

EVALUACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA EN LA CUENCA KATARI BASADO EN TECNOLOGÍA SATELITAL Y PRODUCTOS DERIVADOS

EVALUATION OF DISTRIBUTED PRECIPITATION WITHIN KATARI BASIN USING SATELLITE BASED PRODUCTS

Jhonatan E. Ureña¹, Andrés G. Vallejos¹, Oliver C. Saavedra¹ y Ana C. Escalera²

¹Centro de Investigación en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)
Universidad Privada Bolivia,

²Dirección General de Planificación, Ministerio de Medio Ambiente y Agua (UEE/DGP/MMAyA),
oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 20 de Mayo 2018, aceptado para publicación el 19 de Junio 2018)

RESUMEN

La medición de la precipitación espacial, en alta resolución, es una variable crucial en la modelación hidrológica de cuencas, pero debido a las limitantes con respecto a la cantidad y distribución de pluviómetros, se hace necesario la generación de datos utilizando productos satelitales de precipitación. Para este estudio se usaron los productos: GSMaP, CHIRPS y GMET, cada uno con una resolución espacial y temporal diferente. El área de estudio es la cuenca Katari, al noreste de la ciudad del Alto y presenta alturas entre los 3 800 a 5 200 m.s.n.m. El periodo temporal seleccionado fue 2000 – 2016 y para ello se realizó un análisis comparativo dividido en subcuencas, donde se emplearon dos niveles comparativos: una comparación entre productos de precipitación base (GSMaP, CHIRPS y SENAMHI) y una comparación entre “GS-Katari”, un producto combinado por el método de ajuste iterativo entre GSMaP y SENAMHI, y “GMET”, un producto combinado a través de métodos estocásticos entre SENAMHI y CHIRPS. Inicialmente se demostró que, tanto GSMaP como CHIRPS presentan una sobrestimación de sus intensidades de precipitación con respecto a los datos de tierra, sin embargo, aparentemente presentan una excepción al acercarse al Lago Titicaca. Posteriormente, se realizó 5 iteraciones de ajuste para obtener el producto combinado GS-Katari, este producto ajustado presenta intensidades de precipitación que tienden a la subestimación con rangos menores al 10% del valor medido en tierra. Posterior a la generación del producto, se analizó los datos de precipitación entre GMET y el producto combinado y se comprobó que GMET presenta una sobrestimación con respecto a SENAMHI, pero en el área cercana al Lago Titicaca, se observa que GMET presenta una subestimación similar a CHIRPS y GSMaP con respecto a las intensidades de SENAMHI. Los resultados del presente artículo buscan proporcionar datos con una mayor resolución espacial e intensidades de precipitación más procesadas con el fin de generar modelos hidrológicos con menos incertidumbres, con el fin de gestionar de mejor manera los recursos hídricos para la zona.

Palabras Clave: Cuenca Katari, GSMaP, CHIRPS, GMET, Productos de Precipitación Satelital.

ABSTRACT

Aerial precipitation data is an important variable to run distributed hydrological models. Due to the limitation in the location and quantity of gauge stations, it is necessary to generate precipitation data based in Satellite-Based-Precipitation. In this paper it was used three different products: GSMaP, CHIRPS and GMET, each one with its own spatial and temporal resolution. The study area is the Katari basin, located in the Bolivian Altiplano, presents a variation in the altitude between 3 800 and 5 200 m.a.s.l. The selected evaluation period was 2000 to 2016, it has been realized a comparative analysis at sub basin level. In this task there were two levels of comparison: 1) among the original precipitation products (GSMaP, CHIRPS y SENAMHI) and a comparison between the developed products GS-Katari (corrected by the iterative adjustment) and GMET (a grid product developed stochastically). Both GS-Katari and GMET used the observation rain gauge network so-called SENAMHI as control data set. At first level, GSMaP and CHIRPS showed an overestimation of the precipitation intensities comparing with ground data, except at the sub basin near Titicaca Lake. Then, it was carried out five adjustment iterations to obtain the combined product GS-Katari. This product showed precipitation data that tends to slightly underestimate in ranges less than 10 percent comparing with ground data. At second level, GS-Katari and GMET were compared and it was checked that GMET overestimate comparing with the data from the gauge stations and there are high underestimates near the Titicaca Lake. This paper attempts to increase the spatial and temporal resolution of precipitation data to be used as input to hydrological models and then wiser water resource management of the basin.

Keywords: Basin Katari, GSMaP, CHIRPS, GMET, Satellite Precipitation Products.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de recursos hídricos está teniendo mucha relevancia en los últimos años, debido principalmente a ciertos fenómenos de naturaleza tanto naturales como antropogénicas. Durante los últimos 5 años, Bolivia sufrió sequías en el 46% del total de sus municipios, que se origina debido a la falta de precipitación y a las altas temperaturas como el caso que se dio en la zona del Altiplano. Los municipios de Achacachi, Calacoto, Charaña y Puerto Acosta entre otros; son los más afectados durante los periodos de sequías en el departamento de La Paz. Cabe mencionar que como consecuencia de las sequías, el Lago Poopó, perteneciente al departamento de Oruro y al Altiplano; con una superficie de 2 337 km², perdió todo su volumen de agua a finales del año 2015 [2]. Dado que la cuenca Katari se halla en el Departamento de La Paz, éste posee una ocurrencia de retorno de sequías, para el lapso de 30 años, de 1 de cada 2 años [1].

El análisis de precipitaciones puede ser utilizado en la elaboración de alertas tempranas ante la variación de precipitación, para ello, la medición de la precipitación puede realizarse por varios métodos, entre ellos: manejo de pluviómetros, uso de sensores satelitales o manejo de radares satelitales. En el caso de Bolivia, los datos de precipitación y temperatura son captados a través del uso de pluviómetros y estaciones meteorológicas terrestres. El “Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología” (SENAMHI), entidad encargada de recopilar la información, cuenta con un total de 699 estaciones pluviométricas distribuidas en todo el país, de las cuales 547 se encuentran funcionando [3]. Su distribución se halla centrada en los ejes metropolitanos y sus alrededores. Esto se debe a la dificultad que implica el manejo, control y mantenimiento que las estaciones requieren. Debido a esto, el análisis de precipitaciones utilizando únicamente datos de estaciones terrestres presenta varios inconvenientes, es por ello que se puede utilizar información satelital para completar y generar información de precipitación.

La precipitación basada en productos satelitales es obtenida mediante la combinación de datos de varios instrumentos, entre ellos: sensores de microondas pasivos (PMW) en la órbita baja de la Tierra y radiómetros infrarrojos (IR) en la órbita geostacionaria de la Tierra [4]. Existen otros métodos para obtener la información de precipitación tales como el uso de radares. Entre estos elementos se genera el mapa de precipitaciones de una región determinada con diferentes resoluciones espaciales y temporales. Debido a la gran cantidad de satélites y que cada uno cuenta con diferentes tipos de sensores, existen una gran cantidad de productos de precipitación satelital. Entre los productos satelitales que se usaron para el presente estudio se encuentran: GSMaP, CHIRPS y GMET.

“Global Satellite Mapping of Precipitation” (GSMaP) es un producto creado por la “Japan Aerospace Exploration Agency” (JAXA) y patrocinada por “Japan Science and Technology Agency (JST)” [5]. El funcionamiento de dicho producto empezó en Noviembre de 2002, mostrando resultados en Marzo de 2003 y su funcionamiento continúa hasta la fecha. Los sensores implementados para la elaboración de algoritmos capaces de procesar los datos son: Radiómetro de Microondas (MWR) e Infra-Rojos para puntos ciegos (MWR-IR) [5]. Las características que presenta este producto con respecto a la resolución espacial equivalen a un grillingado de 0.1° (aproximadamente 10 km) y una resolución temporal de 1 hora. El formato de presentación de este producto al formato “Coma-Separated Value” o “CSV”.

“Climate Hazards Group Infrared Precipitations with Stations” (CHIRPS) es un producto elaborado por “Climate Hazards Group” en colaboración con “U.S. Geological Survey” (USGS), “National Aeronautics and Space Administration” (NASA) y “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA), con el fin de desarrollar y elaborar mapas de precipitación en áreas con información escasa [6]. El sensor base de este producto es el infrarrojo (Cold Cloud Duration o CCD), no obstante, se implementó un ajuste a los datos obtenidos implementando el producto “CPC MORRHing Technique” (CMORPH), perteneciente al NOAA [7]. Con respecto a sus características, este producto presenta una resolución espacial de 0.05° (aproximadamente 5 km) y una escala temporal de 1 día. Contando con información desde 1981, CHIRPS presenta sus datos en dos formatos: Raster y NetCDF, ambos formatos visuales.

“Gridded Meteorological Ensemble Tool” (GMET), desarrollado por el “Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de USA” (NCAR en sus siglas en inglés), es un nuevo producto implementado por el “Ministerio de Medio Ambiente y Agua” (MMAyA) y el “Instituto del Ambiente del Estocolmo” (SEI) para el desarrollo del Balance Hídrico Superficial para Bolivia [8]. Dicho producto, viene del análisis de estaciones pluviométricas bolivianas de SENAMHI en conjunto de otras estaciones de países vecinos a través de la implementación de métodos estocásticos de generación de datos. Como complemento, se usó información de CHIRPS para poder generar datos en zonas que no presentan precipitación. Las características de este producto presentan una resolución espacial de 0.05° y una temporal de 1 día. El formato de presentación de datos de este producto corresponde a un único archivo NetCDF con información desde Enero de 1980 hasta Agosto de 2016.

La aplicación de varios productos satelitales como ser: CFSR, MERRA y TRMM 3B42; en zonas de estudio con grandes superficies, como lo es Bolivia [9], permite observar a grandes rasgos, las diferentes intensidades de precipitación que existen en un territorio y las tendencias que existen durante las temporadas de lluvia. Sin embargo, al no centrarse en una zona de estudio con alguna particularidad específica, no permite observar el verdadero potencial del producto.

La implementación de GSMaP, como base de datos para el desarrollo de un producto combinado, ya fue probada en la zona metropolitana de Cochabamba [10]. En ella, se muestra que GSMaP presentaba una subestimación con respecto a los datos pluviométricos de la zona de estudio. Sin embargo, el estudio solo permitió la evaluación de dos épocas de lluvias. Aun no se han realizado pruebas en otras cuencas en Bolivia, además de su validación con productos grillados. El objetivo de este estudio es la generación de un producto de precipitación de mayor resolución para la cuenca Katari en el Altiplano de Bolivia empleando los productos satelitales GSMaP y CHIRPS en el periodo 2001-2015. Se propone un método de ajuste de precipitación iterativo entre el producto GSMaP y las mediciones disponibles en tierra.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Katari, se encuentra en el departamento de La Paz, a una altura entre los 3 800 a 5 200 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y cuenta con una superficie aproximada de 2 955 km². Esta cuenca descarga sus aguas al Lago Titicaca tal como se ve puede ver en la Figura 1, donde la dirección del curso principal es al noroeste.

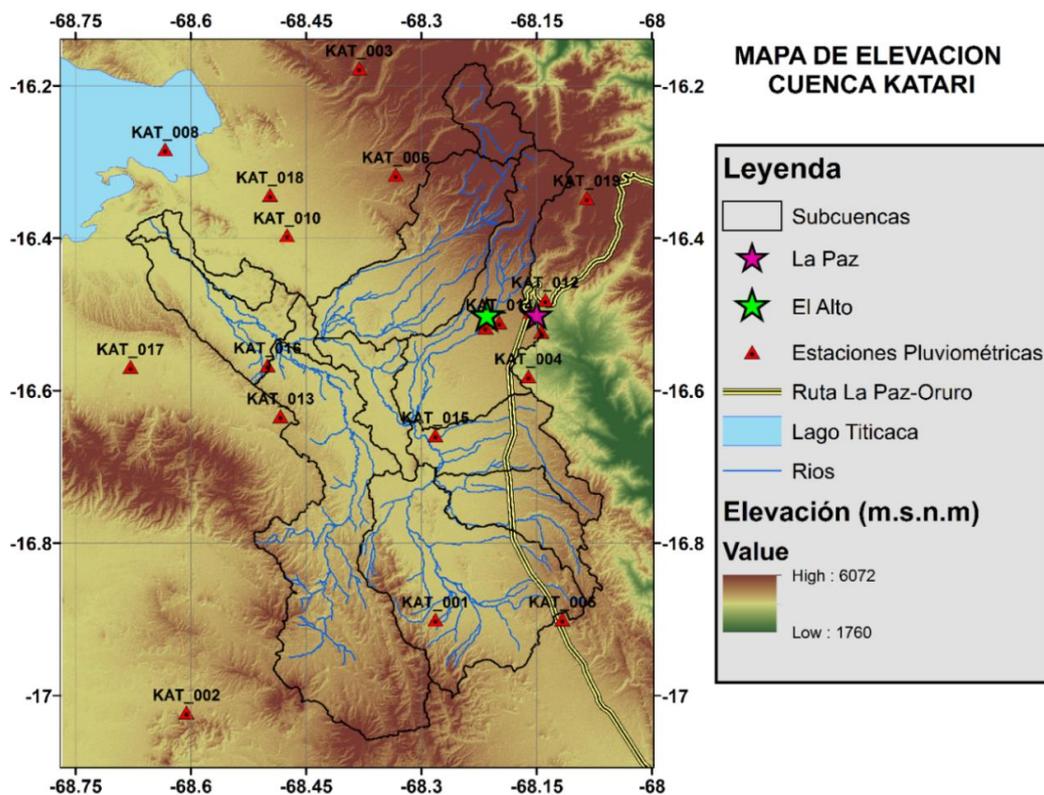


Figura 1: Mapa de Elevación, hidrografía y ubicación pluviómetros en la Cuenca Katari.

La zona oriental de la cuenca presenta una mayor densidad poblacional, como ser la ciudad de El Alto con 848 452 habitantes [11]. Por otro lado, la zona Sur de la cuenca, presenta varias comunidades, cada una entre 1 000 y 2 000 habitantes [12]. En aspectos agropecuarios, en la cuenca principalmente cebada y papa. Otros productos que se encuentran en la zona son: quinua, haba, avena, alfalfa y trigo. En ganadería, la cuenca presenta ganados ovino y bovino principalmente. Otros tipos de cabezas de ganado presentes son: porcinos y camélidos.

La demanda hídrica exigida por las diferentes poblaciones y sus respectivas actividades económicas, llega a 98 millones de metros cúbicos de agua aproximadamente. Los 2/3 de dicha cantidad de agua se emplea para el uso doméstico [12].

La situación del agua en la cuenca Katari presenta niveles de contaminación alta, resultado de la generación de basura por parte de poblados y la presencia de abono cerca de los lechos de los ríos. Otro problema que asola esta cuenca son las sequías que se desarrollan debido a la baja y ausencia de precipitaciones, que son importantes para el desarrollo de la zona [2]. Otro aspecto importante con respecto a esta cuenca, son las inundaciones que se presentan río debajo de la misma durante temporadas de lluvias [12].

En la Figura 2, se observa el mapa de precipitaciones de la cuenca Katari con datos proporcionados por las estaciones pluviométricas de SENAMHI. La precipitación media anual se encuentra entre 470 y 742 mm promedio durante el

periodo 2001-2015. Las precipitaciones mayores observadas se ubican en la zona noreste de la cuenca, zona montañosa y a la salida de la cuenca, por la disponibilidad de agua de evaporación del lago. La temperatura que presenta la cuenca Katari, oscila entre mínima media registrada de -5°C y una máxima media de 15 °C. El clima es típico del altiplano andino.

Para dar mayor información dentro la cuenca, se ha subdividido la cuenca en 12 sub-cuencas tal como se ve en la Figura 2. La Tabla 1 contiene un resumen de las características morfológicas de cada sub-cuenca.

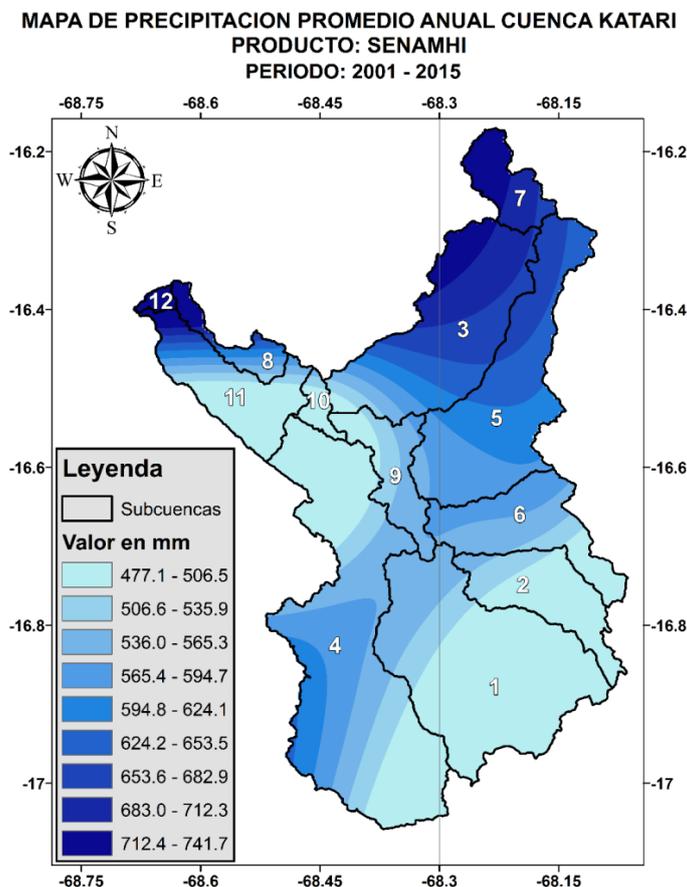


Figura 2: Mapa de precipitación anual de la cuenca Katari (2001-2015) usando pluviómetros interpolados

Fuente: Elaboración propia en base datos de SENAMHI.

TABLA 1 - TABLA RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LAS SUBCUENCAS DE KATARI

Subcuenca	Altitud Mínima (m.s.n.m)	Altitud Máxima (m.s.n.m)	Altitud Promedio (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Tipo de Terreno
1	3 800	4 400	4 100	0 – 7	A - B
2	3 800	4 300	4 050	0 – 3	A
3	3 800	5 000	4 400	0 – 7	A - B
4	3 800	4 700	4 250	0 – 7	A - B
5	3 800	5 000	4 400	0 – 7	A - B
6	3 800	4 300	4 050	0 – 3	A
7	4 400	5 200	4 800	3 – 12	B - C
8	3 800	3 900	3 850	0 – 3	A
9	3 800	4 000	3 900	0 – 3	A
10	3 800	4 000	3 900	0 – 3	A
11	3 800	4 000	3 900	0 – 3	A
12	3 800	3 900	3 850	0 – 3	A

Fuente: [13].

donde, **A:** Plano, Plano Cóncavo y Ligeramente Plano, **B:** Ligeramente Ondulado, Ligeramente inclinado, **C:** Ondulado, Inclinado y **D:** Fuertemente Ondulado e Inclinado.

3. METODOLOGÍA

Se recopilaron y formatearon los datos de precipitación de SENAMHI, de los productos satelitales GSMaP y CHIRPS, como también de la grilla GMET. Estos productos fueron empleados en la comparación y ajuste de sus sesgos de datos y aprovechar las bondades de cada producto para la generación de una base de datos de mayor resolución. En esta sección se detallan los pasos necesarios.

3.1. Preparación de los datos

Inicialmente se hizo una recopilación de datos de precipitación publicados en diferentes fuentes disponibles que abarcan el área de estudio. Con estos datos de las fuentes seleccionadas de SENAMHI, GSMAP, CHIRPS y GMET, se procedió a hacer una comparación espacial y temporal de los datos presentados en la cuenca de estudio. En este proceso inicial de comparación se determinó combinar los datos de GSMaP con la base de datos de SENAMHI y el producto CHIRPS. Una vez combinado GSMaP con SENAMHI se procedió a un segundo nivel (evaluación) de GSMaP corregido con la grilla GMET. Estos niveles y procesos de comparación de datos se presentan en la Figura 3.

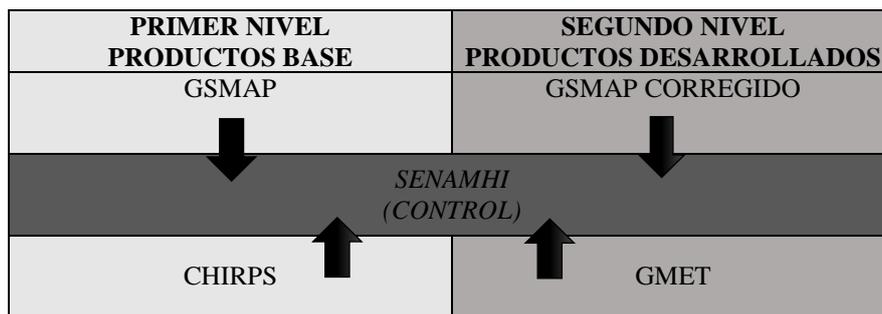


Figura 3: Flujograma de Análisis de los productos satelitales usados.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar zonas de influencia se emplearon las 12 subcuencas como base para determinar el sesgo dentro de cada una y corregir en la realización de las iteraciones de ajuste del producto GSMaP.

3.2. Estaciones SENAMHI

Los datos capturados en tierra son los más importantes, ya que a diferencia de los demás productos satelitales que estima el agua precipitable, estos captan la precipitación que realmente llega a superficie terrestre.

Primeramente se realizó un control de calidad de las bases de datos para depurar y rellenar datos erróneos o la existencia de vacíos en la serie de datos. Los datos de las estaciones seleccionadas presentadas en la Tabla 2 fueron verificados para el periodo de tiempo establecido de la base de datos de SENAMHI [14].

TABLA 2 - ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EMPLEADAS

Código	Estación	Latitud	Longitud	Código	Estación	Latitud	Longitud
KAT_001	Collana	-16.90	-68.28	KAT_011	Villa Adela	-16.52	-68.22
KAT_002	Caquiaviri	-17.02	-68.61	KAT_012	Vino Tinto	-16.48	-68.14
KAT_003	Hichucota	-16.18	-68.38	KAT_013	Yanamuyo Alto	-16.63	-68.48
KAT_004	Achocalla	-16.58	-68.16	KAT_014	El Alto Aeropuerto	-16.51	-68.20
KAT_005	Calamarca	-16.90	-68.12	KAT_015	Viacha	-16.66	-68.28
KAT_006	Chuñavi Alto	-16.32	-68.33	KAT_016	Tambillo_LP	-16.57	-68.50
KAT_007	El Tejar	-16.50	-68.16	KAT_017	Tiawanacu	-16.57	-68.68
KAT_008	Peñas	-16.28	-68.63	KAT_018	Huayrocondo	-16.34	-68.50
KAT_009	Pasankeri	-16.52	-68.14	KAT_019	Alto Achachicala	-16.34	-68.08
KAT_010	Pucarani	-16.40	-68.47				

Fuente: Elaboración propia.

Una característica particular en el uso de estos datos es que dichas estaciones proporcionan datos puntuales, y para poder tener datos distribuidos espacialmente en las sub-cuencas se ha tenido que emplear el método de integración mediante polígonos de Thiessen manteniendo una resolución de grilla y delimitación de la cuenca idéntica a la de los demás productos a comparar.

3.3. Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP)

Los datos de GSMaP descargados en su sexta versión en una serie horaria continua para la zona central de Sudamérica fueron procesados para la cuenca en estudio igualando la resolución establecida y acumulando los datos horarios a una escala temporal diaria y mensual con la que se trabajó en los diferentes productos [15]. Este producto está disponible desde el 2000 a la fecha. Al igual que los demás productos se tabularon los datos de precipitación en las diferentes subcuencas establecidas y se verificó la consistencia de los datos a emplearse.

3.4. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)

Se descargaron los datos de precipitación de este producto en formato *raster*, pero debido a que sus datos presentan información global, fue necesario realizar un recorte inicial para evitar largos periodo de ajuste. Posteriormente, se realizó el proceso de ajuste a la escala temporal mensual y resolución establecida para su comparación [16]. Este producto está disponible desde el 2000 a la fecha.

3.5. GMET

GMET, es un producto que aún no se encuentra disponible al público. No obstante, gracias a la invitación del MMAyA, se logró tener acceso a dicha información y a su único archivo en formato NetCDF (.nc). Para poder extraer los datos de este archivo, se implementó un script en lenguaje “R” que permite extraer archivos del periodo requerido y posteriormente, formatear los datos con idénticas características que los otros productos. Este producto está disponible desde 1980 a 2016.

3.6. Evaluación de Datos

En una etapa inicial, se realizó el análisis comparativo de la precipitación anual de SENAMHI versus los productos GSMaP y CHIRPS; se observa que existe similitudes y diferencias en las sub-cuencas 3 y 12 respectivamente, como se puede apreciar en los paneles de la Figura 4.

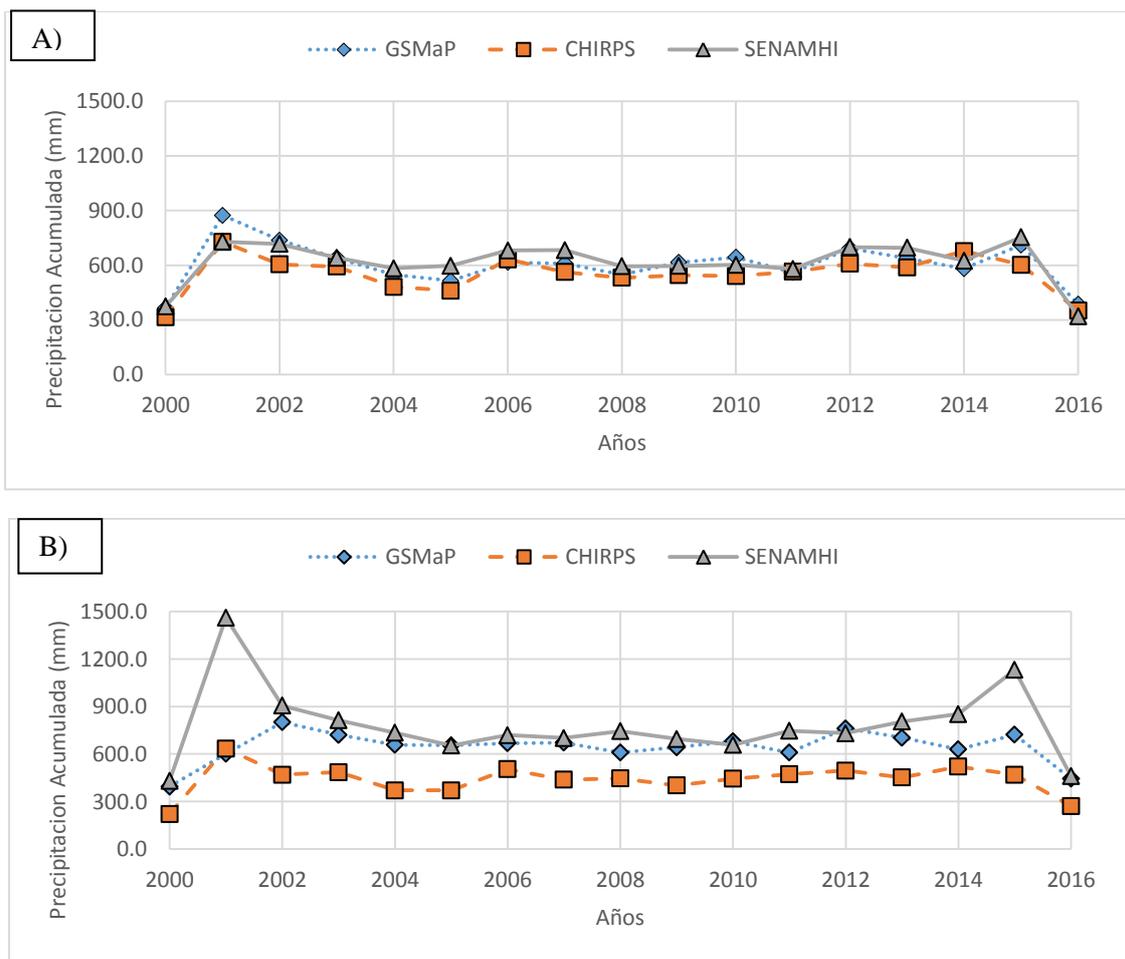


Figura 4: Precipitación Anual con los 3 productos base en la subcuenca 3 (A) y la subcuenca 12 (B).

Fuente: Elaboración propia.

En la subcuenca 3 se puede apreciar una ligera sobreestimación de los productos GSMaP y CHIRPS; en cambio, en la subcuenca 12 se puede apreciar una subestimación. La ubicación de subcuencas está definido en la Figura 2.

En el panel A, correspondiente a la subcuenca 3 ubicada en la parte norte, se observa que los 2 productos de precipitación no presentan variación de precipitación. Sin embargo, para el Panel B, se comprueba que la subcuenca 12 (cerca al lago) presenta puntos donde los productos satelitales claramente subestiman al compararse a los datos de SENAMHI.

En la Figura 5, se observan los mapas de precipitación promedio anual para los productos satelitales GSMaP y CHIRPS, donde se observa la distribución espacial de la precipitación para el producto GSMaP en la subcuenca 4 de manera pronunciada. Igualmente, se constata una subestimación pronunciada del producto CHIRPS en la subcuenca 12.

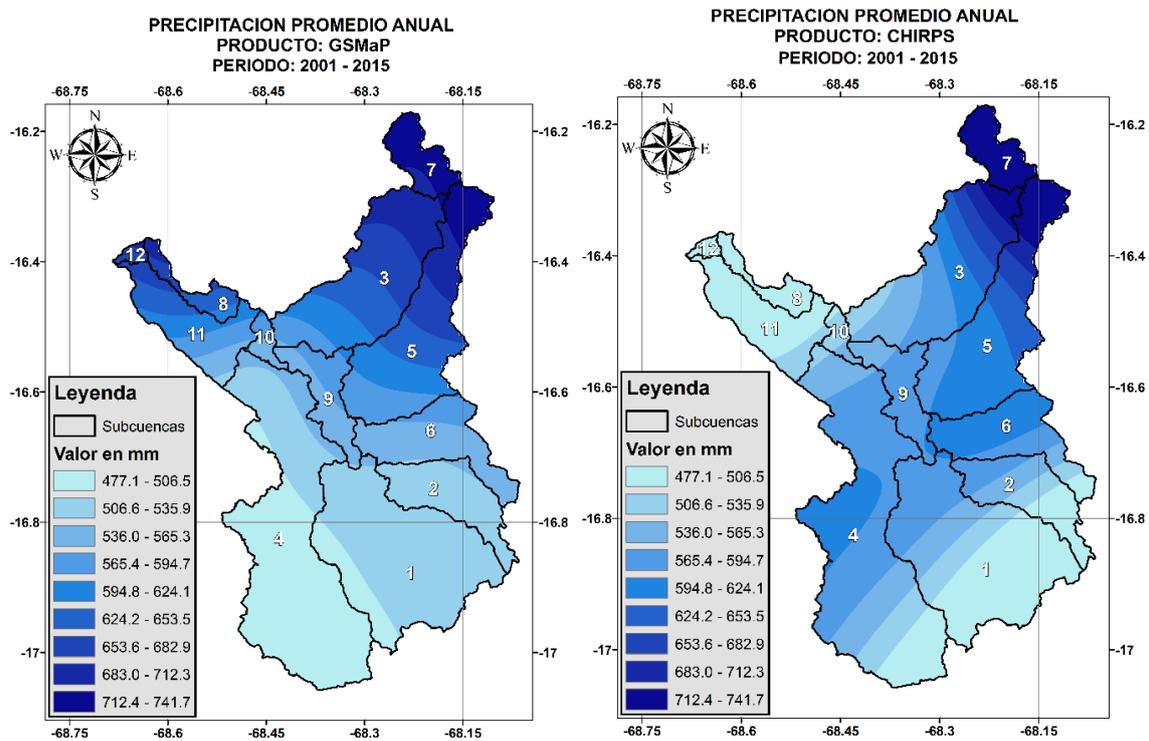


Figura 5: Mapa de Precipitaciones Promedio Anual usando GSMaP Y CHIRPS

Para efectuar una comparación más objetiva entre productos, se realizó el análisis de proporción (producto satelital/control) y sesgo (producto satelital - control). En las Figuras 6 y 7, se observa los resultados del análisis de proporción y sesgo para las subcuencas 3 y 12.

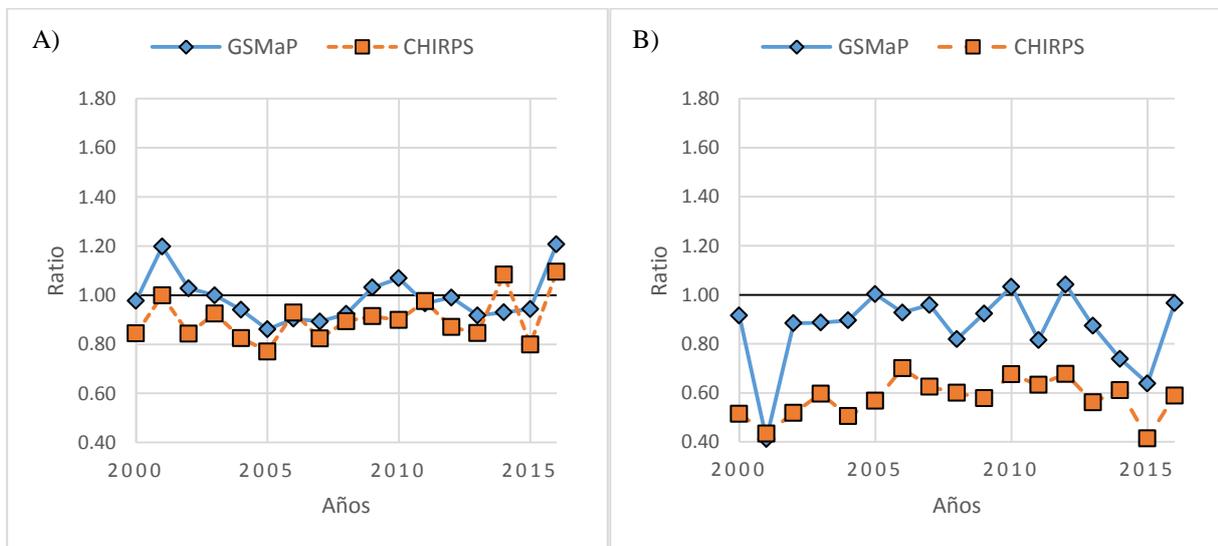


Figura 6: Proporción de GSMaP y CHIRPS en relación a SENMAHI para (A) subcuenca 3 y (B) subcuenca 12.

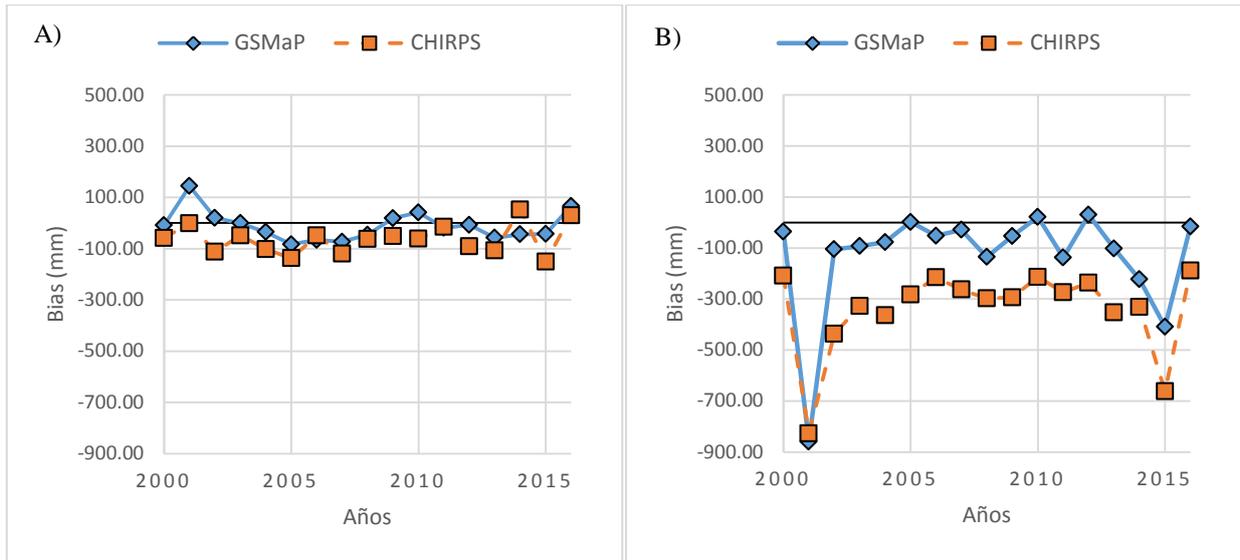


Figura 7: Sesgo de GSMaP y CHIRPS en relación a SENMAHI para (A) subcuenca 3 y (B) subcuenca 12.

En el caso de los Paneles A de las figuras 6 y 7, correspondiente a la subcuenca 3, se observa que las diferencias se encuentran entre un porcentaje promedio de $\pm 10\%$, en magnitud ± 100 mm de precipitación. En el caso de los Paneles B, se observa que ambos productos subestiman los datos de SENAMHI, viendo un pico que se aproxima al 60% o 900 mm aproximadamente en el año 2001. Se puede apreciar que GSMaP tiene mejor performance que CHIRPS para este periodo.

En las Figuras 8 y 9, se pueden observar el comportamiento de la proporción y sesgo de los productos GSMaP y CHIRPS para Enero del 2001, donde se puede magnificar las diferencias en todas las subcuencas. Si bien ambos productos presentan debilidades, se nota un mejor performance de GSMaP sobre CHIRPS para detectar la precipitación espacial y temporal en la cuenca Katari.

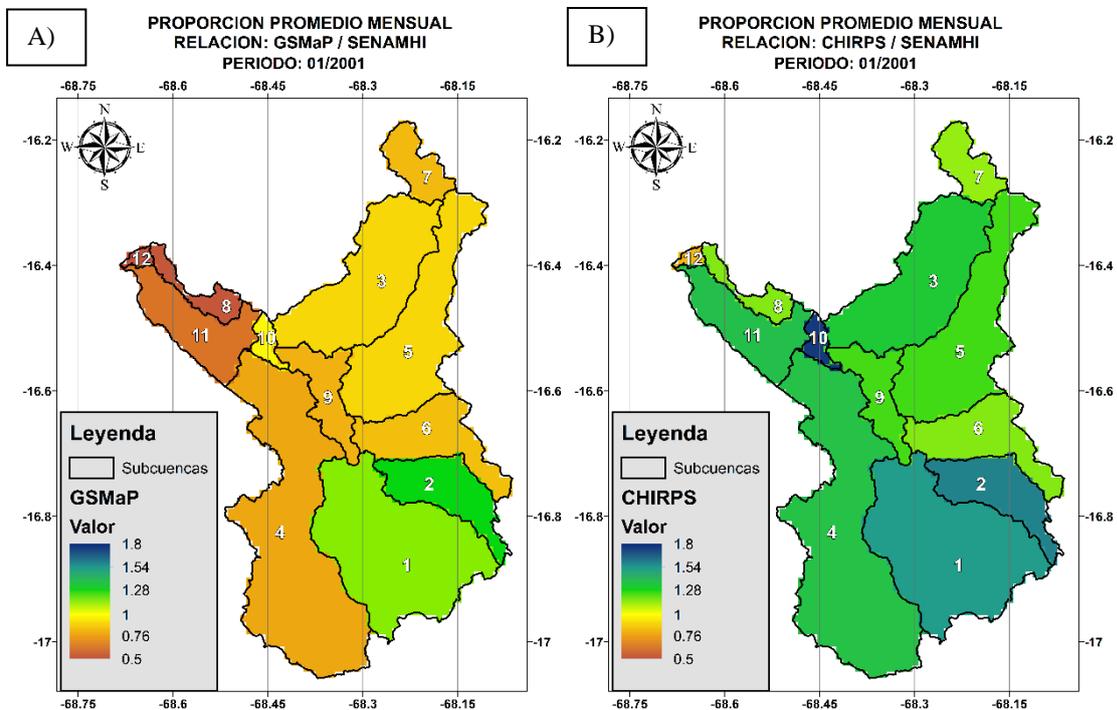


Figura 8: Mapas de Proporción Mensual de GSMaP (A) y CHIRPS (B) en relación a SENMAHI.

Fuente: Elaboración propia.

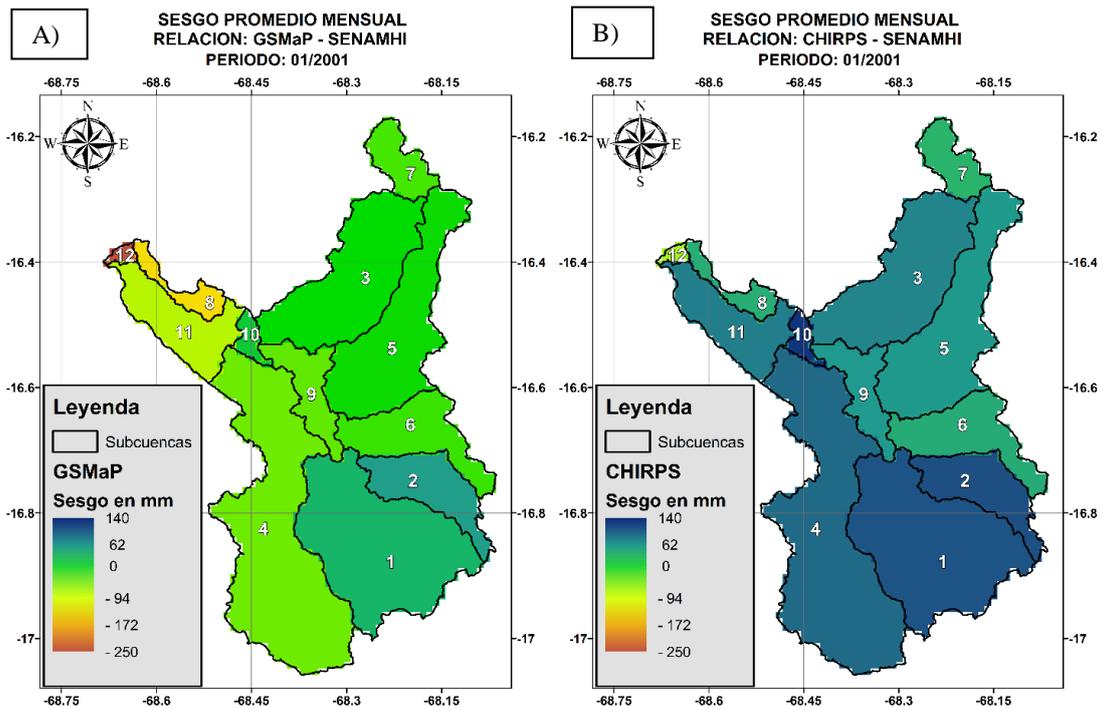


Figura 9: Mapas de Sesgo Mensual de GSMaP (A) y CHIRPS (B) en relación a SENAMHI.

3.7. Generación de producto GSMaP-SENAMHI

De acuerdo a los resultados encontrados en la sección anterior, se ha decidido emplear el producto GSMaP para generar un nuevo producto corregido en la base de datos de SENAMHI, precipitación de control.

Para realizar dicho ajuste, fue necesario el desarrollo de varios scripts en lenguaje Fortran y manejo de tablas en Excel. En la Figura 10, se presenta el flujograma con las actividades principales para la obtención del producto combinado entre GSMaP y SENAMHI.

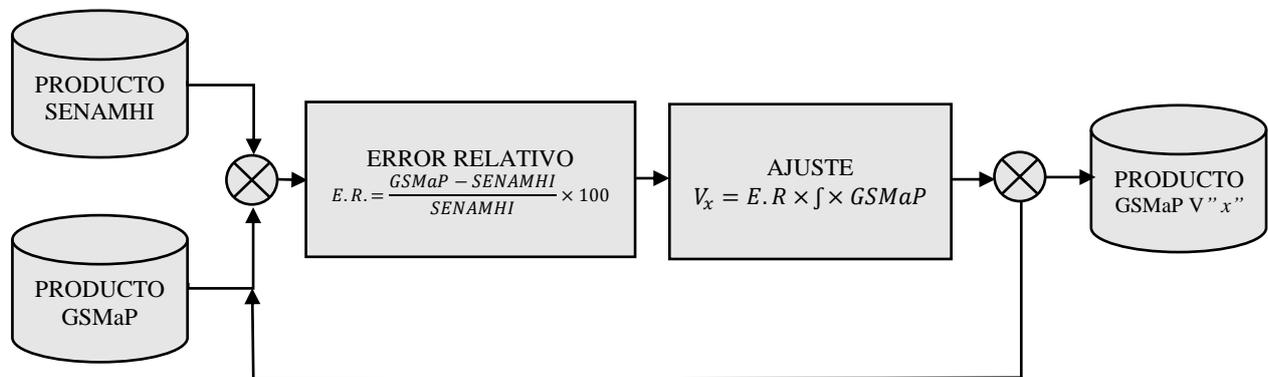


Figura 10: Flujograma de procesos para la obtención del producto combinado.

Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, se procedió a la obtención del error relativo a través de un script en función de la ecuación (1), donde los datos de entrada corresponden inicialmente, a la base de datos mensual de los productos GSMaP Y SENAMHI. Posteriormente, se utilizó los datos resultantes de los ajustes en sus diferentes versiones “x”.

$$E.R._i [\%] = \frac{GE_i - GSM_i}{GE_i} \times 100 \tag{1}$$

donde $E.R._i$: Error Relativo en la posición i , GE_i : Precipitación de SENAMHI para la posición i , GSM_i : Precipitación de GSMaP para la posición i .

Posteriormente, se procedió a obtener el error relativo promedio por cada subcuenca. Se ha generado archivo de texto para cada subcuenca, incluyendo el número de pixeles que la conforma. Luego, se procedió a realizar la tabulación de

dichos promedios, utilizando las coordenadas de puntos empleados. Las tablas resultantes en formato CSV, fueron analizadas en un documento Excel, que permitió determinar los valores de ajustes adecuados para cada mes de cada subcuenca aplicando un factor limitante de $\pm 95\%$.

Una vez obtenidos los valores de ajuste, estos son afectados por los factores de ajuste penalizado por un factor empírico sobre los datos base de GSMaP en base a la ecuación (2).

$$V_x = E.R \times f \times GSM_i \tag{2}$$

donde V_x : Precipitación GSMaP Ajustada para la posición i , E.R. $_i$: Error Relativo para la posición i , GSM_i : Precipitación de GSMaP para la posición i , f : Factor empírico de penalización por no presencia de estaciones de SENAMHI en la Subcuenca.

Una vez obtenido el valor afectado por la penalización, este forma parte de un nuevo documento CSV que sirvió como dato de entrada a un conjunto de scripts que aplicados a la versión inicial del producto de GSMaP dan como resultado los primeros datos ajustados a una escala temporal diaria y mensual.

Aplicando iterativamente este proceso espacialmente sobre todas las grillas de los diferentes productos mensuales de GSMaP se obtienen una mejora considerable del error relativo, sesgo y proporción lo cual de acuerdo a la hipótesis planteada aminora la las diferencias respecto a los datos de precipitación resultantes.

4. RESULTADOS

4.1. Producto Iterativo de Ajuste GSMaP-SENAMHI

En la Figura 11, se puede apreciar el desarrollo de las diferentes iteraciones para ajustar el producto original de GSMaP.

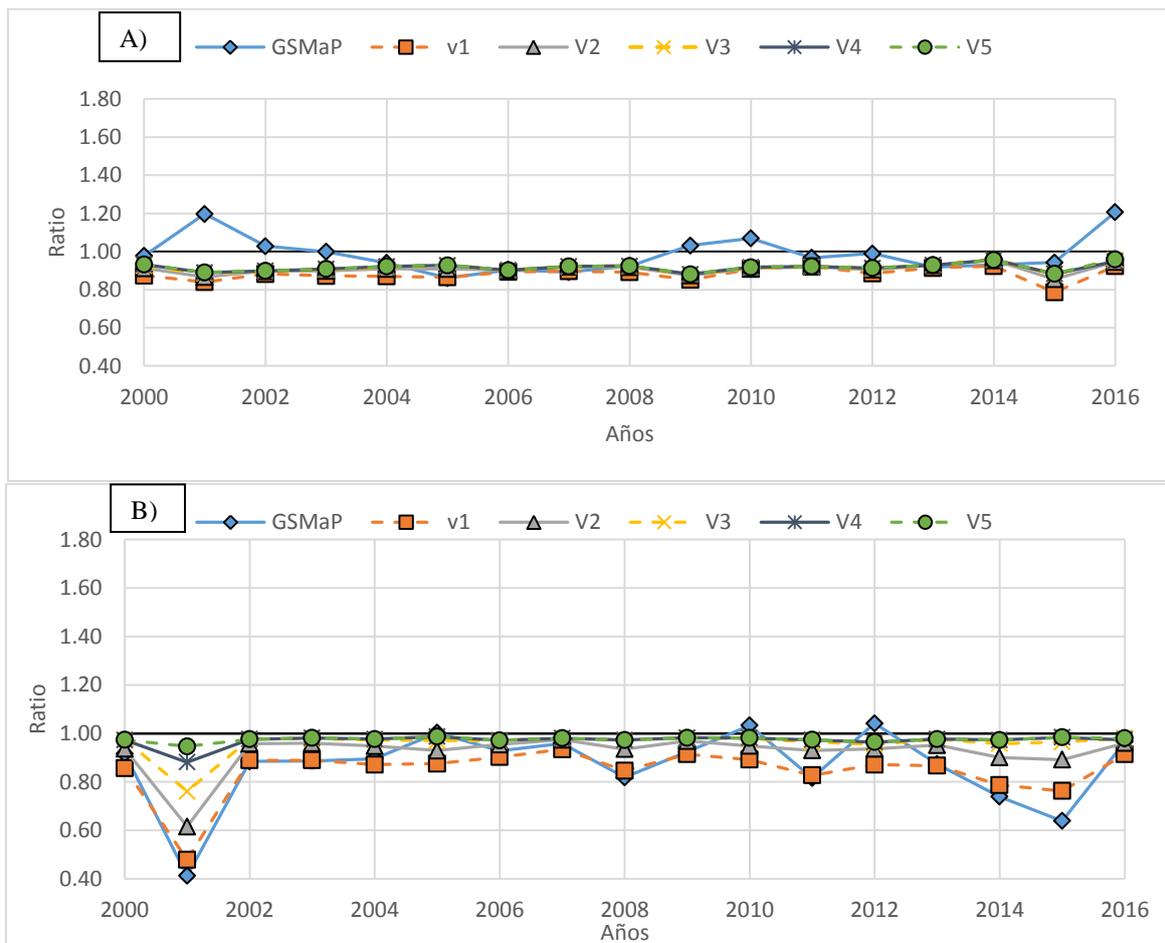


Figura 11: Proporción de Iteraciones en relación a SENAMHI para (A) subcuenca 3 y (B) subcuenca 12.

Fuente: Elaboración propia

Se han requerido cinco iteraciones que dieron lugar a las versiones 1, 2, 3, 4 y 5, donde se puede apreciar la reducción de diferencias entre ambas bases de datos de acuerdo a lo planteado.

Como se observa en la Figura 11, la corrección mediante iteraciones de los datos de GSMaP con relación a SENAMHI, muestran que se ejecuta bajo la premisa disminuir el error relativo. En el caso de la sub-cuenca 3 (Panel A de la Figura 11), muestra una mejora hasta acercarse hasta el 90% del valor real de SENAMHI. Por otro lado, en la sub cuenca 12 (Panel B de la Figura 11), muestra una mejora del 95 % al valor real de SENAMHI en la 5ta iteración (puntos en verde).

En la Figura 12, se muestra la distribución espacial de la precipitación generada por los productos corregidos de GSMaP para las iteraciones 1 y 5 en Enero de 2001. Los datos en su quinta iteración reflejan una mejora de los valores iniciales de GSMaP en relación a los de SENAMHI. Es claramente visible el caso de la subcuenca 12 en la cual las diferentes iteraciones de ajuste prácticamente lograron reducir la diferencia de precipitación a la mínima diferencia

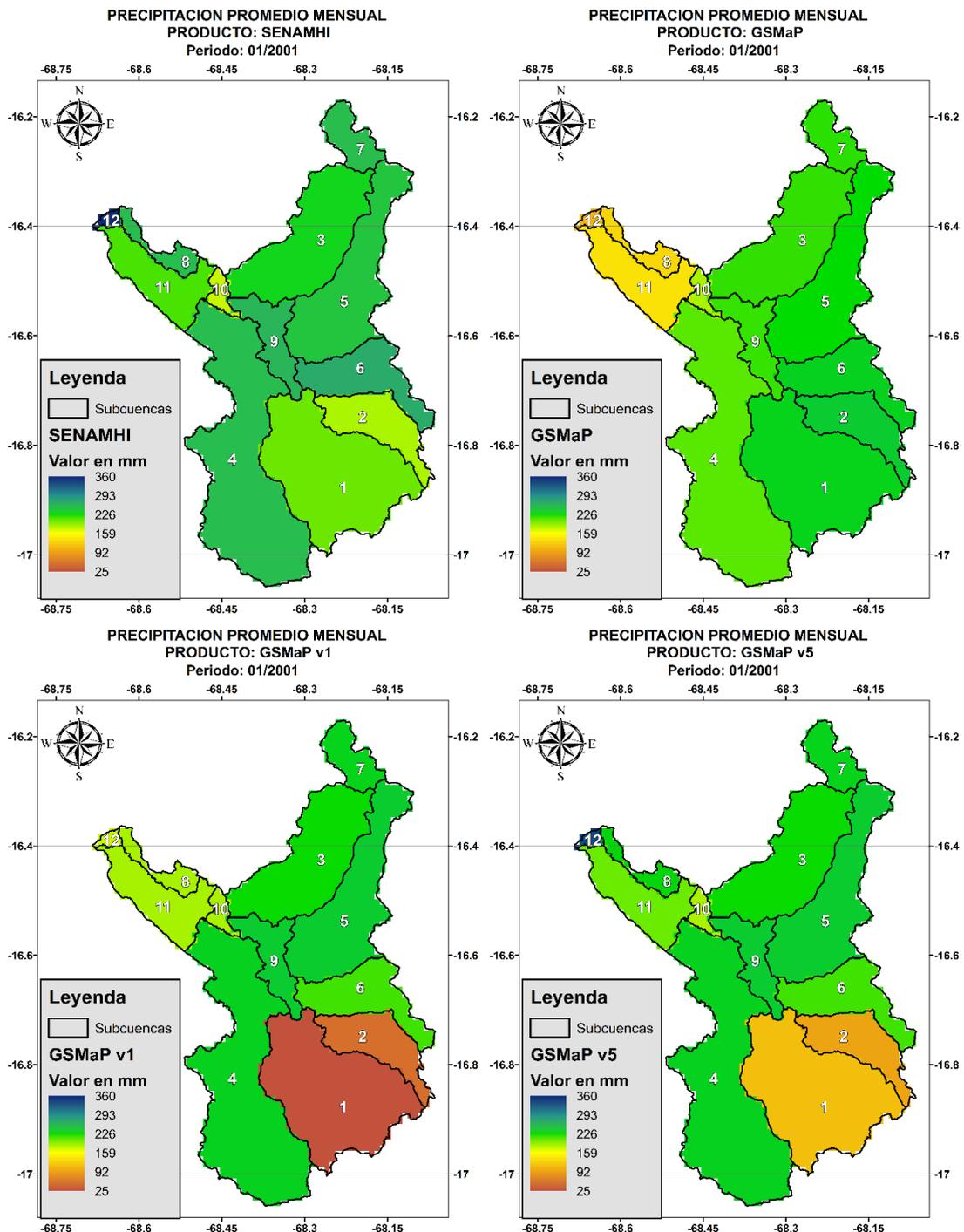


Figura 12: Mapas de Precipitación para enero 2001 usando SENAMHI, GSMaP, GSMaP v1 y GSMaP v5.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13, se observa la comparación de precipitación de GSMaP Original (puntos azul) y GSMaP v5 (triángulos rojo) en función a los datos de SENAMHI. En esta figura se nota claramente como GSMaP v5 ha mejorado respecto a GSMaP original. Desde este punto, el producto resultante GSMaP v5, pasara a llamarse GS-Katari.

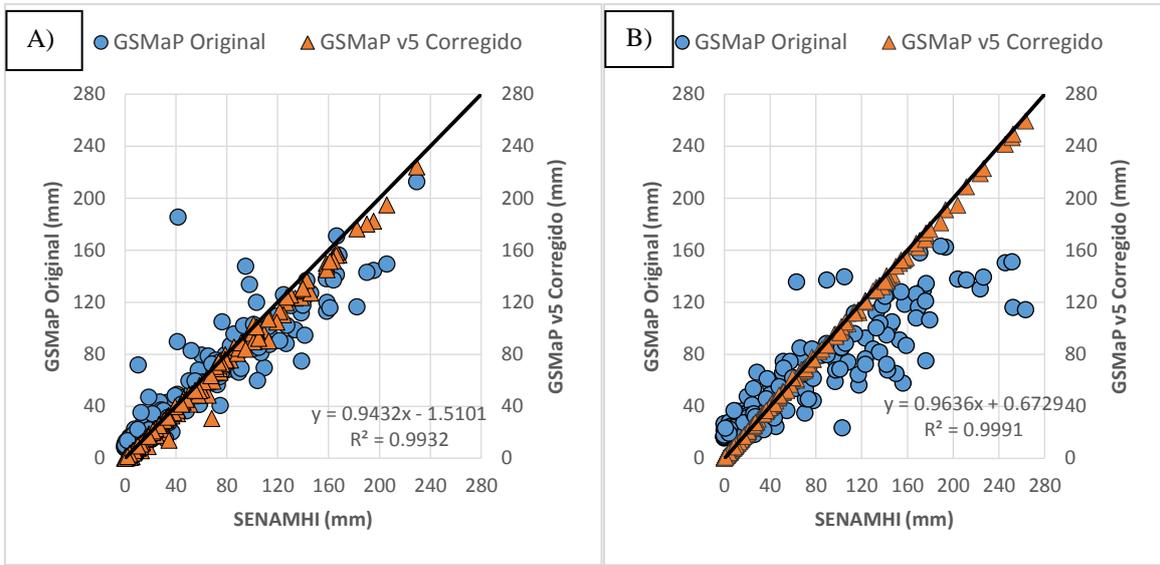


Figura 13: Diagramas comparativos GSMaP original y corregido para (A) subcuenca 3 y (B) subcuenca 12.

4.2. Evaluación de Producto Desarrollado

El producto generado GSMaP (corregido con la 5ta iteración, también denominado GS-Katari) es evaluado en esta sección con el producto de precipitación grillado GMET y los pluviómetros de SENAMHI interpolados.

Primeramente se comparó las series de tiempo de la precipitación anual de GS-Katari en las subcuencas 3 y 12 con GMET y SENAMHI.

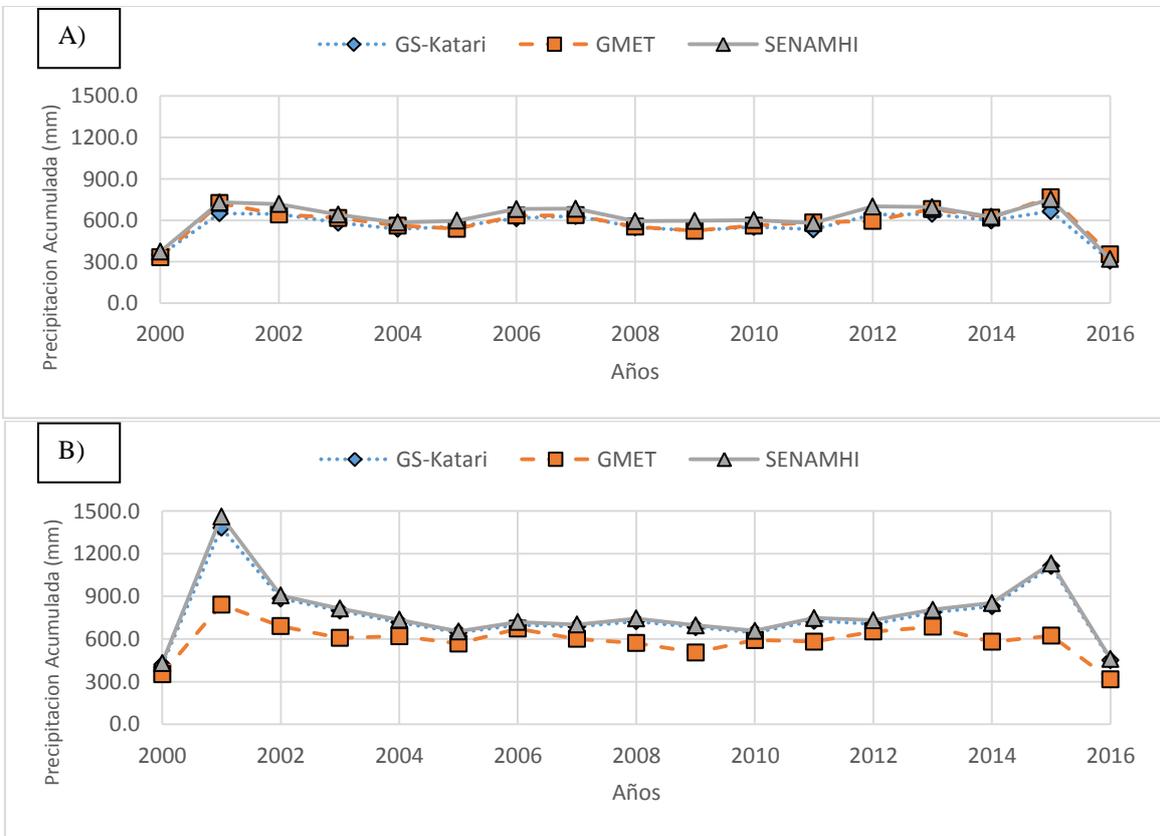


Figura 14: Precipitación Anual de Productos desarrollados para (A) subcuenca 3 y (B) subcuenca 12.

En la Figura 14 se observa que el producto generado GS-Katari se aproxima a SENAMHI, quedando el producto GMET subestimado especialmente para la subcuenca 12. En la Figura 15, se observa los mapas de precipitación anual (promedio 2001-2015) para toda las subcuencas usando GS-Katari y GMET. Se puede notar la distribución espacial de ambos productos denotando las mayores magnitudes en la parte norte (subcuencas 7, 3 y 12) y menores en la parte sureste (subcuenca 1). Al comparar GS-Katari con SENAMHI (ver Figura 2), se puede apreciar la similitud del patrón en la franja central (subcuencas 4, 9 y 5), lo cual no es visible con GMET.

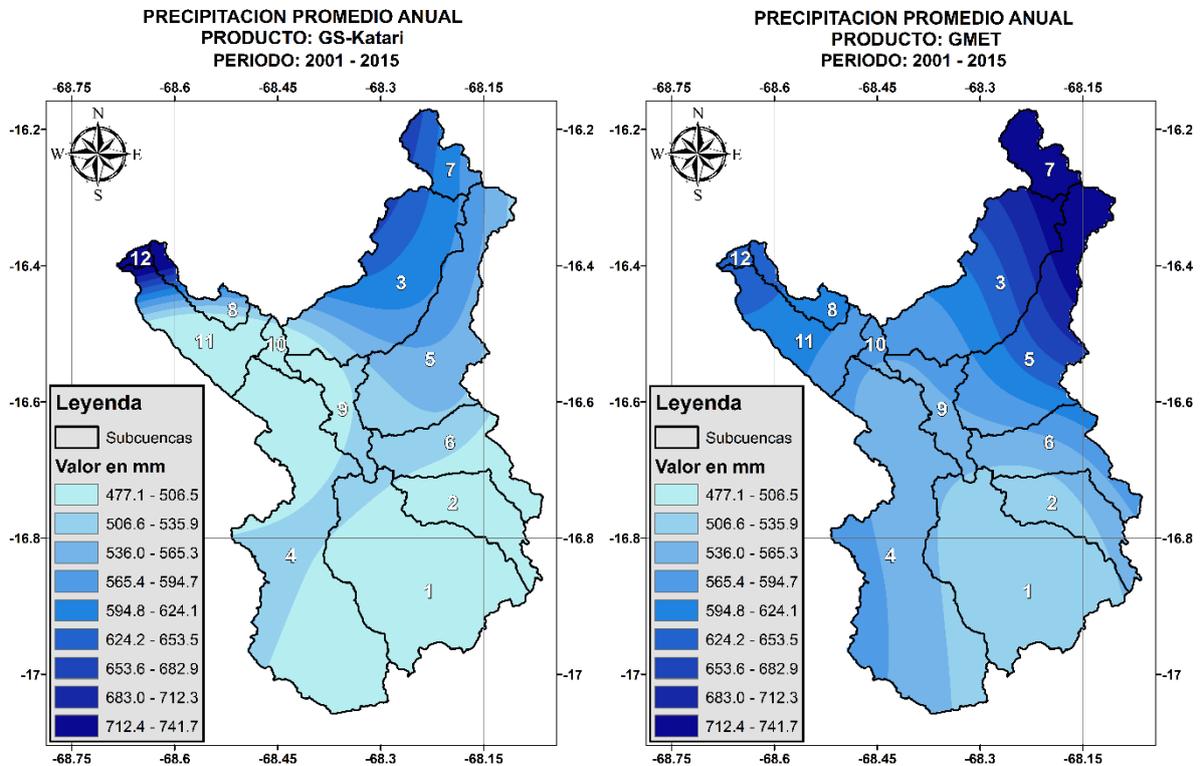


Figura 15: Mapa de distribución de precipitación anual (2001-2015) usando GS-Katari y GMET

Segundo, se realizó el análisis de proporción y sesgo para determinar la diferencia de GS-Katari y GMET en las subcuencas 3 y 12, tal como se puede apreciar en las Figuras 16 y 17. En estas figuras, se observa que el producto desarrollado GS-Katari presenta una mejoría notable con respecto GMET en ambas sub-cuencas.

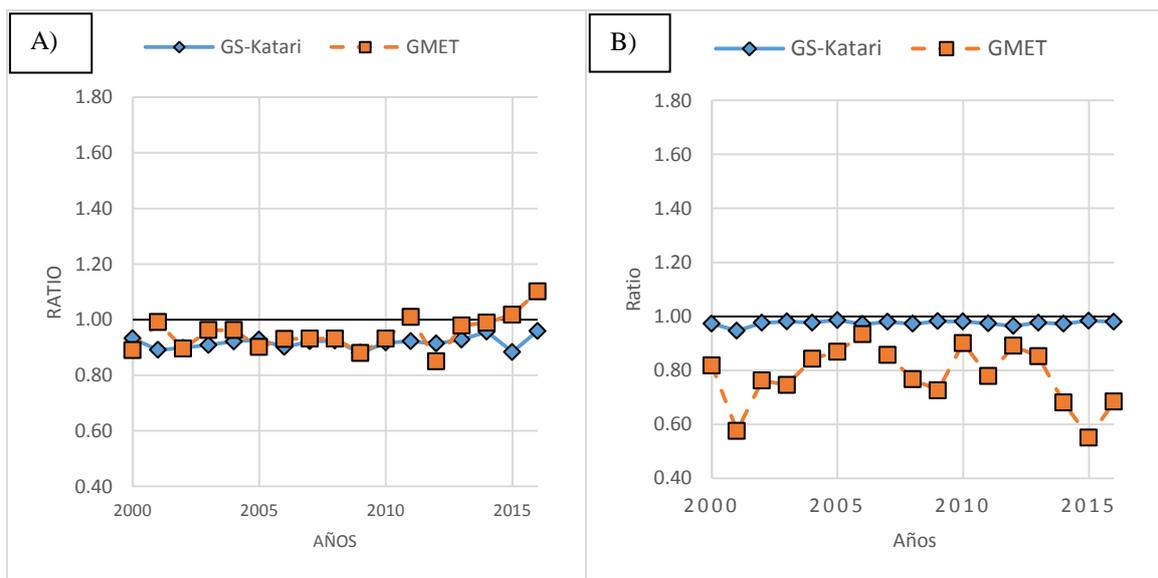


Figura 16: Proporción en relación a SENMAHI para (A) subcuenca 3 y (B) subcuenca 12.

Fuente: Elaboración propia.

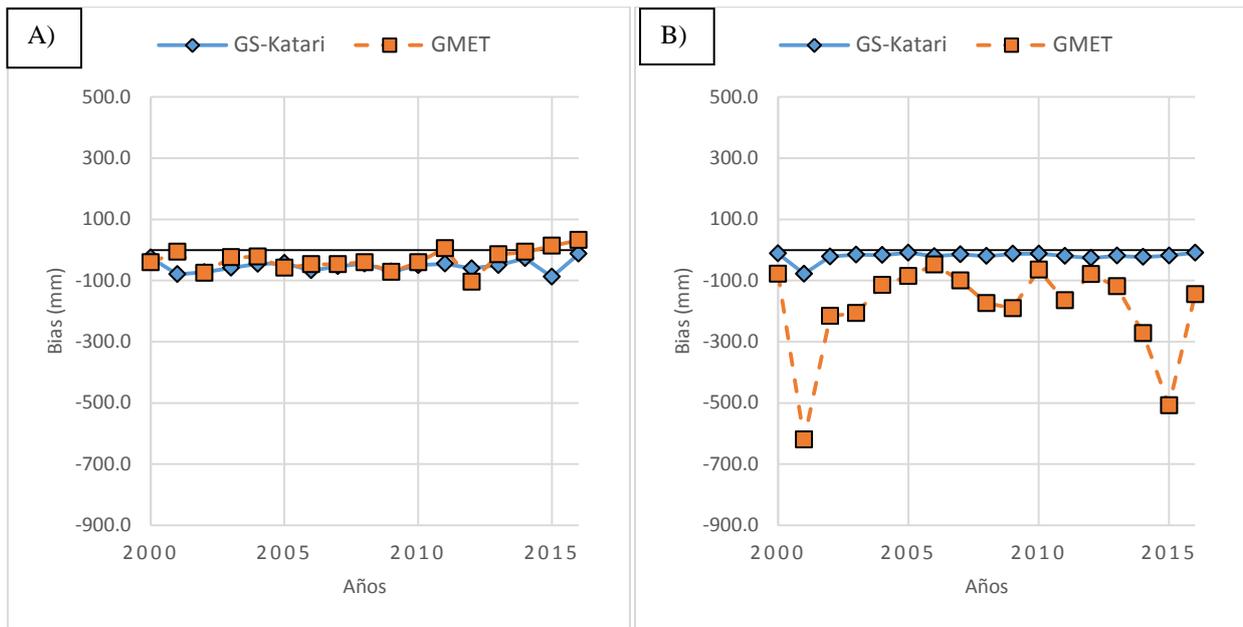


Figura 17: Sesgo en relación a SENMAHI para (A) subcuenca 3 y (B) subcuenca 12.

Fuente: Elaboración propia.

Tercero, se ha comparado los mapas de precipitación para todas las subcuencas para enero 2001 donde se puede apreciar las menores diferencias en proporción (Figura 18 con tendencia al color amarillo) y sesgo (figura 19 con tendencia al color verde claro).

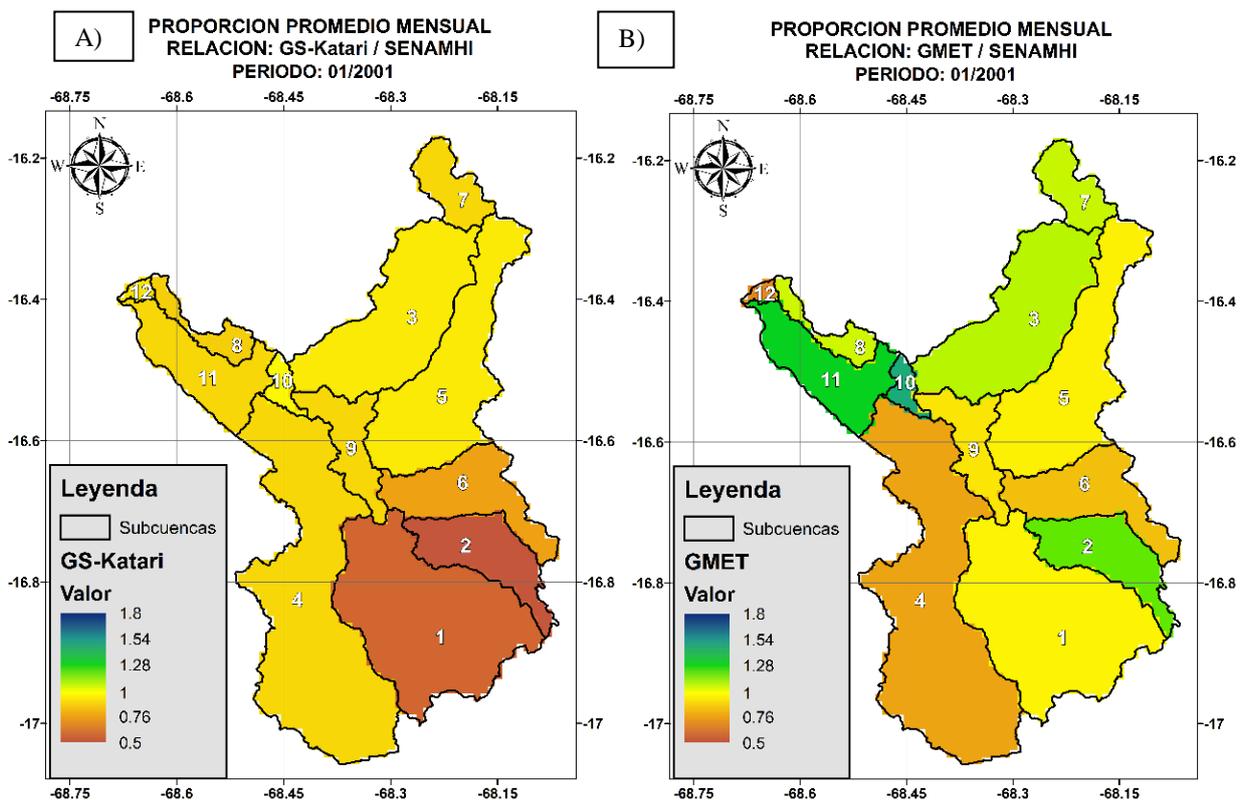


Figura 18 : Mapas de Proporción Mensual de GSMaP v5 (Panel A) y GMET (Panel B) en relación a SENMAHI.

Fuente: Elaboración propia.

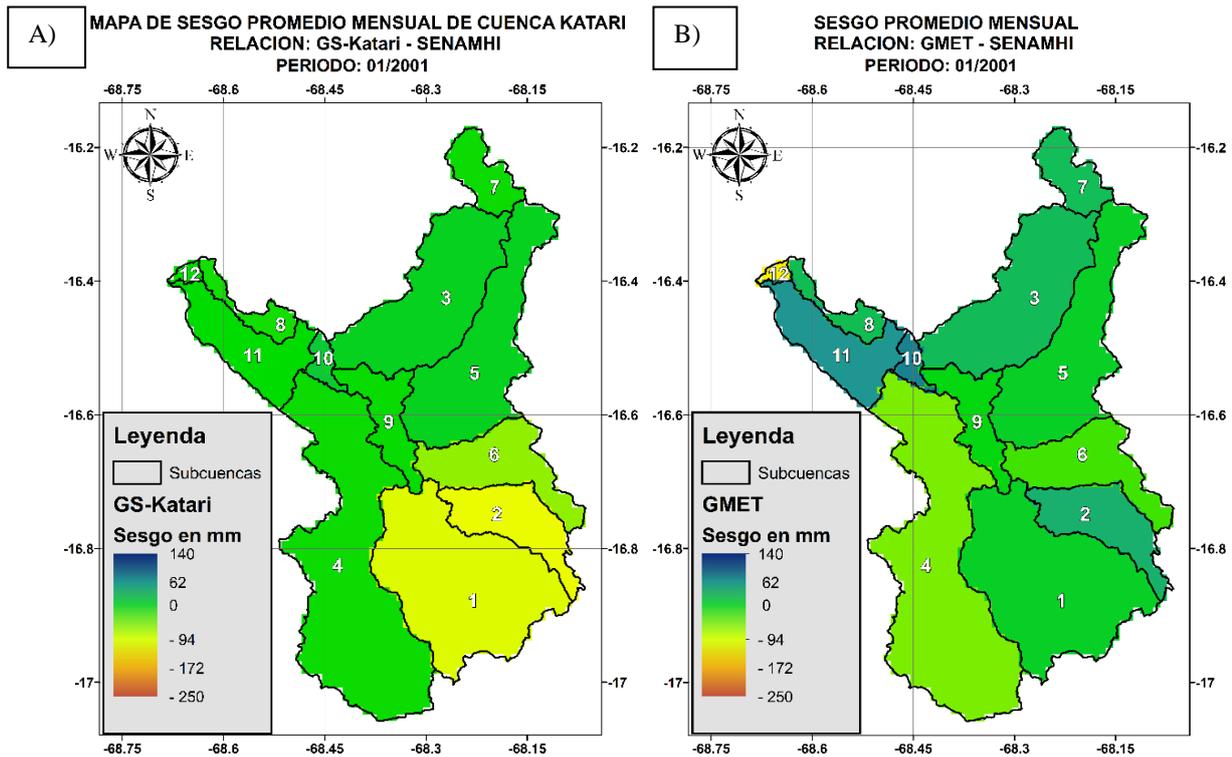


Figura 19: Mapas de Sesgo Mensual de GSMaP (Panel A) y CHIRPS (Panel B) en relación a SENAMHI.

Fuente: Elaboración propia.

Cuarto, para eliminar la incertidumbre en la interpolación de las estaciones de SENAMHI, también se ha evaluado el producto GS-Katari en la ubicación de los pluviómetros. En la Figura 20, se observa la comparación de los valores de precipitación mensual en las estaciones Collana (KAT-001) y Tambillo (KAT-016) usando GS-Katari y GMET.

Como se observa en los paneles A y B de la Figura 20, el producto ajustado presenta mejores resultados de aproximación a los datos de tierra con respecto a GMET. Dicha mejora es variable de un punto a otro, no obstante, esto demuestra que la metodología empleada presenta resultados robustos tanto en los promedios en sub-cuencas como en los pluviómetros.

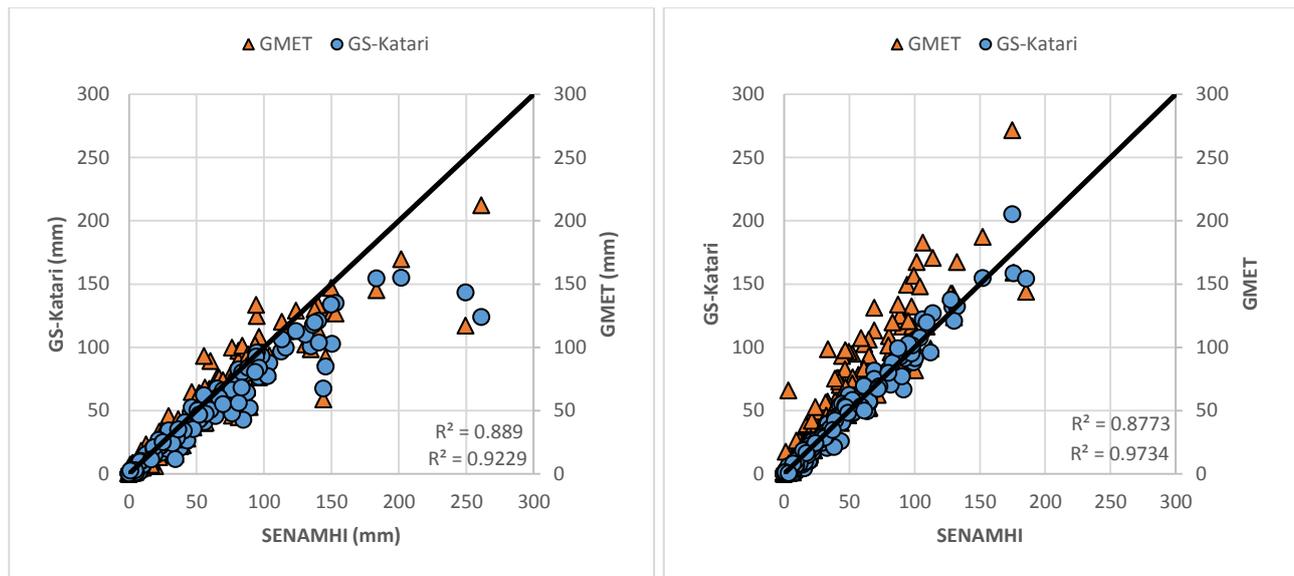


Figura 20: Diagrama Scatter Plot de Precipitaciones Mensuales para las estaciones (A) Collana y (B) Tambillo.

Fuente: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

Los productos de precipitación estimada desde satelitales: GSMaP y CHIRPS fueron evaluados en la cuenca Katari, altiplano boliviano para el periodo 2001-2015. Ambos productos presentan una tendencia general a sobrestimar la precipitación medida en tierra, de hasta el 20%. No obstante, se observó que ambos productos coinciden que la zona Noreste presenta mayor precipitación. En la zona central de la cuenca, CHIRPS presenta precipitaciones similares comparando espacialmente con SENAMHI, abarcando una franja que va de Suroeste a Noreste; sin embargo, ambos productos presentan un rango de subestimación mayor a los datos tomados en la zona Noroeste (Subcuenca 12), muy cerca al lago Titicaca.

En el caso de los procesos de elaboración del producto combinado, se observa que la tendencia de corrección se da a la subestimación de valores. En ciertos periodos y subcuencas, no es necesario realizar más de 3 iteraciones que permitan corregir los datos, pero en los casos que muestran un mayor error, la quinta iteración corrige hasta alcanzar los rangos de sesgo establecidos. El mayor grado de corrección se da en la cuenca 12, ya que la diferencia entre el producto combinado en su 5° iteración y los datos de SENAMHI difieren en un valor aproximado de 5% a la subestimación.

Ambos productos desarrollados presentan un margen de error muy bajo con respecto a los datos de SENAMHI. Por un lado, GS-Katari subestima ligeramente el valor general de las precipitaciones en la toda la cuenca de estudio, teniendo valores menores al 5% de error. Este producto obtuvo sus mejores resultados en la subcuenca 12, donde la diferencia con los datos en tierra presentan una subestimación menor al 2%. En cambio, en la zona sudeste de la cuenca, el producto combinado presenta rangos de subestimación de hasta un 50% de diferencia. Por el otro lado, GMET presenta una ligera sobreestimación en la cuenca de estudio, presentando valores de error relativo en el rango del 5%. GMET aun arrastra ciertos problemas de subestimación de su producto base en la subcuenca 12, llegando a un 40% de error máximo en ella. En la zona sudeste de la cuenca, GMET presenta un mejor ajuste de valores, optando por una sobreestimación que no supera el 25% de la precipitación medida en tierra.

El ajuste de la precipitación a través del método iterativo requiere que tanto, SENAMHI como de GSMaP, tengan su base de datos actualizada hasta la fecha que se desee ajustar el producto combinado. Sin embargo, SENAMHI presenta periodos de análisis internos para actualizar la información que presentan, teniendo en promedio de 2 meses de retraso para disponer dichos datos al público. Se podría realizar un análisis de los valores de ajuste a una escala temporal para observar la tendencia que sigue dicho valor para cada subcuenca y determinar el posible factor de corrección para la siguiente fecha. Esto evitaría el retraso de ajuste de las precipitaciones, ya que GSMaP, dispone su información al público en un periodo máximo de 24 horas después de la captura de datos.

El producto generado en este estudio, ajustado entre GSMaP y los datos de SENAMHI, denominado GS-Katari, ha demostrado una mejoría notoria espacial y temporal. Este producto ha sido evaluado con la precipitación grillada GMET. Por otro lado, no se comprobó cual sería el tipo de ajuste que presentaría el producto CHIRPS siguiendo la misma metodología que se implementó en GSMaP. Realizando dicho producto combinado, se podría realizar un análisis del comportamiento de ajuste entre ambos productos, determinar si alguno de ellos presenta mejores resultados y si estos están condicionados a algún factor morfológico de la zona estudio. Por otro lado, cabe mencionar que se podría analizar la metodología de ajuste que se emplea, comparando GMET (método estocástico) y el producto combinado entre CHIRPS y datos terrestres (método iterativo).

6. AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a SENAMHI por compartir de su base de datos de precipitación. También al Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) y la Cooperación Técnica Belga (CTB) por la invitación que se hizo a los autores para participar en la capacitación para el manejo del producto GMET y compartir los datos de precipitación del producto. Así mismo, agradecer al Instituto Medioambiental de Estocolmo (SEI-US), al Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de los Estados Unidos (NCAR) y al Laboratorio de Física de la Atmosfera (LFA-UMSA) por la transferencia de conocimientos respecto a GMET para Bolivia.

7. REFERENCIAS

- [1] J. Mejía, «Agua del lago Poopó desaparece y los comunarios piden atención,» 2015. [En línea]. Available: http://www.la-razon.com/sociedad/Alerta-agua-lago_Poopo-desaparece-comunarios-atencion_0_2395560458.html. [Último acceso: 11 Abril 2018].
- [2] Redhum, «Bolivia: Afectación y riesgo por sequía,» 30 Marzo 2016. [En línea]. Available: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Redhum-BO-Infografia_Sequia-20160602-AM-18551.pdf. [Último acceso: 11 Abril 2018].

- [3] SENAMHI, «Sistema Integrado de Gestión de Estaciones (SIGE),» 2016. [En línea]. Available: <http://www.senamhi.gob.bo/web/public/sige>. [Último acceso: 20 Abril 2018].
- [4] K. Takido, O. C. Saavedra Valeriano, M. Ryo, K. Tanuma, T. Ushio y T. Kubota, «Spatiotemporal Evaluation of the Gauge-Adjusted Global Satellite Mapping,» *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Japón, 2016.
- [5] T. Kubota, K. Okamoto, S. Shige, T. Ushio, T. Iguchi, N. Takahashi, K. Iwanami, K. Aonashi, M. Kachi, R. Oki y C. , «The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Project,» 7 Diciembre 2007. [En línea]. Available: http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP_crest/pdf/gpm_gsmmap.pdf. [Último acceso: 21 Abril 2018].
- [6] CHG, «CHIRPS,» [En línea]. Available: <http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>. [Último acceso: 21 Abril 2018].
- [7] C. Funk, P. Peterson, M. Landsfeld, D. Pedreros, J. Verdin, S. Shukla, G. Husak, J. Rowland, L. Harrison, A. Hoell y J. Michaelsen, «The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes,» 8 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.nature.com/articles/sdata201566>. [Último acceso: 4 Abril 2018].
- [8] Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, *Transferencia de Tecnología de GMET “Gridded Meteorological Ensemble Tool”*, La Paz, 2017.
- [9] D. L. H. L. G. G. d. G. D. A. V. M. A. Luis A. Blacutt, «Precipitation comparison for the CFSR, MERRA, TRMM3B42 and Combined Scheme datasets in Bolivia,» vol. 163, 2015.
- [10] A. G. Vallejos, S. A. Ancalle, A. C. Escalera y O. V. Saavedra, «ANALYZING AREAL PRECIPITATION AT KEY BASINS IN COCHABAMBA USING SATELLITE-BASED,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.upb.edu/revista-investigacion-desarrollo/index.php/id/article/view/10/27>. [Último acceso: 22 Abril 2018].
- [11] Instituto Nacional de Estadística, «Ficha Resumen Censo Población y Vivienda 2012,» INE, [En línea]. Available: http://censosbolivia.ine.gob.bo/censofichacomunidad/c_pdfm/generar_pdf/02/01/05/x. [Último acceso: 22 Abril 2018].
- [12] Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, «Plan Director de la Cuenca Katari,» 06 Julio 2010. [En línea]. Available: http://www.cuencasbolivia.org/files/plan_director_katari.pdf. [Último acceso: 22 Abril 2018].
- [13] Planeacion Ecologica Ltda y Ecoforest Ltda, «Anexo 5 - Soporte Plan de Manejo de Ordenamiento de una Cuenca, POMCA rio Bogotá. Elaboracion del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca,» Mayo 2015. [En línea]. Available: https://ccxsuesca.files.wordpress.com/2015/05/anexo_5-soporte_pomca_rio_bogota.pdf. [Último acceso: 27 Abril 2018].
- [14] SENAMHI, «Base de Datos Sistema Meteorologico,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.senamhi.gob.bo/web/public/sismet>. [Último acceso: 2018 Abril 2018].
- [15] Earth Observation Research Center (EORC), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), «Global Satellite Mapping of Precipitation Microwave-IR Combined Product(GSMaP_MVK) and Gauge-calibrated Rainfall Product (GSMaP_Gauge), Reanalysis Products (GSMaP_RNL), and Gauge-calibrated Reanalysis Product (GSMaP_Gauge_RNL) Data Format Description V6,» EORC, Tsukuba, Ibaraki, Japón, 2015.
- [16] CHG, «Data,» [En línea]. Available: <http://chg.geog.ucsb.edu/data/index.html>. [Último acceso: 22 Abril 2018].