

ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA PILCOMAYO USANDO UN PRODUCTO DE PRECIPITACIÓN COMBINADO CON SENSORES ABORDO DE SATÉLITES

SEDIMENT ESTIMATION IN THE PILCOMAYO BASIN USING A PRECIPITATION PRODUCT COMBINED FROM SENSORS ABOARD SATELLITES

Jhonatan E. Ureña¹, Oliver C. Saavedra¹, Moisés Perales²

¹Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)

Universidad Privada Bolivia

²Centro de Investigación del Agua (CIAGUA)

Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 30 de mayo 2020, aceptado para publicación el 22 de junio 2020)

RESUMEN

El objetivo de este estudio es la obtención de un producto de precipitación combinando sensores remotos con mediciones en tierra y explorar sus posibles aplicaciones para estimar caudal líquido y sólido. El presente estudio se concentra en la porción de la cuenca Pilcomayo en territorio boliviano. Se emplearon dos productos de precipitación con base satelital: GSMaP y CHIRPS. Empleando un ajuste iterativo de estos productos con pluviómetros se han obtenido dos productos denominados GS y CH respectivamente. Para realizar la validación de los productos generados se comparó con la grilla GMET de 5km de resolución del Balance Hídrico Superficial de Bolivia (BHSB). Como se ha encontrado que el producto GS muestra un performance un poco mayor al de CH, usando la precipitación combinada GS se ha procedido a estimar el caudal por subcuencas. Para este último proceso se ha utilizado los coeficientes de escorrentía reportado en el BHSB. Se ha logrado estimar el caudal líquido empleando el producto de precipitación combinado GS y coeficientes de escorrentía reportados en el BHSB. Primeramente, se ha estimado los caudales específicos por subcuenca para el periodo 2001-2015. Se ha evidenciado que las magnitudes de caudal líquido son mayores en la zona de los llanos y congruente con los valores de precipitación. Posteriormente se ha estimado el caudal líquido en las áreas de aporte de nueve estaciones hidrométricas para comparar con los caudales reportados en los 70s, 80s y 90s. Si bien son periodos diferentes de análisis, se ha notado consistencia de los caudales simulados con los reportados en la mitad de las estaciones. En la estación hidrométrica de Villamontes, que cubre 91 % de la zona de estudio, se ha estimado 6310 millones de m³ de agua en promedio interanual para el periodo 2001-2015. Posteriormente se ha estimado el caudal sólido en las mismas estaciones. En Villamontes se ha estimado 159 millones de Toneladas al año de producción de sedimento. De esta manera en el presente estudio se ha aprovechado del producto de precipitación combinado por subcuenca para estimar la variación espacial del caudal líquido y sólido en la zona de estudio. Se ha notado la importancia de la estimación de la precipitación como variable clave de los procesos hidrológicos, que bien puede ser aún mejor aprovechado utilizando modelos hidrológicos distribuidos para convertir la precipitación en caudal y a su vez en estimar la producción de sedimentos en una cuenca.

Palabras Clave: Bolivia, Cuenca Pilcomayo, Cuenca de La Plata, Precipitación, Sedimentos, GSMaP, CHIRPS

ABSTRACT

The objective of this study is to obtain a precipitation product combining remote sensors with ground measurements and to explore potential applications to estimate liquid and solid flow. This study focuses on the upper portion of the Pilcomayo basin within Bolivia. Two satellite-based precipitation products were used: GSMaP and CHIRPS. Using an iterative adjustment of these products with rain gauges, two products were generated namely GS and CH, respectively. To carry out the validation of generated products, they were compared against GMET grid of 5 km resolution. As it has been found that the GS product showing a slightly higher performance than CH, the combined GS product was employed to estimate the river discharge at sub-basin level. The discharge has been estimated using the combined precipitation product GS and reported runoff coefficients. Firstly, the specific flow at each sub-basin has been estimated for the period 2001-2015. It has been shown that the magnitudes of the river discharged were greater in the plain area and consistent with the precipitation pattern. Subsequently, the discharge in the contribution areas of nine hydrometric stations has been estimated to compare with the observations reported in the 70s, 80s and 90s. Although they are different periods of analysis, the simulated flows have been noted to be consistent with those reported in some stations. For example, at Villamontes hydrometric station, which covers 91% of the study area, 6310 million m³ of water have

been estimated on an annual basis for the period 2001-2015. Subsequently, the solid flow at the same stations has been estimated. At Villamontes, it was estimated 159 million tons per year of sediment production. In this way, the present study has taken advantage of the combined precipitation product per sub-basin to estimate the spatial variation of the liquid and solid flow in the study area. The importance of estimating precipitation has been noted as a key variable in the hydrological processes, which may be even better exploited using distributed hydrological models to convert precipitation to flow and estimate the production of sediments in a basin.

Keywords: Bolivia, Pilcomayo Basin, La Plata Basin, Precipitation, Sediment, GSMaP, CHIRPS.

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación es una variable determinante para realizar estudios hidrológicos, teniendo como característica especial la distribución espacial. La precipitación distribuida es empleada como base para diferentes estudios que permiten indagar sobre las diferentes problemáticas que puede presentar alguna región. Por ejemplo, en la cuenca Pilcomayo, cabecera de la cuenca de La Plata, se realizaron estudios como: inundaciones en periodos de lluvias, periodos de sequía en la cuenca [1], la contaminación de ríos por metales [2] y el análisis de sedimentos [3].

La captura de datos de precipitación se realiza a través de diferentes métodos. Los métodos directos emplean pluviómetros, herramientas que miden la intensidad de precipitación en intervalos de horas o días. En el territorio boliviano, el “Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología” (SENAMHI) se encargada de administrar las estaciones. No obstante, debido a las limitantes en cuestión a la distribución de pluviómetros [4], la información de precipitación no es representativa para el área de interés. Debido a ello, es necesario recurrir a métodos indirectos.

Los métodos indirectos emplean diferentes elementos tecnológicos para estimar variables de los fenómenos naturales sobre globo terráqueo y atmósfera. Algunos estudios que emplearon estas disposiciones tecnológicas son: Monitoreo de Contaminación en el Mar Báltico [5], monitoreo de cuerpos de agua en Turkmenistán [6], etc. En el caso la precipitación, se emplean radares terrestres y sensores a bordo de satélites para realizar estimaciones. Algunos de estos productos son: “Global Satellite Mapping of Precipitation” (GSMaP) es un producto que implementa sensores como: Radiómetro de Microondas (MWR) e Infra-Rojos para puntos ciegos (MWR-IR) [7]. Otro producto es “Climate Hazards Group Infrared Precipitations with Stations” (CHIRPS) que implementa sensor tipo infrarrojo (Cold Cloud Duration o CCD) y un algoritmo que permite el ajuste de los resultados obtenidos implementando estaciones terrestres [8].

Por otro lado, se desarrollaron grillas de precipitación a través de métodos combinatorios entre los datos obtenidos por métodos directos e indirectos. Por ejemplo, se realizaron estudios de evaluación para determinar el nivel de relación existente entre los productos TRMM y GSMaP [9]. El “Gridded Meteorological Ensemble Tool” (GMET), emplea como base los datos de precipitación terrestre y algunas estaciones artificiales con datos de CHIRPS [10]. Otras investigaciones plantean solucionar el relleno de datos de precipitación faltantes a través de métodos estadísticos empleando polígonos de Thiessen y la interpolación de datos IDW disponible en programas de GIS [11].

La estimación del caudal líquido es clave para estudios hidrológicos, el diseño de proyectos hidráulicos y estimación de sedimentos. En estudios recientes como ser el Balance Hídrico Superficial de Bolivia [12] se reporta no solo precipitación por unidades hidrológicas sino también coeficientes de escorrentía.

Según el plan Maestro para la cuenca del río Pilcomayo[13] elaborado el 2008, dos de las problemáticas de interés compartido para los países convivientes en la cuenca son: La mitigación y el manejo de los sedimentos y la disponibilidad de agua y el uso eficiente de la misma (protección de fuentes, almacenamiento, y mejoramiento de tecnologías en los diferentes usos). El río Pilcomayo es considerado una de los ríos con mayor cantidad de transporte de sedimentos en el mundo, con una tasa media anual de 125 millones de toneladas [13]. En base a una recopilación, sistematización y análisis de los antecedentes disponibles con referencias a los sedimentos en la cuenca del río Pilcomayo se puede concluir que el flujo de sedimentos es del orden de 80 millones de toneladas al año esencialmente (86%) en forma de material en suspensión. El transporte de fondo representa alrededor del 10% del volumen total exportado por el río, mientras que la carga de lavado (o materias disueltas) representa sólo el 4%. El régimen del transporte sólido de material en suspensión sigue el régimen hidrológico de la cuenca, con un aporte de más que 85 % durante los 4 meses centrales de lluvia (Diciembre, Enero, Febrero, Marzo). En la estación Misión La Paz, localizada aproximadamente 200 km aguas debajo de Villa Montes, el aporte total sólido medio interanual (sobre el periodo de observación 1963-1975 y 1993-2005) pudo ser estimado en 124 millones Toneladas, de las cuales el 86 % es en forma de material en suspensión, el 4% en forma de materias disueltas (carga de lavado) y el 10 % en arrastre de fondo.

La estimación de sedimentos todavía no ha sido explorada usando productos de precipitación con sensores a bordo de satélites. Además, que los valores reportados corresponden a varios años pasados. Por tanto, se requiere un estudio que explore la posibilidad de usar un producto de precipitación combinada para estimar el caudal líquido y caudal sólido en la cuenca Pilcomayo considerando los diferentes pisos ecológicos.

El objetivo del presente artículo es la estimación de la cantidad de sedimentos producidos en la cuenca Pilcomayo usando un producto de precipitación área empleando los productos de procedencia satelital GSMaP.

2. ZONA DE ESTUDIO

El Río Pilcomayo forma parte del sistema fluvial de la cuenca del Plata. Las nacientes del río se encuentran en la Cordillera de los Frailes en Bolivia, a más de 5000 metros de altura y su área de influencia limita al este con el río Paraguay y se encuentra próxima a la ciudad de Asunción.

Toda la cuenca del río Pilcomayo cubre una superficie de 288 360 km², que se extiende sobre tres países de Sudamérica, dentro del territorio boliviano abarca el 31%, en el territorio argentino 25% y en el territorio paraguayo un 44% como se aprecia en la Figura 1.



Figura 1: Área de estudio (en negro) dentro la Cuenca del Río Pilcomayo (en rojo).

Fuente: Elaborado en base a [14].

El presente estudio se limita a la cuenca Pilcomayo en territorio boliviano, es decir la parte andina hasta el punto de cierre muy próximo a la estación hidrométrica de Misión La Paz. Esta zona comprende una extensión de 89 567 km², con variaciones de elevación de 185 a los 5500 m.s.n.m. La topografía e hidrografía de la zona de estudio se observa en la Figura 2.

Para resaltar la variación espacial dentro la zona de estudio, se empleó la subdivisión oficial de subcuencas de Bolivia del nivel 4 según Pfafstetter. De esta manera el área de estudio se puede dividir en 46 subcuencas, como se aprecia en el panel izquierdo de la Figura 3. Paralelamente, se ha dividido en 3 pisos ecológicos: montañas (conformada con 14 subcuencas), valles (22 subcuencas) y llanos (10 subcuencas), como se observa en el panel derecho de la Figura 3.

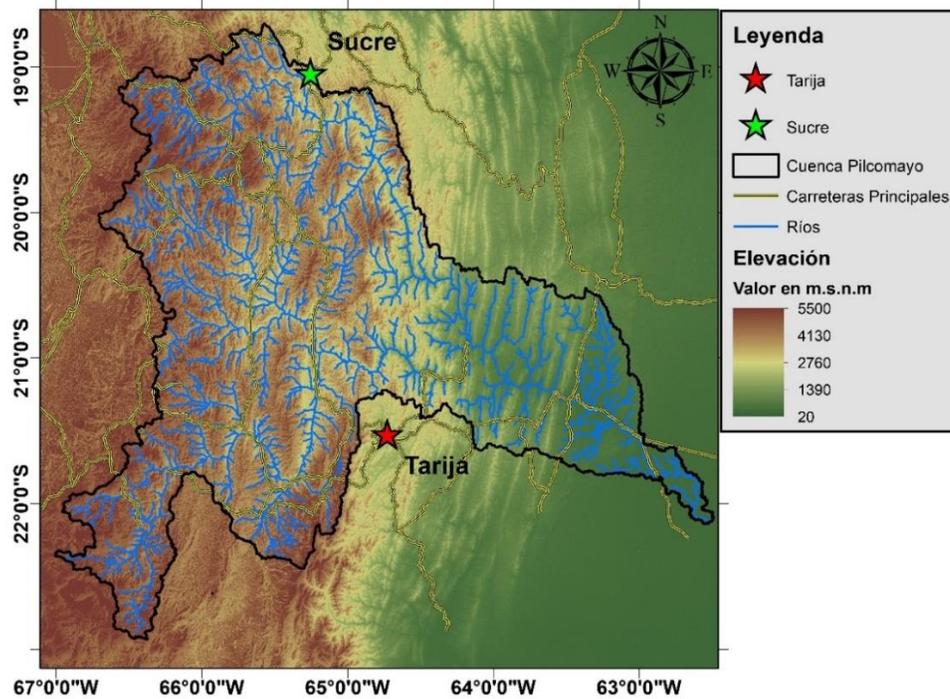


Figura 2: Mapa de Elevaciones de la Cuenca Pilcomayo.

Fuente: Elaboración propia.

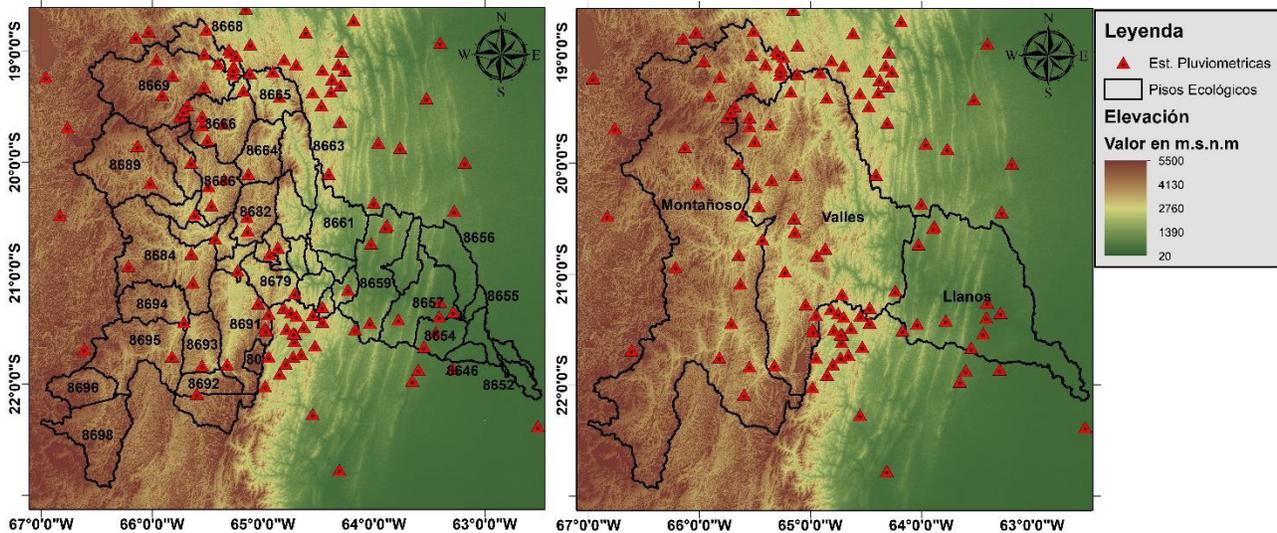


Figura 3: División de la zona de estudio en subcuencas (panel izquierdo) y pisos ecológicos (panel derecho).

Fuente: Elaboración propia.

La zona de estudio presenta una precipitación media anual que varía de 300 a 1000 mm. En la zona montañosa presenta precipitaciones entre 100 y 400 mm/año, los valles presentan precipitaciones entre 400 y 750 mm/año y los llanos presentan precipitaciones entre 750 y 1000 mm/año. La temporada húmeda comprende los meses de diciembre a marzo. Por otro lado, la temporada seca se extiende de mayo a octubre. En la zona la temperatura promedio oscila entre 10 y 25°C.

Las áreas de cada piso ecológico son: montaña con 46.3% de la cuenca, valles con 35.3% y llanos con 18.4%. La densidad con respecto a las estaciones que posee cada piso ecológico es: 0.0008 estaciones/km² en las montañas, 0.0012 estaciones/km² en los valles y 0.0009 estaciones/km² en los llanos.

La geología de la zona presenta diferentes características que varían desde: material permeable constituido por arenas y gravas sueltas, semipermeable formado por arena, limos y arcilla poco consolidados, impermeables constituidos por rocas macizas de origen ígneo, sedimentario o metamórfico [15]. Este material suelto se desprende y puede presentar severos casos de sedimentación a lo largo de su recorrido, provenientes de yacimientos de la zona montañosa [16]. Durante el periodo húmedo, se ha evidenciado inundaciones en las zonas de los valles y llanos.

Por otro lado, en la zona de estudio se ha detectado índices de contaminación por diferentes metales procedentes de la explotación minera en las zonas montañosas de la cuenca. El grado de contaminación que se presenta es alto debido a concentraciones de metales pesados: plomo, cadmio, cobre, zinc, arsénico, plata, estaño, mercurio, entre otros. Estos contaminantes se detectaron en los sedimentos aguas abajo del río [2].

3. METODOLOGÍA

En esta sección se describen los métodos empleados para la obtención del producto de precipitación combinado y la estimación de los caudales líquidos y sólidos.

3.1 Obtención de la Precipitación Combinada

Para el presente estudio, se empleó la base de datos de GSMaP_MVK, en su sexta versión; el producto CHIRPS, la base de datos GMET empleada para realizar el “Balance Hídrico Superficial de Bolivia” y los datos de estaciones pluviométricas en tierra.

Las características más importantes de los productos precipitación son la resolución espacial y temporal. Para los casos de GSMaP (espacial de 0.1°, temporal horario), CHIRPS (espacial de 0.05°, temporal diario) y GMET (espacial de 0.05°, temporal diario), fue necesario uniformizar toda la base de datos. Para ello, se seleccionó una resolución espacial de 0.01° (aprox. 1 km) y una temporal diario/mensual para los productos, con un periodo de estudio entre Marzo de 2000 hasta Agosto de 2016.

Para el caso de la precipitación pluviométrica, al ser puntual se empleó el método de interpolación de Kriging ordinario para obtener la precipitación aérea. Se determinó el factor de ajuste por subcuenca que permita generar la precipitación combinada siguiendo la metodología propuesta por [17]. Los pasos seguidos se describen en la Figura 4.

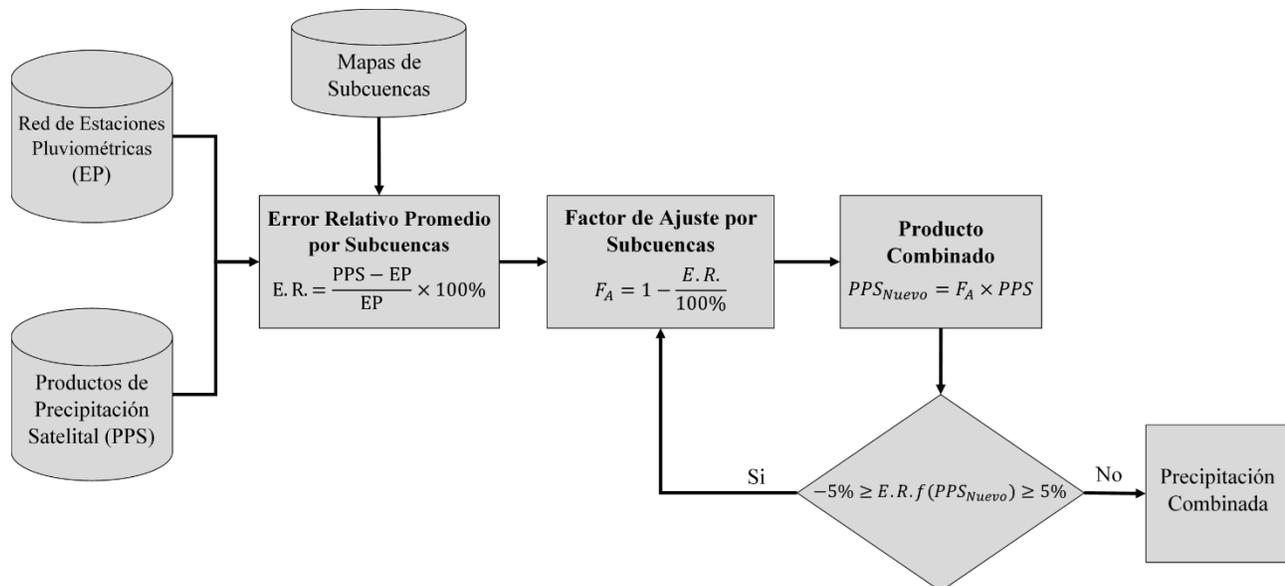


Figura 4: Flujograma para la obtención del producto combinado a través de iteraciones.

Fuente: En base a [17].

El producto final de este proceso corresponde al obtenido en la 5ta iteración donde el residual cumple con la condición de ser menor al 5%. Para la validación de los diferentes productos, se emplearon parámetros estadísticos y probabilísticos que permitieron determinar el grado de aproximación y la diferencia numérica-porcentual de los productos en relación a los datos terrestres.

3.2 Estimación de Caudales Líquidos y Sólidos

Según reportes se analizó la producción de agua y sedimentos en las cuencas hidrográficas del tramo superior del río Pilcomayo, concluyendo que, los procesos erosivos de la superficie de las cuencas estudiadas están estrechamente relacionados al escurrimiento desarrollado por la precipitación [18]. Esta aseveración se sostiene en la estacionalidad que muestran los procesos erosivos y de aporte de sedimentos.

Una vez obtenida la precipitación combinada por subcuenca, se procedió a la estimación del caudal líquido para cada subcuenca usando coeficientes de escorrentía, para así obtener el caudal anual por subcuenca. Posteriormente, se procedió a la estimación de la cantidad de producción de sedimentos tal como se aprecia en la Figura 5.

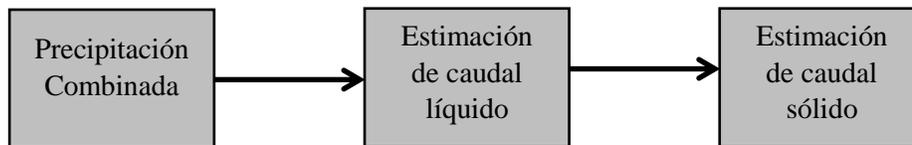


Figura 5: Secuencia de procesos para la estimación de sedimentos por subcuenca.
Fuente: Elaboración propia

Primeramente se ha estimado la precipitación efectiva, la que será convertida en escorrentía superficial usando los coeficientes de escorrentía reportados por el BHSB y multiplicados por la precipitación combinada para cada subcuenca. El caudal específico anual se estima con la siguiente ecuación:

$$Q \left[\frac{l/s}{km^2} \right] = \frac{(1 \times 10^6 \times Pe[mm])}{(86400 \times 365)} \quad (1)$$

donde Pe es la Precipitación efectiva expresada en mm.

En la zona de estudio se cuenta con 8 estaciones hidrométricas ubicadas, y la estación Misión La Paz, unos kilómetros aguas abajo. Se propone realizar el cálculo del caudal líquido en cada estación hidrométrica sumando los productos de caudal específico y el área por subcuenca. Estos resultados son estimados usando el promedio interanual del periodo 2001-2015.

Empleando los coeficientes de relación entre el caudal sólido y líquido reportados para las áreas de aporte de cada estación hidrométrica [19], se ha estimado el caudal sólido en la zona de estudio.

4. RESULTADOS

4.1 Productos de Precipitación Combinada

Se han dividido los productos de precipitación en dos grupos: productos satelitales originales y productos combinados. En el primer grupo se consideraron a GSMaP y CHIRPS; y el segundo conformado por GS, CH y GMET. Ambos casos comparados con los datos de tierra (pluviómetros). En la Figura 6, se observa la variación espacial de la precipitación de acuerdo al tipo de producto.

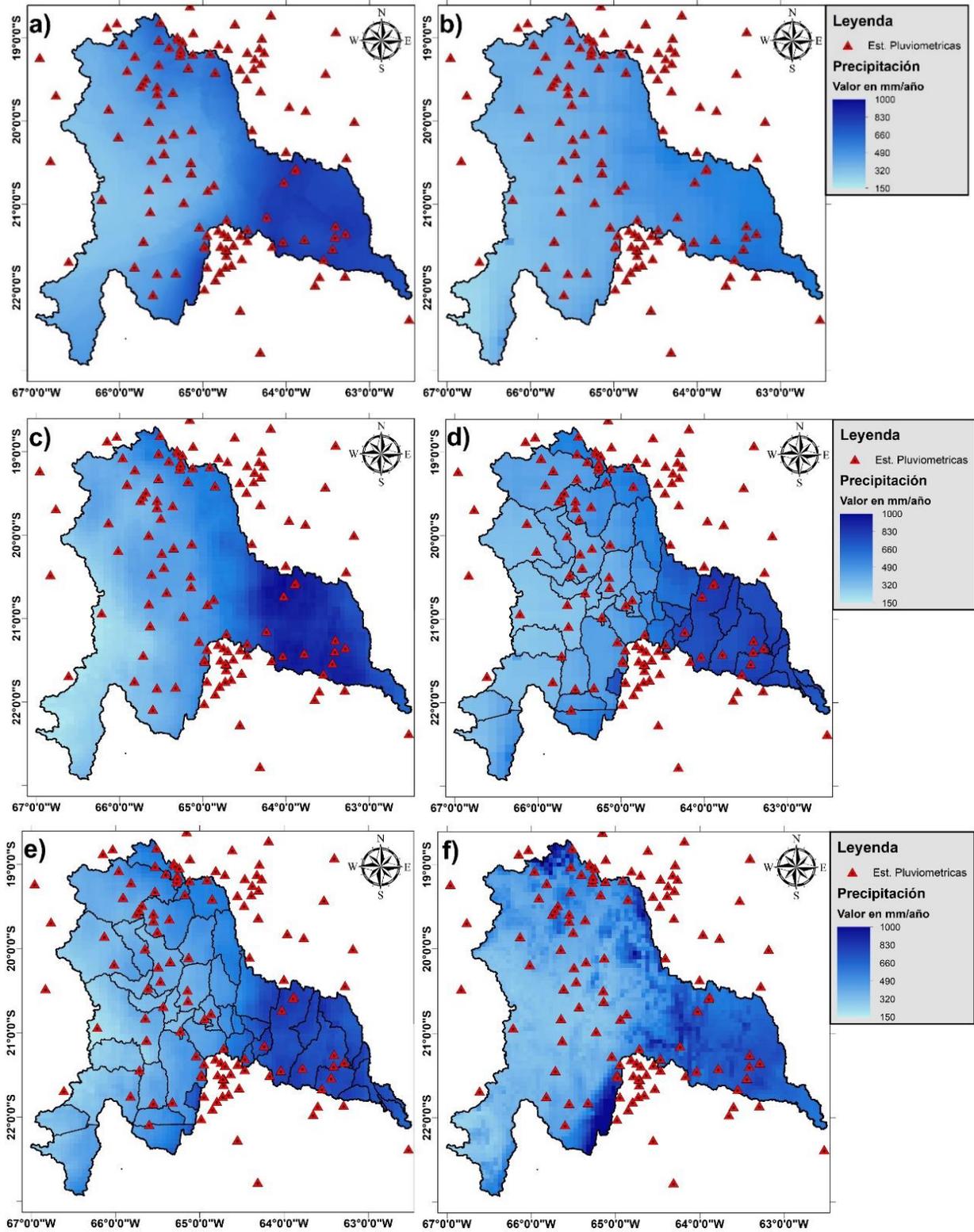


Figura 6: Mapas de precipitación promedio anual 2001-2015, de los productos: a) Pluviómetros, b) GSMaP, c) CHIRPS, d) GS, e) CH y f) GMET.

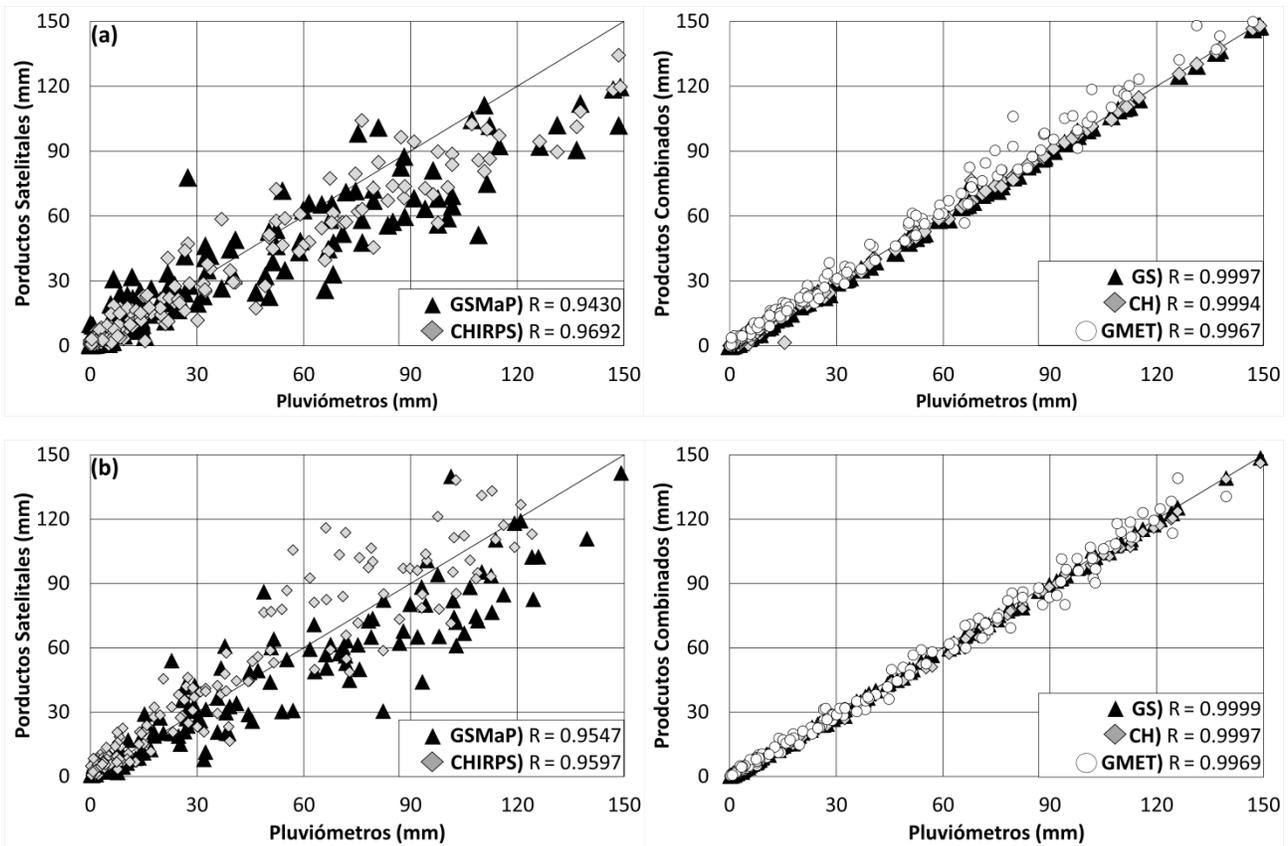
Fuente: Elaboración Propia.

En el primer grupo, GSMaP presenta una subestimación general en los pisos ecológicos de los valles y llanos. En el caso de CHIRPS, se observa una ligera subestimación en el piso montañoso. Por otro lado, en el piso de los llanos, la precipitación se encuentra con sobrestimación. En el caso de los productos combinados, tanto GS como CH presentan una distribución de precipitación que se asemeja a lo medido por los pluviómetros.

En la zona montañosa, se observa que los datos presentan la menor precipitación entre los pisos ecológicos. El producto GSMaP y CHIRPS presentan subestimaciones en relación a los datos de control. En el caso de la zona de los valles, GSMaP presenta subestimaciones y, por otro lado, en el producto CHIRPS presenta sobrestimaciones. En la zona de llanos, se observa que la precipitación es la mayor que se presenta entre los pisos ecológicos. El producto CHIRPS denota con mayor claridad su sobrestimación.

Como parte de la validación, se realizó el análisis de los coeficientes de correlación de los diferentes productos satelitales y combinados, teniendo como parámetro de control los datos de pluviómetros. En la Figura 7, se observa la relación inicial al proceso de generación y los resultados del mismo por pisos ecológicos.

En el caso de la Figura 7a, correspondiente al piso ecológico montañoso de la cuenca, se observa que los productos satelitales presentan una mayor cantidad de datos en subestimación, en relación a sus valores de sobrestimación. Por otro lado, sus productos combinados (GS y CH, respectivamente) presentan una mejora sustancial, acercándose a los valores de control. GMET, por su parte, presenta valores con ligeras sobrestimaciones en relación a los pluviómetros. En la Figura 7b (piso de los valles), el producto GSMaP presenta una mayor cantidad de datos en subestimación, todo lo contrario, a lo que presenta el producto CHIRPS, que presentan una mayor sobrestimación de sus valores. Por su parte, CH y GS se encuentran muy cercanos a los valores de control. GMET presenta ligeras sobrestimaciones y subestimaciones. Para la Figura 7c (piso de los llanos), GSMaP presenta una drástica subestimación de valores en relación a los datos de tierra. Por el contrario, CHIRPS presenta una drástica sobrestimación. Posterior al proceso de generación, se observa que los productos combinados GS y CH, eliminan dichas variaciones de precipitación y se acercan a los valores de control. GMET presentan subestimación en la mayoría de sus valores.



ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA PILCOMAYO USANDO UN PRODUCTO DE PRECIPITACIÓN...

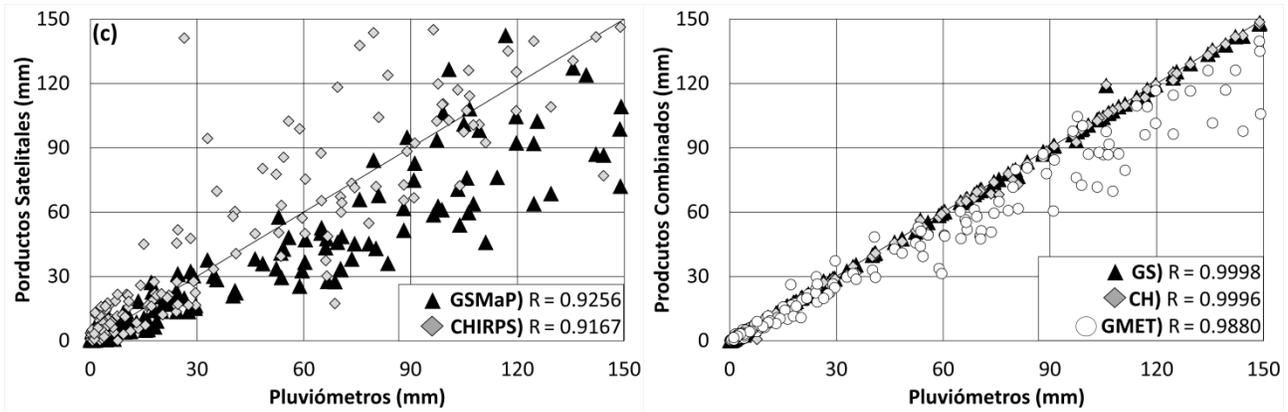
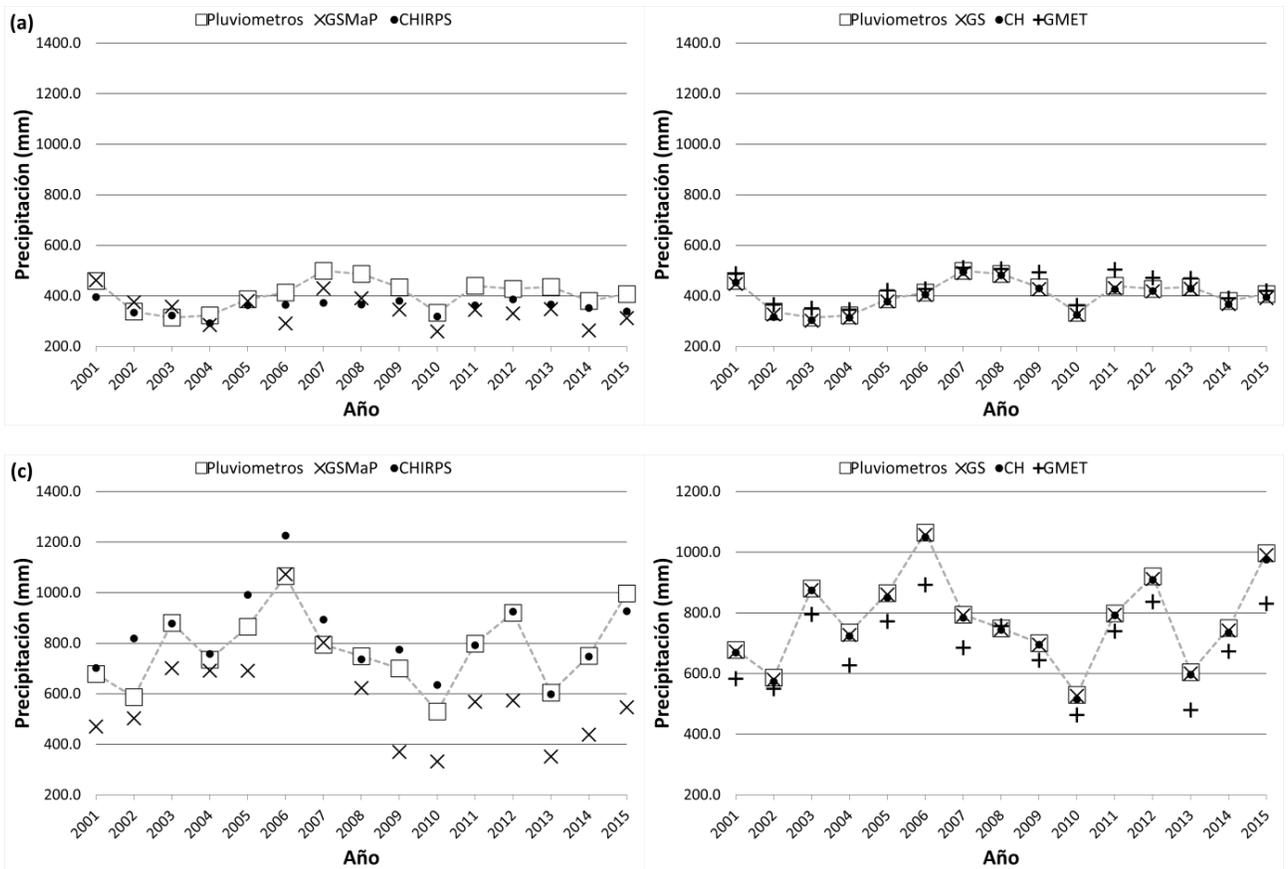


Figura 7: Scatter Plots de precipitación mensual de los productos satelitales (izquierda) y productos combinados (derecha), para los pisos ecológicos: a) Montañoso, b) Valles y c) Llanos.

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados también fueron analizados a través de su tendencia temporal. Para ello, se empleó series de tiempo para analizar el comportamiento de los productos. En la Figura 8, se observa el comportamiento dentro del periodo que empieza en 2001 hasta 2015.



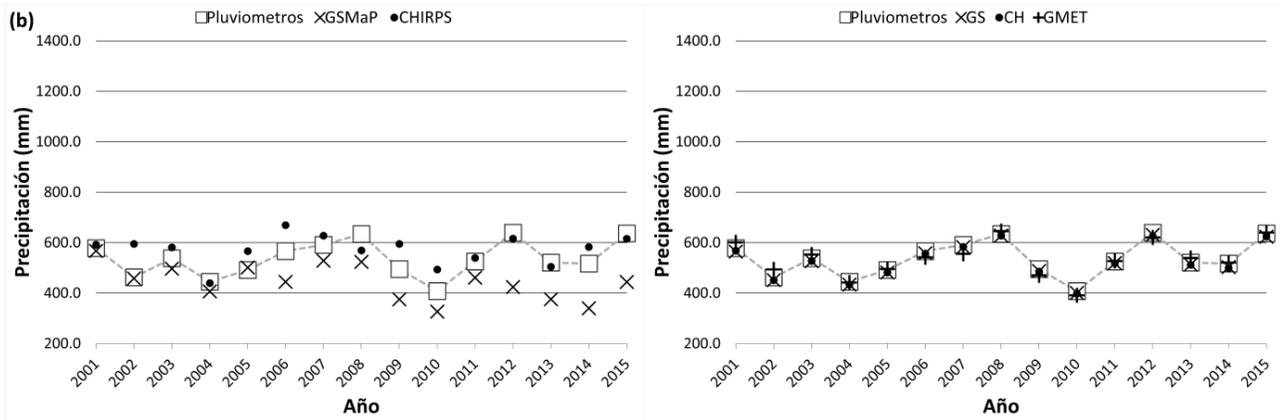


Figura 8: Series de tiempo de precipitación mensual de los productos satelitales (izquierda) y productos combinados (derecha), para los pisos ecológicos: a) Montañoso, b) Valles y c) Llanos, dentro del periodo 2001-2015.

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, los productos combinados, resultados del método de generación a través de iteraciones, presentan los valores más cercanos a los de control. Por otro lado, GMET presenta en el piso ecológico montañoso una ligera tendencia a la sobrestimación en los periodos con mayor precipitación. Sin embargo, este producto presenta subestimaciones que se alejan de los valores de control en el piso ecológico de los valles.

Como se vio en las anteriores figuras, los productos combinados presentan una mejora en relación a los productos satelitales originales. Se realizó el análisis de sus coeficientes de correlación, como se observa en la Tabla 1, donde se observa claramente la mejoría de los productos combinados.

TABLA 1 - COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN ESTUDIADOS Y GENERADOS

Coeficiente de Correlación (R)			
Producto	Montañas	Valles	Llanos
GSMaP	0.9430	0.9547	0.9256
CHIRPS	0.9692	0.9597	0.9167
GMET	0.9967	0.9969	0.9880
GS	0.9997	0.9999	0.9998
CH	0.9994	0.9997	0.9996

Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente en la Tabla 2 se observa el porcentaje de mejora existente entre los productos iterados. Se observa que la mejora es mucho mayor por parte del producto generado GS en los pisos montañosos y valles.

TABLA 2 - PORCENTAJE DE MEJORA DE PRODUCTOS COMBINADOS EN FUNCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN

Porcentaje de Mejora (%)			
Relación	Montañas	Valles	Llanos
GSMaP a GS	5.4	4.5	7.4
CHIRPS a CH	3.0	4.0	8.3

Fuente: Elaboración Propia

Analizando todos los resultados previos, el producto combinado de precipitación GS será empleado para la estimación de caudales líquidos y sólidos. En la Figura 9, se observa la precipitación GS de los tres pisos ecológicos para el periodo 2001-2105, donde se nota mayor precipitación en los llanos.

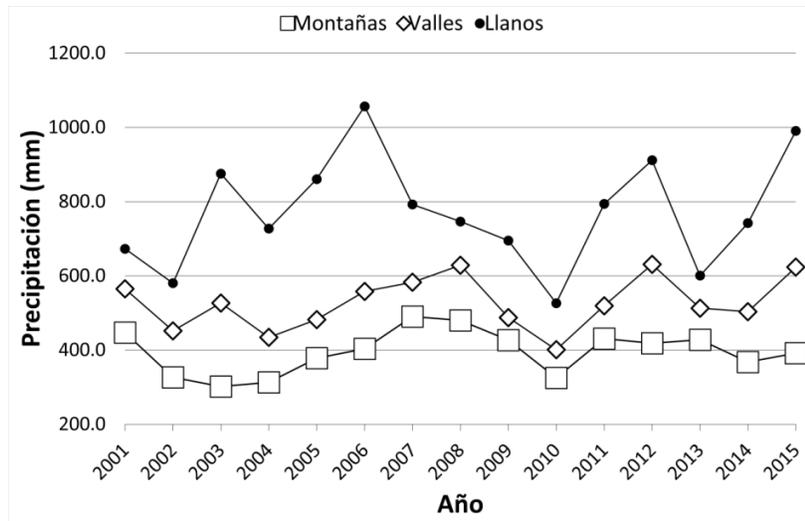


Figura 9: Precipitación anual por piso ecológico del producto combinado GS en el periodo 2001-2015.

Fuente: Elaboración Propia.

4.2 Estimación de Caudales Líquidos y Sólidos

Primeramente, se ha calculado la precipitación efectiva, la porción de la precipitación que se convertirá en caudal líquido, multiplicando la precipitación combinada GS en mm por los coeficientes de escorrentía de 0.2, 0.14 y 0.15 para las zonas montañosas, valles y llanos respectivamente. Estos coeficientes fueron utilizados del BHSB del 2016. Posteriormente se utilizó la ecuación 1 para estimar el caudal específico promedio del 2001 al 2015 por cada subcuenca. De esta manera se puede apreciar el resultado considerando la variación espacial, como se aprecia en la Figura 10, de 1.5 a 3.8 l/s/km².

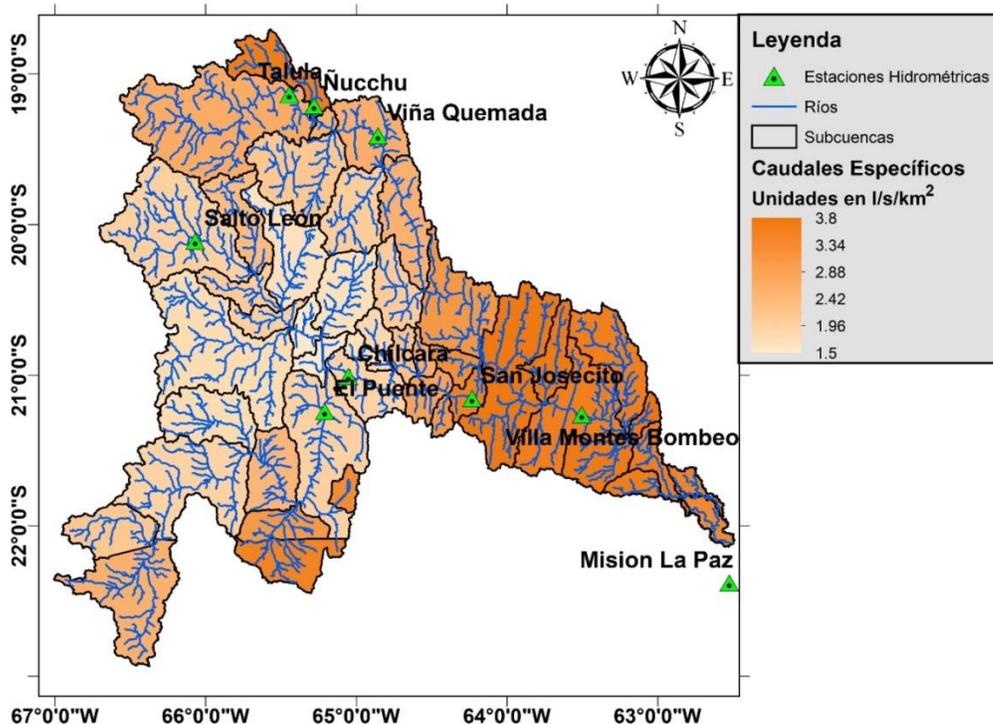


Figura 10: Caudales Específicos promedio del periodo 2001-2015 para la zona de estudio.

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede notar que las magnitudes de caudal específico son mayores en los llanos, consistente con la distribución de la precipitación presentada en la Figura 7. En la Figura 10 también se puede apreciar la ubicación de las principales estaciones hidrométricas en la zona de estudio. Sus áreas de aporte y elevaciones están descritas en la Tabla 3. Se ha procedido al cálculo del caudal líquido en cada estación hidrométrica sumando los productos de caudal específico y el área por subcuenca, ver quinta columna en la Tabla 3. Estos resultados han sido estimados usando el promedio interanual del periodo 2001-2015. Los cuales fueron comparados con los caudales reportados [19] para las décadas de los 70s, 80s y 90s principalmente, ver sexta columna en la Tabla 3. Se ha encontrado consistencia en las estaciones Talula, Viña Quemada, San Josecito y Villamontes. Esta última estación cubre el 91 % de la zona de estudio del presente trabajo.

TABLA 3 - ESTIMACIÓN DEL CAUDAL LÍQUIDO PROMEDIO INTERANUAL DEL PERIODO 2001-2015

Estación hidrométrica	Elevación m.s.n.m.	Área aporte [km ²]	Caudal Especifico [l/s/km ²]	Caudal líquido estimado [Millones m ³]	Caudal líquido según [18] [Millones m ³]	Periodo de observación [Años]
Salto León	3264	3411	2.04	219	37	75-85
Talula	2596	6496	2.67	548	615	64-67 72-98
Ñucchu	2416	1611	3.71	189	564	73-85
El Puente	2329	20202	2.56	1631	488	74-82
Chilcara	2159	43767	1.87	2576	1755	75-85 91-93
Viña Quemada	2022	13464	2.67	1132	1570	78-98
San Josecito	821	48574	1.96	3002	2696	76-87 90-92
Villamontes	393	81413	2.44	6310	7524	73-87 89-05
Misión La Paz	255	90060	2.52	7164	6481	63-75 93 -05

Fuente: Elaboración Propia y usando ref [18].

Para la estimación del caudal solido se utilizó la relación de caudal sólido y caudal líquido reportado por Malbrunot 2006 [19], ver segunda columna en la Tabla 4, donde se analizó los datos de las estaciones pluviométricas que presentan un registro diario de datos, que permitieron generar un análisis de las variaciones espaciales y tasas de erosión, para identificar la proporción de transporte sólido al interior del área de estudio e identificar las cuencas de mayor aporte. Se puede notar que en la estación de Villamontes se espera 60 millones de m³ en promedio interanual del periodo 2001-2015. Utilizando el peso específico medido del sedimento de la zona de estudio de 2.652 se puede obtener el caudal solido en Toneladas, ver cuarta columna en la Tabla 4. En Villamontes se ha estimado 159 millones de Toneladas al año. Por último, se ha estimado la tasa de erosión dividiendo el caudal sólido entre el área de aporte de cada estación, ver última columna de la Tabla 4.

TABLA 4 - ESTIMACIÓN DEL CAUDAL SÓLIDO PROMEDIO INTERANUAL DEL PERIODO 2001-2015

Estación hidrométrica	Relación Qsol/Qliq según [18]	Caudal sólido estimado [Millones m ³]	Caudal sólido estimado [Millones Ton]	Tasa de erosión [Ton/km ² /año]
Salto León	0.008	1.72	4.55	1 334.89
Talula	0.009	5.18	13.73	2 113.28
Ñucchu	0.001	0.21	0.55	341.23
El Puente	0.005	8.72	23.14	1 145.22
Chilcara	0.009	22.72	60.25	1 376.72
Viña Quemada	0.017	18.69	49.57	3 681.35
San Josecito	0.007	21.37	56.67	1 166.69
Villamontes	0.010	60.22	159.72	1 961.91
Misión La Paz	0.006	44.39	117.74	1 307.35

Fuente: Elaboración Propia y usando ref [18].

En base a los datos de la Tabla 4 se evidencia que la mayoría (aproximadamente 63%) de los aportes sólidos registrados en Villamontes parecen provenir de las áreas de aporte de Viña Quemada y San Josecito. El aporte en Viña Quemada

(que recibe también su aporte de Talula y Ñucchu) representa más de 36% del aporte de Villamontes (mirando los promedios interanuales).

Los aportes líquidos anuales registrados en Villa Montes tienen su origen predominantemente en el tramo intermedio comprendido entre la confluencia del río Pilaya con el río Pilcomayo y la estación Villa Montes. Prácticamente el 60% del aporte líquido anual es originado en las subcuencas que aportan a dicho tramo.

5. CONCLUSIONES

La zona de estudio, cuenca Pilcomayo en territorio boliviano, abarca una extensión de 89 567 km². Se ha subdividido en 46 subcuencas, como también en tres pisos ecológicos: Montañas (46.3%), Valles (35.3%) y Llanos (18.4%).

El método de combinación de productos de precipitación ha sido utilizado exitosamente en este estudio. El producto generado GS (en base a GSMaP) ha demostrado, con los indicadores de eficiencia, ser mejor que el producto CH (en base a CHIPS). Especialmente hablando, GS presenta la mejora más drástica entre los dos productos combinados en relación a los productos de precipitación satelital empleados. Ambos productos fueron validados con la grilla GMET del Balance Hídrico Superficial de Bolivia (BSHB). GSMaP presenta un porcentaje de mejora entre 4.5 y 7.4% mientras CHIRPS por su parte presenta mejoras entre 3 y 8.3%. Por su parte, GMET presenta casos de sobrestimación en el piso ecológico montañoso y, por el otro lado, casos de subestimación en el piso de los llanos.

Se ha logrado estimar el caudal líquido empleando el producto de precipitación combinado GS y coeficientes de escorrentía reportados en el BSHB. Primeramente, se ha estimado los caudales específicos por subcuenca para el periodo 2001-2015. Se ha evidenciado que las magnitudes de caudal líquido son mayores en la zona de los llanos y congruente con los valores de precipitación. Posteriormente se ha estimado el caudal líquido en las áreas de aporte de nueve estaciones hidrométricas para comparar con los caudales reportados en los 70s, 80s y 90s. Si bien son periodos diferentes de análisis, se ha notado consistencia de los caudales simulados con los reportados en la mitad de las estaciones. En la estación hidrométrica de Villamontes, que cubre 91 % de la zona de estudio, se ha estimado 6310 millones de m³ de agua en promedio interanual para el periodo 2001-2015. Posteriormente se ha estimado el caudal sólido en las mismas estaciones. En Villamontes se ha estimado 159 millones de Toneladas al año de producción de sedimento. De esta manera en el presente estudio se ha aprovechado del producto de precipitación combinado por subcuenca para estimar la variación espacial del caudal líquido y sólido en la zona de estudio. Se ha notado la importancia de la estimación de la precipitación como variable clave de los procesos hidrológicos, que bien puede ser aún mejor aprovechado utilizando modelos hidrológicos distribuidos para convertir la precipitación en caudal y a su vez en estimar la producción de sedimentos en una cuenca. La información generada de caudal sólido por su facilidad de cálculo permite obtener valores aproximados que nos permiten analizar las características relativas a la producción de sedimentos en la cuenca, y son de beneficio para el planteamiento de futuras actuaciones dentro de la misma como por ejemplo ubicación de embalses de regulación, implementación de obras de mitigación de efectos de la sedimentación, incidencia en la población ictícola, por mencionar algunas.

6. REFERENCIAS

- [1] 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].
- [2] J. R. Miller, P. J. Lechler, G. Mackin, D. Germanoski y L. F. Villarroel, «Evaluation of particle dispersal from mining and milling operations using lead isotopic fingerprinting techniques, Rio Pilcomayo Basin, Bolivia,» *Science of The Total Environment*, vol. 384, pp. 355-373, 1 Octubre 2007.
- [3] L. D. Kazimierski, M. Irigoyen, J. D. Brea, P. Spalletti y Á. N. Menéndez, «Impacto del Cambio Climático en la Producción de Sedimentos en las Cuencas de los Ríos Bermejo y Pilcomayo,» de *1° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*, Buenos Aires, 2012.
- [4] 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].
- [5] N. N. Grishin y A. G. Kostianoy, «Satellite Monitoring of Suspended Matter Pollution Resulted from the Nord Stream Gas Pipeline Construction in Russian Waters of the Baltic Sea in 2010-2011,» vol. 2, n° 1, 2012.

- [6] A. G. Kostianoy, S. A. Lebedev y D. M. Solovyov, «Satellite Monitoring of Water Resources in Turkmenistan,» vol. 1, n° 1, 2011.
- [7] T. Kubota , S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y. Takayabu, T. Ushio, K. Nakagawa, K. Iwanami, M. Kachi and K. Okamoto, "Global Precipitation Map Using Satellite-Borne Microwave Radiometers by the GSMaP Project: Production and Validation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 7, pp. 2259 - 2275, 2007.
- [8] C. Funk, P. Peterson, M. Landsfeld, D. Pedreros, J. Verdin, S. Shukla, G. Husak, J. Rowland, L. Harrison, A. Hoell and J. Michaelsen, "The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes," *Sci Data* 2, no. 150066, 2015.
- [9] O. C. Saavedra Valeriano, M. Ryo y K. Tanuma, «Ground Validation of Satallite-Based Precipitation Measurement for Flood Simulation in Southeast Asian River Basin,» vol. 4, n° 3, 2014.
- [10] J. E. Ureña , A. G. Vallejos, O. C. Saavedra y A. C. Escalera, «Evaluación de la Precipitación Distribuida en la Cuenca Katari Basado en Tecnología Satelital y Productos Derivados,» *Investigación & Desarrollo*, vol. 18, n° 1, pp. 35-51, 19 Junio 2018.
- [11] C. Bielenki Junior, F. Mendonça dos Santos, S. C. Semensato Povinelli y F. F. Mauad, «Alternative methodology to gap filling for generation of monthly rainfall series with GIS approach,» *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 23, 2018.
- [12] MMAyA, Balance Hídrico Superficial de Bolivia (1980- 2016), La Paz, 2018.
- [13] «Plan Maestro de Gestión Integrada de la Cuenca del Río Pilcomayo,» Documento Base, 2008.
- [14] «Línea de Base Ambiental y Socioeconómica de la Cuenca del Rio Pilcomayo,» 2007.
- [15] J. Molina Carpio y D. Espinoza Romero, «Balance Hídrico Superficial de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo,» La Paz, 2005.
- [16] M. Iriondo, F. Colombo y D. Kröhling, «El abanico aluvial del Pilcomayo, Chaco (Argentina-Bolivia-Paraguay): características y significado sedimentario,» *Geogaceta*, vol. 28, 2000.
- [17] J. Ureña y O. Saavedra, «Evaluation of Satellite Based Precipitation Products at Key Basins in Bolivia,» 2020.
- [18] E. Montenegro, «Estudios de erosión, transporte y sedimentación en la cuenca alta del río Pilcomayo. Informe Final,» Cochabamba, 2007.
- [19] A. Malbrunot, «Sedimentología de la cuenca alta del río Pilcomayo Síntesis de los conocimientos hasta la fecha, datos disponibles y elaboración de los parámetros principales aguas arriba de Misión La Paz (Argentina),» 2006.