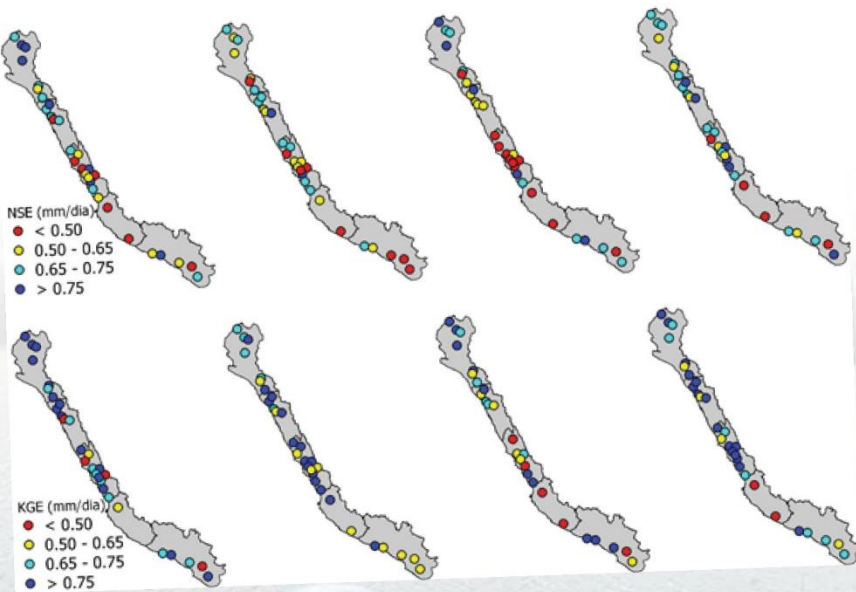
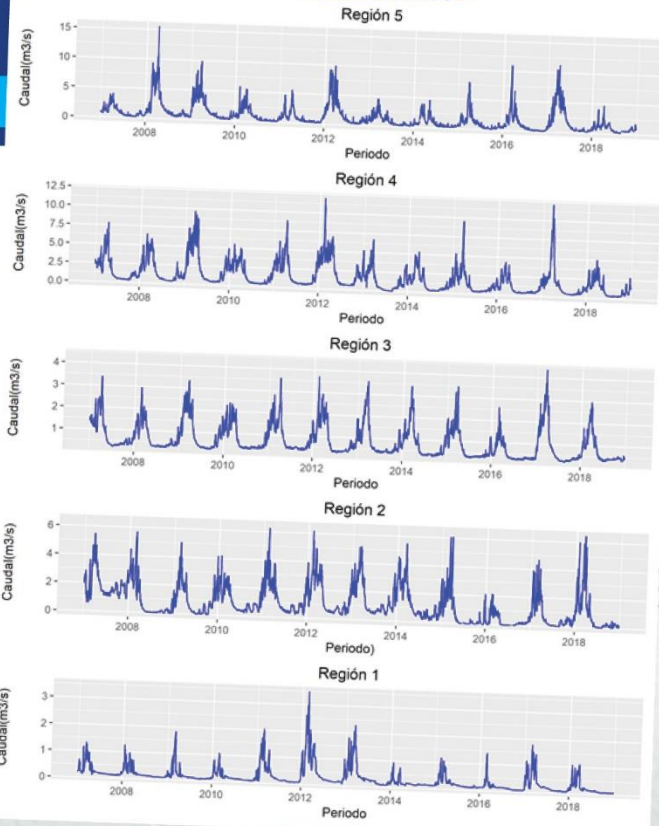


MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON PRODUCTOS SATELITALES EN LA VERTIENTE DEL PACÍFICO

ESTUDIO FINAL



Citar:

Lavado-Casimiro, W.; Qqenta, J; y Felipe, O. (2022). *Modelamiento Hidrológico con Productos Satelitales en la Vertiente del Pacífico.* Estudio Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1779>

**MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON
PRODUCTOS SATELITALES EN
LA VERTIENTE DEL PACÍFICO**
ESTUDIO FINAL





DIRECTORIO

PhD. Guillermo Antonio Baigorria PAz
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL
SENAMHI

REVISORES DEL ESTUDIO

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

AUTORES

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
Bach. Jonathan Giovanni Qquenta Chambi
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

Lima-Perú
Mayo – 2022

Contenido

Resumen.....	7
1. Introducción.....	7
2. Materiales y Métodos.....	9
2.1 Área de Estudio.....	9
2.2 Conjunto de datos.....	11
2.3 Modelado Hidrológico.....	12
2.4 Métricas de Eficiencia.....	14
3. Metodología.....	15
3.1 Extracción de datos de precipitación:.....	15
3.2 Modelamiento hidrológico con GR4J:.....	15
3.3 Evaluación del desempeño de los 4 productos satelitales.....	15
4. Resultados y discusiones.....	18
5. Conclusiones.....	29
6. Referencias Bibliográficas.....	31
Anexos.....	33

Contenido de figuras:

Figura 1. Distribución de regiones de análisis	9
Figura 2. Caudales medios diarios promediados por región	12
Figura 3. Esquema del modelo hidrológico GR4J	13
Figura 4. Diagrama metodológico de la investigación	17
Figura 5. Gráfico de radar por región, para las puntuaciones de métrica de eficiencia promediadas, donde, a menor área, mejor resultado de rendimiento.....	18
Figura 6. Distribución espacial de las métricas de eficiencia	19
Figura 7. Distribución espacial de las métricas de eficiencia	20
Figura 8. Diagramas de caja para la comparación de los periodos de análisis.....	21
Figura 9. Histogramas de frecuencia en término de KGE para la etapa de calibración	22
Figura 10. Comparación de caudales para las distintas Regiones	23
Figura 11. Puntajes de desempeño en términos de KGE para la etapa de calibración	25
Figura 12. Puntajes de desempeño en términos de KGE para la etapa de calibración	26
Figura 13. Mejor desempeño entre SM2RAIN-ASCAT, GPM+SM2RAIN y ERA5 en la estimación de la descarga diaria tomando como base la métrica Skill Score.	27
Figura 14. Mejor desempeño entre ERA 5, SM2RAIN-ASCAT, GPM+SM2RAIN, leídos de izquierda a derecha.	28

Contenido de tablas:

Tabla 1: Descripción de las cuencas en estudio	10
Tabla 2: Parámetros del modelo hidrológico GR4J	14
Tabla 3: Valores inicial del modelo hidrológico GR4J	14
Tabla 4: Indicadores estadísticos de eficiencia	16
Tabla 5: Intervalos de eficiencia de las métricas empleadas	16
Tabla 6: Firmas hidrológicas	17

MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON PRODUCTOS SATELITALES EN LA VERTIENTE DEL PACÍFICO

Resumen

La presente investigación evaluó el desempeño de 4 productos satelitales basados en los enfoques “bottom up” y “top down” en la vertiente del Pacífico, Perú, para la estimación de descargas media diarias. Para el enfoque “top down”, se evaluó los productos Peruvian Interpolation data of the SENAMHI’s Climatological and hydrological Observations (PISCO) y datos de reanálisis (ERA5-Land). Mientras que para el enfoque “bottom up”, se evaluó a los productos satelitales GPM+SM2RAIN y SM2RAIN-ASCAT. Se evaluó el desempeño de 30 cuencas mediante el uso del modelo hidrológico GR4J, las mismas que se encuentran distribuidas en toda la Vertiente del Pacífico, y agrupadas en 5 grandes regiones. Las métricas de eficiencia utilizadas en este estudio fueron, Nash Sutcliffe-Efficiency (NSE), Kling Gupta-Efficiency (KGE); Raíz de error medio cuadrático (RMSE); Sesgo relativo (BIAS) y el Coeficiente de correlación (r). Asimismo, es notorio un mejor desempeño de los productos “bottom up” en cuencas tropicales, destacando el desempeño del producto GPM+SM2RAIN en cuencas del hemisferio norte y ASCAT+SM2RAIN en la zona centro. Por otro lado, para la evaluación de cuencas por extensión, el producto GPM+SM2RAIN presentó los mejores resultados. Finalmente, a la luz de nuestros resultados, se recomienda el uso del reciente enfoque “bottom up”, sobre todo en cuencas tropicales, y a su vez, se recalca el potencial aporte para una mejor comprensión de los recursos hídricos en zonas con escasez de datos de precipitación.

Palabras clave: Productos satelitales, modelo hidrológico, enfoque bottom up.

1. Introducción

A menudo, es común observar la falta de estaciones pluviométricas y a su vez, de datos de registros históricos de precipitación en países en vías de desarrollo como el Perú. Siendo esta variable climática una de las más esenciales, por su influencia en el comportamiento hidrológico de la tierra, entre otros (Fernández, 2011). Sin embargo, a pesar de su importancia, presenta dificultades en su estudio, por su alta variabilidad espacio temporal y por la incertidumbre y tendencias en sus mediciones. Esta variable resulta ser de vital importancia en el modelamiento hidráulico, hidrológico, diseño de estructuras, mitigaciones de desastres naturales, previsión meteorológica, planificación agrícola, entre otras. (Banco Interamericano de Desarrollo, 2015; Carrillo, 2010; Lagos et al., 2007.)

En los últimos años, se presentan diversas opciones de alternativa ante la escasez de datos en zonas de interés, las mismas que comprenden modelos de predicción, meteorológicos, radares, etc. (Hong et al., 2006). Sin embargo, las estimaciones de precipitación mediante el uso de satélite, resultan ser una fuente de información completa, viable, y en su mayoría, de libre acceso (L. Brocca et al., 2013; Luca Brocca

et al., 2019). Entre los productos más usados satisfactoriamente en el mundo, se encuentran los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES), Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG), Global Precipitation Measurement Mission (GPM), Advanced Scatterometer (ASCAT), entre otros (Abera et al., 2017; Hong et al., 2006). Estos productos satelitales, tienen cobertura global, por lo que resultan una alternativa atractiva en zonas donde no se cuenta con estaciones pluviométricas o datos observados. Por otro lado, en los últimos años, surge un nuevo enfoque, que consiste en estimar la precipitación a partir de la humedad de suelo, es por esta característica que se le denomina “bottom up”(Massari et al., 2020). Uno de los muchos beneficios de esta metodología, es su gran precisión, menor número de sensores satelitales y menor número de mediciones en la estimación, por ejemplo, de la precipitación acumulada (precipitación diaria)(Massari et al., 2020).

De la revisión de la literatura, podemos inferir que la principal disimilitud entre un enfoque “top down” y “bottom down” es el que miden, es decir, mientras que un enfoque estima las tasas de lluvia instantánea, el otro enfoque estima la tasa de lluvia acumulada, respectivamente. Se presentan a los productos SM2RAIN+ASCAT y GPM+SM2RAIN, como los productos más avanzados estimados a partir de humedad de suelo, ambos disponibles en resolución diaria y con cobertura global, con múltiples versiones, y disponibles desde el 2007 al 2018 (GPM+SM2RAIN) y 2007 al 2020 (SM2RAIN+ASCAT) (Luca Brocca et al., 2019)(L. Brocca et al., 2013).

De la exploración de literatura, deducimos que este es el primer estudio que evalúa productos satelitales con un enfoque “bottom up” para la generación de caudales medios diarios en la Vertiente del Pacífico. Consecuentemente, podemos describir este enfoque de SM2RAIN (soil moisture to rain), como un enfoque exitoso en su aplicación a cuencas a lo largo del mundo (Almagro et al., 2021)., así como también es de esperarse la existencia de incertidumbre en términos cuantitativos y cualitativos. Bajo este contexto, la presente investigación evaluó el desempeño de 4 productos satelitales basados en los enfoques “bottom up” y “top down” en la Vertiente del Pacífico, Perú, para la estimación de descargas medias diarias. El modelo hidrológico a utilizarse fue el GR4J (Adecuado et al., 2016), y las salidas del modelo fueron comparadas con datos observados de estaciones hidrométricas y a su vez, se tomó como referencia, los resultados de caudales generados por PISCO.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de Estudio

El territorio peruano comprende una extensión de 1 285, 216 km², cuenta con una población aproximada de 31 237 385 habitantes, y se encuentra dividida en tres grandes regiones hidrográficas, a saber: [1] Pacífico (278482 km² - 21.7%); [2] Amazonas (957823km² - 74.5%); [3] Titicaca (48911km² - 3.8%) (ANA). Sin embargo, es la región del Pacífico o Vertiente del Pacífico, la que alberga a un total de 64.9% de la población, lo que denota una distribución demográfica desequilibrada y con latente estrés hídrico.

La presente investigación evaluó 30 cuencas distribuidas en la Vertiente del Pacífico, las mismas que fueron agrupadas en 5 grandes regiones determinadas por las Autoridades Administrativas del Agua (AAA) y avaladas por el Plan Nacional de Recursos Hídricos, Perú. (Figura 1)

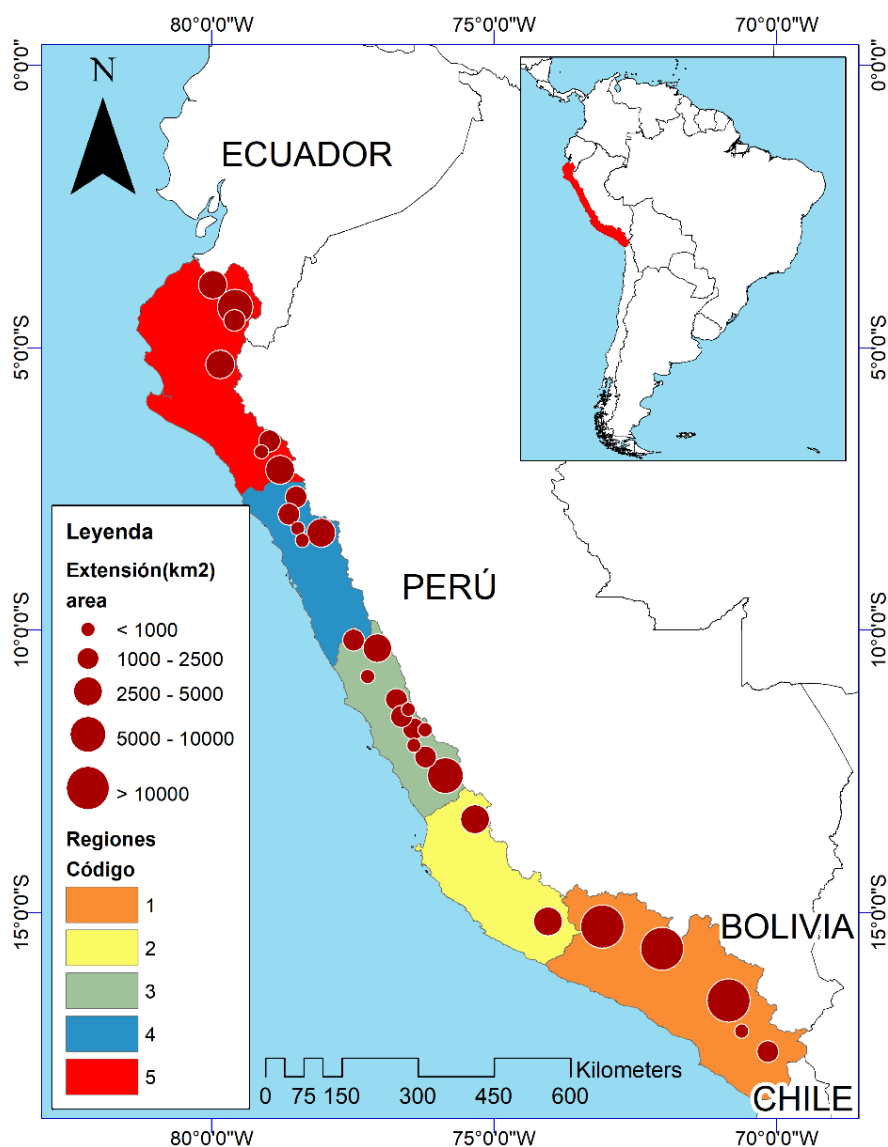


Figura 1. Distribución de regiones de análisis

El análisis contempló la evaluación de cuencas de variada extensión en km², distribuidas a lo largo de la Vertiente del Pacífico y delimitadas con respecto a una estación hidrométrica. Las regiones N°1; 2; 3; 4 y 5, incluyeron 5, 2, 12, 5 y 7 cuencas respectivamente. Las estaciones hidrométricas seleccionadas, presentan un periodo común de datos de caudal (2007-2018), de los cuales se tomó 1 año de calentamiento, 7 años para la calibración y 4 para la validación. (Tabla 1).

Tabla 1: Descripción de las cuencas en estudio

REGIÓN	ESTACIÓN	CUENCA	ÁREA
V	El Tigre	Tumbes	4662.470
	El Ciruelo	Piura	6977.281
	PuenteInter	Tumbes	1850.615
	PteÑacara	Piura	4494.637
	Raca Rumi	Lambayeque	2362.143
	Batan	Zaña	797.072
	Yonán	Jequetepeque	3297.749
IV	Tambo	Tambo	2182.772
	Quirihuac	Moche	1761.533
	Huacapng	Virú	908.416
	Huamansaña	Chao	718.287
	Condorcero	Santa	3175.852
III	Malvados	Fortaleza	1377.967
	Cahua	Pativilca	2948.562
	La Mina	Supe	766.274
	Sto	Domingo	1835.030
	PteMagdalena	Chillón	1245.628
	Chosica	Rímac	2305.110
	Obrajillo	Chillón	364.537
	Tamboraque	Rímac	576.163
	Antapucro	Lurín	996.179
	La Capilla	Mala	2145.148
	Cañete	Fortaleza	5786.402
II	Letrayoc	Pisco	3078.954
	Yauca	Yauca	4113.058
I	Ocoña	Ocoña	16028.977
	Huatipa	Camaná	16937.234
	La Pascana	Tambo	13019.654
	Tumilaca	Tumilaca	461.982
	La Tranca	Sama	1936.740

Fuente: Elaboración propia

2.2 Conjunto de datos

El presente estudio recopiló 4 conjuntos de datos diarios de diferente procedencia y enfoque para un periodo de estudio del 01/01/2007 al 31/12/2018, los mismos que fueron evaluados mediante modelado hidrológico con GR4J.

El primer producto evaluado fue el producto PISCO, el cual fue desarrollado por la Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), y que actualmente se encuentra disponibles en línea y de forma gratuita para el periodo de 1981-2021 (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/?Set-Language=es>). Adicionalmente, se empleó el producto PISCO de evapotranspiración, con resolución de 1km, el mismo que sirvió como input para las 30 cuencas de análisis. Estos datos fueron estimados a partir de estaciones pluviométricas observadas, climatológicas, reanálisis y productos satelitales como el TRMM y GPM para obtener una base grillada a nivel nacional de paso diario y mensual de alta resolución (5km).

El segundo producto de precipitación evaluado en este estudio es el reanálisis del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Mediano Plazo (ECMWF), ERA5-Land. Se encuentra disponible en el servicio Copernicus Climate Change, el cual previó de datos horarios, los mismos que fueron acumulados a paso diario con la expresión: , y se caracterizan por tener cobertura mundial grillada y resolución espacial de 9km. Este producto se encuentra disponible desde Enero de 1950 al presente, y se pueden descargar de forma gratuita desde su página oficial (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>).

El tercer producto satelital, es el SM2RAIN-ASCAT, el cual consiste en un conjunto de datos diarios de precipitación, sigue la metodología “bottom up” y cuenta con un periodo de datos del 2007 a 2018. Este producto es estimado a partir de datos de humedad de suelo del satélite ASCAT, presenta una resolución de 12.5km y cuenta con formatos de netCDF y ráster (<https://zenodo.org/record/3635932#.YbfGn5FByUk>).

El cuarto producto satelital, es el GPM+SM2RAIN, producto cuasi-global de precipitación con resolución de 25km. Este producto sigue la metodología “bottom up”, y está basado en la integración de IMERG-LR de la Misión De Medición de Precipitación Global (GPM) con estimaciones de precipitación basadas en SM2RAIN derivadas de los productos de humedad del suelo ASCAT H113 H-SAF, SMOS L3 y SMAP L3. Este producto está disponible para el periodo 2007-2018 y se puede descargar de manera gratuita en formato netCDF desde su página oficial. (<https://zenodo.org/record/3854817#.YbfHfJFByUk>)

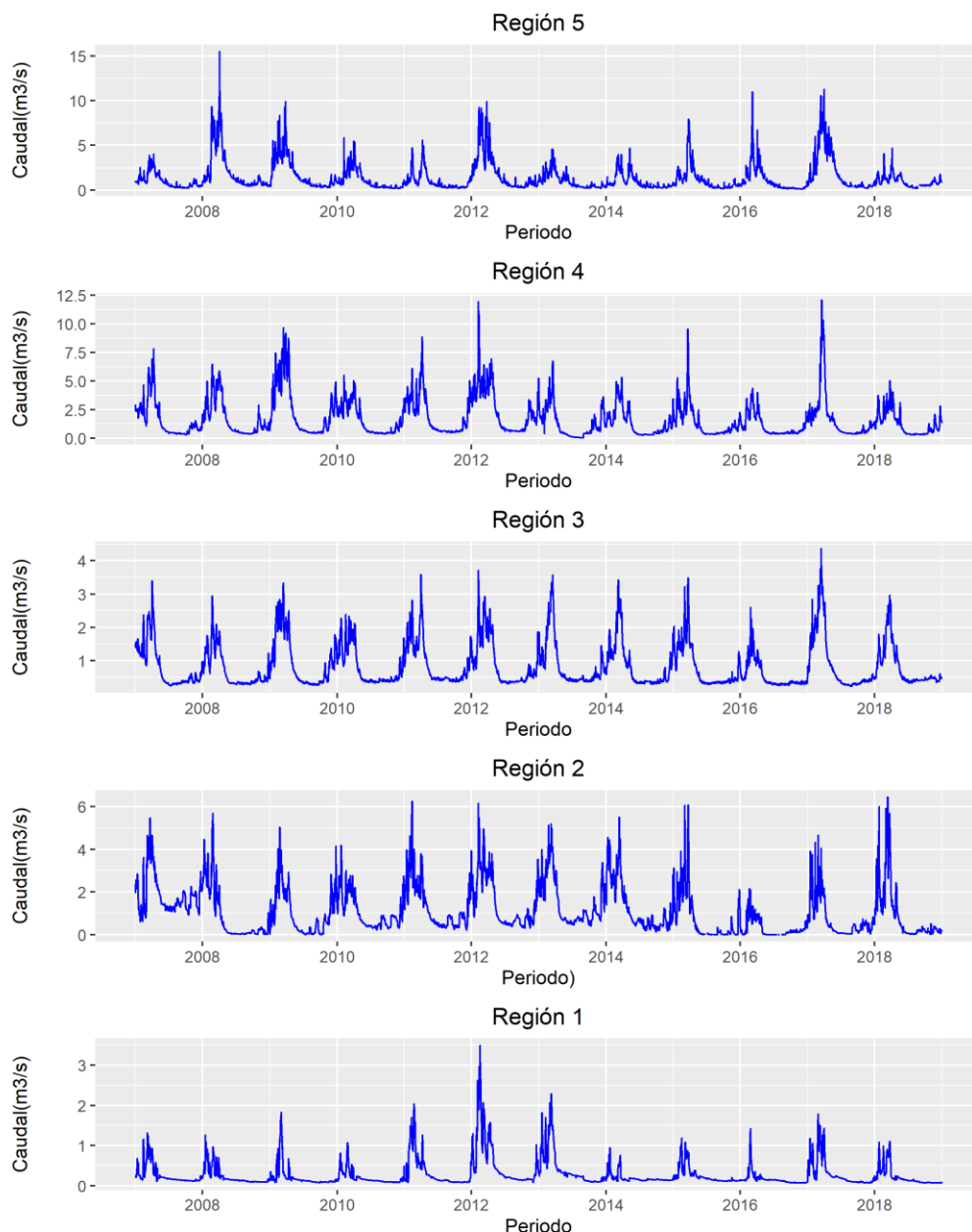


Figura 2. Caudales medios diarios promediados por región

2.3 Modelado Hidrológico

El modelo lluvia-escorrentía utilizado en la presente investigación es el Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), este modelado es caracterizado por ser del tipo determinístico, agregado, tener 4 parámetros y ser de resolución diaria. Este modelo requiere como datos de ingreso, series de precipitación y evapotranspiración media diaria, así como una serie de caudal observado para el proceso de calibración. La estructura del modelo (Figura 3) está configurada por dos reservorios, el reservorio “S”, encargado de relacionar la evapotranspiración y precipitación para proporcionar el volumen de precipitación, y el reservorio “R” representa los procesos de infiltración en la cuenca.

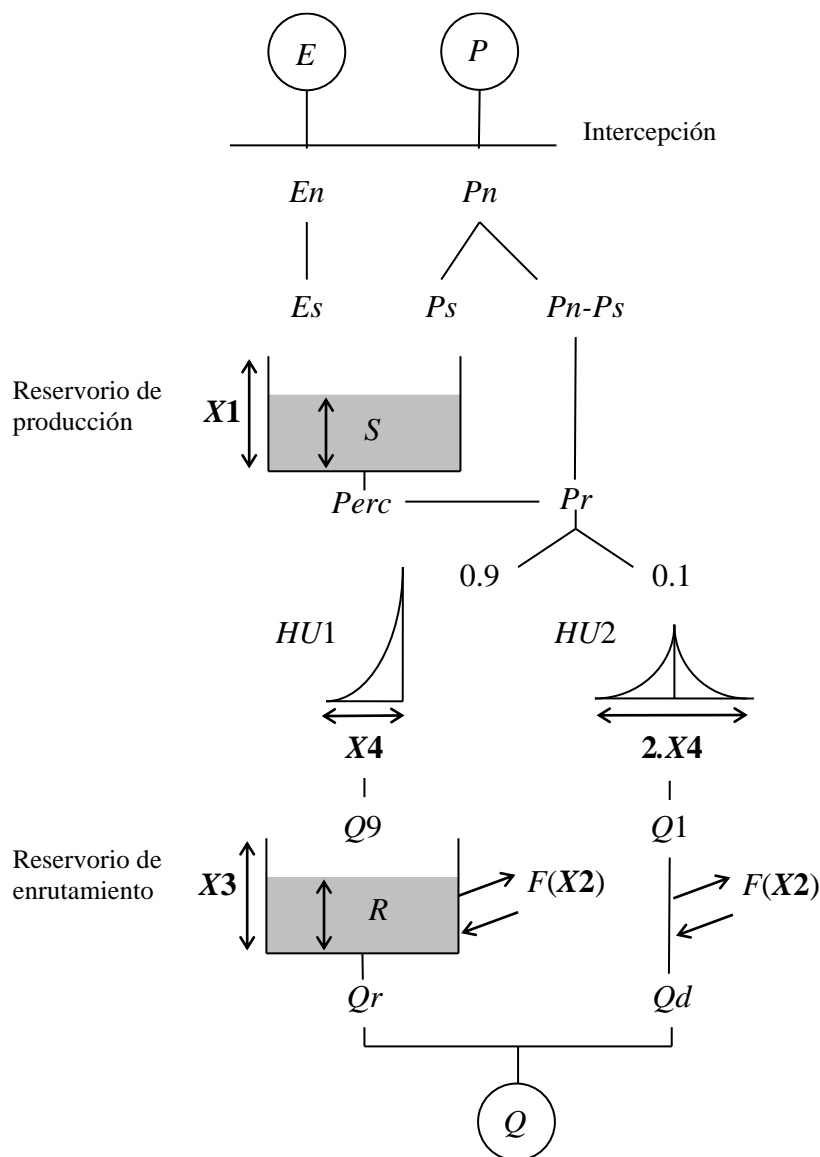


Figura 3. Esquema del modelo hidrológico GR4J

El modelo está constituido por 4 parámetros (Tabla 2), los mismos que son ajustados en el proceso de calibración para cada caso de estudio, además, para el inicio de la simulación, se requiere 2 valores iniciales R y S (Tabla 3). Asimismo, se recomienda como parámetros iniciales para el inicio del modelado, a los parámetros $X1=5.9$; $X2=0$; $X3=4.5$ y $X4=0.2$.

GR4J ha sido aplicado satisfactoriamente en cuencas peruanas y extranjeras, cuenta con aceptación a nivel mundial. En el presente estudio, se generó descargas medias diarias en 30 cuencas de la Vertiente del Pacífico mediante la aplicación de GR4J, usando como datos de ingreso la precipitación y evapotranspiración de los productos satelitales descritos anteriormente.

Tabla 2: Parámetros del modelo hidrológico GR4J

Modelo	Parámetro	Unidad	Descripción
GR4J	X1	m	Capacidad del primer reservorio
	X2	m	Coeficiente de intercambio de agua
	X3	m	Capacidad del segundo reservorio
	X4	dt	Tiempo base de los hidrogramas unitarios

Fuente: (Perrin et al., 2003)

Tabla 3: Valores inicial del modelo hidrológico GR4J

Modelo	Parámetro	Unidad	Descripción
GR4J	R	m	Nivel inicial de agua en el primer reservorio
	S	m	Altura del segundo reservorio

Fuente: (Perrin et al., 2003)

2.4 Métricas de Eficiencia

En la aplicación de un modelo hidrológico, se hace necesaria la evaluación del producto de caudal simulado en comparación con series observadas, esta evaluación se realizó mediante 5 métricas de eficiencia para el periodo de estudio. Las métricas de eficiencia utilizadas en este estudio son, Nash Sutcliffe-Efficiency (NSE), Kling Gupta-Efficiency (KGE); Raíz de error medio cuadrático (RMSE); Sesgo relativo (BIAS) y el Coeficiente de correlación (r). Estos indicadores son ampliamente utilizados en numerosos artículos e investigaciones (Tabla 4). (Hwang et al., 2012; Nash, J. and Sutcliffe, J. V. (1970). *River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I—A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10(3):282–290.* - *Mask'ana Google*, n.d.). Asimismo, se implementó el uso de un Skill Score (SS) para evaluar la bondad de ajuste de cada producto satelital, empleado para evitar la variabilidad de la cuenca frente a condiciones adversas de generación de flujo. (Jiang & Bauer-Gottwein, 2019).

2.5 Firmas hidrológicas

El cálculo de firmas hidrológicas consiste en la cuantificación de las características hidrológicas, con el objetivo de una comprensión holística del comportamiento de la cuenca, asimismo, evaluar la confiabilidad a largo plazo del producto satelital. Estas firmas hidrológicas evalúan términos de Magnitud, Frecuencia, Duración, Momento y Tasa de cambio. Por otro lado, el cálculo de las firmas se realizó usando el Toolbox for Streamflow Signatures en Hydrology (TOSSH) (Gnann et al., 2021) para caracterizar la gama de las 32 series de caudales y fenómenos hidrológicos específicos como inundaciones o caudales bajos.

3. Metodología

La ejecución de la presente investigación consistió en 4 etapas principales: (1) Extracción de datos de precipitación de forma areal; (2) Modelamiento hidrológico con GR4J; (3) Evaluación del desempeño de los 4 productos satelitales mediante métricas de eficiencia y (4) Evaluación de las series mediante skill score y firmas hidrológicas.

3.1 Extracción de datos de precipitación:

Los productos satelitales se descargaron en formato netCDF de forma gratuita de las fuentes oficiales descritas en la sección b) Conjunto de datos, y se delimitaron con respecto a la extensión del territorio peruano. Además, fue necesario delimitar las cuencas en función a la ubicación de las estaciones hidrométricas y consecuentemente, se procedió con la extracción de datos de precipitación de forma areal, para este proceso fue necesario la función `extract` del package `raster` (<https://github.com/rspatial/raster>).

3.2 Modelamiento hidrológico con GR4J:

El modelo requirió como datos de ingreso, la precipitación promedio areal por cuenca extraída previamente, datos de evapotranspiración calculados a partir de la climatología con datos de evapotranspiración PISCO 1km y datos de caudal de las estaciones hidrométricas. Para la ejecución del modelo se hizo uso del package `AirGR`, codificado en lenguaje de programación R, y disponible para su uso libre (<https://github.com/cran/airGR>).

3.3 Evaluación del desempeño de los 4 productos satelitales

Como era de esperarse, fue necesario un proceso de calibración y validación para evaluar las salidas del modelo, y, por ende, medir el desempeño de los 4 productos satelitales. Las métricas utilizadas son detalladas en la Tabla 4, el proceso de calibración y validación se dio con el package `hydroPSO` (Zambrano-Bigiarini & Rojas, 2013), el cual se detalla en su página oficial (<https://github.com/hzambran/hydroPSO>).

3.4 Evaluación de las series mediante Skill Score y firmas hidrológicas.

El uso del Skill Score permitió la comparación de los productos satelitales para determinar el mejor producto por cuenca, lo que consecuentemente permitió elegir el mejor producto por región de análisis. Por otro lado, para el uso de firmas hidrológicas, se seleccionó 10 firmas hidrológicas (Tabla 6) (<https://github.com/TOSSHtoolbox/TOSSH>)

Tabla 4: Indicadores estadísticos de eficiencia

Estadísticos	Formulación	Rangos	Ideal
Nash Suftcliffe Efficiency	$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{simi} - Q_{refi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{refi} - Q_{ref})^2}$	$-\infty$ a 1	1
Kling Gupta Efficiency	$KGE = 1 - \sqrt{\left(\frac{Q_{sim}}{Q_{obs}}\right)^2 + \left(\frac{1}{Bias}\right)^2 + (r - 1)^2}$	$-\infty$ a 1	1
Raíz de error medio cuadrático	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{obsi} - P_{simi})^2}{n}}$	1 a $+\infty$	0
Sesgo relativo	$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{simi} - P_{obsi}}{P_{obsi}}\right)$	$-\infty$ a 1	0
Coefficiente de correlación	$r = \frac{n(\sum_{i=1}^n P_{simi} P_{obsi}) - (\sum_{i=1}^n P_{simi})(\sum_{i=1}^n P_{obsi})}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n P_{simi}^2 - (\sum_{i=1}^n P_{simi})^2][n \sum_{i=1}^n P_{obsi}^2 - (\sum_{i=1}^n P_{obsi})^2]}}$	$-\infty$ a 1	1

Fuente: García et al., 2016

Tabla 5: Intervalos de eficiencia de las métricas empleadas

Clasificación de Rendimiento	NSE	BIAS
Muy bueno	0.75 < NSE < 1.00	BIAS < 0.01
Bueno	0.65 < NSE < 0.75	0.01 < BIAS < 0.015
Satisfactorio	0.50 < NSE < 0.65	0.015 < BIAS < 0.025
Insatisfactorio	NSE < 0.50	BIAS > 0.025

Fuente: Moriasi et al., 1983

Tabla 6: Firmas hidrológicas

Atributo	Descripción	Unidad
Q media	Caudal medio diario	mm/día
Q5	Flujo de corriente 5to cuantil	mm/día
Q95	Flujo de corriente 95 cuantil	mm/día
Q 7 día min	Caudal mínimo de 7 días	-
Q Alta frecuencia	Frecuencia máxima de caudal	1/y
Q Alta duración	Duración máxima de caudal	días
Q Baja frecuencia	Frecuencia mínima de caudal	1/y
Q Baja duración	Duración mínima de caudal	días
BFI	Índice de caudal base	-
Pendiente FDC	La pendiente de la curva de duración	-

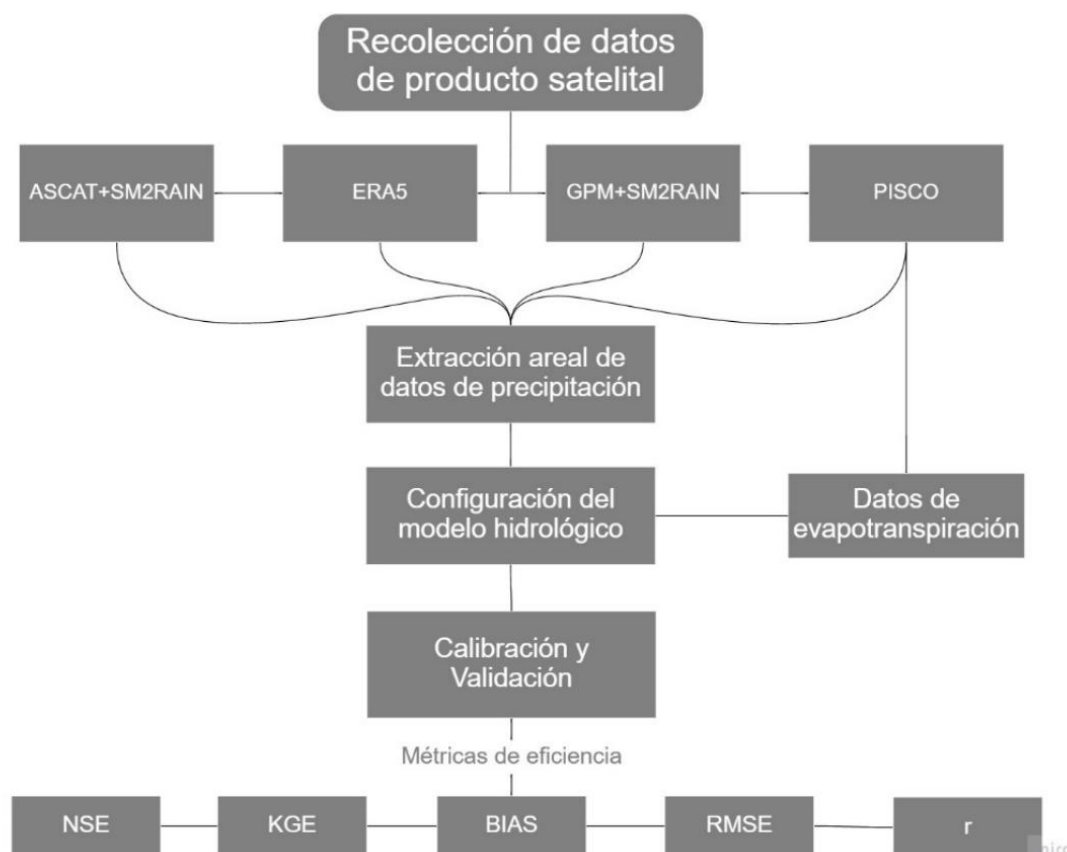


Figura 4. Diagrama metodológico de la investigación

4. Resultados y discusiones

Se procedió a tomar 1 año de calentamiento para cada ejecución del modelo GR4J, asimismo, se tomó como periodo de calibración desde el 01/01/2008 - 31/12/2014 y periodo de validación al 01/01/2014 - 31/12/2018. Los resultados arrojaron métricas de eficiencia satisfactorias en al menos el 75% de las cuencas evaluadas para los 4 productos satelitales. El gráfico de radar nos permitió inferir al producto más adecuado en base a la menor área del polígono inscrito en el gráfico de radar, los resultados muestran que, en promedio, los 4 productos presentan rendimientos satisfactorios, con leves diferencias entre sí. Los datos de ingreso al gráfico de radar comprendieron al promedio de las métricas de eficiencia RMSE; BIAS y r , y se describen en el Anexo 1.

El desempeño espacial de los 4 productos en la producción de caudales medios diarios durante el periodo de calibración se ilustra en la Figura 6 y 7, el cual describe el rendimiento puntual, por región a lo largo de la Vertiente del Pacífico. En términos del indicador RMSE, las mejores respuestas las tienen el producto PISCO, GPM+SM2RAIN, ERA5 y ASCAT+SM2RAIN, respectivamente, donde, en su mayoría, es la Región N°1 la que presenta un menor error cuadrático medio, mientras que la Región N°5 es quien presenta los errores cuadráticos medios más significativos para los 4 productos. Para el caso del indicador BIAS, son los productos ASCAT+SM2RAIN y ERA5 quienes mayor subestimación presentan en comparación a los otros productos, y es la Región N°3 donde existe mayor coincidencia de los productos en cuanto a subestimación. Mientras que, es el producto PISCO y GPM+SM2RAIN, quienes presentan mayor sobreestimación en la parte baja de la región N°5, región N°4 y parte alta de la región N°3. Además, para el indicador r , son los productos ERA5 y ASCAT+SM2RAIN los que mejor coeficiente de correlación presentan, seguidos por PISCO y GPM+SM2RAIN, respectivamente. Siendo la región N°4 y 5, las que mejor puntuación denotaron.

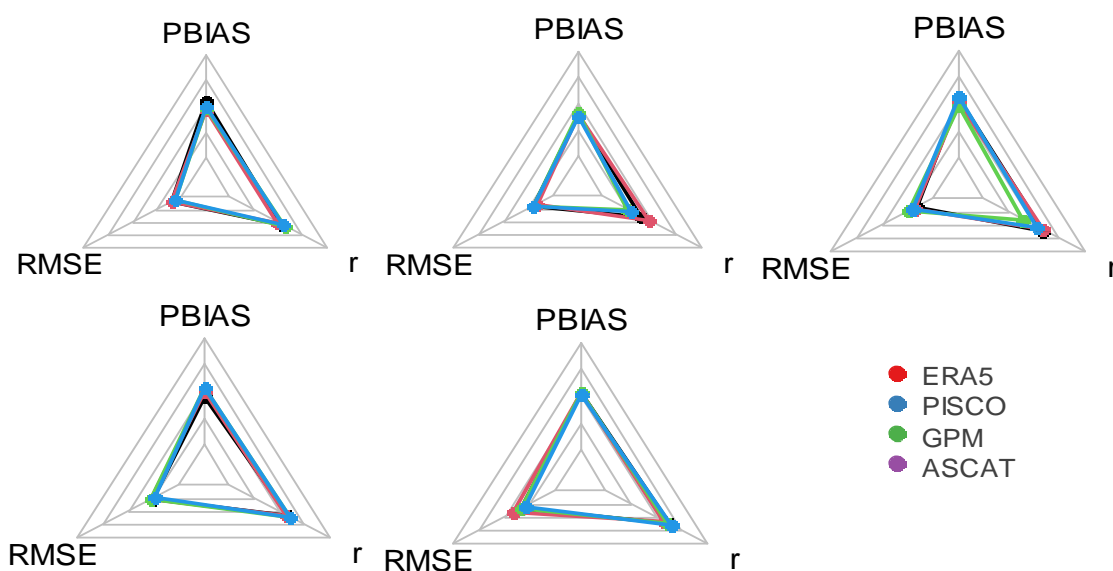


Figura 5. Gráfico de radar por región, para las puntuaciones de métrica de eficiencia promediadas, donde, a menor área, mejor resultado de rendimiento.

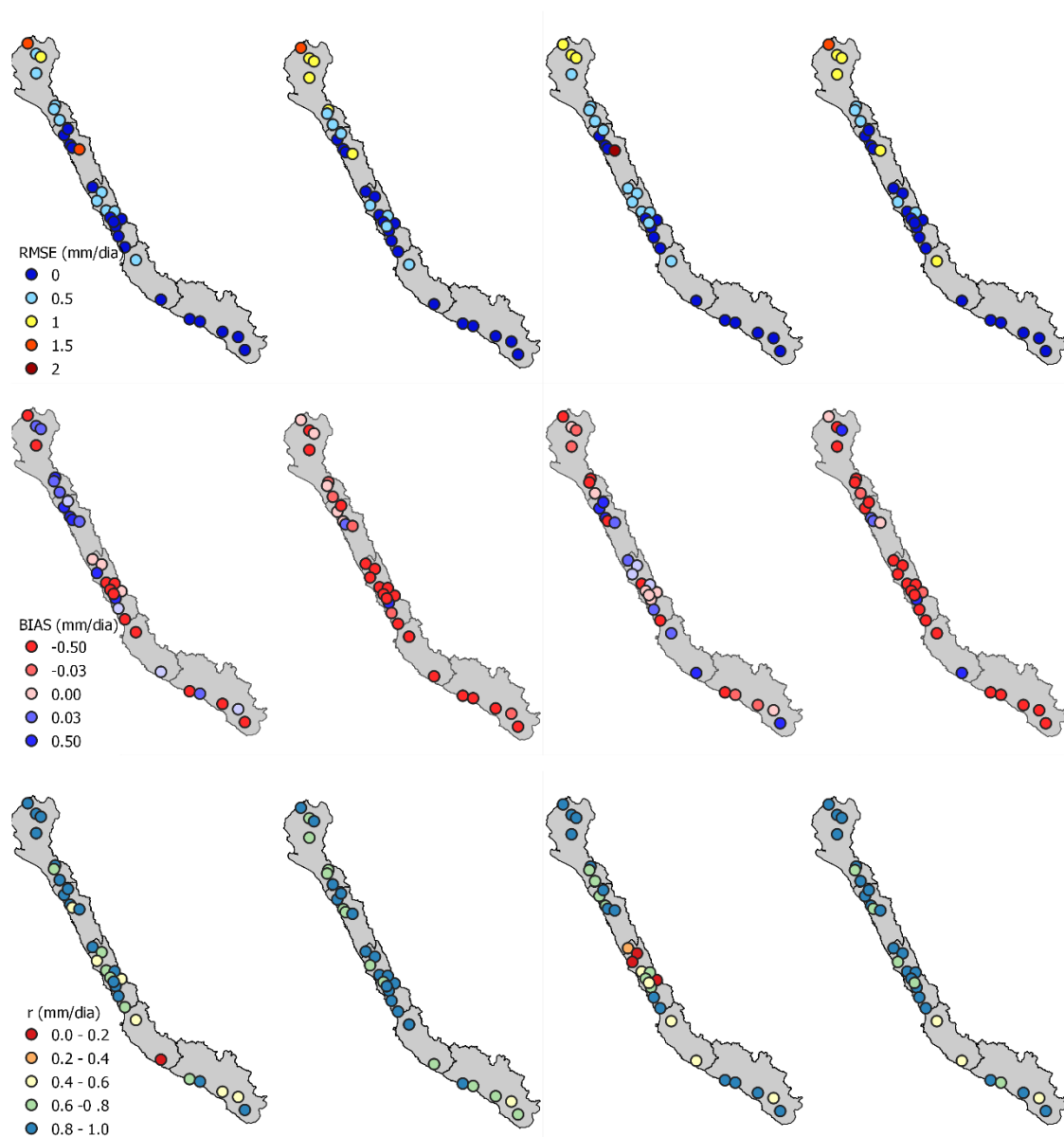


Figura 6. Distribución espacial de las métricas de eficiencia

Por otro lado, los productos ASCAT+SM2RAIN y ERA5, presentaron mayor número de cuencas con KGE satisfactorio ($KGE > 0.4$), sin embargo, es el producto PISCO quien obtuvo en su mayoría los índices más altos de KGE, mientras que el producto GPM+SM2RAIN, obtuvo menor cantidad de cuencas con KGE satisfactorias en la región N°3 y 2.

Finalmente, la métrica de eficiencia NSE, denotó un ajuste satisfactorio ($NSE > 0.5$) de los productos ASCAT+SM2RAIN, PISCO y ERA5, mientras que las regiones con mejor ajuste fueron la Región N°3,4 y 5. Asimismo, fue la región N°3, la que mayor número de cuencas presentó un NSE insatisfactorio.

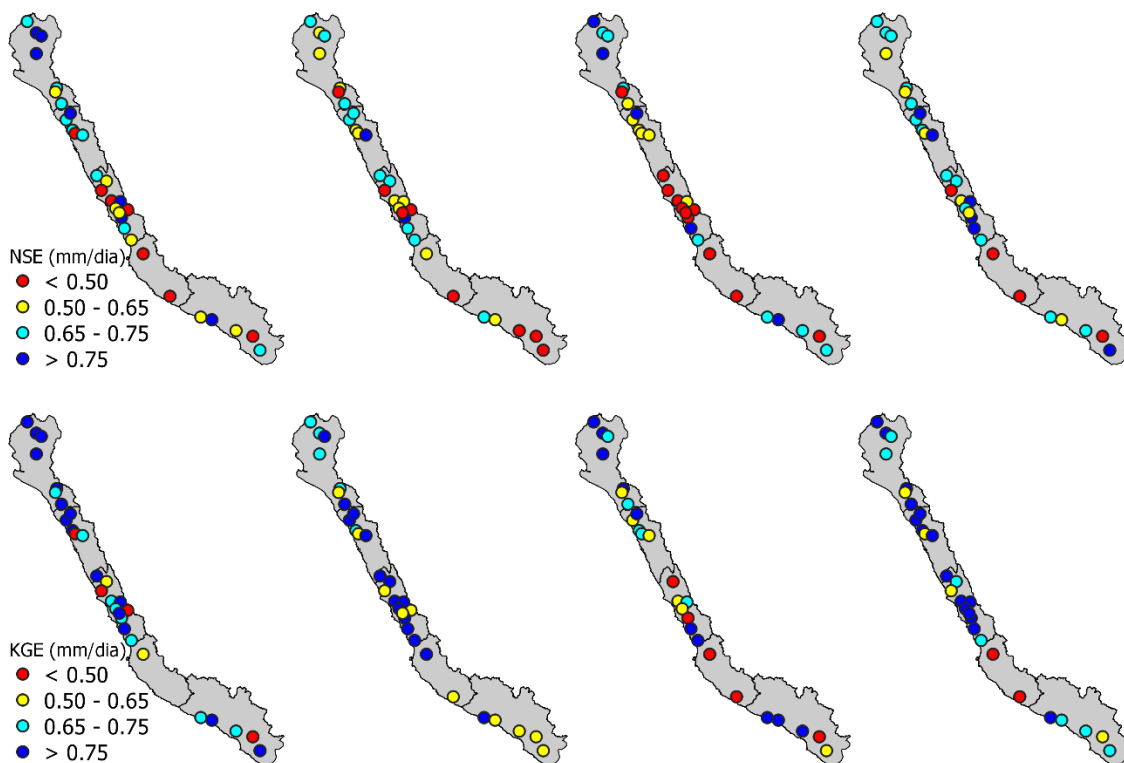


Figura 7. Distribución espacial de las métricas de eficiencia

La Figura 8, denota la comparación entre el periodo de calibración, periodo total y periodo de validación, los cuales demuestran que en general, los 4 productos son confiables en las distintas fases de análisis. En el periodo de calibración, es donde se presentan los puntajes de las 4 métricas de eficiencia que mejor se ajustan, y como era esperarse, estos puntajes disminuyen levemente en el periodo total y periodo de validación.

Para la métrica NSE, la media del periodo calibración y periodo total, se encuentran por encima de 0.6 y 0.5 respectivamente, mientras que la media del periodo de validación de los productos ASCAT+SM2RAIN, PISCO y GPM+SM2RAIN se encuentra entre 0.4 y 0.6 (Bueno), siendo el producto ERA5 el que presentó una media de 0.36 (Satisfactorio). Además, se presenta a los productos PISCO y ASCAT+SM2RAIN, como aquellos que presentan menor variación entre los periodos de calibración, total y validación, siendo el producto ERA5 el que presenta una mayor variación entre estos periodos. También, se describe al producto GPM+SM2RAIN como aquel con mayor variación en cada periodo, denotado por el tamaño del diagrama de caja en cada fase de análisis.

Para la métrica KGE, la media del periodo calibración y periodo total, se encuentran por encima de 0.7 y 0.6 respectivamente, mientras que la media del periodo de validación de los productos ASCAT+SM2RAIN, PISCO y ERA5 se encuentra entre 0.5 y 0.65, siendo el producto GPM+SM2RAIN el que presentó una media de 0.35 (Satisfactorio). Además, se presenta a los productos PISCO y ASCAT+SM2RAIN, como aquellos que presentan menor variación entre los periodos de calibración, total y validación, siendo el

producto ERA5 el que presenta una mayor variación entre estos periodos. También, se describe al producto GPM+SM2RAIN como aquel con mayor variación en cada periodo, denotado por el tamaño del diagrama de caja en cada fase de análisis.

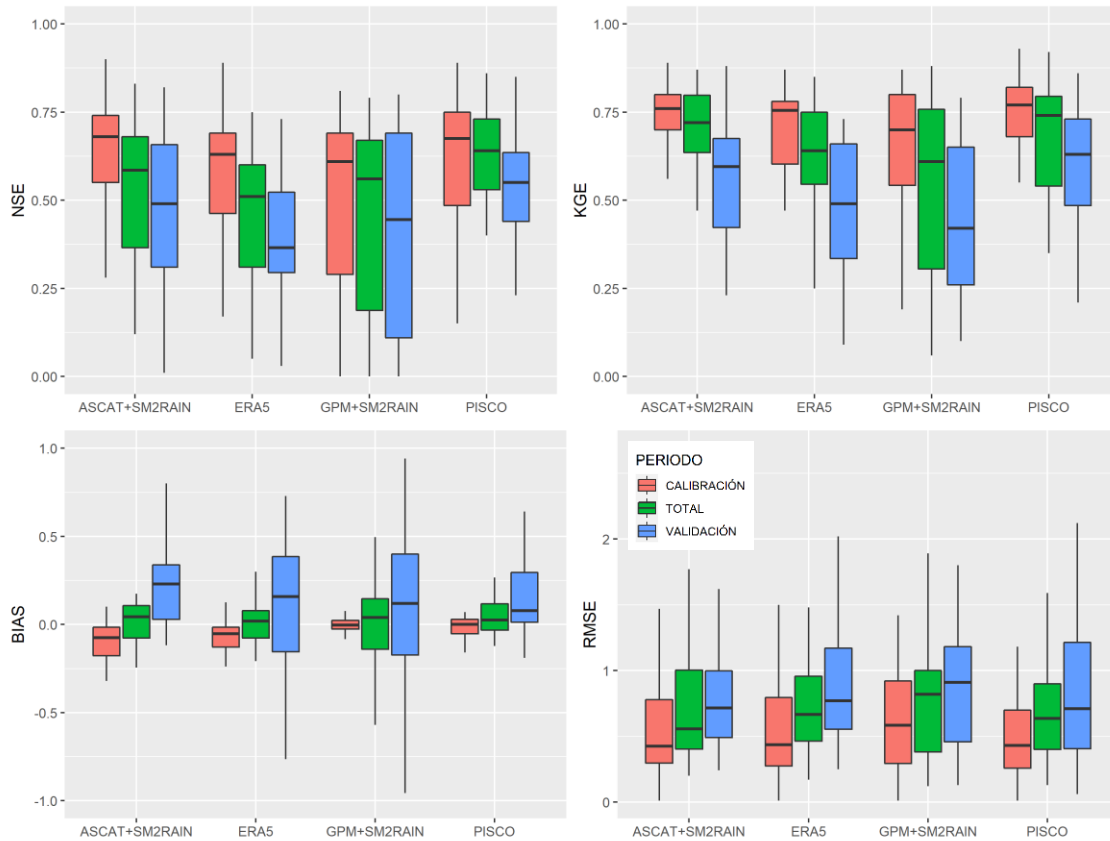


Figura 8. Diagramas de caja para la comparación de los periodos de análisis

Para la métrica BIAS, la media del periodo calibración y periodo total, se encuentran cercano al 0, mientras que la media del periodo de validación de los productos ASCAT+SM2RAIN y ERA5 son los que se alejan levemente del 0. Además, se presenta a los productos GPM+SM2RAIN y PISCO, como aquellos que mejor ajuste presentan en los periodos de calibración y total, siendo el producto ERA5 el que presenta una mayor variación entre estos periodos. También, se describe al producto GPM+SM2RAIN como aquel con mayor variación en el periodo total y de validación, denotado por el tamaño del diagrama de caja en cada fase de análisis.

Para la métrica RMSE, la media del periodo calibración y periodo total, se encuentran alrededor de 0.5, mientras que la media del periodo total del producto GPM+SM2RAIN se encuentra más cercano a 1. Además, la media de los productos satelitales se encuentra entre 0.5 a 1, y es GPM+SM2RAIN, de quien la media es quien más se acerca a 1. También, se describe al producto ASCAT+SM2RAIN como aquel con un error medio cuadrático más estable en las tres fases de análisis.

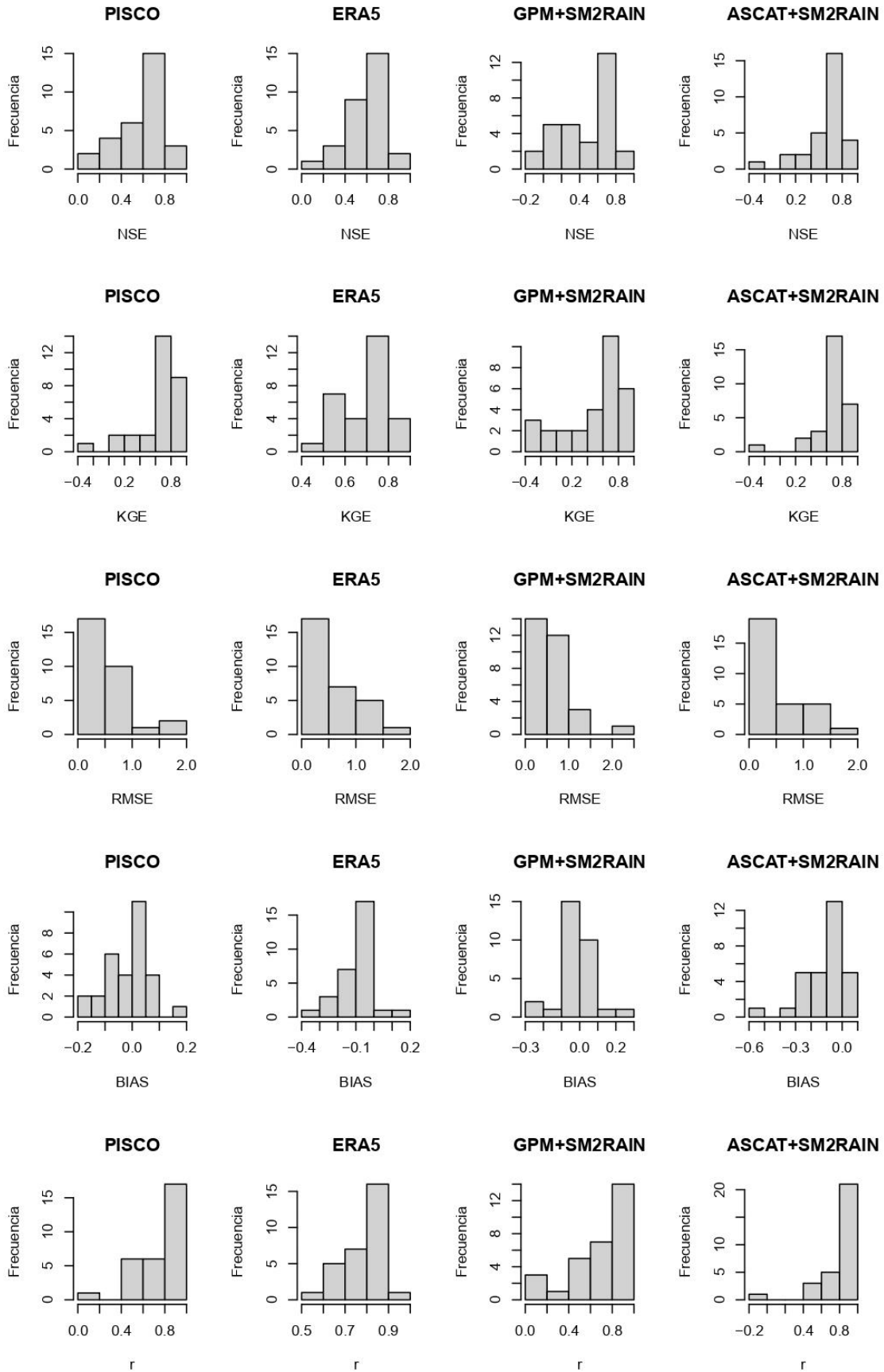


Figura 9. Histogramas de frecuencia en término de KGE para la etapa de calibración

La Figura 9, describe los resultados de los puntajes de 4 métricas de eficiencia del modelo hidrológico, para el periodo de validación (01/01/2015-31/12/2018), representados por histogramas. Esta figura muestra la distribución de los puntajes en intervalos de puntuación, los mismos que se podrían organizar como Insuficiente ($NSE < 0.2$); Satisfactorio ($0.2 < NSE < 0.4$); Bueno ($0.4 < NSE < 0.6$); Muy Bueno ($0.6 < NSE < 0.8$) y Excelente ($NSE > 0.8$). En el que, para los 4 productos satelitales, la mayor cantidad de puntuaciones cayeron en el intervalo de Muy Bueno, teniendo 15 cuencas con este puntaje para los productos PISCO, ERA5 y ASCAT+SM2RAIN, solo siendo GPM+SM2RAIN quien presentó 12 cuencas en este intervalo.

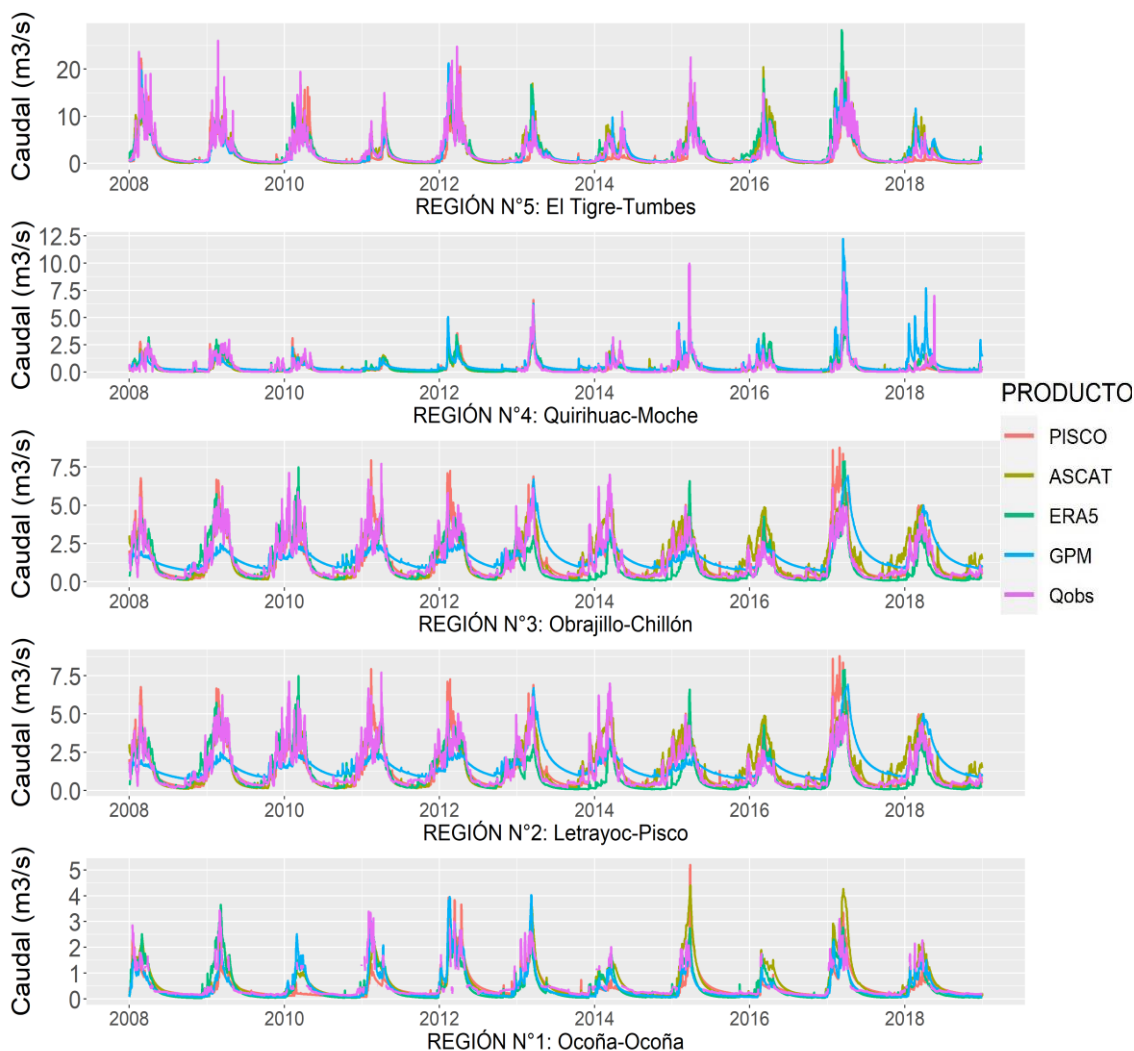


Figura 10. Comparación de caudales para las distintas Regiones

Por otro lado, en el conteo general de las puntuaciones aceptables, se tiene que el producto PISCO, determinó 24 cuencas que se ajustaron con un $NSE > 0.4$, el producto ERA5, determinó 26 cuencas con un $NSE > 0.4$. El GPM+SM2RAIN, determinó 18 cuencas con un ajusta de $NSE > 0.4$ y el producto ASCAT+SM2RAIN, determinó 24 cuencas que se ajustaron a un $NSE > 0.4$.

En la métrica KGE, los 4 productos satelitales presentaron una mayor frecuencia en el intervalo $0.6 < KGE < 0.8$, con 14, 14, 12 y 17 para los productos PISCO, ERA5, GPM+SM2RAIN y ASCAT+SM2RAIN, respectivamente. Para el intervalo de $KGE > 0.8$, se determinaron a 9, 7, 6 y 4 cuencas con estas puntuaciones, en los productos PISCO, ASCAT+SM2RAIN, GPM+SM2RAIN y ERA5, respectivamente.

Por otro lado, en el conteo general de las puntuaciones aceptables, se tiene que el producto PISCO, determinó 25 cuencas que se ajustaron con un $KGE > 0.4$, el producto ERA5, determinó 29 cuencas con un $KGE > 0.4$. El GPM+SM2RAIN, determinó 22 cuencas con un ajuste de $KGE > 0.4$ y el producto ASCAT+SM2RAIN, determinó 27 cuencas que se ajustaron a un $KGE > 0.4$.

En la métrica RMSE, existe predominancia de los 4 productos hacia un error cuadrático medio hacia los valores $0 - 0.5$, mientras que para el intervalo de $0.5 - 1$, es el producto GPM+SM2RAIN quien contienen mayor número de cuencas (12), seguido de PISCO (10), ERA5 (6) y ASCAT+SM2RAIN (5).

En la métrica BIAS, los 4 productos tienen predominancia hacia el 0, es decir, en general, los productos son conservadores en cuanto a la subestimación y sobreestimación de la respuesta hídrica. En el intervalo de -0.1 a 0.1 , se reconocieron 26, 18, 25 y 19 cuencas para los productos PISCO, ERA5, GPM+SM2RAIN y ASCAT+SM2RAIN, respectivamente. Además, fueron los productos ASCAT+SM2RAIN y ERA5 los que presentaron una subestimación -0.6 y -0.4 en 3 cuencas, por otro lado, es el producto ASCAT+SM2RAIN quien presenta mayor conservación en términos de sobreestimación.

Para la métrica de coeficiente de correlación, los productos PISCO, ERA5, GPM+SM2RAIN y ASCAT+SM2RAIN presentaron $r > 0.6$, en 22, 29, 21 y 26 cuencas, respectivamente. Esta métrica denotó que para el intervalo $0.8 - 1$, el producto ASCAT+SM2RAIN fue quien mejor se ajustó, con 20 cuencas en este puntaje, mientras que el producto GPM+SM2RAIN, presentó 14 cuencas en este puntaje.

Del análisis realizado con las métricas de eficiencia, es notable que, por lo general, las cuencas tienen una buena respuesta hídrica, sin embargo, también es notorio la insatisfacción de algunas cuencas. Esta insatisfacción, se da por ejemplo en cuencas de distinta extensión, en la Figura 11 y 12, se muestran los histogramas, ordenadas en función del KGE para el tamaño de las cuencas. La división de las 30 cuencas se realiza en 4 bloques, cuencas con tamaño menor a 1000km^2 , entre $1000-2500\text{km}^2$, $2500-5000\text{km}^2$ y mayores de 5000km^2 . Para las cuencas menores a 1000km^2 (8 cuencas), se tienen a 4 cuencas para cada producto satelital que superan a un $KGE > 0.6$, y es el producto ERA5 quien presentó un mayor número de cuencas con KGE satisfactorio, todas por encima de 0.5. Para las cuencas entre $1000-2500\text{km}^2$ (10 cuencas), se tienen a 10, 8, 6 y 10 cuencas, para los productos PISCO, ERA5, GPM+SM2RAIN y ASCAT+SM2RAIN, respectivamente, que superan a un $KGE > 0.6$. Es el producto GPM+SM2RAIN aquel que presentó 2 cuencas con puntuación insatisfactoria, mientras que el producto PISCO es quien contiene la mayor cantidad de cuencas con $KGE > 0.8$,

seguidos por los otros productos. Para las cuencas entre 2500-5000km² (7 cuencas), se determinaron a 4, 6, 3 y 5 cuencas con un KGE>0.6 para los productos PISCO, ERA5, GPM+SM2RAIN y ASCAT+SM2RAIN, respectivamente. Para las cuencas mayores de 5000km² (5 cuencas), PISCO, ERA5, GPM+SM2RAIN y ASCAT+SM2RAIN, presentaron 5, 4, 5 y 5 cuencas con KGE > 0.6, siendo los productos PISCO y GPM+SM2RAIN los que mejor puntuación presentaron, con un KGE>0.8.

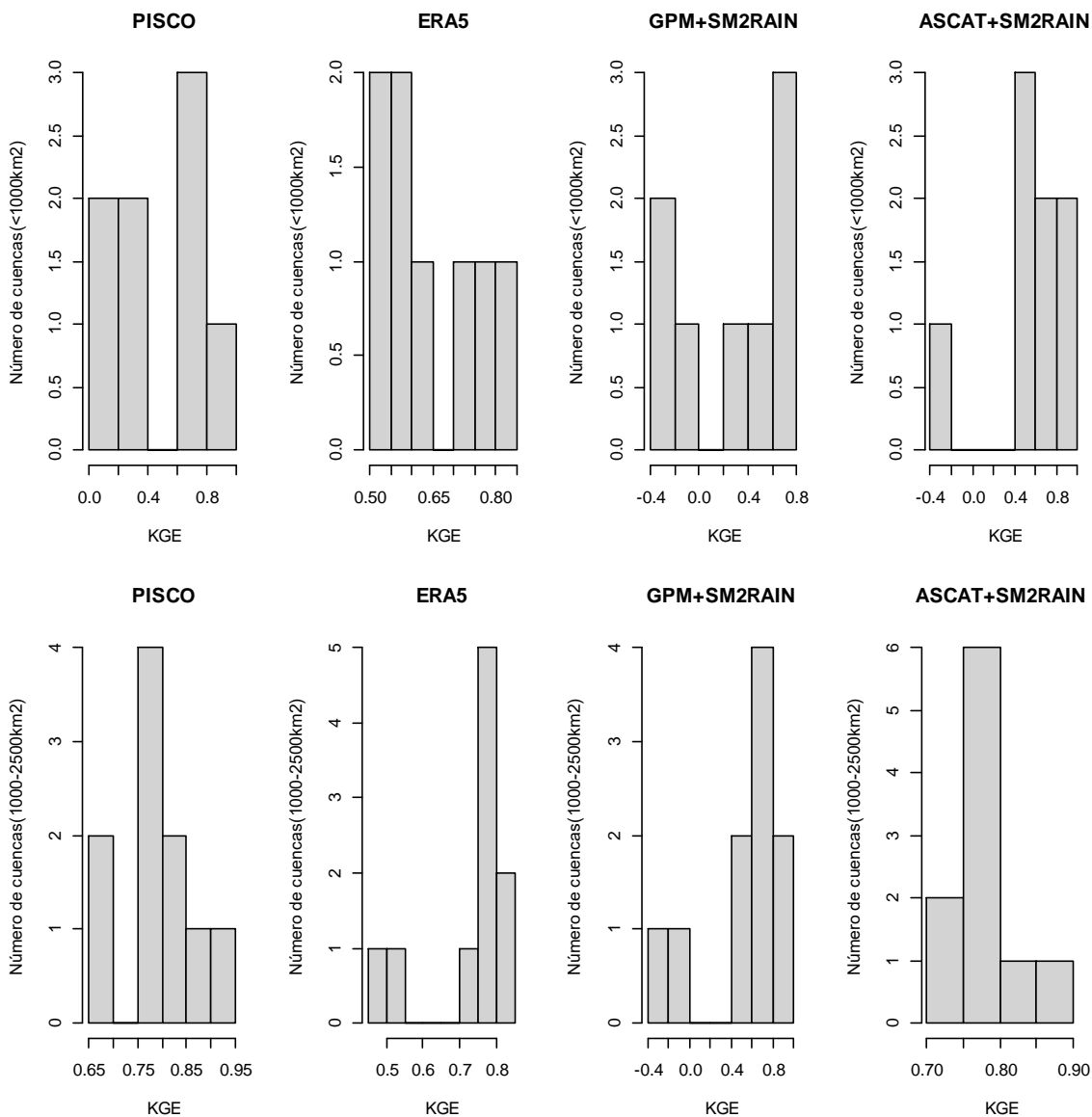


Figura 11. Puntajes de desempeño en términos de KGE para la etapa de calibración

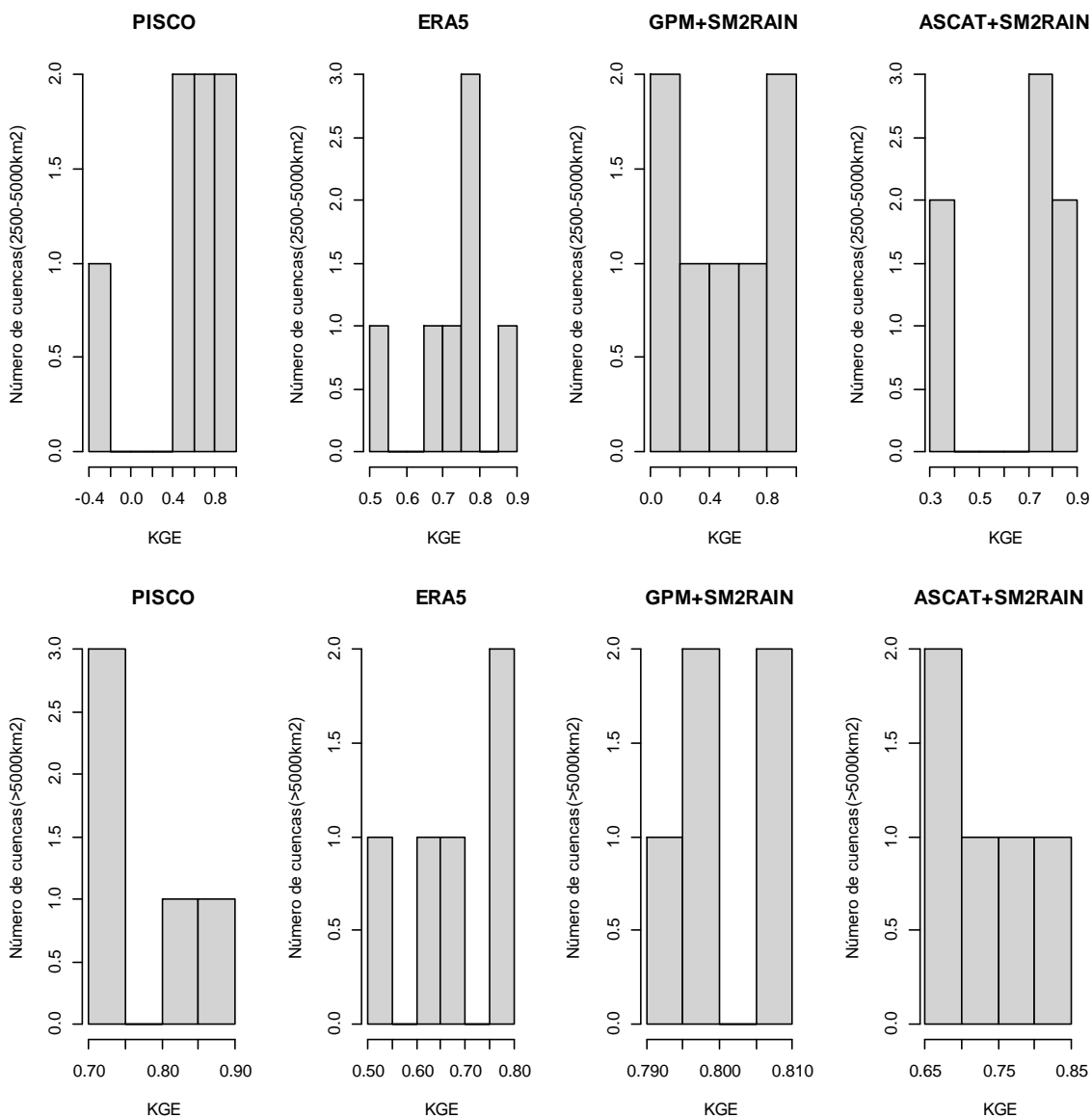


Figura 12. Puntajes de desempeño en términos de KGE para la etapa de calibración

Una vez calculada las métricas de eficiencia, se utilizó el índice Skill Score, para determinar el mejor producto por cuenca (Figura 13), donde ERA5, GPM+SM2RAIN y SM2RAIN+ASCAT fueron predominantes en 5, 12 y 13 cuencas, respectivamente. Además, se denota que en la parte norte de la región 5, existe una predominancia del producto GPM+SM2RAIN y en el Sur de la región, predomina el producto SM2RAIN+ASCAT. En la región 4, predomina el producto SM2RAIN+ASCAT, en la región 3, al norte predomina SM2RAIN+ASCAT y al sur GPM+SM2RAIN, en la región 2 predomina ERA5, y en la región 1, predomina GPM+SM2RAIN.

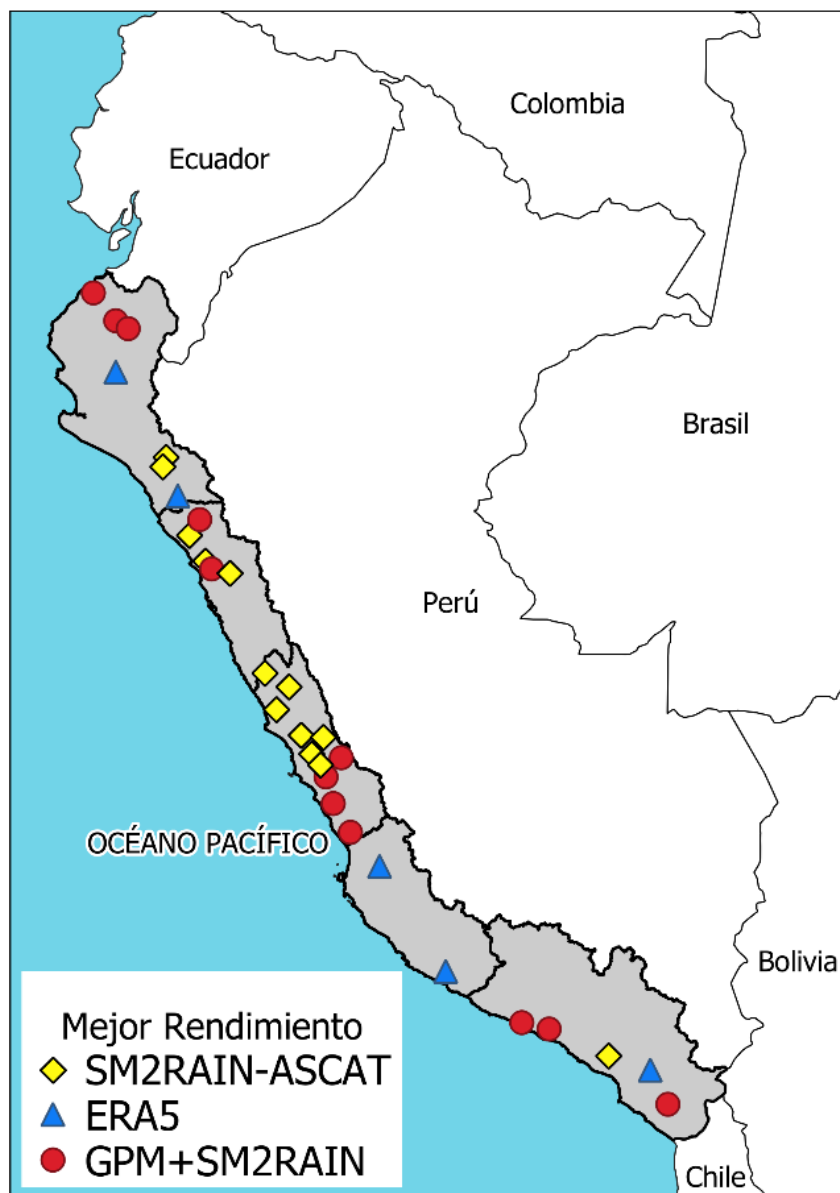


Figura 13. Mejor desempeño entre SM2RAIN-ASCAT, GPM+SM2RAIN y ERA5 en la estimación de la descarga diaria tomando como base la métrica Skill Score.

REGIÓN 5	Caudal medio	0.7971	0.9586	0.9546			
	Q5	0.9180	0.5663	0.9531			
	Q95	0.6861	0.9876	0.9592			
	Mínimo 7 días	0.9123	0.4711	0.9516			
	Índice de flujo base	0.7450	0.6613	0.9362			
	Alta Frecuencia	0.8018	0.7580	0.9424			
	Baja Frecuencia	0.7556	0.7322	0.8399			
	Larga Duración	0.5894	-0.2172	0.5851			
	Alta Duración	0.6188	0.3815	0.6981			
	FDC	0.7514	-0.0605	0.8515			
REGIÓN 4	Caudal medio	0.9976	0.9941	0.9978			
	Q5	0.9998	0.9989	0.9997			
	Q95	0.9983	0.9773	0.9947			
	Mínimo 7 días	0.9996	0.9991	0.9999			
	Índice de flujo base	0.0748	-0.0330	0.2660			
	Alta Frecuencia	0.6124	-0.4025	0.5650			
	Baja Frecuencia	0.5349	-0.4790	0.3993			
	Larga Duración	0.5595	0.3211	0.7262			
	Alta Duración	0.1740	-0.5110	0.7790			
	FDC	0.6196	-0.5082	0.2635			
REGIÓN 3	Caudal medio	0.8720	0.7751	0.7644			
	Q5	0.8352	0.5615	0.7041			
	Q95	0.6634	0.8282	0.4204			
	Mínimo 7 días	0.7962	0.5394	0.6579			
	Índice de flujo base	0.3081	0.6610	0.5121			
	Alta Frecuencia	-0.0282	0.9056	0.6346			
	Baja Frecuencia	0.2750	0.9179	0.4049			
	Larga Duración	-0.1074	0.7768	0.5416			
	Alta Duración	0.2472	0.3051	0.3322			
	FDC	-0.0772	0.4893	0.2650			
REGIÓN 2	Caudal medio	0.9987	0.9887	0.9968			
	Q5	0.9983	0.9963	0.9951			
	Q95	0.9204	0.7296	0.9347			
	Mínimo 7 días	0.9925	0.9996	0.9995			
	Índice de flujo base	-0.6668	0.9045	0.9986			
	Alta Frecuencia	0.7178	0.9993	0.9661			
	Baja Frecuencia	0.9804	0.9972	0.7482			
	Larga Duración	0.2180	0.9677	0.7545			
	Alta Duración	0.7152	0.4424	0.9971			
	FDC	0.8244	0.9994	0.9887			
REGIÓN 1	Caudal medio	0.9615	0.9916	0.9525			
	Q5	0.3053	0.9732	0.9376			
	Q95	0.9836	0.9867	0.9724			
	Mínimo 7 días	0.0587	0.9900	0.8104			
	Índice de flujo base	0.6957	0.9871	0.2467			
	Alta Frecuencia	0.4426	0.7178	0.2679			
	Baja Frecuencia	0.2274	0.6986	0.4387			
	Larga Duración	0.5745	0.7536	-0.5579			
	Alta Duración	0.9127	0.9858	0.7604			
	FDC	0.9738	0.8585	0.2057			

Figura 14. Mejor desempeño entre ERA 5, SM2RAIN-ASCAT, GPM+SM2RAIN, leídos de izquierda a derecha.

5. Conclusiones

Este estudio tuvo el objetivo de evaluar el desempeño de 4 productos satelitales basados en los enfoques “bottom up” y “top down” en la Vertiente del Pacífico, Perú, para la estimación de descargas media diarias. SM2RAIN ASCAT y GPM+SM2RAIN basados en satélites “bottom up”, ERA5 basado en reanálisis y PISCO, producto realizado por el SENAMHI para su aplicación en Perú. Este último, no entró en la comparación, mas sirvió como referencia para la evaluación de los otros productos junto a los datos de las estaciones hidrométricas descritas. Se evaluó 30 cuencas con el modelo hidrológico GR4J a paso diario, las mismas que fueron agrupadas en 5 regiones, definidas por la Autoridad Administrativa del Agua (AAA). A su vez, la evaluación del desempeño fue realizada mediante las métricas de eficiencia Nash Sutcliffe-Efficiency (NSE), Kling Gupta-Efficiency (KGE); Raíz de error medio cuadrático (RMSE); Sesgo relativo (BIAS) y el Coeficiente de correlación (r).

A la luz de los resultados, se describe que los productos evaluados en la mayoría de las cuencas mostraron resultados por encima de satisfactorios (>0.5), y a su vez, es notable la disminución de las puntuaciones en las métricas en el paso de la calibración, al periodo total y a la validación. Concluimos que en la región N°5, el producto que mejor se desempeñó fue el ASCAT+SM2RAIN, seguidamente del ERA5 y GPM+SM2RAIN. En la región N°4, el mejor producto fue el ASCAT+SM2RAIN, seguidamente del ERA5 y GPM+SM2RAIN. En la región N°3, el mejor producto fue el ERA5, seguidamente de ASCAT+SM2RAIN y GPM+SM2RAIN. En la región N°2, el mejor producto fue el ERA5, seguidamente de ASCAT+SM2RAIN y GPM+SM2RAIN. En la región N°1, el mejor producto es el ASCAT+SM2RAIN, seguidamente del GPM+SM2RAIN y ERA5.

De los productos evaluados, se concluye que, para la métrica de NSE, con rango de $-\infty$ a 1, el producto que mejor se desempeñó en la mediana para los 3 periodos de análisis, calibración, validación y total, es el ASCAT+SM2RAIN con 0.65, 0.6, 0.5, respectivamente, seguidamente de GPM+SM2RAIN y ERA5. Sin embargo, el producto GPM+SM2RAIN, es quien mayor variación presentó. A su vez, para la métrica KGE, con rango de $-\infty$ a 1, el producto que mejor se desempeñó en los 3 periodos de análisis, calibración, validación y total, es el ASCAT+SM2RAIN con 0.75, 0.70 y 0.6, respectivamente, seguidamente de ERA5 y GPM+SM2RAIN. Donde nuevamente, es el producto GPM+SM2RAIN quien mayor variación presentó. Además, para la métrica BIAS, el producto que mayor conservación presentó al estar cerca del 0 en la etapa de calibración fue el GPM+SM2RAIN, superando inclusive al producto PISCO. Sin embargo, en las etapas siguientes de validación y periodo total, es también notorio que este producto es quien mayor variación presentó, siendo los productos ASCAT+SM2RAIN y ERA5 los más estables de forma general. Por otro lado, para la métrica RMSE, con rango de 1 a $+\infty$, el producto que mejor se desempeñó fue el ASCAT+SM2RAIN, superando de forma general al producto PISCO, seguidamente del ERA5 y GPM+SM2RAIN.

En el análisis de los productos, por tamaño de cuenca, se determinó que para las cuencas con extensión menor a 1000km², el mejor producto es el ERA5 (superando inclusive a PISCO), seguidamente de ASCAT+SM2RAIN y GPM+SM2RAIN. Para las

cuencas con extensión de 1000-2500km², el mejor producto fue el ASCAT+SM2RAIN (superando inclusive a PISCO) seguidamente del ERA5 y GPM+SM2RAIN. Para las cuencas con extensión de 2500-5000km², el mejor producto fue el ERA5 (superando inclusive a PISCO), seguidamente de ASCAT+SM2RAIN y GPM+SM2RAIN. Finalmente, para las cuencas con extensión mayor de 5000km², el mejor producto fue el GPM+SM2RAIN ERA5 (superando inclusive a PISCO), seguidamente de ASCAT+SM2RAIN y ERA5.

Por otro lado, para el análisis con indicador Skill Score, se determina que los mejores productos por región fueron, región 5 el GPM+SM2RAIN, en la región 4, el SM2RAIN+ASCAT, en la región 3 el SM2RAIN+ASCAT, en la región 2 predomina ERA5, y en la región 1, predomina GPM+SM2RAIN.

Finalmente, nuestro estudio recomienda el uso de productos satelitales en la Vertiente del Pacífico, y a su vez recomienda una mayor exploración en otras cuencas de la Vertiente, por lo que potencialmente se buscará la aplicación de estos productos satelitales en otras vertientes del territorio peruano.

6. Referencias Bibliográficas

- Abera, W., Formetta, G., Brocca, L., & Rigon, R. (2017). Modeling the water budget of the Upper Blue Nile basin using the JGrass-NewAge model system and satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 3145–3165. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3145-2017>
- Adecuado, D., La, E. N., Del, C., Astorayme, M. A., Gutiérrez, R. R., García, J., Felipe, O., & Suarez, W. (2016). XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA AIIH DOWNSCALING TEMPORAL DE UN MODELO HIDROLÓGICO A PASO.
- Almagro, A., Oliveira, P. T. S., Meira Neto, A. A., Roy, T., & Troch, P. (2021). CABra: A novel large-sample dataset for Brazilian catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3105–3135. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3105-2021>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). *Perfil de Riesgo por Inundaciones en Perú*. 191.
- Brocca, L., Moramarco, T., Melone, F., & Wagner, W. (2013). A new method for rainfall estimation through soil moisture observations. *Geophysical Research Letters*, 40(5), 853–858. <https://doi.org/10.1002/grl.50173>
- Brocca, Luca, Filippucci, P., Hahn, S., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., Schüller, L., Bojkov, B., & Wagner, W. (2019). SM2RAIN-ASCAT (2007-2018): Global daily satellite rainfall data from ASCAT soil moisture observations. *Earth System Science Data*, 11(4), 1583–1601. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1583-2019>
- Carrillo, M. (2010). *Modelación hidrológica semidistribuida de micro cuencas de diferente cobertura vegetal*. 129. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/733/1/ti861.pdf>
- Fernández, G. (2011). *El cambio climático: Los aspectos científicos y económicos mas relevantes*. *Nómadas. Critical Journal of Social and Juridical Sciences*, 32(4), undefined-undefined. [fecha de Consulta 17 de Septiembre de 2019]. ISSN: 1578-
- Gnann, S. J., Coxon, G., Woods, R. A., Howden, N. J. K., & McMillan, H. K. (2021). TOSSH: A Toolbox for Streamflow Signatures in Hydrology. *Environmental Modelling & Software*, 138, 104983. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2021.104983>
- Hong, Y., Hsu, K. L., Moradkhani, H., & Sorooshian, S. (2006). Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response. *Water Resources Research*, 42(8), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005WR004398>
- Hwang, S. H., Ham, D. H., & Kim, J. H. (2012). Une nouvelle mesure de l'efficacité des modèles hydrologiques de prévision pilotés par les données. *Hydrological Sciences Journal*, 57(7), 1257–1274. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.710335>

- 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. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.03.042>
- Lagos, P., Silva, Y., & Nickl, E. (n.d.). *EL NIÑO Y LA PRECIPITACIÓN EN LOS ANDES DEL PERÚ*.
- Massari, C., Brocca, L., Pellarin, T., Abramowitz, G., Filippucci, P., Ciabatta, L., Maggioni, V., Kerr, Y., & Fernandez Prieto, D. (2020). A daily 25 km short-latency rainfall product for data-scarce regions based on the integration of the Global Precipitation Measurement mission rainfall and multiple-satellite soil moisture products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2687–2710. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2687-2020>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (1983). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. *Transactions of the ASABE*, 50(3).
- Nash, J. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3):282–290.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Zambrano-Bigiarini, M., & Rojas, R. (2013). A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration. *Environmental Modelling and Software*, 43, 5–25. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.01.004>

Anexos

Región 5	BIAS	RMSE	r
	1.00	2.50	1.00
	-1.00	0.00	0.00
ASCAT+SM2RAIN	0.07	0.86	0.62
ERA5	0.07	1.05	0.56
GPM+SM2RAIN	0.08	0.82	0.61
PISCO	0.02	0.76	0.64

Región 4	BIAS	RMSE	r
	1.00	2.50	1.00
	-1.00	0.00	0.00
ASCAT+SM2RAIN	-0.09	0.63	0.59
ERA5	-0.01	0.69	0.56
GPM+SM2RAIN	0.05	0.71	0.60
PISCO	0.09	0.61	0.60

Región 3	BIAS	RMSE	r
	1.00	2.50	1.00
	-1.00	0.00	0.00
ASCAT+SM2RAIN	0.09	0.42	0.60
ERA5	0.05	0.46	0.59
GPM+SM2RAIN	-0.04	0.57	0.39
PISCO	0.14	0.51	0.53

Región 2	BIAS	RMSE	r
	1.00	2.50	1.00
	-1.00	0.00	0.00
ASCAT+SM2RAIN	-0.20	0.48	0.40
ERA5	-0.21	0.38	0.47
GPM+SM2RAIN	-0.17	0.47	0.26
PISCO	-0.24	0.50	0.29

Región 1	BIAS	RMSE	r
	1.00	2.50	1.00
	-1.00	0.00	0.00
ASCAT+SM2RAIN	0.09	0.23	0.53
ERA5	-0.08	0.23	0.49
GPM+SM2RAIN	-0.02	0.14	0.56
PISCO	-0.01	0.16	0.54