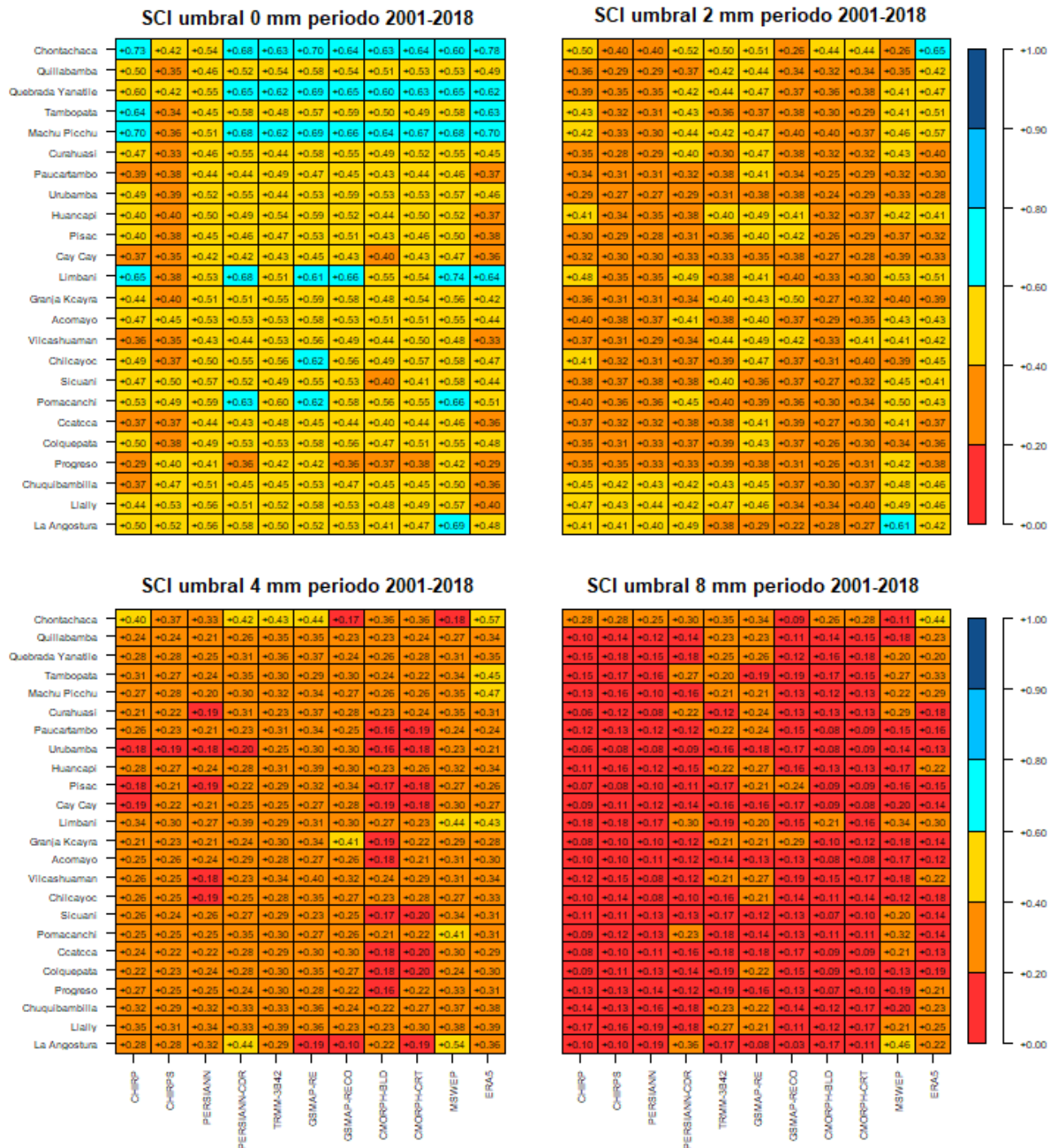


Figura 12. Puntajes de la FAR. Los valores de umbrales van de 0 a 20 mm/día, con intervalos de 2 mm/día.

La Figura 14 muestra el puntaje de contingencia en términos de CSI (en rojo, menos adecuados; en azul, más adecuados para éxito crítico

sobre las características de la lluvia: detección y falsas alarmas) para los PPEDsr de acuerdo con la ubicación de las estaciones pluviométricas para el área de estudio; se calcularon para los umbrales de 0 a 20 mm/día (Figura 15); se muestran para los umbrales 0, 2, 4, 8 mm/día (Figura 14). Todos los productos muestran tendencias decrecientes de CSI a medida que aumenta el umbral. Los productos MSWEP, PERSIANN-CDR y GSMAP-RE se presentan mejor que los demás productos en general, pero MSWEP es el mejor y más consistente. El CSI es en promedio 40 % para tasas de lluvia superiores a 2 mm/día, y disminuye gradualmente. Todos los productos satelitales tienen un CSI bajo (~ 0 %) cuando la intensidad de la lluvia es superior a 20 mm/día, con excepción de los productos MSWEP y PERSIANN-CDR (Figura 15) en ciertas estaciones, lo cual indica que todos los PPEDsr (con excepción de MSWEP y PERSIANN-CDR) por lo general funcionan mal al detectar altas tasas de lluvia, es decir, no pueden resolver de modo adecuado los eventos de lluvia con índices de lluvia altos.



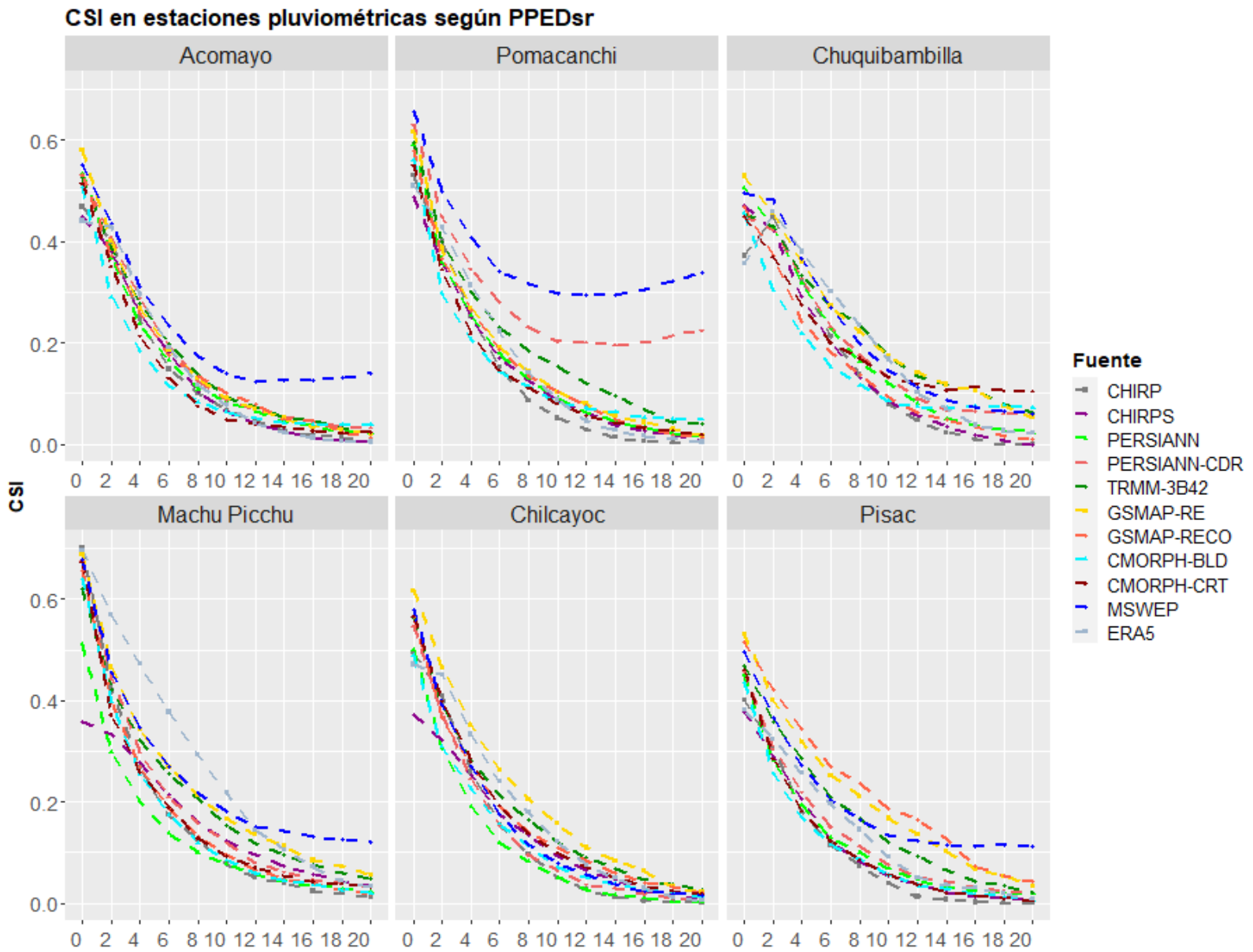


Figura 14. Puntajes del CSI. Los valores de umbrales van de 0 a 20 mm/día, con intervalos de 2 mm/día.

Clasificación de los productos de los PPEDsr

Con base en los puntajes de los estadísticos descriptivos y categóricos se llevó a cabo una clasificación jerárquica de los PPEDsr, la cual se muestra en la Tabla 6. Así, los productos MSWEP, CHIRPS, TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR son los mejores con base en la validación por ubicación de las estaciones pluviométricas.

Tabla 6. Jerarquía de los PPEDsr con base en la validación por estaciones pluviométricas a 1 y 10 días.

<i>Fuente</i>	<i>Descriptivas</i>	<i>Categóricas</i>	<i>Global</i>
MSWEP	1	1	1
CHIRPS	2	4	2
TRMM-3B42	3	3	3
PERSIANN-CDR	4	2	4
GSMAP-RECO	5	5	5
GSMAP-RE	6	7	6
ERA5	8	6	7
CHIRP	7	8	8
CMORPH-BLD	9	9	9
CMORPH-CRT	10	10	10
PERSIANN	11	11	11

Discusión

La metodología desarrollada compara 24 estaciones pluviométricas con medición *in situ* con el píxel correspondiente con 11 PPEDsr; se utilizaron estadísticos descriptivos y categóricos (Kenabatho *et al.*, 2017; Lekula *et al.*, 2018; Sultana & Nasrollahi, 2018; Tan & Santo, 2018) para evaluar la capacidad de los PPEDsr que tienen de cuantificar y detectar la lluvia en la cuenca Vilcanota, la cual es una cuenca de formación andina en la parte alta, y de amazonia en la parte media y baja.

Contar con datos que representen la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones es de crucial importancia en la gestión y planificación de los recursos hídricos. El uso de datos espaciales de precipitación en la modelación hidrológica muestra mejores resultados que datos puntuales de estaciones (Kenabatho *et al.*, 2017; Su, Hong, & Lettenmaier, 2008; Zhu *et al.*, 2018), aunque debido a las condiciones particulares de cada cuenca y las características de los diversos PPEDsr estos deben ser validados previamente con datos observados, ya sea mediante el enfoque de punto-píxel (capacidad de cuantificar y detectar la precipitación) y/o modelamiento hidrológico (capacidad de estimar la producción hídrica en una cuenca hidrográfica).

Las series temporales de las estaciones pluviométricas presentan ausencia de datos, lo cual representa un problema al momento de analizar y comparar con los PPEDsr. Esto se presenta en las estaciones con ID 1 y 4, y se refleja en los bajos resultados de los estadísticos descriptivos y categóricos en tales estaciones.

Los resultados de los datos de precipitación agregados considerando 10 días consecutivos, mensuales, de los PPEDsr presentan valores en

concordancia con los datos observados en las estaciones pluviométricas. En el dato diario, la cuantificación de la precipitación por los PPEDsr disminuye la concordancia. Lo anterior se debe en parte a las resoluciones o tamaño de píxel de los PPEDsr que representan áreas; mientras que el registro en la estación podría ser bastante focalizado, como lo es en zonas andinas con topografías complejas. Esto puede representar un problema cuando se quieren analizar eventos extremos (crecidas) en cuencas como la de Vilcanota, por lo que evaluar distintos PPEDsr es importante para seleccionar el mejor o mejores que puedan representar las precipitaciones para el análisis de eventos extremos.

La metodología desarrollada en el presente estudio fue para una cuenca de formación andina. Se ha identificado que los mejores productos para la cuantificación y detección de precipitación fueron los PPEDsr MSWEP, CHIRPS, TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR. Los resultados podrían ser distintos para otras cuencas debido a sus condiciones particulares y condiciones orográficas, entre otros aspectos, por lo cual es recomendable analizar los PPEDsr con estaciones *in situ* en cada cuenca que se pretende analizar.

El aporte de la nieve en la precipitación no se ha considerado en el presente estudio. Los 11 PPEDsr estiman la precipitación líquida. Datos de sensoramiento remoto también se han utilizado para estimar la cobertura de nieve (Satgé *et al.*, 2019), como los productos MOD10A1 y MYD10A1 del sensor MODIS y utilizados en el modelamiento hidrológico (Han *et al.*, 2019; Steele *et al.*, 2017; Tahir, Chevallier, Arnaud, Neppel, & Ahmad, 2011).

Conclusiones

Se validaron los 11 PPEDsr con 24 estaciones pluviométricas para el periodo 1981-2018 dentro de la cuenca y cercanas a la cuenca Vilcanota, para lo cual se utilizaron estadísticos descriptivos (error medio, coeficiente de correlación, raíz del error medio cuadráticos, error absoluto medio, BIAS, diagrama de Taylor) y categóricos (probabilidad de detección, proporción de falsas alarmas, índice de éxito crítico); se encontró que los mejores PPEDsr son MSWEP, CHIRPS, TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR, pues son capaces de representar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación para la zona de estudio de la cuenca Vilcanota.

El uso de los PPEDsr para la gestión de los recursos hídricos es particularmente importante en áreas donde las estaciones son escasas, como la cuenca Vilcanota, ya que los PPEDsr representan una fuente alternativa de datos de precipitación con buena resolución espacio-temporal.

Los resultados del presente estudio muestran la importancia de la validación de los PPEDsr en cuencas de formación andina (parte alta) y amazonia (parte media y baja).

A escala de tiempo de 10 días, mensual, los PPEDsr mejoraron la capacidad de cuantificar la precipitación; en mejor medida, los que presentan corrección con estaciones MSWEP, CHIRPS y PERSIANN-CDR por encima de su contraparte sin ajuste con estaciones (CHIRP y PERSIANN).

Aunque la evaluación de las estimaciones de precipitación de los PPEDsr se basó en el valor por píxel, el rendimiento de los PPEDsr en la región andina (mayor altitud) es mejor que en la región de la amazonia (menor altitud). MSWEP y CHIRPS presentan los coeficientes de correlación más altos, menor error medio cuadrático y BIAS alrededor de cero. MSWEP y PERSIANN-CDR presentan mayor probabilidad de detección de lluvia y menores proporciones de falsa alarma.

Los PPEDsr pueden usarse para la modelación hidrológica en la estimación de la oferta hídrica en la cuenca Vilcanota, además se pueden utilizar los productos MODIS en la estimación del aporte de la nieve en la oferta hídrica, en lo cual nos encontramos desarrollando investigaciones.

Agradecimientos

Fondo Newton-Paulet a través de los siguientes proyectos:

- RAHU: glaciares, seguridad hídrica y adaptación al cambio climático, 005-2019-PROCIENCIA. Perú.
- Movilizaciones ECOS NORD Perú E009-2019-01-ECOS, número de registro 67538.
- Proyecto Modélisations atmosphérique et hydrologique afin d'évaluer les impacts de la déforestation amazonienne sur l'hydrologie du bassin versant Urubamba-Vilcanota financiado por la iniciativa ECOS-NORD/CONCYTEC/PROCIENCIA (P20UA01 et P20UA01).

Referencias

- Abdallah, A. M., & Rosenberg, D. E. (2019). A data model to manage data for water resources systems modeling. *Environmental Modelling and Software*, 113-127. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.005
- Beck, H., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., Van Dijk, A., & Weedon, G. (2017). Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6201-6217. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.072
- Bisselink, B., Zambrano-Bigiarini, M., Burek, P., & De Roo, A. (2016). Assessing the role of uncertain precipitation estimates on the robustness of hydrological model parameters under highly variable climate conditions. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8, 112-129. DOI: 10.1016/j.ejrh.2016.09.003
- Chen, L., Xu, J., Wang, G., & Shen, Z. (2019). Comparison of the multiple imputation approaches for imputing rainfall data series and their applications to watershed models. *Journal of Hydrology*, 572, 449-460. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.025
- Fang, J., Yang, W., Luan, Y., Du, J., Lin, A., & Zhao, L. (2019). Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. *Atmospheric Research*, 223, 24-38. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.03.001

- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, 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. DOI: 10.1029/2005RG000183
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 1-21. DOI: 10.1038/sdata.2015.66
- Gebregiorgis, A. S., & Hossain, F. (2013). Understanding the dependence of satellite rainfall uncertainty on topography and climate for hydrologic model simulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(1), 704-718. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2196282
- Han, P., Long, D., Han, Z., Du, M., Dai, L., & Hao, X. (2019). Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling. *Remote Sensing of Environment*, 224, 44-59. DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.041
- Iqbal, M. F., & Athar, H. (2018). Validation of satellite based precipitation over diverse topography of Pakistan. *Atmospheric Research*, 201, 247-260. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.10.026

- Jiang, L., & Bauer-Gottwein, P. (2019). How do GPM IMERG precipitation estimates perform as hydrological model forcing? Evaluation for 300 catchments across Mainland China. *Journal of Hydrology*, 572, 486-500. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.042
- Joyce, R., Janowiak, J., Arkin, P., & Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5(3), 487-503. DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2
- Kenabatho, P. K., Parida, B. P., & Moalafhi, D. B. (2017). Evaluation of satellite and simulated rainfall products for hydrological applications in the Notwane catchment, Botswana. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 19-30. DOI: 10.1016/j.pce.2017.02.009
- Kim, J., Lee, J., Kim, D., & Kang, B. (2019). The role of rainfall spatial variability in estimating areal reduction factors. *Journal of Hydrology*, 568, 416-426. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.11.014
- Lakshmi, V. (2004). The role of satellite remote sensing in the prediction of ungauged basins. *Hydrological Processes*, 18(5), 1029-1034. DOI: 10.1002/hyp.5520
- Lekula, M., Lubczynski, M. W., Shemang, E. M., & Verhoef, W. (2018). Validation of satellite-based rainfall in Kalahari. *Physics and Chemistry of the Earth*, 105, 84-97. DOI: 10.1016/j.pce.2018.02.010

- Li, D., Christakos, G., Ding, X., & Wu, J. (2018). Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the SWAT modeling of Tiaoxi catchment (Taihu lake basin, China). *Journal of Hydrology*, 556, 1139-1152. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.006
- Mahmoud, M. T., Hamouda, M. A., & Mohamed, M. M. (2019). Spatiotemporal evaluation of the GPM satellite precipitation products over the United Arab Emirates. *Atmospheric Research*, 219, 200-212. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.12.029
- Marzen, M., Iserloh, T., De Lima, J. L. M. P., Fister, W., & Ries, J. B. (2017). Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Science of the Total Environment*, 590-591, 502-513. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.190
- Paredes-Trejo, F. J., Barbosa, H. A., & Lakshmi-Kumar, T. V. (2017). Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of Arid Environments*, 139, 26-40. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.12.009
- Satgé, F., Bonnet, M. P., Gosset, M., Molina, J., Hernan-Yuque-Lima, W., Pillco-Zolá, R., Timouk, F., & Garnier, J. (2016). Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. *Atmospheric Research*, 167, 1-14. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.07.012

- Satgé, F., Ruelland, D., Bonnet, M. P., Molina, J., & Pillco, R. (2019). Consistency of satellite-based precipitation products in space and over time compared with gauge observations and snow-hydrological modelling in the Lake Titicaca region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 595-619. DOI: 10.5194/hess-23-595-2019
- Satgé, F., Xavier, A., Zolá, R. P., Hussain, Y., Timouk, F., Garnier, J., & Bonnet, M. P. (2017). Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main bolivian watersheds. *Remote Sensing*, 9(4), 1-16. DOI: 10.3390/rs9040369
- Simpson, J., Kummerow, C., Tao, W. K., & Adler, R. F. (1996). On the tropical rainfall measuring mission (TRMM). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 60(1-3), 19-36. DOI: 10.1007/BF01029783
- Sorooshian, S., Hsu, K. L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9), 2035-2046. DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<2035:EOPSSE>2.3.CO;2
- Steele, C., Dialesandro, J., James, D., Elias, E., Rango, A., & Bleiweiss, M. (2017). Evaluating MODIS snow products for modelling snowmelt runoff: Case study of the Rio Grande headwaters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63, 234-243. DOI: 10.1016/j.jag.2017.08.007

- Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 622-640. DOI: 10.1175/2007jhm944.1
- Sultana, R., & Nasrollahi, N. (2018). Evaluation of remote sensing precipitation estimates over Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments*, 151, 90-103. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2017.11.002
- Sun, R., Yuan, H., & Yang, Y. (2018). Using multiple satellite-gauge merged precipitation products ensemble for hydrologic uncertainty analysis over the Huaihe River basin. *Journal of Hydrology*, 566, 406-420. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.024
- Tahir, A. A., Chevallier, P., Arnaud, Y., Neppel, L., & Ahmad, B. (2011). Modeling snowmelt-runoff under climate scenarios in the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan. *Journal of Hydrology*, 409(1-2), 104-117. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.035
- Tan, M. L., & Santo, H. (2018). Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmospheric Research*, 202, 63-76. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.11.006
- Tang, L., Tian, Y., Yan, F., & Habib, E. (2015). An improved procedure for the validation of satellite-based precipitation estimates. *Atmospheric Research*, 163, 61-73. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.12.016

- Valverde-Ramírez, M. C., De-Campos-Velho, H. F., & Ferreira, N. J. (2005). Artificial neural network technique for rainfall forecasting applied to the São Paulo region. *Journal of Hydrology*, 301(1-4), 146-162. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.028
- Wang, X., Ding, Y., Zhao, C., & Wang, J. (2019). Similarities and improvements of GPM IMERG upon TRMM 3B42 precipitation product under complex topographic and climatic conditions over Hexi region, Northeastern Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 218, 347-363. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.12.011
- Zhang, A., Xiao, L., Min, C., Chen, S., Kulie, M., Huang, C., & Liang, Z. (2019a). Evaluation of latest GPM-Era high-resolution satellite precipitation products during the May 2017 Guangdong extreme rainfall event. *Atmospheric Research*, 216, 76-85. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.09.018
- Zhang, S., Xiang, M., Yang, J., Fan, W., & Yi, Y. (2019b). Distributed hierarchical evaluation and carrying capacity models for water resources based on optimal water cycle theory. *Ecological Indicators*, 101, 432-443. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.01.048
- Zhong, R., Chen, X., Lai, C., Wang, Z., Lian, Y., Yu, H., & Wu, X. (2019). Drought monitoring utility of satellite-based precipitation products across mainland China. *Journal of Hydrology*, 568, 343-359. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.072

Zhu, H., Li, Y., Huang, Y., Li, Y., Hou, C., & Shi, X. (2018). Evaluation and hydrological application of satellite-based precipitation datasets in driving hydrological models over the Huifa river basin in Northeast China. *Atmospheric Research*, 207, 28-41. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.02.022