

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“COMPARACIÓN DE LOS PRODUCTOS TRMM Y GPM PARA EL
MODELAMIENTO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO
HUANCANÉ.”**

Presentado por:

FLAVIO ALEXANDER ASURZA VÉLIZ

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

Lima-Perú

2017

DEDICATORIA

A mi familia, por el constante apoyo y ejemplo de vida que he admirado y seguido durante todos estos años.

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos al Ing. Cayo Ramos, por su guía durante la realización de la presente tesis. Un especial agradecimiento al Dr. Waldo Lavado, quien ha asesorado permanentemente la investigación, aportando enriquecedores comentarios y sugerencias. Asimismo, a todos los compañeros y amigos de la Dirección de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú con quienes compartí conocimientos y momentos gratos. Finalmente, pero no por ello menos importante, a mis amigos y compañeros de la carrera, especialmente a los integrantes de El Círculo de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos, por los momentos vividos y el apoyo mutuo durante esta experiencia.

RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo evaluar la capacidad de los productos grillados de precipitación de la *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) y de la *Global Precipitation Measurement* (GPM), en su aplicación al modelamiento hidrológico. Para ello, se realizó una comparación cuantitativa de estos productos satelitales con la precipitación observada, obtenida de una cuenca con baja densidad de estaciones pluviométricas: la cuenca del río Huancané, ubicada en el Altiplano peruano. En general, la comparación de la precipitación media diaria de la cuenca a partir de las estimaciones de los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG respecto a la lluvia media diaria de las estaciones (para el periodo Abril 2014 – Diciembre 2015), determina que IMERG representa correctamente los patrones de la precipitación (R^2 : 0.38) pero no cuantifica adecuadamente la intensidad (BIAS: -32%). Por otro lado, el producto 3B42V7 capta muy bien la intensidad de lluvia en contraste con el 3B42RT que presenta elevadas sobrestimaciones. De igual manera, una evaluación inicial de los productos satelitales sin corregir utilizando el modelo hidrológico agregado GR4J, evidencia que en ausencia de datos observados, el producto 3B42V7 es la mejor opción para la estimación de las descargas. Finalmente, al realizar la corrección del sesgo por el promedio al producto IMERG, los resultados muestran que se mejora las estimaciones de la lluvia (R^2 : 0.9; BIAS: -10.1%) y en consecuencia, el IMERG corregido es el mejor producto satelital de precipitación para su aplicación al modelamiento hidrológico. Estos resultados preliminares están limitados al análisis de un corto periodo, sin embargo, a medida que se liberan más datos del IMERG, más estudios para explorar su utilidad en aspectos del agua y cambio climático serán necesarios.

Palabras clave: modelamiento hidrológico, productos satelitales, Altiplano peruano, IMERG, modelo GR4J, corrección del sesgo.

ABSTRACT

The current research has the main purpose to assess the capacity of gridded precipitation products of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Global Precipitation Measurement (GPM) in its application to hydrologic modelling. A quantitative comparison was made among these satellite products with a low dense gauge network over Huancané basin in Peruvian Altiplano. In general, comparisons of 3B42RT, 3B42V7 and IMERG estimates with gauge observations over a period from April 2014 to December 2015 at daily resolution show that IMERG estimates correctly precipitation patterns (R^2 : 0.38), however it doesn't quantify properly the rain intensity (BIAS: -32%). On the other hand, the product 3B42V7 captures very well the rain intensity in contrast to the 3B42RT that show high overestimation. An initial hydrologic assessment with GR4J lumped hydrologic model using satellite products without correction indicate that, in lack of gauge observations, 3B42V7 is the best option to simulate daily streamflow. Finally, when performing the mean field bias correction to IMERG, results show that the precipitation estimation is improved (R^2 : 0.9; BIAS: -10.1%), consequently the IMERG corrected is the best precipitation satellite product to its application in hydrologic modelling. These preliminary results are limited to the short-term analysis, however as more IMERG data is released, more studies to explore its usefulness in water and climate change aspects will be needed.

Keywords: hydrologic modelling satellite products, Peruvian Altiplano, IMERG, model GR4J, bias correction.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
INDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE ANEXOS	xiii
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION DE LITERATURA	3
2.1. SATELITES METEOROLOGICOS	3
2.1.1. Satélites Operacionales Geoestacionarios	3
2.1.2. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).....	5
2.1.3. Situación actual y futuro del TRMM.....	7
2.1.4. Global Precipitation Measurement (GPM).....	8
2.2. MODELAMIENTO HIDROLOGICO	11
2.2.1. El ciclo hidrológico	11
2.2.2. Clasificación de los modelos hidrológicos	12
2.2.3. Modelo precipitación-escorrentía GR4J	14
2.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	18
2.3.1. Optimización en hidrología: un problema complejo	18
2.3.2. El algoritmo de optimización local – Método “paso a paso”	19
2.4. USO DEL SENSORAMIENTO REMOTO (TRMM y GPM) EN HIDROLOGIA	22
III. MATERIALES Y METODOS.....	25
3.1. MATERIALES Y EQUIPOS	25
3.1.1. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO	25
3.1.2. DATOS Y METODOS UTILIZADOS	27
3.1.3. EQUIPOS	32
3.2. METRICAS ESTADISTICAS DE DESEMPEÑO	33
3.3. METODOLOGIA	36

3.3.1. Análisis exploratorio de datos (AED)	37
3.3.2. Evaluación y comparación de la precipitación.....	38
3.3.3. Evaluación en el modelamiento hidrológico	38
3.3.4. Corrección de la precipitación estimada por el satélite GPM	41
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	43
4.1. Análisis exploratorio de datos.....	43
4.2. Análisis comparativo de la precipitación	44
4.2.1. Evaluación y comparación estacional de la precipitación.....	44
4.2.2. Evaluación y comparación espacial de la precipitación.....	46
4.3. Implementación del modelo GR4J.....	51
4.3.1. Escenario I: Parámetros estáticos	51
4.3.2. Escenario II: Parámetros dinámicos	53
4.3. Sobre el desempeño del IMERG corregido en el modelamiento hidrológico	56
V. CONCLUSIONES	58
5.1. De la comparación estadística de los productos de precipitación del TRMM y GPM respecto a la lluvia observada a nivel espacial y estacional.....	58
5.2. De la evaluación del TRMM y GPM en el modelamiento hidrológico (GR4J).	58
5.3. De la evaluación del IMERG corregido en el modelamiento hidrológico.....	59
VI. RECOMENDACIONES	62
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62
VIII. ANEXOS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de satélites geoestacionarios Meteorológicos Mundial ubicados a un altitud promedio de 35,800 Km.	4
Figura 2: Cobertura espacial del TRMM (35°N – 35°S).....	5
Figura 3: Geometría de escaneo actual del radar de precipitación a bordo del satélite TRMM, modificado del Manual de Instrucción, versión 6 ,en cuanto a la altura del satélite y el <i>swath width</i> a partir del cambio de la órbita hecho en el 2001.	6
Figura 4: Imagen en 3D de la NASA que muestra la estimativa de lluvia y la estructura vertical de la tormenta.	7
Figura 5: Altura de orbita histórica del TRMM.	8
Figura 6: Conjunto de satélites que comprende el GPM.....	9
Figura 7: Nave GPM con los instrumentos GMI y DPR.....	10
Figura 8: Comparación de las áreas cubiertas por las órbitas del TRMM (35°N – 35°S) y GPM (60°N – 60°S).....	10
Figura 9: Representación del ciclo hidrológico.....	12
Figura 10: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de sus ecuaciones.....	14
Figura 11: Estructura del modelo diario precipitación-escorrentía GR4J.	16
Figura 12: Esquematización de óptimos locales y globales dentro del dominio o espacio de búsqueda.	19
Figura 13: Esquema de funcionamiento del algoritmo de optimización “Paso a paso”.....	20
Figura 14: Comparación de los productos satelitales de precipitación media mensual respecto a la lluvia observada para cuatro subcuencas. Región Pacífico-Andino (Perú-Ecuador).....	23
Figura 15: Comparación del desempeño del TRMM en siete regiones de los andes peruano. TRMM 3B43 representa el producto sin corregir; TRMM A, corregido mediante un factor aditivo; TRMM M, corregido mediante un factor multiplicativo.	23
Figura 16: Eficiencia de Nash en los puntos de calibración utilizados. A partir de a) Lluvia observada, b) IMERG, c) 3B42V7, y d) 3B42RT	24
Figura 17: Ubicación del área de estudio con las estaciones meteorológicas utilizadas y la estación hidrométrica Puente Huancané.....	26

Figura 18: Climatología de la cuenca del río Huancané en base a los datos observados de lluvia y evapotranspiración [Período 2000-2015]	27
Figura 19: Representación de las grillas que cubren la zona de estudio. a) Para el producto 3B42RT y 3B42V7 (5x5), b) para el producto IMERG (12x12)	30
Figura 20: Ilustración del esquema del método de la distancia media al cuadrado aplicado sobre un polígono de referencia (p.e. una cuenca hidrográfica).....	31
Figura 21: Diagrama de Taylor para la comparación del desempeño de tres productos satelitales de precipitación. Cuenca del río Ganjiang, China.	36
Figura 22: Flujograma de trabajo dividido en dos procedimientos generales. (1) Evaluación estacional y espacial, y (2) evaluación en el modelamiento hidrológico.	36
Figura 23: Precipitación y evapotranspiración media para la cuenca a partir de los datos observados. Variables de entrada al modelo GR4J.	39
Figura 24: Diagrama de Taylor para la evaluación estadística de la precipitación media areal de los productos satelitales.	45
Figura 25: Correlación de los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG respecto a la precipitación media areal de la cuenca.	45
Figura 26: Estacionalidad de las lluvias mensuales de los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG en comparación con la precipitación media areal de la cuenca.	46
Figura 27: Representación espacial del coeficiente de determinación (arriba) y del sesgo estadístico (abajo) de los productos en evaluación.....	48
Figura 28: Desempeño de los productos TRMM y GPM respecto a la altitud de la zona de estudio. a) En base a la correlación (R^2), y b) en base a la subestimación o sobreestimación expresado en el porcentaje del BIAS.....	49
Figura 29: Representación espacial de la precipitación acumulada para la cuenca de estudio en el año hidrológico 2014-2015. Nótese la variabilidad espacial de la intensidad de la precipitación indicada por las flechas. a) Lluvia observada, b) producto IMERG, c) producto 3B42RT, d) producto 3B42V7.	50
Figura 30: Escenario de simulación I. a) calibración a partir de los datos observados, b) validación I a partir de los datos observados, c) validación I a partir del producto 3B42RT, y d) validación I a partir del producto 3B42V7.....	52
Figura 31: Escenario de simulación I. a) validación II a partir de los datos observados, b) validación II a partir del producto 3B42RT, c) validación II a partir del producto 3B42V7, y d) validación II a partir del producto IMERG.	53

Figura 32: Escenario de simulación II. a) Calibración y validación I a partir del producto 3B42RT, y b) calibración y validación I a partir del producto 3B42V7.	54
Figura 33: Escenario de simulación. a) Validación II a partir de los productos 3B42RT e IMERG, y b) validación II a partir de los productos 3B42V7 e IMERG.....	55
Figura 34: Diagrama de dispersión del IMERG corregido respecto a la lluvia observada.	57
Figura 35: Comparación del desempeño de: a) IMERG corregido, b) datos observados, c) IMERG sin corregir y d) 3B42V7 para el periodo de validación II.	57
Figura 36: Precipitación diaria para las once estaciones meteorológicas consideradas.	67
Figura 37: Temperatura máxima diaria para las once estaciones meteorológicas consideradas.....	68
Figura 38: Temperatura mínima diaria para las once estaciones meteorológicas consideradas.....	69
Figura 39: Coeficiente de determinación de la precipitación acumulada mensual entre las once estaciones meteorológicas consideradas.	70
Figura 40: Diagrama de cajas de la precipitación observada mensual por cada estación meteorológica.	71
Figura 41: Curva de doble masa entre las lluvias mensuales observadas a partir de las estaciones meteorológicas. Sin presencia de quiebres o saltos notorios evidencian que son datos consistentes.	71
Figura 42: Diagrama de cajas de la temperatura media mínima mensual por cada estación meteorológica.	72
Figura 43: Coeficiente de determinación de la temperatura máxima mensual entre las once estaciones meteorológicas consideradas.....	73
Figura 44: Coeficiente de determinación de la temperatura mínima mensual entre las once estaciones meteorológicas consideradas.....	74
Figura 45: Diagrama de cajas de la temperatura media máxima mensual por cada estación meteorológica.	75
Figura 46: Diagrama de cajas de los caudales medios para cada mes según el periodo considerado.....	76
Figura 47: Serie de tiempo de la precipitación observada y los productos 3B42RT, 3B42RT e IMERG para el periodo Abril 2014 – Diciembre 2015.	77
Figura 48: Visualización diaria y mensual de la precipitación observada. Hacia el lado izquierdo la serie de tiempo se muestra para el periodo Enero 2001 – Diciembre 2015. Hacia	

el lado derecho, el diagramas de cajas muestra la tendencia de lluvias y presencia de posibles anómalos.....	78
Figura 49: Visualización diaria y mensual el producto 3B42RT. Hacia el lado izquierdo la serie de tiempo se muestra para el periodo Enero 2001 – Diciembre 2015. Hacia el lado derecho, el diagramas de cajas muestra la tendencia de lluvias y presencia de posibles anómalos.....	78
Figura 50: Visualización diaria y mensual el producto 3B42V7. Hacia el lado izquierdo la serie de tiempo se muestra para el periodo Enero 2001 – Diciembre 2015. Hacia el lado derecho, el diagramas de cajas muestra la tendencia de lluvias y presencia de posibles anómalos.....	79
Figura 51: Visualización diaria y mensual el producto IMERG. Hacia el lado izquierdo la serie de tiempo se muestra para el periodo Abril 2014 – Diciembre 2015. Hacia el lado derecho, el diagramas de cajas muestra la tendencia de lluvias y presencia de posibles anómalos.....	79
Figura 52: Regresión lineal de cada estación meteorológica considerada. Precipitación observada respecto al producto 3B42V7.....	80
Figura 53: Regresión lineal de cada estación meteorológica considerada. Precipitación observada respecto al producto IMERG.....	81
Figura 54: Regresión lineal de cada estación meteorológica considerada. Precipitación observada respecto al producto 3B42RT.....	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de las principales características entre los instrumentos satelitales del TRMM y GPM para la generación de los productos grillados de precipitación.	11
Tabla 2: Características de los tres modelos.....	13
Tabla 3: Relación de estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en cuencas aledañas..	28
Tabla 4: Información de los productos satelitales utilizados.....	29
Tabla 5: Estación de control para el modelamiento hidrológico.	32
Tabla 6: Información del uso de los programas de cómputo utilizados.	33
Tabla 7: Esquema explicativo para la evaluación hidrológica.	41
Tabla 8: Rango de parámetros establecidos para el modelo GR4J.....	51
Tabla 9: Evaluación estadística de la precipitación acumulada mensual observada. S(0.05) representa que el test es significativo al 5% de nivel de significancia. NS(0.05) representa que el test no es significativo al 5% de nivel de significancia.....	72
Tabla 10: Evaluación estadística de la temperatura mínima mensual observada. S(0.05) representa que el test es significativo al 5% de nivel de significancia. NS(0.05) representa que el test no es significativo al 5% de nivel de significancia.....	75
Tabla 11: Evaluación estadística de la temperatura máxima mensual observada. S(0.05) representa que el test es significativo al 5% de nivel de significancia. NS(0.05) representa que el test no es significativo al 5% de nivel de significancia.....	76
Tabla 12: Evaluación estadística de los caudales medios mensuales observados. S(0.05) representa que el test es significativo al 5% de nivel de significancia.	77
Tabla 13: Resumen de los estadísticos descriptivos para la precipitación diaria observada y satelital. Observado, 3B42RT y 3B42V7 para el periodo 2000-2015 e IMERG para el periodo 2014-2015.....	83
Tabla 14: Radiación solar extraterrestre para el hemisferio norte y sur.	84
Tabla 15: Métricas de desempeño de los productos TMPA y GPM evaluados en el periodo Abril 2014 – Diciembre 2015	85
Tabla 16: Métricas de desempeño por cada producto utilizado en el modelamiento hidrológico para el Escenario I.	85
Tabla 17: Métricas de desempeño por cada producto utilizado en el modelamiento hidrológico para el Escenario II. a) Basado en el producto 3B42RT, b) basado en el producto 3B42V7.....	85

Tabla 18: Análisis comparativo de la precipitación observada por cada estación meteorológica respecto a los productos IMERG, 3B42RT y 3B42V7. Comparación tomada a partir de la extracción estación-píxel.	86
Tabla 19: Parámetros calibrados para el modelamiento hidrológico en base a la precipitación observada y a los productos 3B42RT y 3B42V7.	87

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Script en R para el modelamiento hidrológico.....	66
Anexo 2. Distribución temporal de las variables observadas para el periodo 2000-2015 a paso diario.	67
Anexo 3. Análisis gráfico y estadístico de la precipitación observada en el periodo 2000-2015	70
Anexo 4. Análisis gráfico y estadístico de la temperatura mínima y máxima mensual observada en el periodo 2000-2015	72
Anexo 5. Análisis gráfico y estadístico de los caudales medios mensuales observados en el periodo 2000-2015	76
Anexo 6. Análisis exploratorio de la precipitación areal observada y de los productos de precipitación satelital TRMM y GPM.	77
Anexo 7. Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día para el cálculo de la evapotranspiración diaria por el método de Hargreaves.....	84
Anexo 8. Tablas resumen de la comparación de los productos satelitales de precipitación y resultados del modelamiento hidrológico.	85

I.INTRODUCCION

La precipitación pluvial es una variable climática de gran importancia para los sistemas hidrológico, agrícola, industrial y energético. El entendimiento de su comportamiento temporal y espacial es de sumo interés, especialmente en los estudios de riesgos climáticos, donde la disponibilidad de información de alta resolución y de buena calidad es esencial (Carrasco et al., 2010). Sin embargo, las mediciones de pluviómetros convencionales son relativamente escasas y están mal distribuidos, especialmente en los océanos o las regiones en desarrollo. En Perú, este problema es muchas veces una limitante para la evaluación hidrológica de una cuenca, sin embargo en las últimas décadas, el rápido desarrollo de la tecnología de teledetección ha traído una oportunidad sin precedentes para la estimación de la precipitación (Chen y Li, 2016).

En la actualidad se encuentran a libre disposición los productos de la *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), la cual ha estado proporcionando mediciones de precipitación sobre los vastos océanos y continentes dispersos en las zonas tropicales y subtropicales (35°N-35°S) desde noviembre de 1997. A lo largo de los años, numerosos estudios han sido desarrollados a partir de los productos TRMM; los cuales evidencian que en zonas de topografía compleja las precipitaciones están asociadas a un significativo sesgo y errores aleatorios (Nikolopoulos et al., 2012). En ese contexto, surge *The Global Precipitation Mission* (GPM) con la finalidad de ser la siguiente generación de productos satelitales de precipitación y con la misión principal de mejorar el entendimiento de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación global (Hou et al. 2011). El TRMM y el GPM ofrecen distintos productos grillados de precipitación- El TRMM provee los productos 3B42 *real-time* (3B42RT) y 3B42 versión 7 (3B42V7), los cuales han sido ampliamente estudiados y aplicados a la simulación y predicción hidrológica (Ochoa et al., 2014; Zulkafli et al., 2014; El Kenawy et al., 2015; Tupac Yupanqui et al., 2015). De igual manera, el GPM ofrece el producto *Day-1 multi-satellite precipitation* dado por el algoritmo *Integrated Multisatellite Retrievals for GPM* (IMERG).

Tanto el TRMM como el GPM estarán en órbita paralelamente hasta mediados del 2017, después de la fecha los productos 3B42 serán reemplazados dando lugar a la era del GPM (Huffman, 2015). En ese contexto, es necesario realizar una comparación detallada para determinar si el producto del GPM estima mejor las precipitaciones respecto a los productos del TRMM, y en consecuencia, evaluar si es de utilidad para la estimación de caudales.

En base a lo expuesto, el objetivo principal de esta investigación se enfoca en comparar la capacidad de los satélites TRMM y GPM para el modelamiento hidrológico; siendo el ámbito de estudio una cuenca del altiplano peruano: cuenca del río Huancané. Para su logro, se ha planteado tres objetivos específicos: (1) comparar estadísticamente los productos de precipitación del TRMM y GPM respecto a la lluvia observada a nivel estacional y espacial. (2) evaluar los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG en el modelamiento hidrológico (GR4J), y (3) evaluar el desempeño del producto IMERG corregido en el modelamiento hidrológico.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1.SATELITES METEOROLOGICOS

Las observaciones de la variabilidad espacio-tiempo de la precipitación alrededor de la Tierra son indispensables para el entendimiento de como el cambio climático afecta el ciclo del agua en relación a los cambios en las características de la precipitación regional (tipo, frecuencia e intensidad), así como también eventos hidrológicos extremos (inundaciones y sequías). Sin embargo, teniendo en cuenta las redes de estaciones meteorológicas limitados sobre la tierra y la imposibilidad de hacer mediciones de precipitaciones extensas sobre los océanos, una descripción completa de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación global sólo se puede lograr desde el punto de vista del espacio (Hou et al., 2011).

En 1963, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) estableció el programa de Monitoreo del Clima Mundial para la creación de una red operacional de satélites meteorológicos geoestacionarios y de órbita polar nombrándolo Sistema de Observación Global (Kidd, 2015).

2.1.1. Satélites Operacionales Geoestacionarios

Actualmente hay cientos de satélites en el espacio. Dentro de su clasificación de acuerdo a la órbita, se encuentran los satélites geosincrónicos (también llamados geoestacionarios). Estos aproximadamente están ubicados a 36,000 Km sobre la superficie terrestre (ver Figura 1). Se mueven en el mismo sentido de rotación de la Tierra y permanecen verticalmente sobre un punto en particular de la Tierra, de esta manera parece estar “fijo” en el espacio.

Dentro de las principales ventajas que brindan estos tipos de satélites son:

- **El costo**, las imágenes puede ser libremente descargadas desde Internet.
- **Imágenes en tiempo real**, la data de satélites geoestacionarios generalmente están disponibles en tiempo real (dentro de 15 a 30 minutos).

- **Cobertura espacial**, dado que su órbita puede cubrir largas áreas de la superficie terrestre.

Algunas desventajas que presentan son:

- **Confiabilidad**, debido a que la mayoría de factores ambientales son medidos indirectamente, las estimaciones no siempre son confiables para su aplicación.
- **Calibración**, las estimaciones del satélite necesitan ser calibrados y validados con data en tierra.

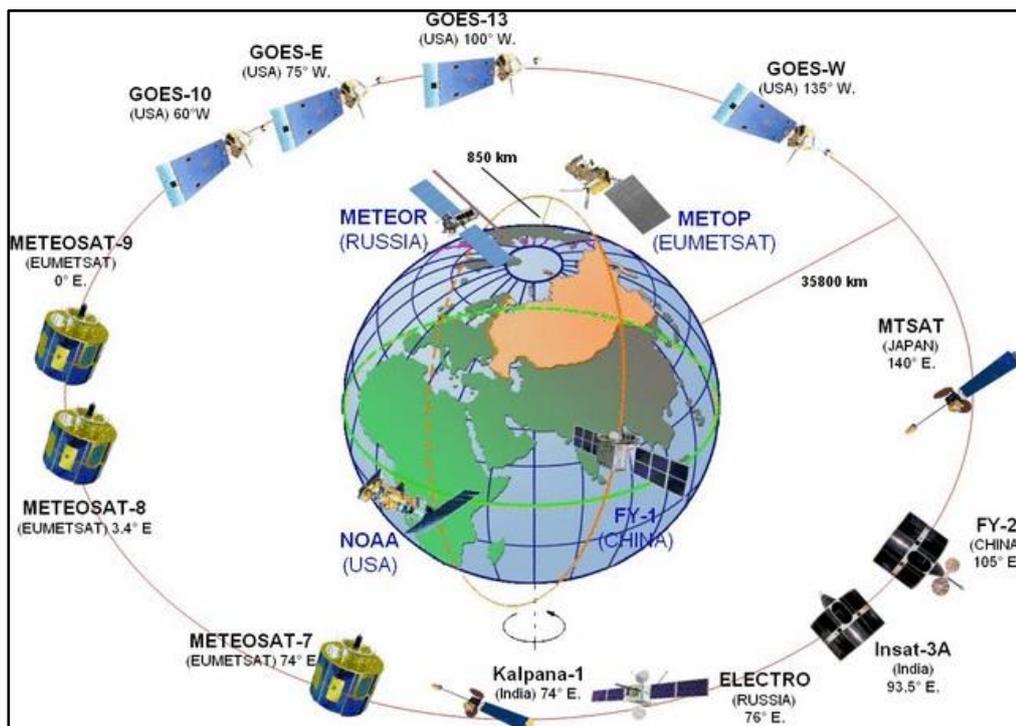


Figura 1. Sistema de satélites geostacionarios Meteorológicos Mundial ubicados a un altitud promedio de 35,800 Km.

Fuente: Kidd (2009)

Los sensores que llevan consigo estos satélites se pueden clasificar en tres tipos: sensores visibles, infrarrojos y microondas. Los sensores visibles solo reciben las emisiones producidas por la luz solar (no hay información por las noches) permitiendo la diferenciación de nubes gruesas y delgadas. Los sensores infrarrojos (infrarrojo cercano, infrarrojo de ondas cortas e infrarrojo térmico) permiten obtener del espectro electromagnético, información respecto al estado y presencia de vegetación; y de la temperatura de la parte superior de las nubes.

Por otro lado, la radiación recibida por los sensores microondas, están influenciados fuertemente por la naturaleza de la superficie emisora (si es rugosa o suavizada, seco

o húmedo) y el tamaño de partículas dentro de ella. Esta capacidad les permite distinguir entre nubes con gotas de suficiente tamaño para producir lluvia o no. Sin embargo, esto funciona mejor en los océanos pero no en tierra, debido a que la radiación emitida es más variable por la humedad, rugosidad y tipo de vegetación de la superficie. Es por ello que se implementa y sigue mejorando algoritmos de estimación de lluvia a partir de sensores microondas (Ceccato y Dinku, s.f.). Mayor detalle del estado del arte de estos algoritmos está disponible en <https://pmm.nasa.gov/science/precipitation-algorithms>

2.1.2. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

El TRMM es una misión conjunta entre la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y Agencia de Exploración Espacial de Japón (JAXA), diseñado para monitorear y estudiar la lluvia en los trópicos. Lanzado en Noviembre de 1997, el TRMM fue originalmente diseñado para operar por 3 años, sin embargo aún continúa brindando información que es utilizada alrededor del mundo en el monitoreo y pronósticos de peligros climáticos (NASA y JAXA, 2001). La cobertura espacial del TRMM (Figura 2) permite medir la lluvia en los trópicos y subtropicales, y entender mejor la interacción entre los factores que producen cambios en las precipitaciones globales y el clima.

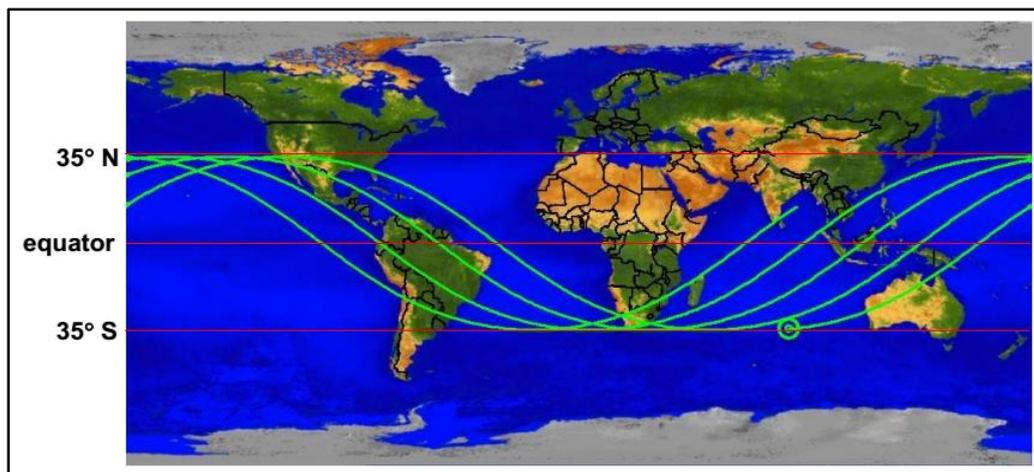


Figura 2: Cobertura espacial del TRMM (35°N – 35°S)
Fuente: NASA y JAXA (2001)

Sus principales instrumentos de lluvia (Figura 3) son el Imágenes microondas del TRMM (TMI), el Radar de Precipitación (PR), y el Escáner Visible e Infrarrojo (VIRS).

- **Radar de precipitación (PR):** Sus mediciones proporcionan información muy valiosa sobre la intensidad y la distribución de la lluvia, y en la altura a la que la nieve se derrite en forma de lluvia. Una de sus características más importantes es su capacidad para proporcionar los perfiles verticales de la lluvia y la nieve de la superficie.
- **Imágenes Microonda TRMM (TMI):** Misión de imágenes de microondas (TMI) es un sensor de microondas pasivo diseñado para proporcionar información cuantitativa sobre las lluvias de una amplia franja en el marco del satélite TRMM. Midiendo cuidadosamente las cantidades de energía de microondas emitidas por la Tierra y su atmósfera, el TMI es capaz de cuantificar el vapor de agua, el agua de las nubes y la intensidad de la lluvia en la atmósfera.
- **Escáner infrarrojo visible (VIRS):** Como su nombre lo indica, la radiación VIRS escanea la longitud de onda emitida por radiación de la tierra (espectro), que va desde visible para micrómetros de infrarrojos.

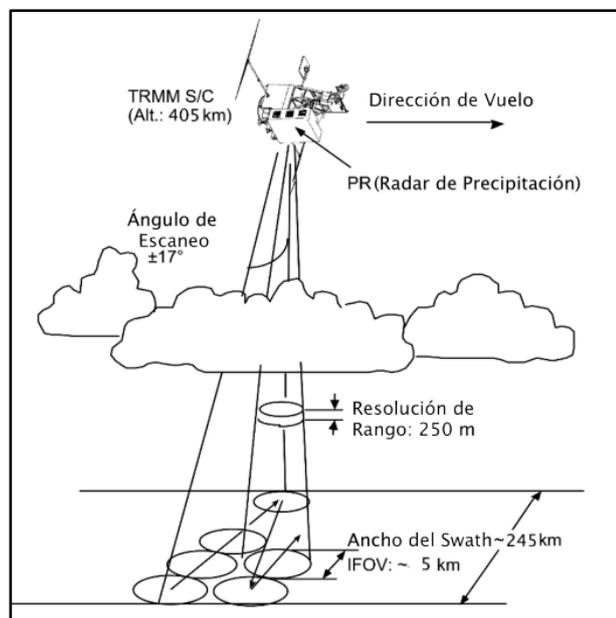


Figura 3: Geometría de escaneo actual del radar de precipitación a bordo del satélite TRMM, modificado del Manual de Instrucción, versión 6, en cuanto a la altura del satélite y el *swath width* a partir del cambio de la órbita hecho en el 2001.

Fuente: Adaptado de Nasda (2001)

La combinación en el uso de ellos provee información respecto a la estructura tridimensional (Figura 4) de la precipitación (NASA y JAXA, 2001). La información registrada por estos sensores ha sido dispuesta por la NASA en tres niveles, los cuales se distinguen por el procesamiento que reciben. De esta manera los productos del nivel 3 son los que proveen grillados de precipitación cada 3 horas a una resolución espacial de 0.25°.

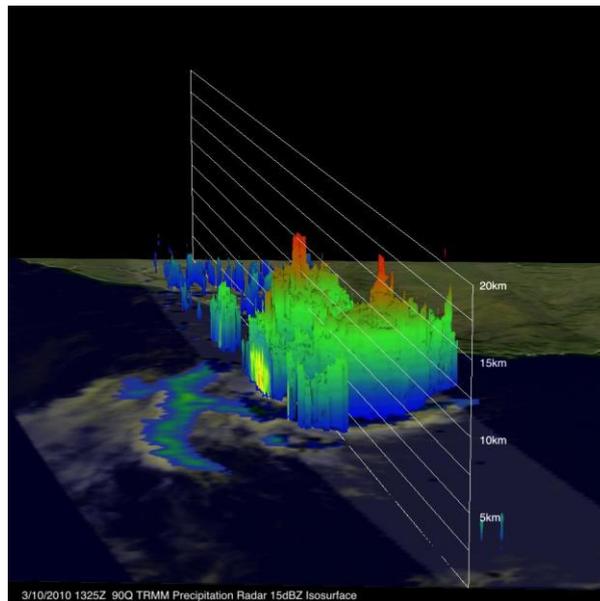


Figura 4: Imagen en 3D de la NASA que muestra la estimativa de lluvia y la estructura vertical de la tormenta.

Fuente: <http://eltallerdejar.blogspot.pe/2011/01/ciclones-tropicales-en-el-oceano.html>

2.1.3. Situación actual y futuro del TRMM

La fase terminal del TRMM había comenzado cuando el combustible se agotó en julio del 2014. El 7 de octubre de 2014 el satélite descendió a una altitud que impedía brindar datos útiles del PR, más allá de la altura original de 350 km (Figura 5). Mientras tanto, el TMI continuó funcionando pero solo con algunas de sus características. Posteriormente, como parte de la clausura del satélite, el TMI fue dado de baja el 8 de Abril del 2015. La inutilidad del PR y TMI afectó las estimaciones de precipitación del satélite creando ligeras no homogeneidades para la generación de sus productos grillados del nivel 3. Debido a ello, nuevos algoritmos de estimación fueron implementados para darles continuidad (Huffman, 2015), por lo tanto el uso de estos productos a partir de la fecha descrita debe estar sujeta a evaluación del usuario por posible presencia de inconsistencias en la serie de lluvia satelital. Se espera que el

satélite siga brindando los datos grillados de precipitación hasta mediados del año 2017 en paralelo con el nuevo satélite *Global Precipitation Mission* (GPM) .

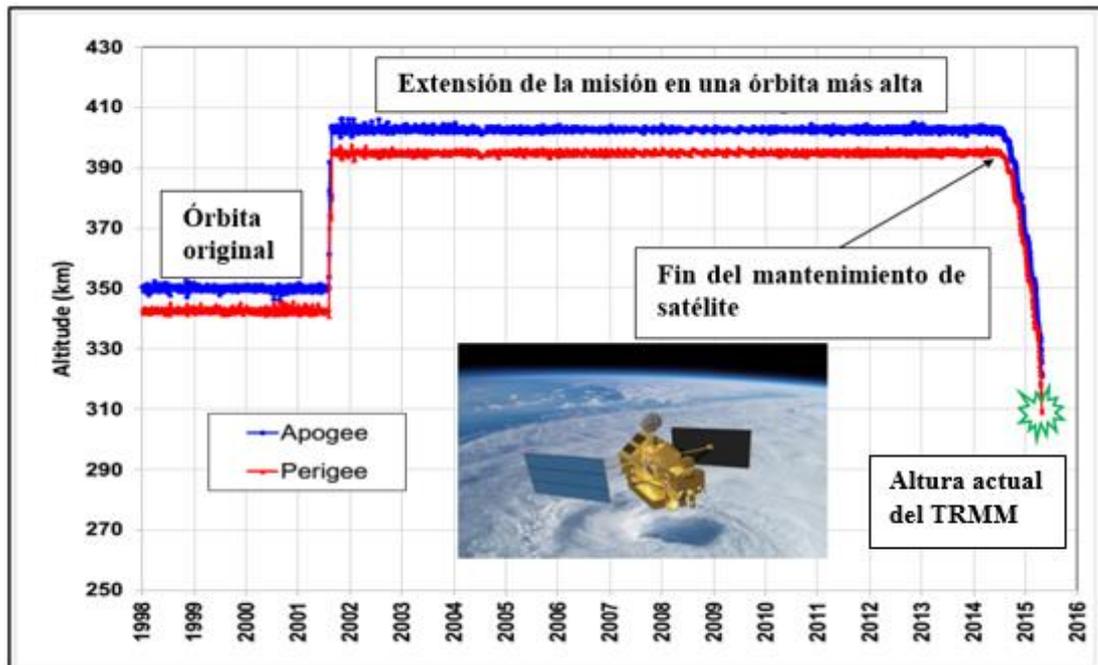


Figura 5: Altura de órbita histórica del TRMM.

Fuente: Adaptado de NASA y JAXA (2001)

2.1.4. Global Precipitation Measurement (GPM)

El GPM es una red internacional de satélites que proporcionan las observaciones globales de la próxima generación de lluvia y nieve. Basándose en el éxito del TRMM, el concepto GPM se centra en el despliegue de un satélite "Core" que mide la precipitación desde el espacio y sirve como referencia para unificar las mediciones de precipitación a través de una constelación de satélites (Figura 6). El GPM ayuda a mejorar la predicción de eventos extremos que causan desastres naturales, y extiende las capacidades actuales de usar información precisa y oportuna de la precipitación para beneficiar directamente a la sociedad.

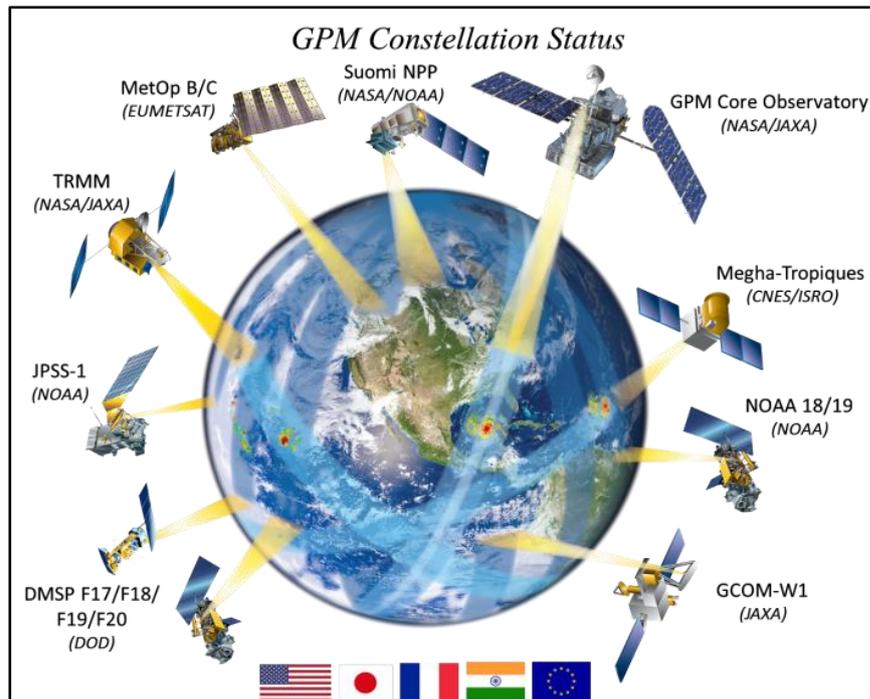


Figura 6: Conjunto de satélites que comprende el GPM.

Fuente: <https://pmm.nasa.gov/precipitation-measurement-missions>

Sus principales instrumentos (Figura 7) son el radar de precipitación de frecuencia dual (DPR) y el Imager microondas del GPM (GMI), los cuales en combinación, permiten una mejor estimación de la precipitación nival y lluvias ligeras (Hou et al., 2011). El GPM cubre las regiones comprendidas entre las latitudes 60° N-S (Figura 8).

- **Imager microondas del GPM (GMI):** El GMI se caracteriza por trece canales de microondas que van en la frecuencia de 10 GHz a 183 GHz. Además de transportar canales similares a los del TMI, el GMI lleva cuatro canales de alta frecuencia, de onda milimétrica, alrededor de 166 GHz y 183 GHz. Con una antena de 1,2 m de diámetro, el GMI proporciona una resolución espacial significativamente mejor sobre TMI.
- **Precipitación de frecuencia dual (DPR):** Uno de los principales instrumentos a bordo del *GPM Core Observatory* se llama el radar de precipitación de doble frecuencia (DPR). El DPR consiste en un radar de precipitación en banda Ku (KuPR) y un radar de precipitación en banda Ka (KaPR). El KuPR (13.6 GHz) es una versión actualizada de la unidad altamente exitosa volada en la misión TRMM.

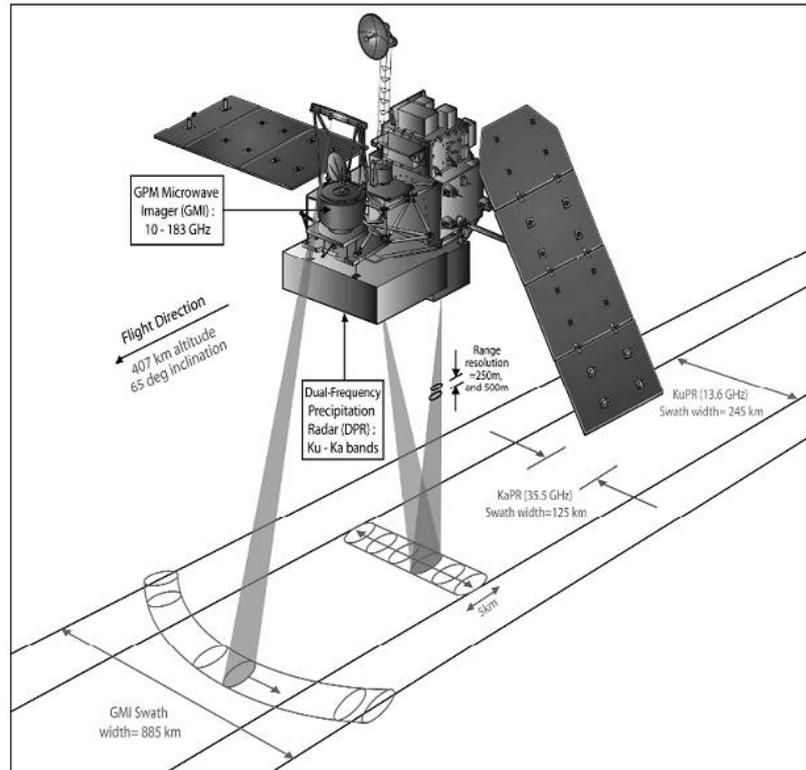


Figura 7: Nave GPM con los instrumentos GMI y DPR.
Fuente: Hou *et al.* (2011)

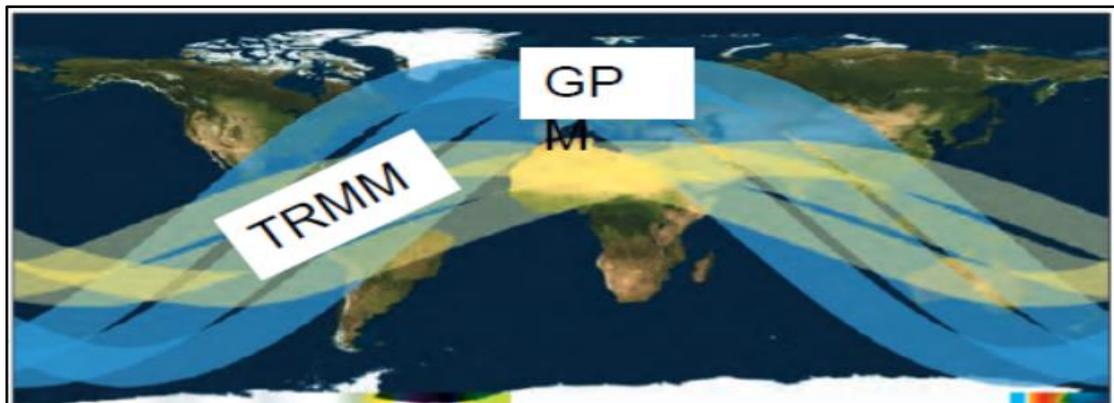


Figura 8: Comparación de las áreas cubiertas por las órbitas del TRMM (35°N – 35°S) y GPM (60°N – 60°S).

Fuente: Manz (s.f.)

Al igual que el TRMM, el GPM ofrece tres niveles de procesamiento de la información registrada por los satélites, es así que en el nivel 3 el algoritmo de *Integrated Multisatellite Retrievals for GPM* (IMERG) es el encargado de combinar la información recolectada y generar un producto grillado de precipitación cada media

hora y a una resolución espacial de 0.05° (Huffman et al., 2015). Gracias al avance tecnológico existen significantes mejoras de estos sensores respecto al TRMM (Tabla 1).

Tabla 1: Comparación de las principales características entre los instrumentos satelitales del TRMM y GPM para la generación de los productos grillados de

Características	TRMM	GPM
Cobertura espacial	35°N – 35°S	60°N – 60°S
¹ Frecuencia y Ancho de barrido (Radar de precipitación)	13.8 Ghz -220 Km	35.5 Ghz - 885 Km
¹ Frecuencia y ancho de barrido (Imager microondas)	85 Ghz – 760 Km	Desde 10 Ghz a 183 Ghz – 885 Km
Resolución espacial (productos nivel 3)	0.25°	0.05°
Resolución temporal (productos nivel 3)	3 h	0.5 h

precipitación.

Fuente: Manz (s.f.); NASA y JAXA (2001)

2.2.MODELAMIENTO HIDROLOGICO

2.2.1. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmosfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en a la atmosfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo sub-superficial y descargar en los ríos como esorrentía superficial (Figura 9). La mayor parte del agua interceptada y de esorrentía superficial regresa a la atmosfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la esorrentía

¹ Sensores con resoluciones espaciales más altas y mayores frecuencias ayudan a diferenciar la precipitación pluvial y nival.

superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmosfera a medida que el ciclo hidrológico continua (Chow et al., 1994).

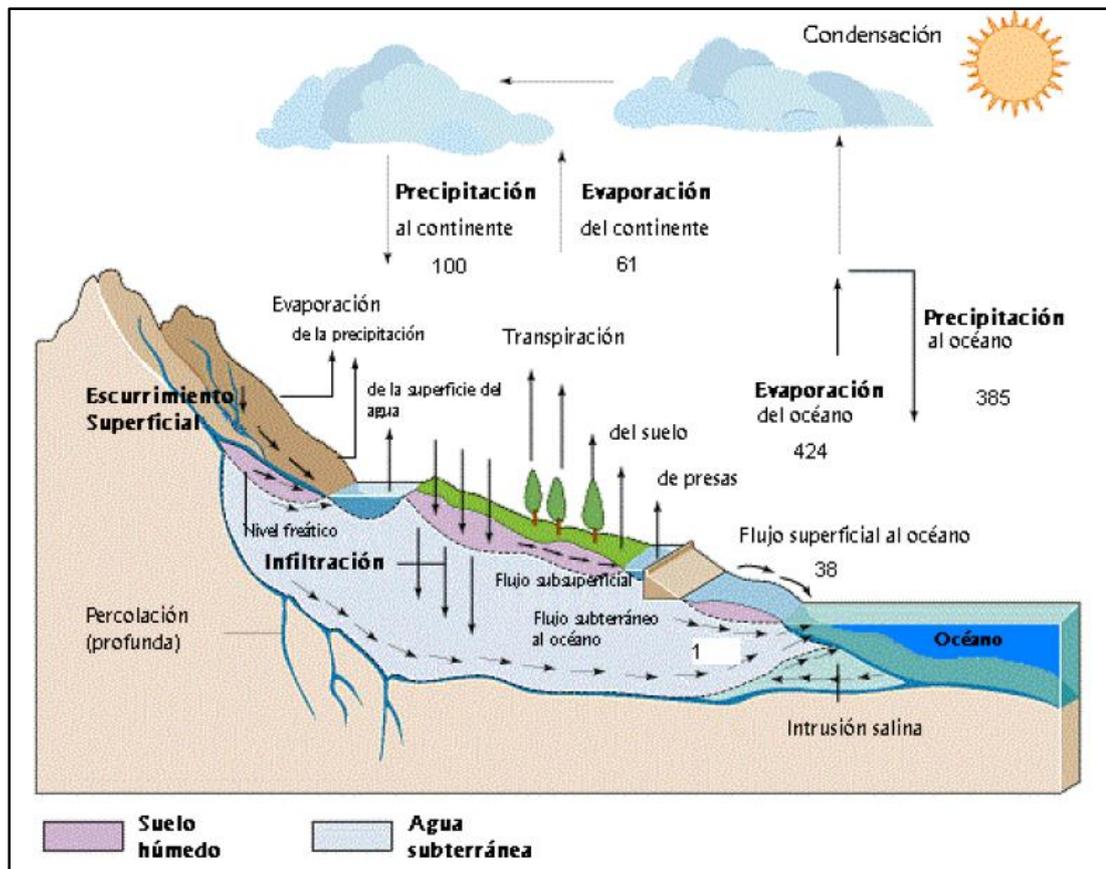


Figura 9: Representación del ciclo hidrológico.
Fuente: Adaptado de Chow et al. (1994)

2.2.2. Clasificación de los modelos hidrológicos

Existen diversas clasificaciones de acuerdo a las variables y componentes que describen al ciclo hidrológico. Puede ser clasificados como modelos agrupados y distribuidos, basado en los parámetros del modelo en función del espacio y el tiempo; y modelos determinísticos y estocásticos (Figura 10), teniendo en cuenta otros criterios (Devi et al., 2015) .

Una de las más importantes clasificaciones son los modelos empíricos, modelos conceptuales y modelos basados físicamente.

- **Modelos empíricos**, son aquellos que toman solamente la información de la data existente sin considerar las características y procesos hidrológicos. Compuesto por ecuaciones matemáticas que provienen de las series de tiempo de entrada y

salida y no de los procesos físicos de la cuenca. Son válidos bajo ciertas condiciones de contorno. Un ejemplo de ello son los hidrogramas unitarios.

- **Modelos conceptuales**, son los que describen todos los componentes del proceso hidrológico. Consiste en un cierto número de reservorios interconectados que representan los elementos físicos dentro de la cuenca, los cuales son recargados por los procesos de lluvia, infiltración y percolación; y vaciados por la evaporación, escorrentía, drenaje, etc. Requieren series de tiempo largas para su calibración.
- **Modelos basado físicamente**, aquellos que tratan de representar el fenómeno real. Usa variables de estado que son medibles y están en función del tiempo y espacio. Los movimientos del agua de los procesos hidrológicos son representados por ecuaciones de diferencias finitas. No requiere de largas series de tiempo para su calibración pero se debe evaluar el gran número de parámetros que describen las características físicas.

Un resumen comparativo de las principales características de los tipos de modelos descritos se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Características de los tres modelos

Modelos empíricos	Modelo conceptuales	Modelos basados físicamente
Modelos de caja negra	Modelos de caja gris	Modelos de caja blanca
Envuelve ecuaciones matemáticas	Basado en el modelamiento de reservorios e incluye ecuaciones semi empíricas	Basado en la distribución espacial. Requiere información que describan los parámetros físicos de la cuenca.
Alto poder de predicción	Simple y de fácil implementación en un código computacional	Modelos complejos, requieren experiencia y habilidad computacional.
No pueden generalizarse para otras cuencas. Ejemplo: Hidrogramas unitarios.	Ejemplos: modelo HBV, modelo GR4J	Ejemplo: Modelo SWAT

Fuente: Adaptado de Devi et al. (2015)

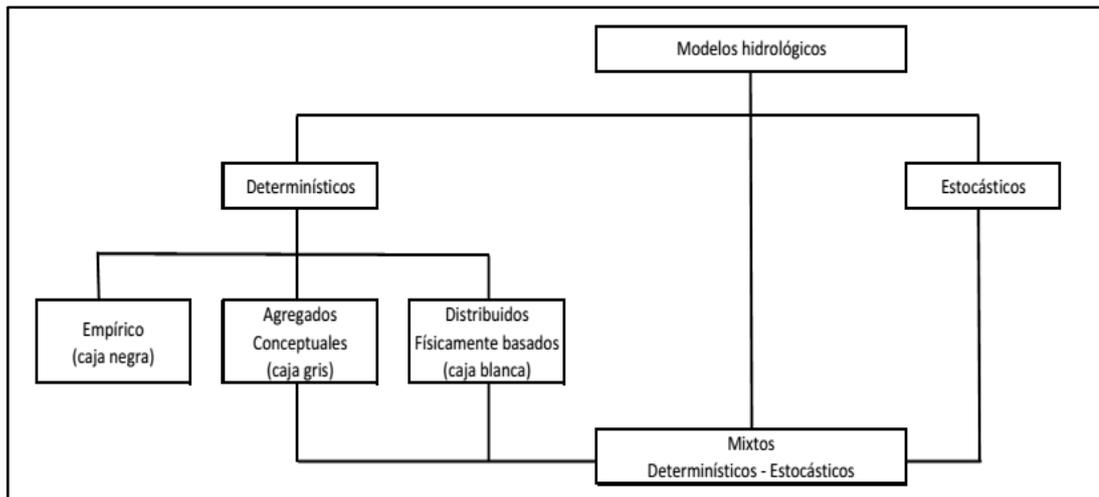


Figura 10: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de sus ecuaciones.

Fuente: Refsgaard y Abbott (1996); citado en Cabrera (2009)

2.2.3. Modelo precipitación-escorrentía GR4J

El modelo GR4J entra en la clasificación de modelos conceptuales. Está basado en cuatro parámetros que tienen como datos de entrada la precipitación diaria y la evapotranspiración potencial. Está compuesto por cuatro parámetros:

- X1: Máxima capacidad del reservorio de producción (mm)
- X2: Coeficiente de intercambio de aguas subterráneas (mm)
- X3: Máxima capacidad del reservorio de enrutamiento (mm)
- X4: Ordenada del tiempo pico del hidrograma unitario (día)

El modelo GR4J brinda mejores resultados que otros modelos de lluvia, para ello el modelo fue evaluado en 429 cuencas de diferentes climas, incluyendo climas tropicales (Harlan et al. 2010).

a) Estructura de funcionamiento del modelo GR4J

GR4J está dividido en dos reservorios: el de producción y el de enrutamiento (Figura 11). Los datos de entrada del modelo: precipitación P [mm] y evapotranspiración potencial E [mm], son procesados de la siguiente manera:

Si $P > E$, la lluvia neta P_n es dada por la ecuación 1 y la evapotranspiración neta. Una parte P_s de P_n es directamente llevado al reservorio de producción, cuyo máximo contenido de agua es el parámetro X_1 (mm) y de contenido actual S (mm).

$$Pn = P - E \quad (1)$$

$$En = 0 \quad (2)$$

$$Ps = \frac{X1 * \{1 - \left(\frac{S}{X1}\right)^2\} * \tanh\left(\frac{Pn}{X1}\right)}{1 + \frac{S}{X1} * \tanh\left(\frac{Pn}{X1}\right)} \quad (3)$$

La parte restante Pn-Ps es reservada para calcular la escorrentía. Si P<E, la evapotranspiración neta es igual a la ecuación 4 y la lluvia neta como la ecuación 5

$$En = E - P \quad (4)$$

$$Pn = 0 \quad (5)$$

Una parte Es (ecuación 6) de En es extraído desde el reservorio de producción cuyo contenido actual es actualizado por la ecuación 7. La percolación Perc (ecuación 8) es tomado desde el contenido actual del reservorio de producción y añadido a parte de la escorrentía directa de la lluvia a dar Pr (ecuación 9), que es el total del agua disponible para el enrutamiento.

$$Es = \frac{S * \left(2 - \frac{S}{X1}\right) * \tanh\left(\frac{En}{X1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X1}\right) * \tanh\left(\frac{En}{X1}\right)} \quad (6)$$

$$S = S + Ps - Es \quad (7)$$

$$Perc = S * \left\{1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9X1}\right)^4\right]^{-1/4}\right\} \quad (8)$$

$$Pr = Pn - Ps + Perc \quad (9)$$

Pr es luego dividido en dos partes, una parte (10%) para la escorrentía directa Q1 (ecuación 10) a través del Hidrograma unitario HU2 con un tiempo base igual a 2*X4; la otra parte (90%), la escorrentía retardada Q9 (ecuación 11) es llevada hacia el reservorio de enrutamiento a través del hidrograma unitario HU1 con un tiempo base X4. El máximo contenido del almacenamiento de enrutamiento es X3, y su actual contenido es R, que es actualizado usando Q9 y el valor de la función F(X2) (ecuación 12, ecuación 13), donde X2 es el coeficiente que contabiliza los efectos del agua subterránea.

$$Q1(i) = 0.1 * \sum_{k=1}^m HU2(k) * Pr(i - k + 1) \quad (10)$$

$$Q9(i) = 0.9 * \sum_{k=1}^L HU1(k) * Pr(i - k + 1) \quad (11)$$

$$F(x2) = X2 * \left(\frac{R}{X3}\right)^{\frac{7}{2}} \quad (12)$$

$$R = \max(0, R + Q9 + F) \quad (13)$$

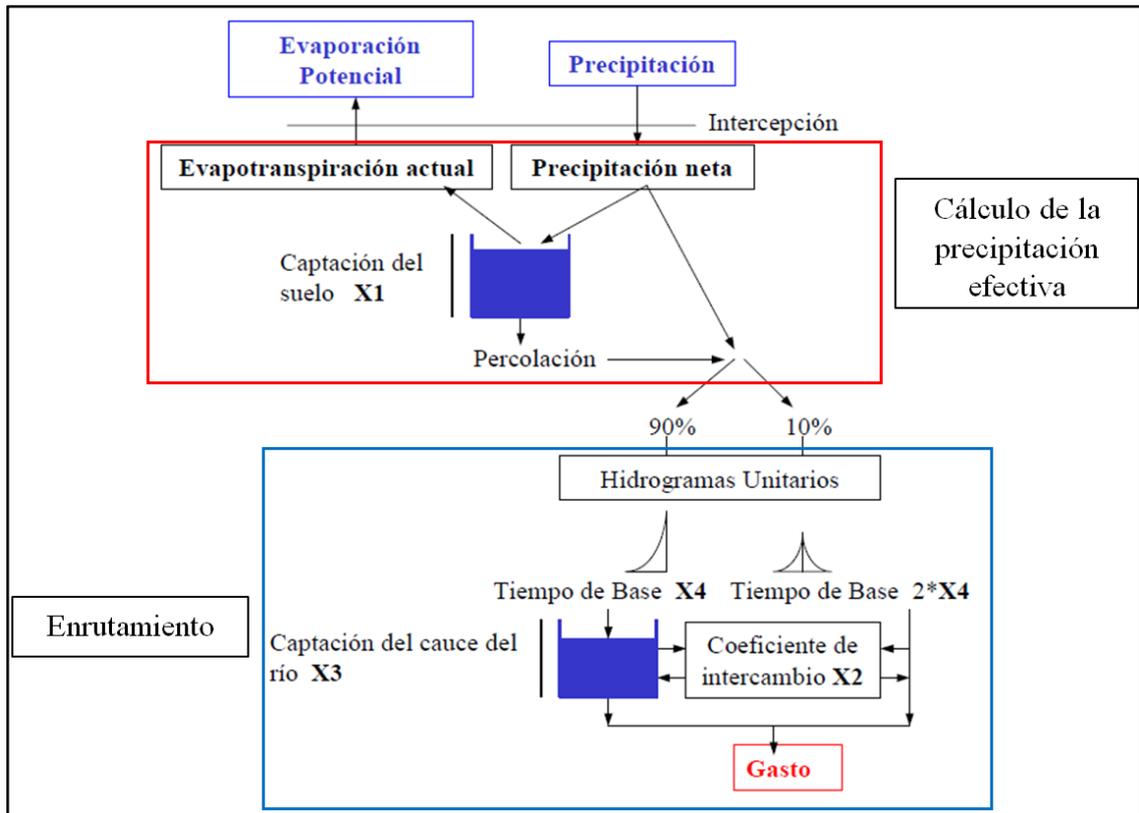


Figura 11: Estructura del modelo diario precipitación-escorrentía GR4J.

Fuente: Perrin (2000); citado y adaptado de Serna (s.f.)

Después, este contenido actualizado del reservorio de enrutamiento es usado para calcular el flujo retrasado de salida Qr (ecuación 14) del mismo. $Q1$ y $F(X2)$ son combinados para calcular la escorrentía directa Qd (ecuación 15). La escorrentía total del día dado en la salida de la cuenca, es luego estimado sumado Qr y Qd .

$$Qr = R * \{1 - [1 + \left(\frac{R}{X3}\right)^4]^{-1/4}\} \quad (14)$$

$$Qd = \max(0, Q1 + F) \quad (15)$$

$$Q = Q + Qd \quad (16)$$

b) Estudios hidrológicos aplicando el modelo GR4J en Sudamérica

Si bien estructuralmente el modelo GR4J es considerado un modelo simple por su poca cantidad de parámetros, los resultados obtenidos de diferentes investigaciones demuestran que es un modelo eficiente. Con fines de dar un alcance de los principales estudios realizados en Sudamérica, esta sección resumirá los resultados más relevantes que han sido obtenidos.

- **“Mejora de la estimación de caudales fluviales en Uruguay”**, Narbondo y Crisci (2016) analizan la performance en la estimación de caudal diario de dos modelos hidrológicos concentrados de simulación continua en cuencas representativas del Uruguay. Implementó el modelo GR4J en cuatro cuencas de diferentes características geomorfológicas y edafológicas, como resultado se obtuvieron métricas satisfactorias.
- **“Evaluación de la precipitación TRMM para la estimación de caudales diarios en pequeñas cuencas”**, Tupac Yupanqui et al. (2015) contempla el uso del TRMM (3B42V7) corregido mediante el método de la transformada de Wavelet en dos pequeñas cuencas ubicadas en el norte de la costa peruana. De la aplicación hidrológica usando el modelo GR4J bajo condiciones de cuatro subescenarios, los resultados mostraron desempeños satisfactorios.
- **“Modelización hidrológica con un enfoque semi distribuido en la cuenca del río Chillón, Perú”**, Astorayme et al. (2015) comparó cuatro modelos (GR4J, SOCONT, HBV y SAC) para evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Chillón. Los resultados mostraron que los modelos HBV y SAC, de mayor número de parámetros, presentan mejor desempeño; pero con poca variación respecto a los modelos GR4J y SOCONT (modelos con menor número de parámetros).
- **“Fiabilidad de un modelo hidrológico conceptual en una cuenca andina semiárida frente a cambios en el uso del agua”**, Iahs et al. (2015) explora la confiabilidad de las simulaciones de bajo flujo por modelos conceptuales. Para

ello evaluaron tres modelos: GR4J, GR6J y GR4J/IWU, este último era una modificación del GR4J considerando el aporte de nieve. Se obtiene muy buenas bondades de ajuste para todos los modelos.

- **“Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J aplicación: Cuenca del río Aburrá”**, Carvajal y Roldan (2007) calibraron el modelo GR4J en ocho subcuencas de la cuenca del río Aburrá (Colombia). Los resultados muestran en general ajustes aceptables, si se tiene en cuenta la variabilidad del área de las subcuencas, de la precipitación y de la evaporación, y el efecto de la zona urbana en cuanto al aporte de caudales de aguas residuales.

2.3.CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados (Cabrera, 2009). Este proceso puede realizarse de dos formas:

- Prueba y error, es el método más utilizado y usualmente recomendado. Implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Tiene valor de aprendizaje pero es lento y subjetivo.
- Automática, la cual optimiza los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas. A diferencia de la “prueba y error”, este método es mucho más rápido y objetivo; sin embargo, es numéricamente complejo.

2.3.1. Optimización en hidrología: un problema complejo

La optimización es definida como el proceso de encontrar la solución óptima de un problema bajo ciertas condiciones. Por lo general, es un proceso que dependerá del conocimiento que se tenga del problema, y un poco de sentido común al respecto. Los métodos que buscan la solución de estos problemas se dividen en métodos de optimización global y local. Los métodos globales buscan la mejor solución, o sea el máximo o mínimo global del problema, mientras que los locales se concentran en la vecindad de una solución encontrada (Figura 12), por lo cual necesitan técnicas adicionales para acercarse todo lo posible a la solución global (Chong y Zak, 2013; citado en Gaudiani, 2015).

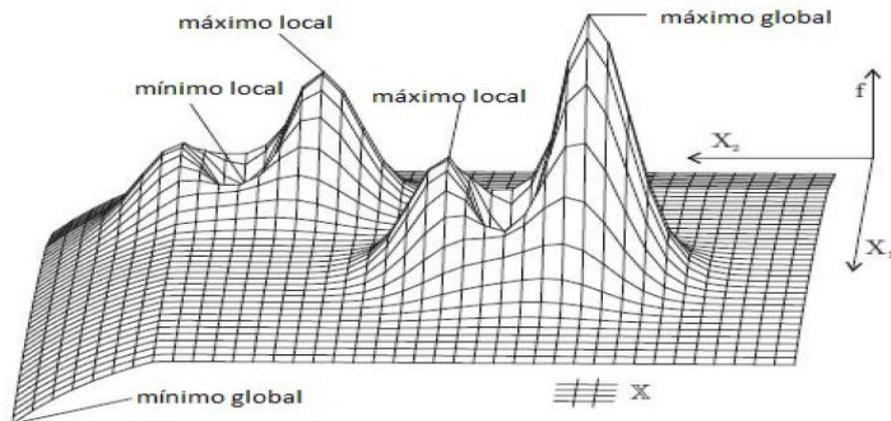


Figura 12: Esquematización de óptimos locales y globales dentro del dominio o espacio de búsqueda.

Fuente: Gaudiani (2015)

El planteamiento del problema en términos matemáticos precisos debe reflejar exactamente lo que deseamos resolver. Es necesario tener en cuenta dos pasos para este planteo: la función objetivo (usualmente una medida de bondad de ajuste) y el conjunto de restricciones (rango de búsqueda de los parámetros más sensibles), que debe estar explícitamente establecido y deberá cumplirse de manera que las soluciones posibles sean verdaderamente factibles. Estos procedimientos automatizados permiten generalmente borrar la subjetividad inherente a los enfoques manuales y son a menudo mucho más rápido, sin embargo, están sujetos a una serie de problemas numéricos que complican la fase de optimización (Perrin, 2002). Esta combinación de factores a menudo conduce a una situación donde el óptimo global es difícilmente observable.

2.3.2. El algoritmo de optimización local – Método “paso a paso”

Los métodos locales utilizan una estrategia iterativa en el que, partiendo de un punto en el espacio de parámetros, se desplaza en la dirección que mejora continuamente el valor de la función objetivo, hasta que puedan generar una mejora. Dentro de los métodos locales se encuentra el subgrupo de métodos directos, como por ejemplo el método “Paso a paso” (Michel, 1989; Nascimento, 1995; citado en Perrin, 2002).

El método “paso a paso” es un método local que opera la optimización (maximización o minimización) de una función objetivo elegida por el usuario (independientemente del método). La Figura 13 ilustra los pasos dados por el algoritmo. El proceso de optimización es iterativo, primero adopta una estrategia de desplazamiento, en su mayor

parte, a lo largo de los ejes del espacio de parámetros, con un paso de búsqueda que puede variar de una iteración a la siguiente.

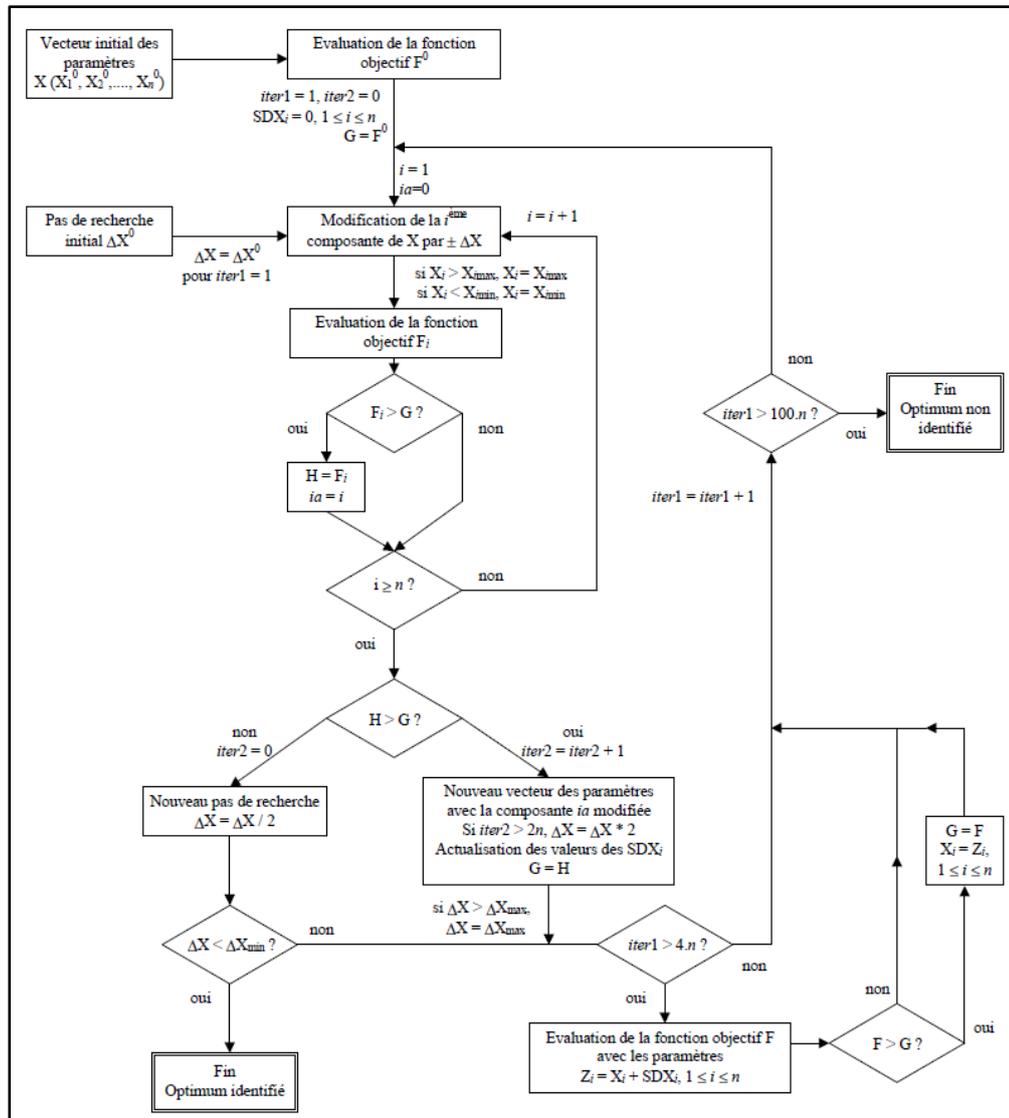


Figura 13: Esquema de funcionamiento del algoritmo de optimización “Paso a paso”.

Fuente: Perrin (2002)

La búsqueda se inicia a partir de un vector inicial de parámetros x^0 , de “n” componentes $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$. A continuación, es calculado el valor correspondiente de la función objetivo. Los valores de los parámetros luego, varían sucesivamente de una desviación inicial $\pm \Delta x_{ini}$. Cuando el valor de i^{me} es modificado, los dos vectores de parámetros probados son por lo tanto $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_i^0 + \Delta x_{ini}, \dots, x_n^0)$ y $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_i^0 - \Delta x_{ini}, \dots, x_n^0)$, por cada vez que se calcula el valor de la función objetivo correspondiente.

Cuando todos los ajustes se han cambiado uno por uno, dos escenarios son posibles:

- Hay una mejora en el valor de la función objetivo para uno o más de los nuevos vectores de parámetros. Se retiene en este caso el vector x^1 que corresponde a la mayor mejora en la función. Este vector cuyos componentes corresponden a los del vector x^0 excepto la i -ésima componente coincidente $x_i^0 + \Delta x$ o $x_i^0 - \Delta x$, se convierte en la nueva búsqueda vector inicial. Si hay “2n” mejoras sucesivas de la función en la misma dirección, la búsqueda se multiplica por dos para acelerarla (dentro de los límites Δx_{\max}).
- Hay una mejora en el valor de la función objetivo para cualquiera de los parámetros de cambio. A continuación, refina la búsqueda dividiéndola en dos, y se repite los cambios de configuración en el mismo vector inicial x_0 sin una nueva búsqueda.

El procedimiento se detiene cuando la desviación mínima especificada en los parámetros Δx_{\min} ya no aporta una mayor mejoría en la función objetivo. A continuación, se localiza el óptimo x^* con una relativa precisión para la mínima desviación. Por seguridad, para los tiempos de cálculo no demasiado largos, el procedimiento termina si el número de iteraciones es mayor que “100n”. El método es capaz de localizar un punto óptimo en la superficie de respuesta.

Cabe mencionar que para reducir el impacto que tiene la elección correcta del conjunto inicial de parámetros en los métodos de optimización local, el algoritmo “paso a paso” implementa como paso previo una búsqueda de los valores de estos parámetros a partir de un rango definido por el usuario.

Para comprobar la validez de este método, Nascimento (1995; citado en Perrin, 2002) llevó a cabo una evaluación de la aplicación de este algoritmo para el modelo GR4J de cuatro parámetros. Se comparó con los métodos globales siguiendo la metodología de Duan et al. (1992; citado en Perrin, 2002) con los datos de la cuenca del Orgeval (Francia). Los resultados mostraron que el método da buenos resultados. El bajo número de parámetros del modelo GR4J y el grado adecuado de independencia entre ellos, permiten al método “paso a paso” tener ese buen comportamiento. Aunque los resultados se refieren a una cuenca, el método es fiable a más de 90%.

2.4.USO DEL SENSORAMIENTO REMOTO (TRMM y GPM) EN HIDROLOGIA

La lluvia es extremadamente variable en el tiempo y el espacio, particularmente en regiones caracterizadas por una compleja topografía. En Perú, la cordillera de los Andes es un factor que contribuye a esta variabilidad (Espinoza et al., 2015; citado en Zubieta et al., 2016). Las estimaciones de precipitación de los satélites meteorológicos están disponibles sobre terrenos de estas características, sin embargo, estas están asociadas a un significativo sesgo y errores aleatorios que se propagan en el modelamiento hidrológico (Nikolopoulos et al., 2012).

Existen numerosas investigaciones relacionados a la evaluación del desempeño de productos satelitales de precipitación. De entre ellos, Heidinger et al. (s.f.) citó a tres estudios relacionados a la evaluación del TRMM en terrenos de topografía compleja. En primer lugar, Sandoval (2007) validó TRMM en Oruro (Bolivia) con datos de estaciones y se concluyó que el TRMM no puede ser aplicado en el altiplano sin mejoras de corrección. Luego, Dinku et al. (2008) evaluaron la alta resolución de los productos de lluvia, incluido el TRMM, sobre Etiopia (región de terreno complejo) y Zimbabwe (región plana) y observó un mejor desempeño en este último. Ellos asumieron que la subestimación de la lluvia del satélite TRMM sobre Etiopia se debió a cálidas nubes causadas por la compleja topografía y por el proceso de precipitación orográfica, ya que la parte superior de la nube estaría demasiado caliente para los umbrales de infrarrojos (IR). Finalmente, Barros et al. (2010) concluyó en Nepal, que el desempeño del TRMM fue mejor comparado con datos de bajas altitudes de las estaciones meteorológicas que con ubicadas en altas elevaciones.

Por otro lado, en las regiones pacífico andina y andino – amazónica, las principales conclusiones indican que satélites como el TRMM son capaces de capturar la estacionalidad de las lluvias (Figura 14) y que la bondad de ajuste respecto a la precipitación observada disminuye al reducir la escala de tiempo. Esto se refleja consecuentemente en el modelamiento hidrológico (Lavado et al., 2009; Ochoa et al., 2014; Zulkafli et al., 2014). Respecto al mejoramiento de los productos satelitales, Nerini et al. (2015) evaluó métodos de interpolación geo estadísticos y no paramétricos a partir del TRMM y estaciones climatológicas, para su aplicación en el modelamiento hidrológico. Se encontró que, mediante una aplicación de corrección del sesgo por el promedio, se mejora el desempeño hidrológico de estos productos y sustenta que el uso

de productos satelitales combinados con grillados a partir de datos de estación, deben ser aplicados para el modelamiento hidrológico a gran escala.

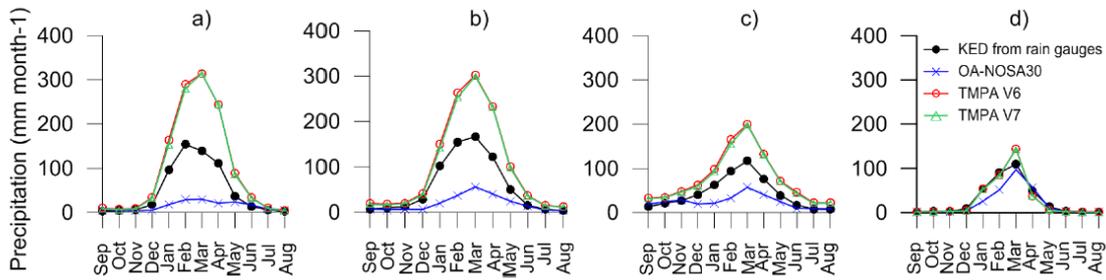


Figura 14: Comparación de los productos satelitales de precipitación media mensual respecto a la lluvia observada para cuatro subcuencas. Región Pacífico-Andino (Perú-Ecuador).

Fuente: Ochoa et al. (2014)

En los Andes centrales, el TRMM no es buen reemplazante de la lluvia observada. Presenta grandes sesgos en la estimación de la precipitación diaria, lo que conlleva a tener cuidado en el uso del TRMM para el modelamiento hidrológico (Scheel et al., 2010). A paso mensual, el comportamiento de la lluvia en áreas montañosas de los andes peruano (a menos de los 3000 msnm) antes de ser usada, debe ser corregida (Figura 15). Sin corrección, en el periodo de Octubre a Marzo y de Mayo a Agosto, se observa subestimación y sobrestimación respectivamente por parte del TRMM respecto a la precipitación observada (Condom et al., 2011).

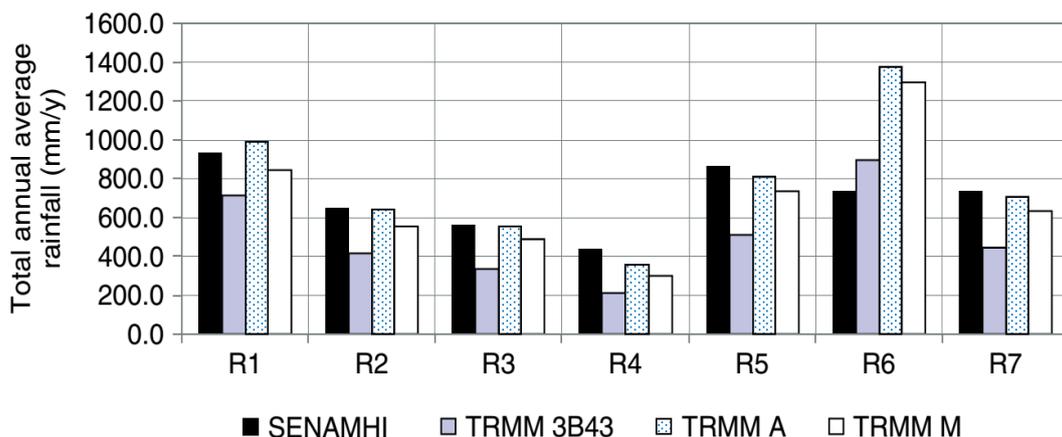


Figura 15: Comparación del desempeño del TRMM en siete regiones de los andes peruano. TRMM 3B43 representa el producto sin corregir; TRMM A, corregido mediante un factor aditivo; TRMM M, corregido mediante un factor multiplicativo.

Fuente: Condom et al. (2011)

Más recientemente estudios relacionados a la evaluación del nuevo satélite GPM se han llevado a cabo en regiones de compleja topografía y clima. Sharifi et al. (2016), encontró en cuatro regiones de Irán que el producto del GPM (IMERG) tiene un mejor desempeño que el producto del TRMM (3B42V7), presentando una mejor estimación de la lluvia (ligeras subestimaciones) y alta correlación.

En China Chen y Li (2016) analizó el desempeño del producto mensual del TRMM (3B43) respecto a su equivalente IMERG acumulado mensual. Los resultados más relevantes de este estudio muestran que el IMERG captura mejor los patrones espaciales de precipitación que el 3B43. Sin embargo IMERG también está sujeto a una gran variabilidad presentando mejor desempeño en bajas latitudes que en medianas latitudes. De igual manera, Tang et al. (2016) realizó la comparación entre los productos TRMM (3B42RT y 3B42V7) respecto al producto IMERG en la cuenca Ganjiang (China) a paso diario. Se encontró una alta correlación de estos tres productos respecto a la lluvia observada y una alta sobreestimación del 3B42RT. En la evaluación hidrológica, concluye que el IMERG es un producto comparable con la información de la precipitación observada, por lo tanto representa una mejora respecto a su antecesor TRMM.

Por el lado de la costa del Pacífico, Zubieta et al. (2016) evaluó la capacidad del TRMM y GPM para la estimación de caudales en la región andino amazónica, encontrando que en general el IMERG tiende a sobreestimar la precipitación. Mejor bondad de ajuste en la simulación de las descargas se observa en la zona sur del país (cuenca del río Ucayali) que en la región norte (Figura 16)

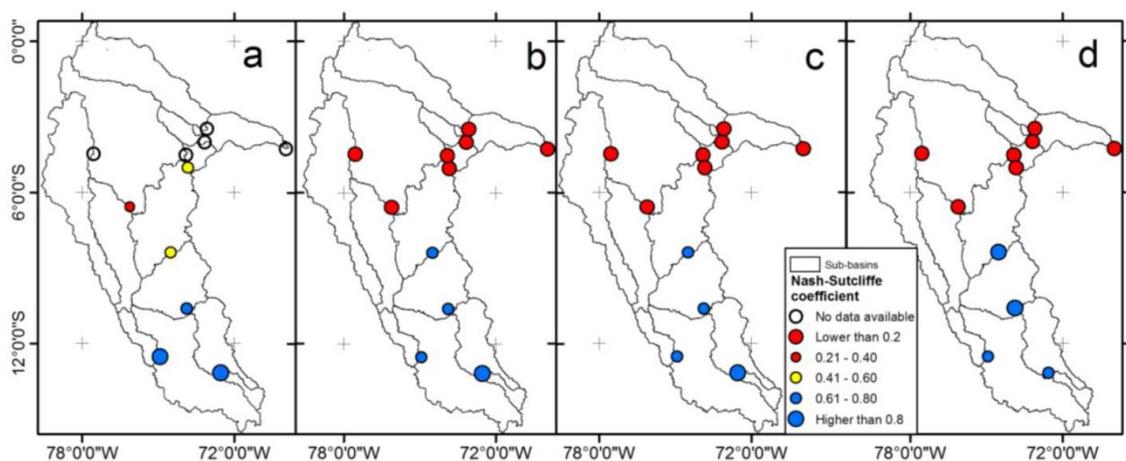


Figura 16: Eficiencia de Nash en los puntos de calibración utilizados. A partir de a) Lluvia observada, b) IMERG, c) 3B42V7, y d) 3B42RT
Fuente: Zubieta et al. (2016)

III. MATERIALES Y METODOS

3.1.MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Huancané tiene una superficie aproximadamente de 3631 km², su cota máxima es 5 086 msnm., y una cota mínima de 3661 msnm, que corresponde al cerro Surupana a la desembocadura del río en el lago Titicaca, respectivamente. Se encuentra entre los paralelos 14.3° y 15.6° latitud sur y entre los meridianos 69.2° y 70.4° longitud oeste (Figura 17).

El río principal, nace con el nombre de río Putina, luego de un largo recorrido confluye con el río Quellocarca - Tuyto, es a partir de este punto que toma el nombre de río Huancané, nombre con el cual desemboca. La longitud de este río principal desde sus nacientes hasta su desembocadura, llega a medir aproximadamente 142 km.

La cuenca Huancané limita con las siguientes cuencas hidrográficas:

- Este: Cuencas río Suches y río Huaycho
- Oeste: Cuenca río Azángaro e intercuenca Ramis.
- Norte: Cuenca río Azángaro.
- Sur: El lago Titicaca.

La cuenca Huancané, políticamente está ubicada en:

- Región: Puno
- Provincia: Huancané, Moho, San Antonio de Putina y Azángaro.
- Distrito: Huancané, Moho, Huayrapata, Rosaspata, Vilque Chico, Cojata, Inchupalla, Huatasani, Pedro Vilca Apaza, Quilcapuncu, Putina, Muñani, Ananea y Potoni.

La geomorfología de la cuenca del río Huancané presenta cinco características: la planicie altiplanicie que abarca un 313.4 Km² en la zona baja y media de la cuenca; la planicie ondulada, localizada en la parte alta y baja con 48.4 km²; la colina y montaña, que abarca

casi toda la cuenca con un área de 3246.6 Km²; y las lagunas, localizadas en pequeñas superficies de 22.7 Km² en total.

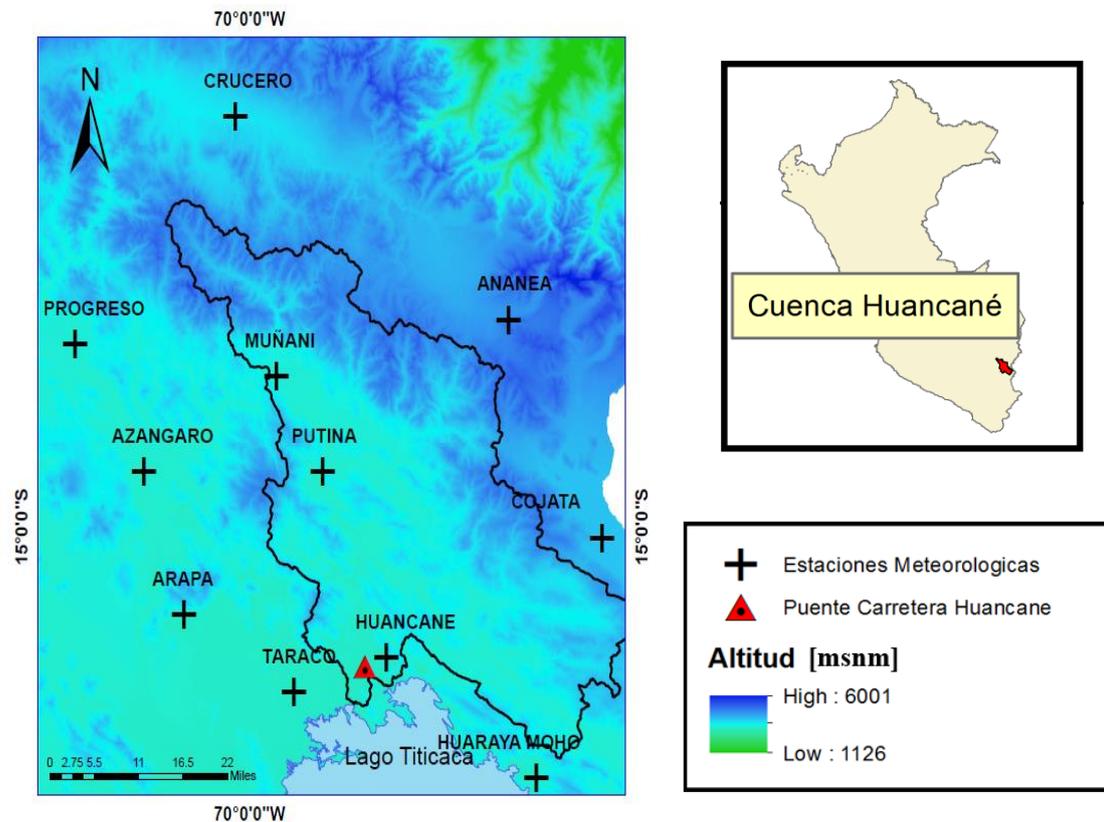


Figura 17: Ubicación del área de estudio con las estaciones meteorológicas utilizadas y la estación hidrométrica Puente Huancané.

Fuente: Elaboración propia

La precipitación sobre el Altiplano se encuentra prácticamente concentrada en el verano austral (diciembre, enero y febrero), especialmente a lo largo del parte suroeste del mismo, donde más del 70% de precipitación ocurre de diciembre a febrero (Garreaud, 2000). En la Figura 18 se visualiza esta tendencia. El promedio multianual de la precipitación sobre Huancané es de 664 mm/año.

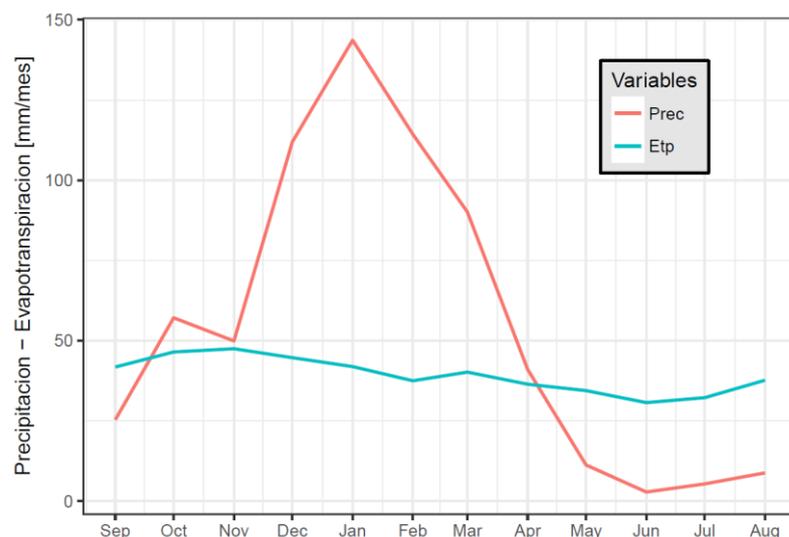


Figura 18: Climatología de la cuenca del río Huancané en base a los datos observados de lluvia y evapotranspiración [Período 2000-2015]

Fuente: Elaboración propia

La compleja combinación topográfica y climática de la cuenca hace que sea vulnerable a los eventos de inundación. En base a lo expuesto por Choquehuanca y Mamani (2008), las inundaciones en Huancané han estado fuertemente relacionadas con el nivel del lago Titicaca, presentándose así dos fuertes inundaciones entre los años 1982 y 1986, y los años 2003 y 2004. Las catastróficas consecuencias se debieron principalmente a los desbordes de los ríos Huancané y Ramis, presentándose pérdidas de tierras de cultivo, viviendas, animales, locales escolares y postas sanitarias, e interrupción de las principales carreteras. Esto resalta la importancia de evaluar la capacidad del modelamiento hidrológico para alertar posibles crecidas y peligros de desbordamiento del río Huancané.

3.1.2. DATOS Y METODOS UTILIZADOS

a) Precipitación *in situ* de las estaciones meteorológicas

La información pluviométrica fue recopilada de las estaciones meteorológicas administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Se recopiló información de lluvia acumulada diaria a partir de once estaciones meteorológicas convencionales, según se especifica en la Tabla 3, para un período en común comprendido entre 01/09/2000 y 31/12/2015. Las estaciones

pertenecen a la cuenca del río Huancané y de cuencas aledañas, abarcando así toda el área de estudio.

Tabla 3: Relación de estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en cuencas aledañas.

Nombre	Cuenca de ubicación	Ubicación geográfica		
		Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Huaraya Moho	Intercuenca 0171	15°23' 17.80"	69°29' 3.40"	3819.4
Arapa	Intercuenca Ramis	15°8' 10.50"	70°7' 5.60"	3889.1
Putina	Cuenca Huancané	14°54' 52.60"	69°52' 3.90"	3852.7
Muñani	Cuenca Huancané	14°46' 1.00"	69°57' 6.50"	3926.0
Huancané	Cuenca Huancané	15°12' 5.40"	69°45' 12.80"	3865.2
Continuación	a Suches	15°1' 0.00"	69°22' 0.00"	4335.9
Taraco	Intercuenca Ramis	15°18' 0.00"	69°58' 0.00"	3819.5
Crucero	Cuenca Azángaro	14°21' 51.10"	70°1' 33.30"	4125.8
Progreso	Cuenca Azángaro	14°42' 56.28"	70°18' 52.17"	3899.2
Azángaro	Cuenca Azángaro	14°54' 51.70"	70°11' 26.70"	3841.5
Ananea	Cuenca Inambari	14°40'42.40"	69°32'3.33"	4647.0

Fuente: SENAMHI

b) Precipitación a partir de los productos grillados del TRMM y GPM

Los productos satelitales usados fueron tres: 3B42 *real-time* (3B42RT de aquí en adelante), 3B42 versión 7 (3B42V7 de aquí en adelante) e IMERG *Final Run* (IMERG de aquí en adelante).

- **El producto 3B42**, provee estimados de precipitación cada 3 horas a una resolución de 0.25°. La cobertura espacial va desde las latitudes 50°S a 50°N y se encuentran disponibles desde Enero de 1998 hasta el presente (Macritchie, 2015). Consiste en dos productos: el *near-real-time* (3B42RT) y el *research-grade* (3B42V7). El primero es menos precisa, pero proporciona estimaciones de precipitación rápidas (aproximadamente entre 6 a 9 horas) adecuados para las actividades de monitoreo y modelado-en tiempo casi real. El segundo, disponible aproximadamente dos meses después de la observación, se calibra con los datos

de estaciones con lluvia observada. El producto resultante es más preciso y adecuado para la investigación (Huffman et al., 2010).

- **El producto IMERG *Final Run***, proporciona estimaciones de precipitación a una resolución espacial de 0.05° sobre el dominio 60 ° N-S. El período actual de registro es a mediados de marzo de 2014 hasta el presente (retrasado en unos 3 meses). Análogo al 3B42, el IMERG tiene dos productos *real time: Early y Late*. Luego que la calibración a partir de la lluvia mensual de estaciones en tierra es llevado a cabo, el producto *Final Run* es generado (Huffman et al., 2015).

La cobertura espacial de estos productos satelitales sobre la zona de estudio se observa en la Figura 19. La extracción de la data de precipitación se hizo a nivel estación-píxel, es decir, un valor de lluvia correspondiente a un valor de píxel de acuerdo a la ubicación de cada estación meteorológica. La Tabla 4 resume las principales características de cada producto satelital.

Tabla 4: Información de los productos satelitales utilizados.

Satélite	Datos	Resol. temporal	Resol. espacial	Registro	Fuente
TRMM	3B42RT	3 horas	0.25°	1998-presente	IRI Data Lybrary http://iridl.ldeo.columbia.edu/
	3B42V7	3 horas	0.25°	1998-presente	IRI Data Lybrary http://iridl.ldeo.columbia.edu/
GPM	IMERG final run	0.5 horas	0.10°	2014-presente	NASA https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm

Fuente: Indicada

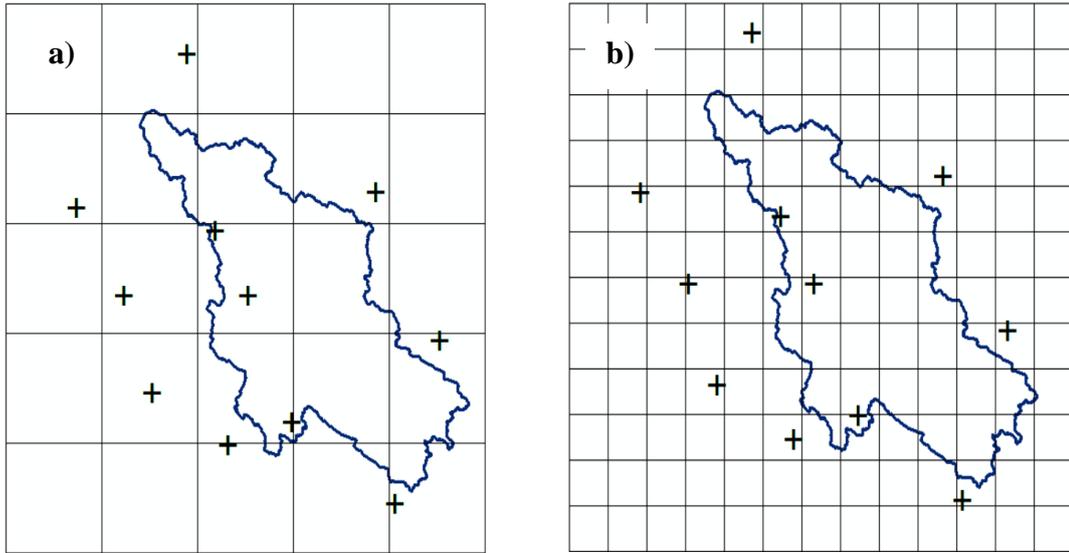


Figura 19: Representación de las grillas que cubren la zona de estudio. a) Para el producto 3B42RT y 3B42RT (5x5), b) para el producto IMERG (12x12)

Fuente: Elaboración propia

c) Método de Interpolación Inverso a la distancia (IDW)

Los valores de precipitación y temperatura recolectada por cada estación meteorológica, fueron convertidos a valores medios para la cuenca de estudio. Para ello se utilizó el método IDW.

El método IDW es similar al método de la media aritmética, pero con el agregado de una ponderación por distancia. Dicha ponderación, al tener un factor cuadrático, recibe una influencia bastante fuerte del monto pluvial de las estaciones más cercanas (Chow et al. 1994).

Sean A, B, C, D y E, las estaciones en consideración. Para ello, las ponderaciones se calculan como:

$$w_c = \frac{\frac{1}{dC^2}}{\frac{1}{dC^2} + \frac{1}{dD^2} + \frac{1}{dE^2} + \frac{1}{dA^2}} \quad (17)$$

Donde w_c es el peso asignado a la estación C, dC es la distancia desde el “nodo” hasta la estación C. De manera similar para las estaciones A, D y E. Entiéndase por “nodo” a la posición dentro de la cuenca que me ofrece una adecuada resolución espacial de la precipitación dentro de ella (Figura 20).

El nodo del hietograma en el tiempo t se calcula como:

$$P_{nodo}(t) = w_A * p_A(t) + w_C * p_C(t) + w_D * p_D(t) + w_E * p_E(t) \quad (18)$$

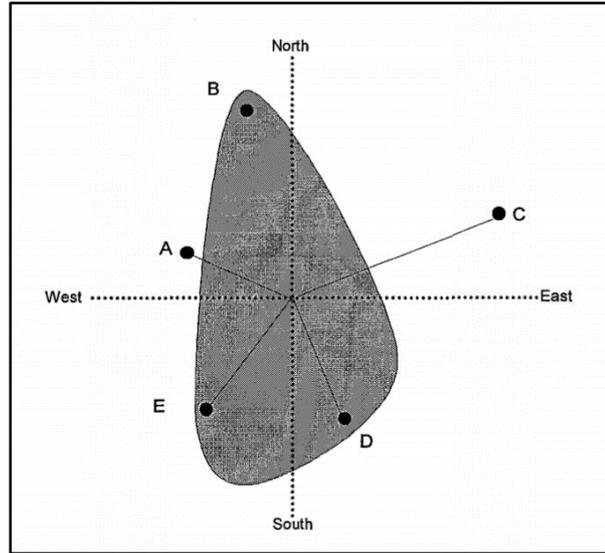


Figura 20: Ilustración del esquema del método de la distancia media al cuadrado aplicado sobre un polígono de referencia (p.e. una cuenca hidrográfica).

Fuente: *US Army Corps of Engineers* (2000)

La precipitación areal se determina como:

$$P(t) = \sum w_{nodo} * \frac{P_{nodo}(t)}{\sum w_{nodo}} \quad (19)$$

Donde w_{nodo} es el peso asignado para cada nodo.

d) Evapotranspiración según Método de Hargreaves

La información de temperatura máxima, mínima y media fueron obtenidas de las estaciones especificadas en la Tabla 3 y convertidas a variables medias (por el método IDW) para el ámbito de estudio. A partir de ello, la evapotranspiración potencial ha sido calculada mediante el método de Hargreaves, el cual necesita solamente de datos de temperatura y radiación solar. Se calcula a partir de la ecuación 20, donde la evapotranspiración potencial diaria Et_0 [mm/día] está en base a la temperatura media T_{med} y la radiación solar incidente R_s [mm/día].

$$Et_0 = 0.0135 * (T_{med} + 17.78) * R_s \quad (20)$$

La radiación solar incidente, R_s , se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no

existiera atmósfera). Para su cálculo se utiliza la ecuación 189, que toma en consideración la radiación solar extraterrestre tabulada, un coeficiente KT y las temperaturas máxima T_{mBax} y mínima T_{min} .

$$R_s = R_0 * KT * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (21)$$

Puesto que los valores de R_0 están tabulados y las temperaturas máximas y mínimas son datos empíricos relativamente fáciles de obtener, la dificultad para aplicar esta sencilla expresión la encontramos en el coeficiente KT . Para evaluar la Radiación Solar Extraterrestre (R_0) existen varias tablas, todas ellas en función de la latitud y del mes. Esta tabla (Anexo 5) está en MJulio/m²/día, que para pasar a mm/día (de agua evaporada) se multiplicó por 0.408. El coeficiente KT es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, Hargreaves recomienda para regiones del interior $KT = 0.162$, coeficiente utilizado en la presente investigación.

e) Caudales

La información de caudales medios diarios corresponde a la estación hidrométrica limnigráfica Puente Carretera Huancané (Tabla 5), para el periodo de 01/09/2000 hasta 31/12/2015. La estación se encuentra ubicada en el punto de salida de la cuenca y es de gran utilidad porque captura el aporte hídrico total.

Tabla 5: Estación de control para el modelamiento hidrológico.

Nombre	Cuenca	Ubicación geográfica		
		Latitud	Longitud	Altitud
Puente Carretera Huancané	Cuenca Huancané	15°12'59.3"	69°47'33.3"	3812 msnm

Fuente: SENAMHI

3.1.3. EQUIPOS

Para la presente investigación se han utilizado los siguientes equipos de escritorio y programas:

a) Equipos de escritorio

- Computadora de escritorio

b) Programas de cómputo

- Hydraccess
- Lenguaje R versión 3.3.1
- Microsoft Office 2013: Ms Word, Ms Excel
- ArcGIS versión 10.3

El uso de cada uno de los programas se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6: Información del uso de los programas de cómputo utilizados.

Programa de cómputo	Uso
Hydraccess	Manejo de base de datos, Interpolación IDW
Lenguaje R	Análisis estadísticos, reportes gráficos y modelamiento numérico
Microsoft Office	Editor de texto y reportes gráficos
ArcGIS	Edición de mapas y modelamiento espacial

Fuente: Elaboración propia.

3.2. METRICAS ESTADISTICAS DE DESEMPEÑO

Se ha empleado diversas métricas para evaluar la naturaleza estadística de las variables y la relación entre ellas (precipitación observada y productos estimados por satélite, caudales simulados y observados). Estas se describen a continuación:

a) El criterio de Nash - Sutcliffe (NSE)

El criterio de Nash-Sutcliffe es usado para evaluar el poder de predicción de los modelos hidrológicos, y está definido por la ecuación 22:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{(\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{ref,t} - Q_{ref})^2)} \quad (22)$$

Donde Q_{sim} es la descarga simulada en el tiempo t y Q_{ref} es el caudal observado en el tiempo t . Varía desde $-\infty$ hasta 1, donde 1 representa el mejor desempeño del modelo.

b) El criterio de Nash - Sutcliffe logarítmico (NSEL)

El coeficiente logarítmico del índice de Nash-Sutcliffe es usado para evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos para los caudales bajos. Está definido por la ecuación 23:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (\ln(Qsim, t) - \ln(Qref, t))^2}{(\sum_{t=ti}^{tf} (\ln(Qref, t) - \ln(Qref))^2)} \quad (23)$$

Varía desde $-\infty$ hasta 1, donde 1 representa el mejor desempeño del modelo.

c) El sesgo estadístico (BIAS)

La cuantificación del BIAS en porcentaje mide la tendencia de los valores simulados si son más grandes o más pequeños en función de los valores observados. El óptimo valor del porcentaje del BIAS es 0, valores negativos indican subestimación y valores positivos indican sobreestimación.

$$BIAS(\%) \text{ o } PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{(\sum_{i=1}^N O_i)} \quad (24)$$

En la ecuación 24 S_i son los valores simulados en el tiempo i y O_i son los valores observados en el tiempo i .

d) La raíz del error medio cuadrático (RMSE)

Este estadístico me indica, en las mismas unidades de los valores evaluados, la desviación estándar de los errores de los valores simulados. Un valor pequeño indica un mejor desempeño.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (25)$$

Donde S_i son los valores simulados en el tiempo i y O_i son los valores observados en el tiempo i .

e) El coeficiente de correlación de Pearson (CC)

Muestra cómo de estrecha es la relación lineal existente entre los pares de datos formados por el modelo y las determinaciones reales.

$$CC = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y} = \frac{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{(\sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}) (\sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2})} \quad (26)$$

Donde:

- σ_{xy} es la covarianza de los valores x y y

- σ_x es la desviación típica de la variable x
- σ_y es la desviación típica de la variable y
- \bar{x} y \bar{y} son los valores promedios de x e y

f) El coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación es un estadístico usado en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis.

El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo.

El R^2 es simplemente el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, lo cual es sólo cierto para la regresión lineal simple.

$$R^2 = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2 * \sigma_y^2} \quad (27)$$

Donde:

- σ_{xy}^2 es la covarianza de los valores x y al cuadrado
- σ_x^2 es la desviación típica de la variable x al cuadrado
- σ_y^2 es la desviación típica de la variable y al cuadrado

g) El Diagrama de Taylor

Una de las herramientas de mayor utilidad para evaluar el rendimiento de un modelo es el conocido como Diagrama de Taylor (Figura 21). Este diagrama utiliza la ley de cosenos para representar en una sola gráfica cómo varían simultáneamente los tres estadísticos más representativos del rendimiento de un modelo (Taylor, 2005), como son:

- La raíz del error medio cuadrático centrado, que matemáticamente es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los errores calculados, y que permite obtener una idea de la media del error detectado para el modelo, en la unidad de medida original, y sin tener en cuenta los efectos del signo del error, lo cual resulta muy útil para comprobar la precisión del modelo.
- La desviación estándar, que permite comprobar cuál es la variabilidad existente en ambas muestras de datos, pudiendo ver además si dicha variabilidad se conserva o varía en el modelo respecto a lo observado para los datos reales.
- El Coeficiente de Correlación de Pearson.

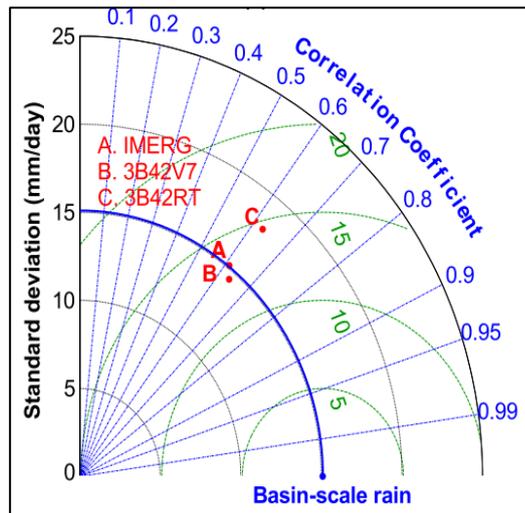


Figura 21: Diagrama de Taylor para la comparación del desempeño de tres productos satelitales de precipitación. Cuenca del río Ganjiang, China.

Fuente: Tang et al. (2016)

3.3.METODOLOGIA

En esta sección se detallan los procedimientos utilizados, entre ellos las técnicas aplicadas en función de los objetivos específicos planteados. La Figura 22 representa el esquema de trabajo seguido a través de cada proceso.

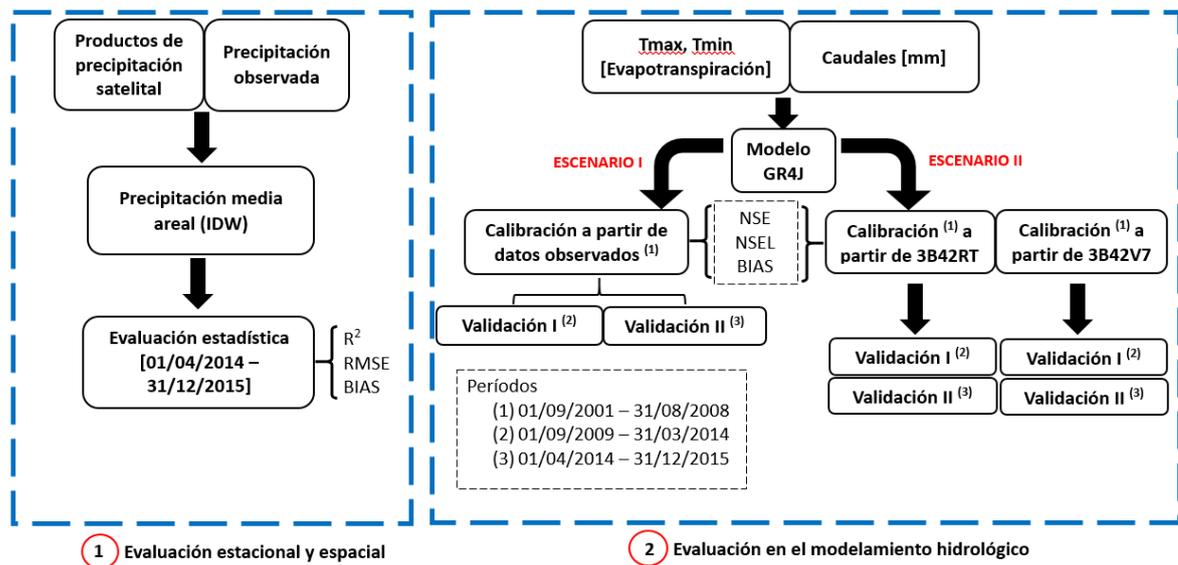


Figura 22: Flujo de trabajo dividido en dos procedimientos generales. (1) Evaluación estacional y espacial, y (2) evaluación en el modelamiento hidrológico.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1. Análisis exploratorio de datos (AED)

El AED consiste en el análisis de los datos empleando una variedad de técnicas (en su mayoría gráficas) para incrementar nuestro entendimiento sobre ellos y visualizar las relaciones existentes entre las variables analizadas. El AED es examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística.

El AED abarca un gran ámbito; sin embargo, él proporciona métodos gráficos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallas en el diseño y muestreo para recolectar los datos, tratamiento y evaluación de datos ausentes, identificación de valores atípicos y comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas estadísticas.

En la presente investigación se ha realizado un trabajo previo de análisis de la información con la finalidad de conocer el comportamiento estadístico de los datos de lluvia, temperatura y de caudal. Este análisis consistió en la detección de quiebres y anómalos en las respectivas series mensuales. Para ello se procedió con el análisis gráfico y estadístico de los datos:

- Diagrama de cajas, es un gráfico que está basado en cuartiles y mediante el cual se visualiza la distribución de un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo (la “caja”) y dos brazos (los “bigotes”). Se usaron a fin de poder definir la existencia de datos atípicos.
- Curvas de doble masa, es el método más directo para evaluar la consistencia de los registros y ayuda también a corregir los datos en una estación. En este método, la variable anual acumulada de una estación en particular, es comparada gráficamente en un plano cartesiano, con la variable anual acumulada media de un grupo de estaciones alrededor de la estación analizada.
- Test de homogeneidad de la media (T- Student), cuando la causa de la pérdida de homogeneidad de la serie es probable que sea un abrupto cambio en la media, la prueba paramétrica de la T de Student es especialmente útil. La prueba es poderosa para detectar la inconsistencia en la media, además de ser un test riguroso, excepto cuando la longitud de los dos períodos seleccionados para comparación de sus medias no son iguales, pues entonces la distribución de los datos puede no ser sesgada.

3.3.2. Evaluación y comparación de la precipitación

Esta sección tuvo por objetivo estimar las diferencias entre las precipitaciones medias de la cuenca de los productos satelitales (3B42RT, 3B42V7 e IMERG) respecto a la precipitación observada a través de métricas estadísticas descriptivas.

Como primer análisis se realizó la comparación directa de las series temporales de cada producto satelital respecto a la precipitación observada. Posteriormente, la evaluación espacial consistió en cuantificar la bondad de ajuste en base a la precipitación de las estaciones meteorológicas utilizadas. Estas, al estar distribuidas en el espacio, mediante me da un alcance de la variación espacial de la lluvia dentro del ámbito de estudio. Finalmente, el análisis de la precipitación satelital respecto a la altura también se llevó a cabo.

La aplicabilidad de las métricas utilizadas en esta sección, se describen a continuación:

- El coeficiente de determinación, para establecer la relación lineal entre las variables a comparar.
- La raíz del error medio cuadrático, para medir la diferencia promedio entre los las variables a comparar.
- El sesgo estadístico, para estimar el porcentaje de subestimación o sobrestimación de las variables a comparar
- El diagrama de Taylor, se usó para visualizar el desempeño de todos los productos en comparación mediante tres métricas: la desviación estándar, el error cuadrático medio y el coeficiente de correlación de Pearson. Esto permitió visualizar el desempeño de los diferentes productos satelitales sobre un mismo diagrama.

3.3.3. Evaluación en el modelamiento hidrológico

El objetivo de esta sección fue la de calibrar y validar el modelo GR4J tomando como punto de evaluación la estación hidrométrica Puente Huancané. El modelo agregado GR4J tiene como variables de entrada la precipitación y evapotranspiración media de la cuenca (Figura 23).

Cabe mencionar que el modelo GR4J esta implemetado en el lenguaje de programación R en la librería airGR. Dentro de las bondades que brinda esta librería es que te permite

aplicarlo bajo diferentes condiciones, incluyendo la capacidad de simular cuencas con aporte significativo de nieve.

Mayor detalle del uso y aplicación del modelo GR4J de la librería airGR está disponible en el siguiente link: <https://odelaigue.github.io/airGR/index.html>.

El proceso de construcción y aplicación del modelo se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se adaptaron los datos de entrada para correr el modelo GR4J, este consistió de una tabla de ingreso que contiene los valores de Precipitación, Evapotranspiración y Caudales específicos.
- Definimos el periodo de calentamiento, de calibración y validación. El periodo de calentamiento se tomó de 1 año (año hidrológico 2000-2001), el periodo de calibración representó el 70% de los datos disponibles (desde 01/09/2001 hasta 31/08/2010) y el periodo de validación incluyó el 30% restante (desde 01/09/2010 hasta 31/12/2015). Este periodo de validación fue subdividido en dos partes según los escenarios de simulación planteados.
- La calibración se hizo en base al índice de Nash para que optimice la función objetivo usando el algoritmo “paso a paso” (explicado en la Sección 2.3.2).

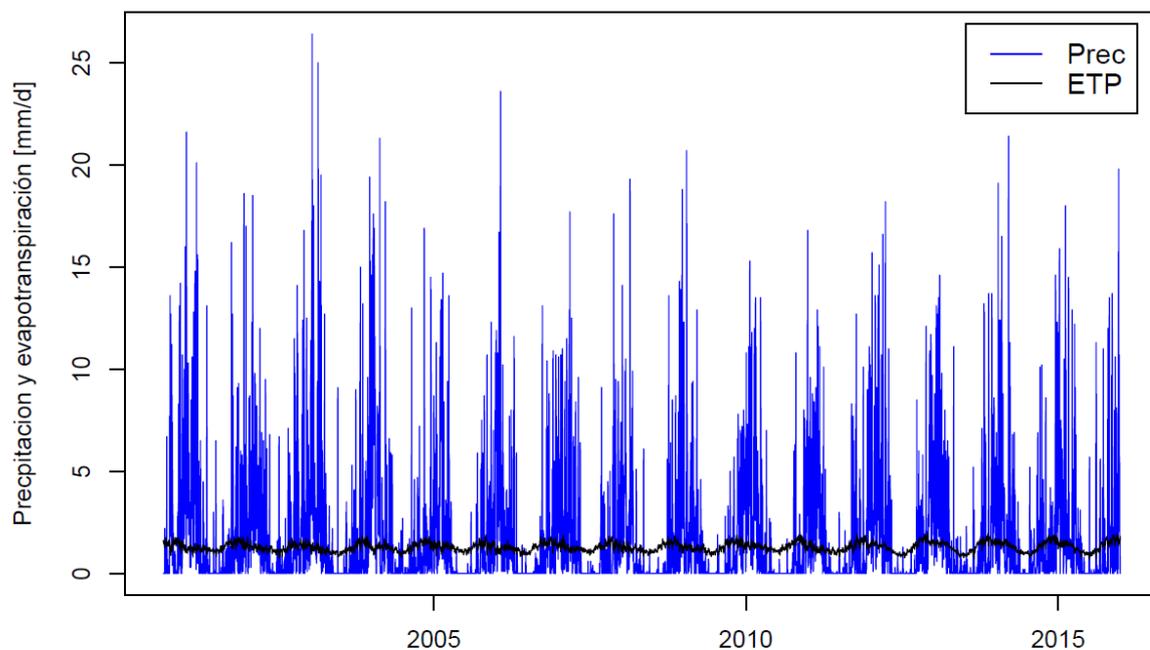


Figura 23: Precipitación y evapotranspiración media para la cuenca a partir de los datos observados. Variables de entrada al modelo GR4J.

Fuente: Elaboración propia

El script utilizado para la simulación del modelo GR4J se encuentra en el Anexo 1.

a) Escenarios de simulación

El objetivo de esta sección fue el de generar dos escenarios de simulación y evaluar el desempeño de los productos satelitales en la estimación de caudales diarios. Estos fueron ingresados al modelo hidrológico sin ninguna corrección para así dar cuenta si existe realmente una mejora en cuanto a la estimación de lluvia del GPM respecto a los productos TRMM. Principalmente, las métricas de desempeño usadas para la evaluación fueron el NSE, para los caudales altos; el NSEL, para los caudales bajos y el BIAS.

- **Escenario I: Parámetros estáticos**

El modelo GR4J fue calibrado a partir de la precipitación media areal observada. Luego, con el juego de parámetros obtenidos, se comparó el desempeño a partir de los datos observados, el producto 3B42RT y 3B42V7 para el periodo de validación I comprendido desde 01/09/2008 hasta 31/03/2014. Luego, los productos mencionados y añadiendo el GPM, fueron evaluados para el periodo de validación II, comprendido desde 01/04/2014 hasta 31/12/2015 utilizando el mismo juego de parámetros.

- **Escenario II: Parámetros dinámicos**

El modelo GR4J fue dinámicamente recalibrado, de acuerdo a los productos de precipitación de entrada (para el 3B42RT y 3B42V7 respectivamente) obteniendo un juego de parámetros por cada producto. Se continuó con la respectiva validación para cada uno en el período de validación I. Finalmente, se generaron los caudales diarios utilizando cada producto para el período de validación II, y además se añadió el GPM.

Para un mejor entendimiento de estos periodos de calibración y validación se adjunta la Tabla 7.

Tabla 7: Esquema explicativo para la evaluación hidrológica.

Escenarios	Calibración o Validación	Período de Tiempo	Precipitación	Parámetros
I	Calibración	01/09/2001 31/08/2008	Media areal observada	Para 1
	Validación I	01/09/2008 31/03/2014	Todos los datos	Para 1
	Validación II	01/04/2014 31/12/2015	Todos los datos	Para 1
II	Calibración	01/09/2001 31/08/2008	3B42V7	Para 2
	Validación I	01/09/2008 31/03/2014	3B42V7	Para 2
	Validación II	01/04/2014 31/12/2015	3B42V7	Para 2
	Validación II	01/04/2014 31/12/2015	IMERG	Para 2
	Calibración	01/09/2001 31/08/2008	3B42RT	Para 3
	Validación I	01/09/2008 31/03/2014	3B42RT	Para 3
	Validación II	01/04/2014 31/12/2015	3B42RT	Para 3
	Validación II	01/04/2014 31/12/2015	IMERG	Para 3

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Corrección de la precipitación estimada por el satélite GPM

El objetivo en esta sección fue de ajustar el sesgo de la precipitación estimada por el satélite GPM, utilizando el método de corrección por el promedio.

Lee et al. (2015) explica que el concepto fundamental de la corrección del sesgo por el promedio (MFBC por sus siglas en inglés), es que el factor de corrección (G/R) es calculado usando la relación del promedio espacial entre las precipitaciones estimadas por radar y la observada en el correspondiente pixel. Luego, la corrección de la lluvia es

calculada por la multiplicación del factor G/R con la lluvia estimada por radar. La ecuación 28 describe el metodo MFBC.

$$Factor \frac{G}{R} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (28)$$

Donde G_i es la lluvia del día i de la estación climática y R_i es la lluvia estimada por radar para el correspondiente pixel en el día i .

$$bc.GPM_{ts} = Factor \frac{G}{R} * GPM_{ts} \quad (29)$$

Donde $bc.GPM_{ts}$ representa el producto del GPM corregido por el método del bias corrección durante la serie de tiempo considerada, y GPM_{ts} es la serie de tiempo del GPM en bruto.

Una vez aplicada esta corrección, un último escenario fue generado, el cual incluye la aplicación del modelo GR4J a partir de los datos de precipitación del producto IMERG corregido, usando los parámetros obtenidos del Escenario I.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se presentará el análisis de los resultados obtenidos en base a cada ítem propuesto en la metodología. Se hace énfasis principalmente en la interpretación de los indicadores estadísticos en cuanto al comportamiento de las precipitaciones y caudales simulados durante el periodo del 01/04/2014 hasta el 31/12/2015.

4.1. Análisis exploratorio de datos

Como etapa preliminar al análisis comparativo, esta sección detallará el análisis de las variables forzantes (o de entrada) para el posterior modelamiento hidrológico. La información de estas variables corresponde a los datos de precipitación total acumulada en 24 horas, temperatura media diaria y caudal medio diario, recopilados de once estaciones meteorológicas y una estación hidrométrica respectivamente. Los acumulados mensuales y/o promedios mensuales de estas variables, fueron sometidas a una evaluación visual (gráfica) y estadística como procedimiento preliminar. Para ello, se llevó a cabo una inspección visual de la naturaleza estadística y el régimen hidrológico predominante en el área de estudio, se elaboró gráficos de la serie de tiempo del periodo disponible; gráficos de cajas a nivel mensual, con los cuales se pudo observar la cantidad de valores atípicos -la estacionalidad de las variables en análisis dentro del área de estudio.

En general, del análisis mensual de la precipitación, a partir del 01/09/2000, presenta una disponibilidad promedio de datos del 96 por ciento. La más baja disponibilidad lo tiene la estación Putina con 74 por ciento. Por tanto, se considera que la base de datos de referencia presenta una buena longitud de disponibilidad para estimar los valores medios areales de la precipitación observada. Asimismo, se presenta buena correlación entre todas las estaciones (R^2 superior a 0.6) y sin saltos y quiebres que representen una no homogeneidad en las series mensuales, lo cual se aprecia en las gráficas de doble masa y test estadísticos de T Student y F Fisher. En resumen, los datos mensuales de lluvia son homogéneos al 5 por ciento de nivel de significancia (Anexo 3).

En general, del análisis mensual de la temperatura mínima, a partir del 01/09/2000, presenta una disponibilidad promedio de datos del 94 por ciento. La más baja disponibilidad lo tiene la estación Putina con 73 por ciento. Asimismo, se presenta una aceptable correlación entre todas las estaciones (R^2 superior a 0.4) y una distribución asimétrica de los datos con presencia de una gran variabilidad de la temperatura respecto a la mediana. Los valores más bajos pertenecen a la estación Cojata y los más altos a la estación Taraco. Del análisis mensual de la temperatura máxima, a partir del 01/09/2000, presenta una disponibilidad promedio de datos del 94 por ciento. La más baja disponibilidad lo tiene la estación Putina con 73 por ciento. Asimismo, se presenta una aceptable correlación entre todas las estaciones (R^2 superior a 0.4) y una distribución simétrica de los datos siendo los valores más bajos pertenecientes a la estación Ananea y los más altos de la estación Azángaro (Anexo 4).

Los caudales medios mensuales obtenidos de la estación Puente Huancané, presentan una disponibilidad promedio de datos del 99 por ciento. Asimismo, los caudales presentan una alta variabilidad en el periodo de avenidas, definido entre los meses de Enero a Abril según el análisis del diagrama de cajas. En resumen, los caudales medios mensuales son homogéneos al 5 por ciento de nivel de significancia según las pruebas de T Student y F Fisher (Anexo 5).

Finalmente, se considera que la base de datos de referencia presenta una buena longitud de disponibilidad para estimar los valores medios areales diarios de la temperatura mínima y máxima observada; y también para la variable de precipitación. Cabe mencionar que el análisis presentado no implicó realizar ningún tipo de alteración de la información recopilada, siendo consistente y de validez para su posterior aplicación.

4.2. Análisis comparativo de la precipitación

4.2.1. Evaluación y comparación estacional de la precipitación

Un primer análisis de la precipitación media de la cuenca por cada producto satelital se observa en el Anexo 4. Este análisis se realizó de mejor manera en el diagrama de Taylor (Figura 24), el cual resume los resultados de los productos satelitales respecto a la precipitación observada, en donde definitivamente el IMERG es el mejor producto.

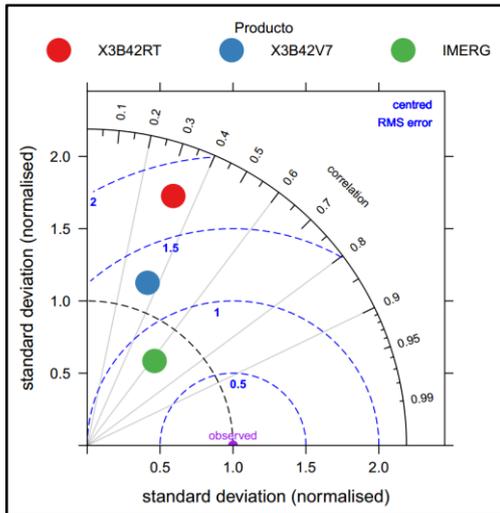


Figura 24: Diagrama de Taylor para la evaluación estadística de la precipitación media areal de los productos satelitales.

Fuente: Elaboración propia

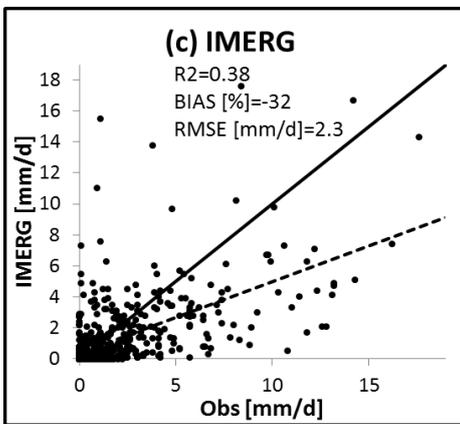
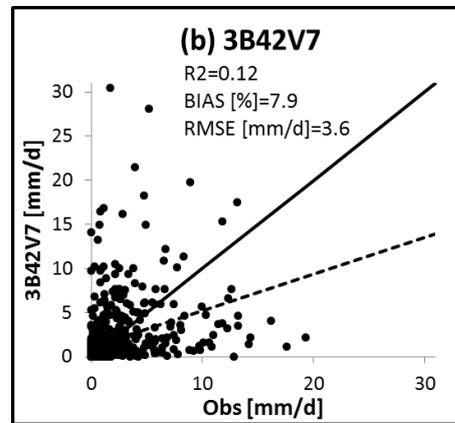
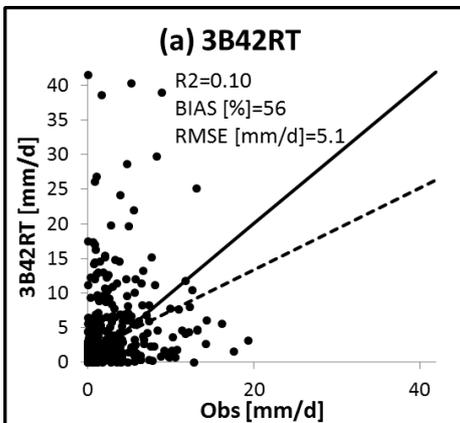


Figura 25: Correlación de los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG respecto a la precipitación media areal de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia

Un factor que no es evaluado en el diagrama es el porcentaje de error del sesgo (BIAS), de esta manera el mismo análisis se obtuvo a partir del diagrama de dispersión. En la Figura 25 se observa que el producto IMERG es el que presente mejor bondad de ajuste ($R^2=0.38$) en contraste con el 3B42V7 ($R^2=0.12$) y del 3B42RT ($R^2=0.1$). Por otro lado, si cuantificamos la intensidad de precipitación, el producto 3B42V7 es el de mejor desempeño presentando una pequeña sobreestimación (BIAS=7.9%), en comparación

con la muy alta sobrestimación del 3B42RT (BIAS=55.6%) y la considerable subestimación del IMERG (BIAS=-31.8%).

El comportamiento estacional de la precipitación para la cuenca del río Huancané presenta un incremento en los meses de Diciembre a Abril (periodo de Avenidas) y una disminución en los meses de Mayo a Noviembre (periodo de Estiaje). Este patrón es captado por los cuatro productos satelitales tal como se observa en la Figura 26. El resultado muestra principalmente que el IMERG presenta deficiencias para captar las intensidades de la lluvia en el periodo de crecidas, en contraste con el producto 3B42V7.

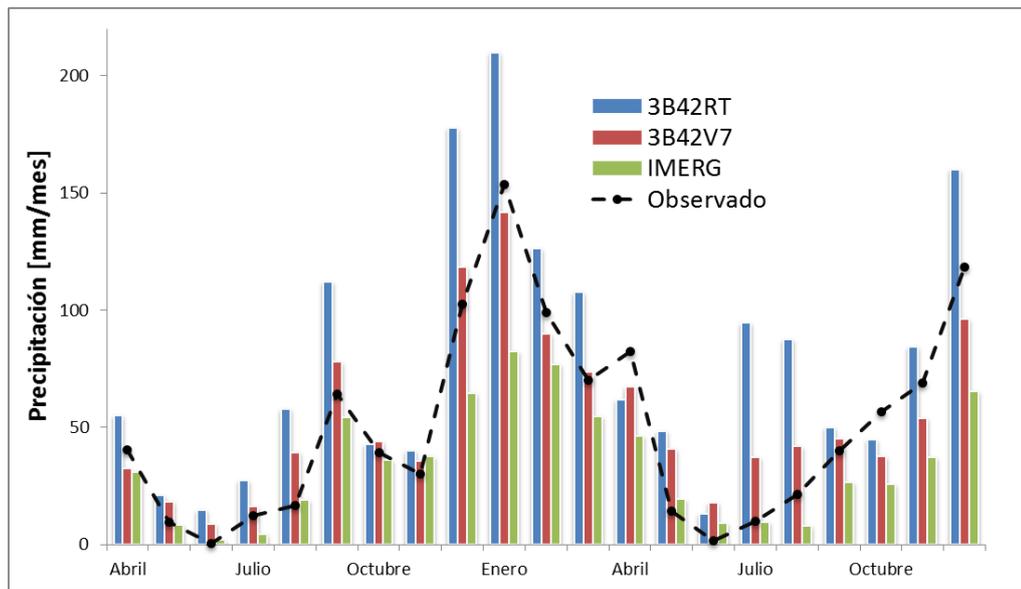


Figura 26: Estacionalidad de las lluvias mensuales de los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG en comparación con la precipitación media areal de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente para esta sección, según el Diagrama de Taylor, que resume los resultados de los productos satelitales respecto a la precipitación observada, muestra que definitivamente el IMERG es el mejor producto tomando en cuenta las métricas de RMSE, CC y SD, sin embargo también es el que mayor subestimación presenta. Este factor, en consecuencia, se ve reflejado en el modelamiento hidrológico.

4.2.2. Evaluación y comparación espacial de la precipitación

Conocer la compleja variación espacial de la precipitación ha sido siempre un problema principalmente a las limitadas estaciones convencionales empleadas para su medición. Hoy en día, el desarrollo de productos grillados de precipitación permite obtener una

estimación aproximada mas no exacta de la lluvia en zonas no cubiertas y de difícil acceso (especialmente en zonas altas y montañosas), siempre y cuando estos hayan sido previamente validados en comparación con estaciones en tierra.

Como primer análisis se presenta la variación espacial del R^2 dentro del área de influencia de la zona de estudio. La Figura 27, muestra para el caso (a) la variación del producto GPM, el cual presenta valores de R^2 que van desde 0.2 a 0.35. Este se incrementa hacia los lados nor-oeste y sur-oeste de la cuenca, y disminuye hacia el lado este. Para el caso (b), la variación para el producto 3B42RT presenta valores de R^2 que varían en el rango de 0.01 a 0.08. Esta se incrementa hacia el lado este de la cuenca, y disminuye hacia el oeste. Para el caso (c), la variación para el producto 3B42V7 presenta el mismo patrón y rango de variación que el 3B42RT.

Como segundo análisis se presenta la variación espacial del BIAS dentro del área de influencia de la zona de estudio. Para el caso (d), la variación para el producto IMERG, el cual presenta una marcada subestimación que varía en el rango de -20% a 40%. Esta se incrementa hacia los lados sur-este y nor-oeste de la cuenca, y disminuye hacia el norte y sur-oeste. Para el caso (e), la variación para el producto 3B42RT presenta una notoria sobrestimación que varía en el rango de 20% a 120%. Esta se incrementa hacia los lados nor-oeste y sur-este de la cuenca, y disminuye hacia el sur-este. Para el caso (f), la variación para el producto 3B42V7 presenta una aceptable variación del BIAS que va desde -20% a 60%. Esta se incrementa hacia los lados norte y sur-oeste de la cuenca, y disminuye hacia el lado sur-este.

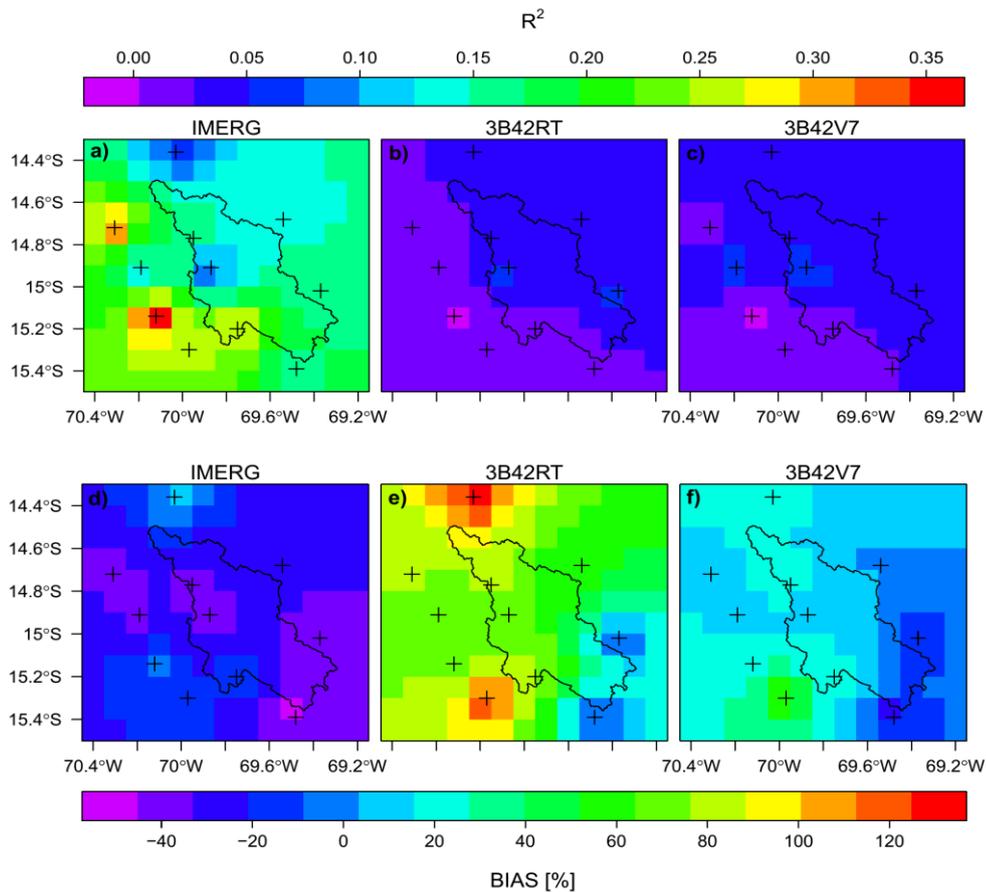


Figura 27: Representación espacial del coeficiente de determinación (arriba) y del sesgo estadístico (abajo) de los productos en evaluación.

Fuente: Elaboración propia.

Conocer el desempeño de los productos en base a la altitud de la zona de estudio, permite visualizar si presenta alguna mejora respecto de los nuevos sensores del GPM respecto al TRMM para captar la precipitación en zonas de compleja topografía y en un clima tan complejo como el Altiplano. En la Figura 28 (a) la variación del R^2 respecto a la altitud de las estaciones meteorológicas utilizadas, se observa una considerable mejora en cuanto a capturar los patrones de precipitación, si bien el desempeño no es satisfactorio y no hay un patrón claro de una buena correlación para la zona de estudio, en altitudes cercanas a los 4000 msnm el IMERG captura mejor las tendencias. La Figura 28 (b) evidencia que el producto 3B42RT presenta una mejor estimación de la intensidad de lluvia entre los 4300 y 4400 msnm, pero en general el porcentaje de sobrestimación es muy alta. El IMERG sigue un patrón similar del BIAS que el 3B42V7 respecto a la altitud; ambos entre los 3900 y 4100 msnm captan mejor las intensidades. Estos resultados coinciden con lo expuesto por Scheel et al. (2010) y Condom et al. (2011) respecto al desempeño del TRMM en zonas altas y de compleja topografía.

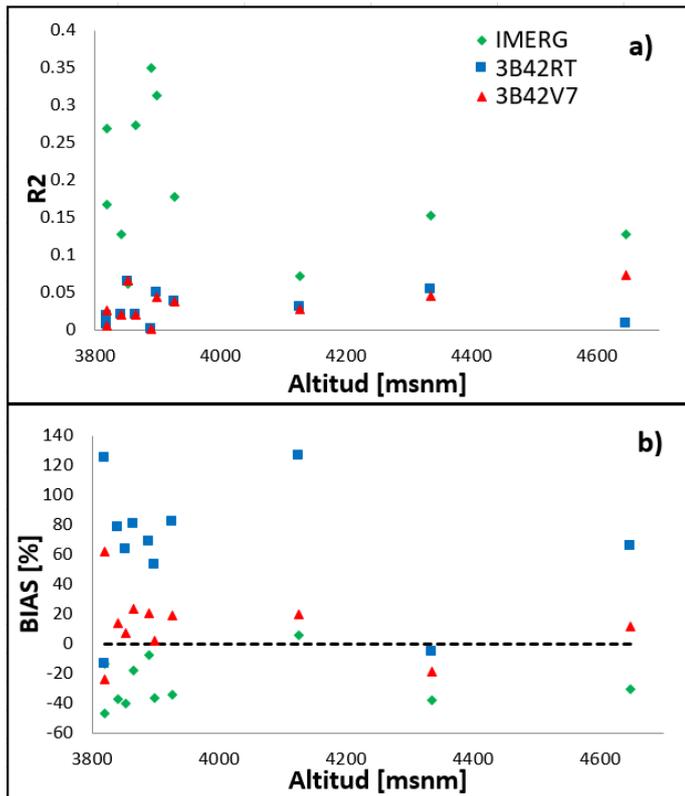


Figura 28: Desempeño de los productos TRMM y GPM respecto a la altitud de la zona de estudio. a) En base a la correlación (R^2), y b) en base a la subestimación o sobreestimación expresado en el porcentaje del BIAS.
Fuente: Elaboración propia

De igual manera el análisis de la precipitación acumulada para el año hidrológico 2014-2015 se presenta distribuida espacialmente en toda la cuenca (Figura 29). Se observa claramente la subestimación (para el IMERG) y sobreestimación (para el 3B42RT y 3B42V7) si observamos el valor acumulado anual por cada producto. Un claro patrón es definido por la precipitación observada la cual aumenta según su intensidad de norte a sur en la cuenca de estudio, patrón que es bien captado por el IMERG aunque en menor intensidad. Sin embargo los productos 3B42RT y 3B42V7 presenta el mismo patrón de distribución de la precipitación pero difieren en comparación con el observado, ya que esta aumenta de sur a norte. Esto demuestra que la correlación de la lluvia es mejor representada por el IMERG, tal como se determinó en la sección anterior.

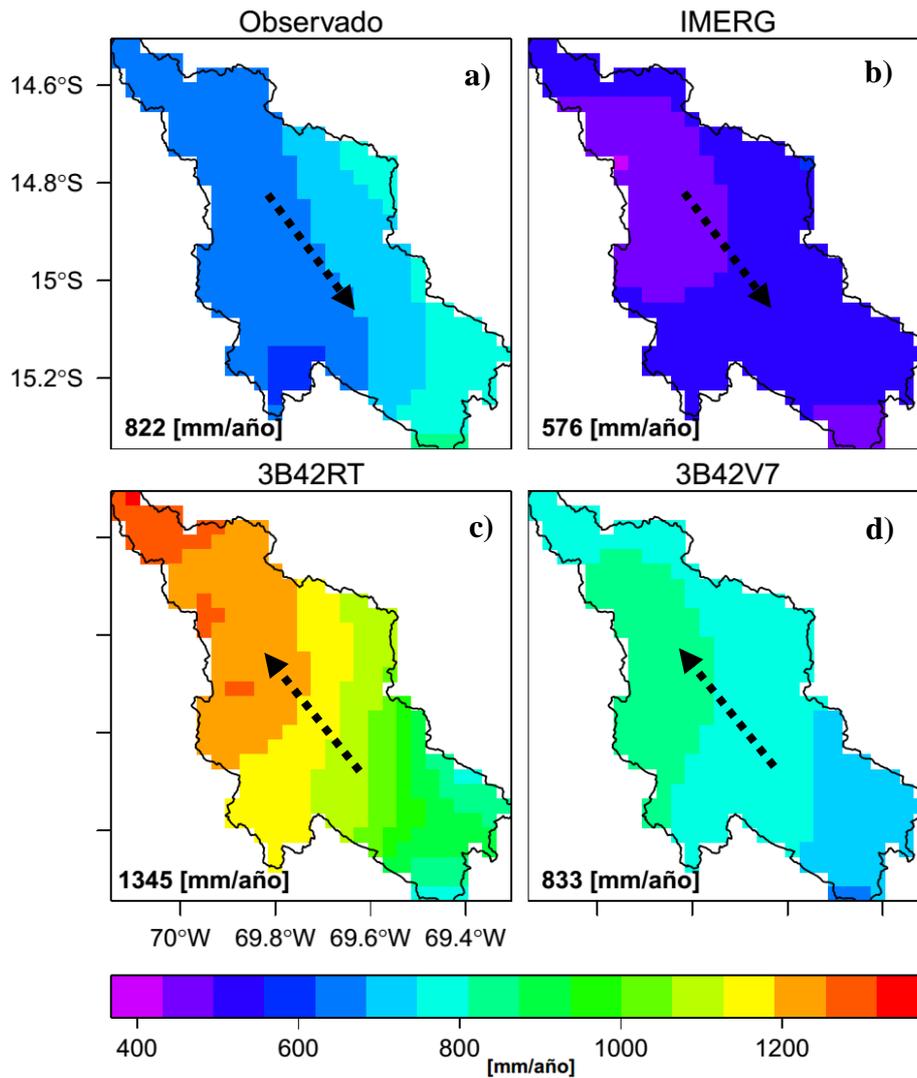


Figura 29: Representación espacial de la precipitación acumulada para la cuenca de estudio en el año hidrológico 2014-2015. Nótese la variabilidad espacial de la intensidad de la precipitación indicada por las flechas. a) Lluvia observada, b) producto IMERG, c) producto 3B42RT, d) producto 3B42V7.

Fuente: Elaboración propia

Evidentemente la precipitación satelital del TRMM para la zona de estudio debe ser corregida. De igual manera el IMERG, presenta un bajo desempeño en base a los estadísticos y debería ser corregido para su aplicabilidad en el modelamiento hidrológico. Siguiendo con la metodología planteada en la presente investigación, en primer lugar se procedió a simular las descargas diarias con los datos en bruto.

4.3. Implementación del modelo GR4J

Para la selección del modelo hidrológico, se deben principalmente responder a las interrogantes de: ¿De qué información dispongo? y ¿Para qué lo que lo usaré?. Para responder a la primera pregunta, generalmente la información de precipitación, temperatura mínima y máxima se encuentran disponibles y son las variables de mayor influencia para la simulación hidrológica continua. En cuanto a la segunda pregunta, el modelo GR4J es relativamente simple pero que brinda resultados satisfactorios para la estimación de caudales diarios; ha sido ampliamente usado (ver sección 2.2.3) y es una herramienta útil para los objetivos del presente estudio.

La precipitación media para la cuenca del río Huancané fue generada para cada producto (lluvia observada, 3B42RT, 3B42V7 e IMERG). El cálculo de la evapotranspiración también se hizo de manera independiente según el método de Hargreaves a partir de la temperatura máxima y mínima observada. El modelo GR4J se basa en principios físicos simplificados y está definido por cuatro parámetros cuyos rangos están establecidos según la Tabla 8, sin embargo, estos no son rangos absolutos y pueden variar de acuerdo a cada ámbito de estudio.

Tabla 8: Rango de parámetros establecidos para el modelo GR4J.

Object	Name	Units	Description	Regular Range
GR4J	A	m ²	Surface of the basin	>0
	X1	m	Capacity of production store	0.01 to 1.2
	X2	m	Water exchange coefficient	-0.005 to 0.003
	X3	m	Capacity of routing store	0.01 to 0.5
	X4	d	UH time base	-0.5 to 1
	Slni	m	Initial water content in the production reservoir	-
	Rlni	m	Initial water level in the routing reservoir	-

Fuente: CREALP et al. (2015)

4.3.1. Escenario I: Parámetros estáticos

En el escenario I, la calibración se realizó para el periodo del 1 de setiembre del 2001 hasta el 31 de agosto del 2008 con un periodo de calentamiento del modelo de un año (año hidrológico 2000-2001). Presenta un buen desempeño del modelo para simular los caudales máximos (NSE/BIAS:0.89/-1.8%) tal como se observa en la Figura 30 (a). Los caudales bajos son bien representados (NSE: 0.86). En general las métricas para el periodo de calibración son muy satisfactorias.

El periodo de validación I a partir de los datos observados sigue presentando una buena estimación de los caudales altos (NSE: 0.79) y bajos (NSEL: 0.86). Se observa una mayor subestimación (BIAS: -5.2%) debido principalmente a que no se simula satisfactoriamente el caudal máximo del año hidrológico 2012-2013. El producto 3B42RT (Figura 30 (c)) tiende a sobreestimar en un gran porcentaje los caudales observados (BIAS: 119.9%), y no los representa satisfactoriamente (NSE/NSEL: -1.33/0.43). El producto 3B42V7 tiende en general a sobreestimar los caudales (BIAS: 22.2%) pero en menor proporción al producto 3B42RT (Figura 30 (d)), además tiene un buen desempeño para los caudales bajos (NSEL: 0.80) y no muy bueno para los caudales altos (NSE: 0.32).

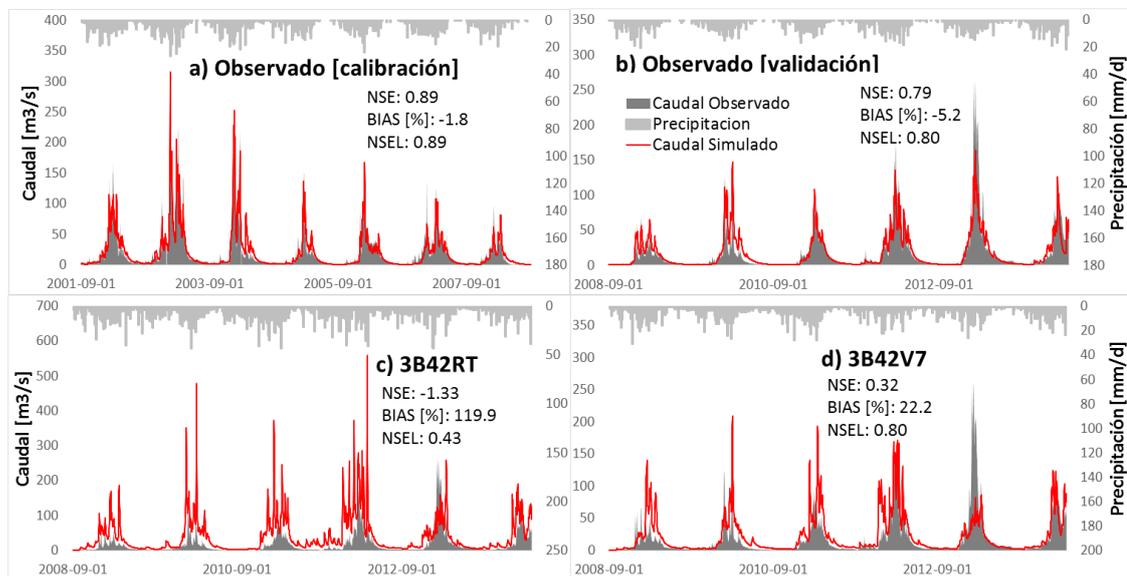


Figura 30: Escenario de simulación I. a) calibración a partir de los datos observados, b) validación I a partir de los datos observados, c) validación I a partir del producto 3B42RT, y d) validación I a partir del producto 3B42V7.

Fuente. Elaboración propia

Para el periodo de validación II, se evaluaron los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG. En la Figura 31 (a), a partir de la precipitación observada, el resultado muestra un buen desempeño para la simulación de los caudales picos (NSE: 0.84), caudales bajos (NSEL: 0.89) y una ligera subestimación (BIAS: -12%). El producto 3B42RT (Figura 31 (b)), al igual que en la validación I, sobreestima altamente al caudal observado (BIAS: 131.1%), y también tiene una baja representatividad de los caudales picos y bajos (NSE/NSEL: -2.91/-0.07). El producto 3B42V7 (Figura 31 (c)) ofrece un mejor desempeño estimando

satisfactoriamente los caudales picos y bajos (NSE/NSEL: 0.64/0.62) y con un tendencia a sobrestimarlos ligeramente (BIAS: 7.1%). Finalmente, para intereses del presente estudio, el GPM es usado para la simulación de caudales (Figura 31 (d)), sin embargo las métricas indican que no tiene un buen desempeño. Presenta una gran subestimación y no representa bien los caudales picos (BIAS/NSE: -64.4%/ 0.11), aunque si logra estimar satisfactoriamente los caudales bajos (NSEL: 0.56). La deficiencia en representar los caudales máximos se debe a la poca capacidad que tiene el producto IMERG para representar la intensidad de la lluvia, esta afirmación se basa en lo discutido en la sección 4.2.

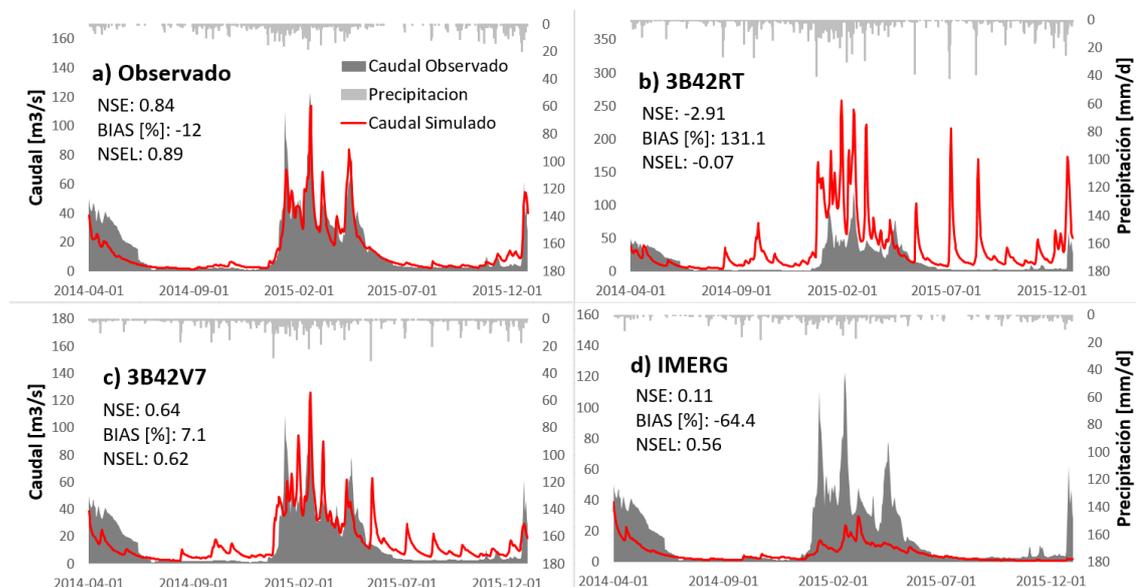


Figura 31: Escenario de simulación I. a) validación II a partir de los datos observados, b) validación II a partir del producto 3B42RT, c) validación II a partir del producto 3B42V7, y d) validación II a partir del producto IMERG.

Fuente. Elaboración propia

4.3.2. Escenario II: Parámetros dinámicos

Para el escenario II, la calibración con el producto 3B42RT (Figura 32 (a)), muestra un regular desempeño al no representar adecuadamente los caudales altos a pesar de mostrar NSE satisfactorio (NSE: 0.51) sobrestimando para todo el periodo calibrado (BIAS: 6.6%). Los caudales bajos son satisfactoriamente representados (NSEL: 0.63), pero se observa que simula algunos picos en periodos de estiaje. La validación I muestra las mismas condiciones descritas, mejorando en la estimación de caudales bajos (NSEL: 0.80); sin embargo presenta una mayor subestimación (BIAS: -30.8%). En líneas

generales el producto 3B42RT no representa adecuadamente los caudales diarios y tiende a subestimarlos.

Por otro lado, la calibración con el producto 3B42V7 (Figura 32 (b)), presenta mejores métricas de desempeño. Los caudales son mejor representados aunque sigue sin captar correctamente los valores picos (NSE/BIAS: 0.48/ -1.6%), los caudales bajos simulados son estimados mejor que el producto 3B42RT (NSEL: 0.83). En la validación I, representa insatisfactoriamente las descargas diarias y sigue con la tendencia de subestimarlos (NSE/BIAS: 0.42/ -12%) aunque en un mayor porcentaje, debido en general a que simula muy bajo al caudal pico del año hidrológico 2012-2013. Este producto tiene un buen desempeño en la estimación de caudales bajos (NSEL: 0.79).

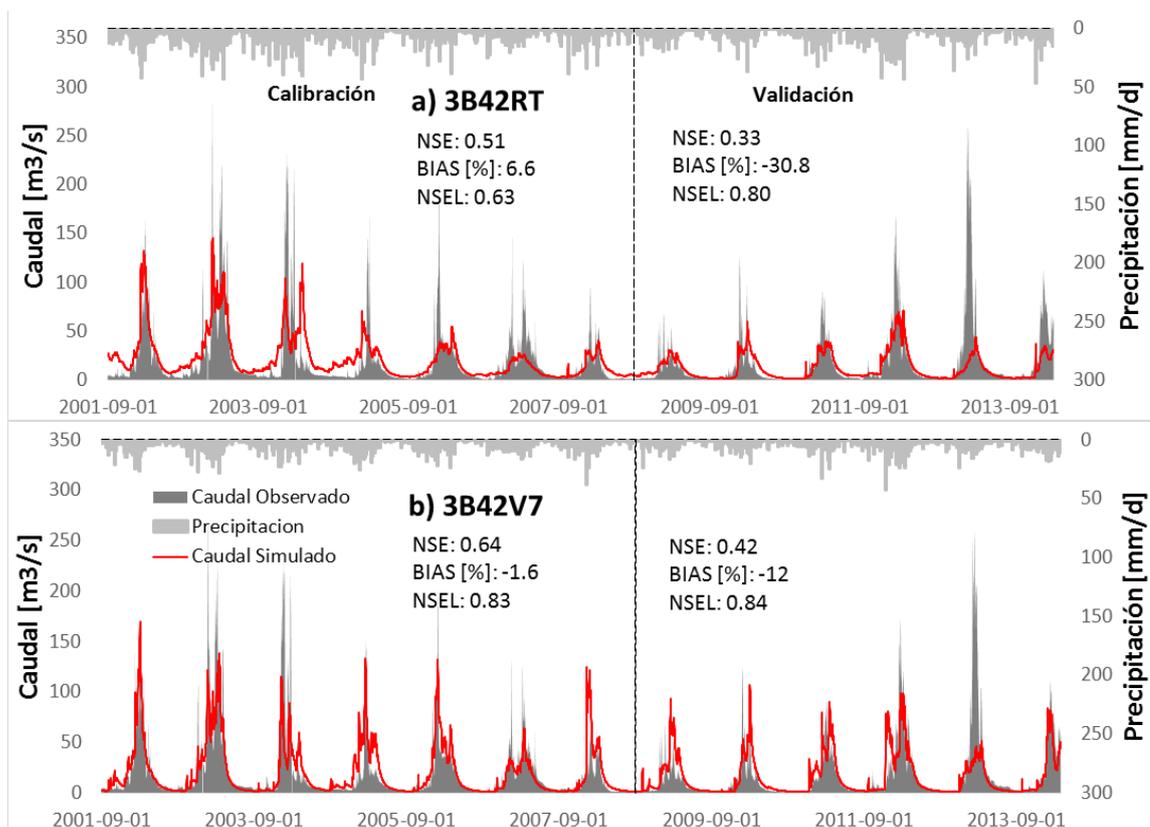


Figura 32: Escenario de simulación II. a) Calibración y validación I a partir del producto 3B42RT, y b) calibración y validación I a partir del producto 3B42V7.

Fuente. Elaboración propia

Finalmente, usando el juego de parámetros obtenidos por cada producto, el periodo de validación II incorpora al producto IMERG para la simulación. En la Figura 33 (a), la simulación basada en el 3B42RT presenta un bajo desempeño. No es bien representado

el caudal pico del año hidrológico 2014-2015 (NSE/BIAS: 0.53/ -26.9%) y es muy notoria la baja representatividad de los caudales bajos, debido a que simula picos inexistentes en el periodo de estiaje. A partir del IMERG, la estimación de caudales es menos eficiente. Hay una gran subestimación (BIAS: -82%) y no tiene representatividad en el periodo de crecida (NSE: -0.31). En la Figura 33 (b), la simulación basada en el producto 3B42V7 muestra igualmente un bajo desempeño. La descarga máxima no es bien simulada respecto a su intensidad (NSE/BIAS: 0.59/ -30.1%), además la estimación de caudales en el periodo de estiaje presenta picos inexistentes similares al del 3B42RT. A partir del IMERG, la estimación de caudales es de bajo desempeño, pero mejor en comparación al basado en el producto 3B42RT. Hay una gran subestimación (BIAS: -69.5%), y no tiene representatividad en el caudal pico del periodo considerado (NSE: 0.03).

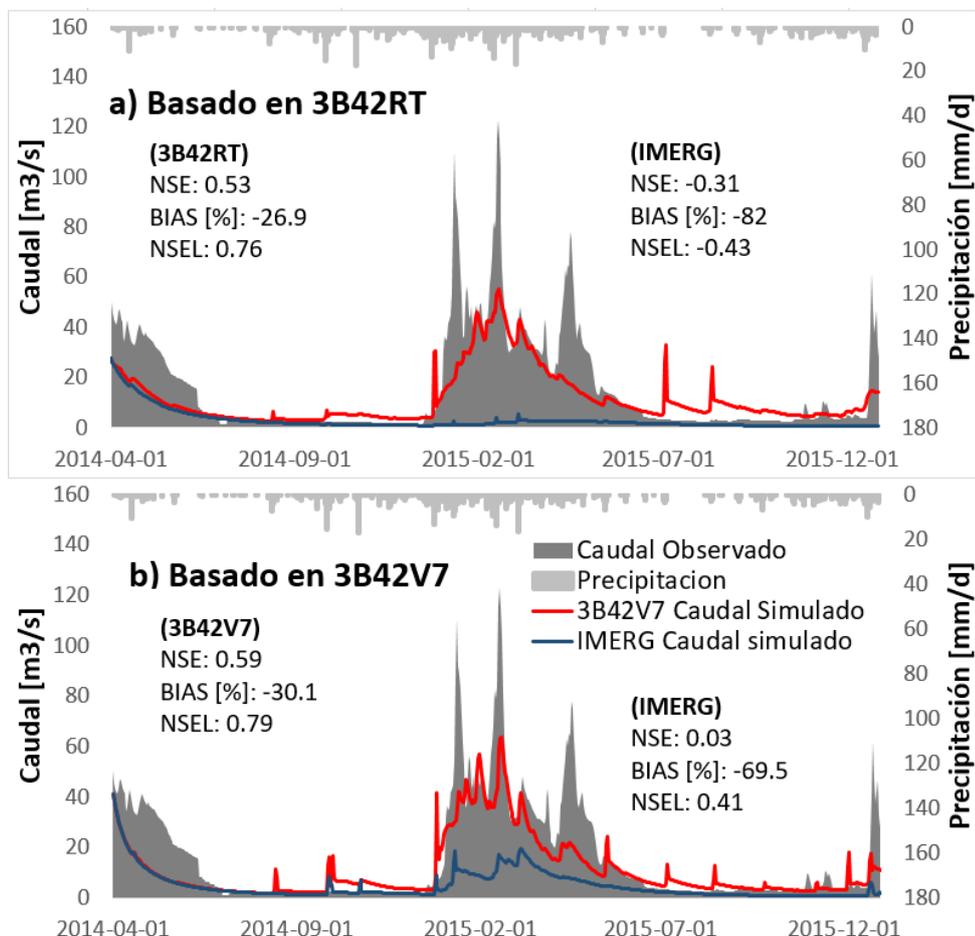


Figura 33: Escenario de simulación. a) Validación II a partir de los productos 3B42RT e IMERG, y b) validación II a partir de los productos 3B42V7 e IMERG.

Fuente. Elaboración propia

El juego de parámetros del Escenario II no se recomienda para su uso en el modelamiento hidrológico de acuerdo a los resultados obtenidos. Por otro lado el Escenario I, si bien presenta mejores indicadores, no muestra al IMERG como un buen producto para la simulación de caudales, a pesar de que capta mejor las tendencias en relación a los otros. Por tal motivo, la aplicación de una metodología simple para su corrección es propuesta cuyos resultados se exponen en la siguiente sección.

4.3. Sobre el desempeño del IMERG corregido en el modelamiento hidrológico

Evidentemente, basado en los indicadores del coeficiente de determinación (R^2) y el sesgo estadístico (BIAS), el IMERG presenta deficiencias para representar la intensidad de la lluvia en la cuenca del río Huancané. En consecuencia, la estimación de las descargas es deficiente siendo el producto 3B42V7 el más indicado para su uso en ausencia de data observada. Sin embargo, esta deficiencia del IMERG puede ser corregida aplicando métodos de corrección del sesgo. El método de corrección al promedio (explicado en la sección 3.3.4) es aplicado en la presente investigación, brindando los siguientes resultados:

- Las métricas de desempeño mejoran considerablemente al comparar las precipitaciones medias de la cuenca, la correlación mejora a 0.95 y el BIAS se reduce hasta -10.1% (Figura 34). En cuanto a la aplicación del IMERG corregido para la simulación hidrológica, en primer lugar se logra mejorar los estadísticos respecto a lo presentado en el Escenario I. Los caudales son mejor estimados ($NSE/NSEL=0.76/0.90$), y la subestimación se reduce (BIAS: -30.1%). La mejora de las métricas para el modelamiento hidrológico usando el IMERG corregido y sin corregir se puede observar en las Figura 35.
- En segundo lugar, al comparar el mejor resultado del Escenario I utilizando el 3B42V7 con el IMERG corregido, las métricas evidencian una mejora a favor de este último producto. Si bien el producto 3B42V7 sigue presentando un mejor BIAS (3B42V7/IMERG: 7.1%/ -30.1%), se presenta una considerable mejora en cuanto a la estimación de los caudales bajos NSEL (3B42V7/IMERG: 0.62/0.90) y altos NSE (3B42V7/IMERG: 0.64/0.76).

Si se tiene en consideración que los productos del TRMM serán dejados fuera de órbita debido a la nueva generación de satélites de precipitación (GPM), el empleo del producto IMERG *Final Run* corregido es un buen estimador de las precipitaciones y

consecuentemente brinda buenos resultados para la simulación de caudales en la presente cuenca de estudio.

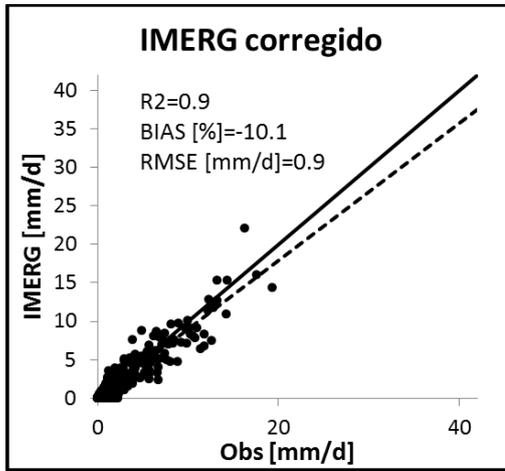


Figura 34: Diagrama de dispersión del IMERG corregido respecto a la lluvia observada.

Fuente: Elaboración propia

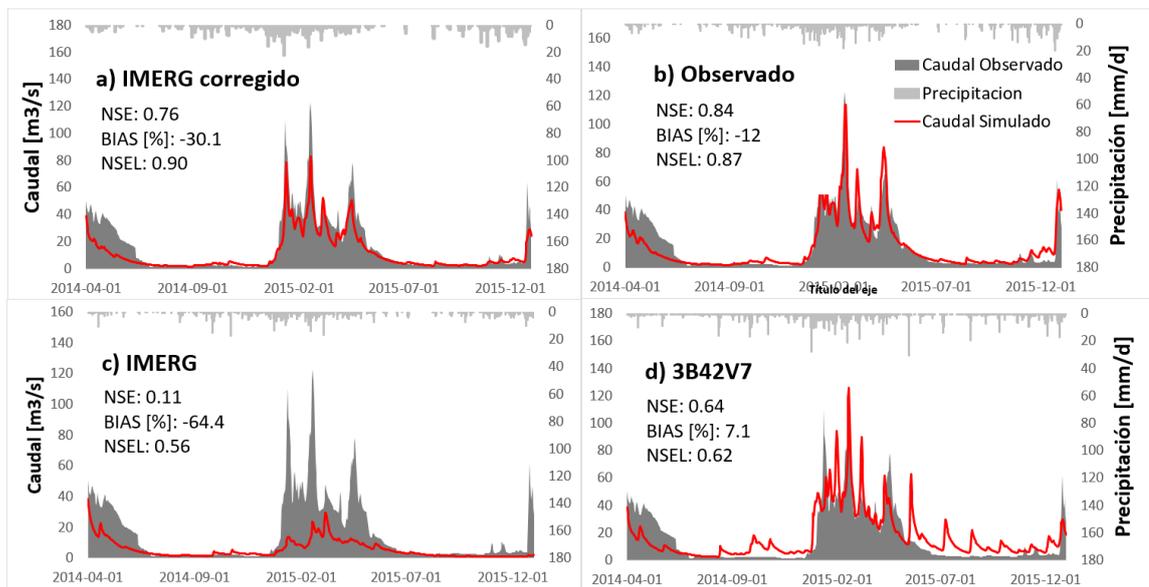


Figura 35: Comparación del desempeño de: a) IMERG corregido, b) datos observados, c) IMERG sin corregir y d) 3B42V7 para el periodo de validación II.

Fuente: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

Esta investigación ha permitido conocer el comportamiento estadístico entre los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG; para luego para evaluar su desempeño en la simulación hidrológica utilizando el modelo GR4J. Los resultados presentados pueden ser específicos para la cuenca en estudio, pero probablemente también es aplicable a otras cuencas ubicadas en el altiplano.

Las principales conclusiones de la comparación de los productos, evaluados desde el 01 de abril del 2014 hasta el 31 de diciembre del 2015, están en relación de los objetivos específicos planteados:

5.1. De la comparación estadística de los productos de precipitación del TRMM y GPM respecto a la lluvia observada a nivel espacial y estacional.

A partir de la precipitación media areal para la cuenca del río Huancané, se resume las siguientes conclusiones:

- El producto 3B42RT (3B42V7), presenta una baja bondad de ajuste y sobrestima excesivamente (sobrestima ligeramente) la precipitación observada. El producto IMERG capta mejor y con menor error la precipitación, sin embargo, en el análisis mensual se evidencia que no cuantifica adecuadamente la intensidad de lluvia.
- La precipitación es mejor captada en altitudes menores a 4000 msnm dentro de la cuenca del río Huancané para el caso del IMERG. En el mismo análisis, la variación del porcentaje de BIAS respecto a la altitud sigue la misma tendencia para los tres productos; a altitudes próximas a 3900 msnm (4300 msnm) los productos 3B42V7 e IMERG (el producto 3B42RT) capturan mejor las intensidades de precipitación.

5.2. De la evaluación del TRMM y GPM en el modelamiento hidrológico (GR4J).

Considerando la estrategia de calibración se emplearon dos periodos de validación. El periodo de validación I (desde 01/09/2008 hasta 31/03/2014) para la evaluación de los

productos 3B42RT y 3B42V7; y el periodo de validación II (desde 01/04/2014 hasta 31/12/2015), para la evaluación los productos mencionados incluyendo el IMERG. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

- En el Escenario I, calibrado a partir de la precipitación observada, el IMERG muestra un bajo desempeño. Los caudales altos no son bien representados mostrando una considerable subestimación para el periodo de avenidas del año hidrológico 2014-2015. Para el mismo periodo, el producto 3B42RT es el menos confiable debido a las altas sobreestimaciones y baja representatividad de la estacionalidad; por otro lado el 3B42V7 representa mucho mejor las descargas diarias, siendo el mejor producto a usar en ausencia de precipitación observada.
- En el Escenario II, con los parámetros recalibrados a partir de los productos 3B42RT y 3B42V7, los caudales obtenidos desde del IMERG muestran una representatividad más baja que la del Escenario I. Las métricas para los periodos de calibración y validación no son satisfactorias. Por tal motivo este escenario quedó descartado para el post- análisis a partir de la precipitación IMERG corregida. Sin embargo cabe mencionar que, tomando en cuenta los productos satelitales sin corregir, el mejor producto para ser usado en ausencia de lluvia observada es el 3B42V7. A partir de los parámetros calibrados correspondientes a este producto se puede utilizar en el modelamiento hidrológico considerando que tiene un mejor desempeño en periodos de estiaje y subestima las descargas en periodo de crecidas.

5.3. De la evaluación del IMERG corregido en el modelamiento hidrológico

A partir del método de corrección del sesgo por el promedio, se desprenden las siguientes conclusiones:

- El IMERG corregido presenta una considerable mejora, permitiendo captar muy bien la estacionalidad de la lluvia y reduciendo significativamente la subestimación.
- Mediante el uso del IMERG corregido los caudales son mejor estimados por el modelo GR4J. En el Escenario I, las descargas diarias son más representativas respecto al 3B42V7. Los patrones son mejor captados y se corrige el sesgo que presentaba, aunque no permite una mejor estimación del caudal máximo para el año hidrológico 2014-2015.

En líneas generales, el producto IMERG sin corregir aplicado al modelamiento hidrológico, presenta un bajo desempeño tanto para el Escenario I y peor aún para el Escenario II. Sin embargo, el método de corrección del sesgo por el promedio mejora al IMERG de tal manera que es un producto útil para la estimación de caudales, mostrando un desempeño superior a su antecesor (3B42V7), y se convierte en la mejor opción a ser tomado en cuenta en ausencia de precipitación observada. Para cuencas ubicadas a medianas o altas latitudes y que obedezcan a otros patrones climáticos, no necesariamente presentarán los mismos resultados expuestos en la presente investigación.

VI. RECOMENDACIONES

Concluida la presente investigación, se generan cuestiones que deberían plantearse en futuros estudios. Es necesario evaluar mejores alternativas dentro de la metodología propuesta, las cuales deben ser aplicadas al desarrollo de nuevas líneas de investigación relacionadas a la temática tratada.

- Evaluar la capacidad del IMERG para el modelamiento hidrológico aplicado a cuencas de otras zonas y que obedezcan a un distinto régimen climático. Se debería plantear la hipótesis de si existe una mejora del satélite GPM para la estimación de precipitaciones en terrenos de compleja topografía y climatología, problema principal que presenta su predecesor TRMM.
- A medida que se vaya liberando los datos del GPM, se debe plantear la evaluación de sus productos IMERG *real time* (*Early* y *Late*) para su aplicación a sistemas de alerta temprana y, dado su buena resolución temporal (0.5 horas), para evaluar su desempeño en la simulación de eventos extremos.
- La buena resolución espacial del IMERG ($0.10^\circ \times 0.10^\circ$) hace factible el uso de un modelo hidrológico distribuido, por lo tanto se recomienda proponer su uso y disgregación de la cuenca del río Huancané identificando puntos de mayor interés que ayuden a una mejor gestión de sus recursos hídricos.
- También debe plantearse la aplicación del IMERG en modelos que se basen en las propiedades físicas de la cuenca (p.e. SWAT). De esta manera se llevaría a cabo un análisis a profundidad de los distintos componentes hidrológicos dentro de la cuenca. Además el modelo serviría como una importante herramienta para la toma de decisiones.
- Explorar otros métodos de corrección del sesgo que permitan mejorar la subestimación que sigue presente en el IMERG, y en consecuencia, mejorar el desempeño de las métricas para la estimación de las descargas diarias. Una propuesta simple podría ser mediante una regresión lineal múltiple, tomando en consideración variables como la latitud, longitud, altura y entre otras.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Astorayme, M; García, J; Suarez, W; Felipe, O; Huggel, C; Molina, W. 2015. Modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú. Revista Peruana Geo Atmosférica RGPA 4(4): 109-124.
- Cabrera, J. 2009. Calibración de Modelos Hidrológicos. Imefen.Uni.Edu.Pe 1.
- Carrasco, M; Yarlequé, C; Posadas, A. 2010. Datos faltantes de precipitación pluvial diaria mediante la Transformada Wavelet. Revista Peruana Geo-Atmosférica 88(2): 76-88.
- Carvajal, LF; Roldan, E. 2007. Agregado Gr4J Aplicación : Cuenca Del Río Aburrá Calibration of Gr4J Lumped Rainfall-Runoff Model Application : Rio Aburrá Cachtment. Dyna 74: 73-87.
- Ceccato, P; Dinku, T. s.f. Introduction to Remote Sensing for Monitoring Rainfall , Temperature , Vegetation and Water Bodies.
- Chen, F; Li, X. 2016. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China. Remote Sensing 8(6): 1-18.
- Choquehuanca; Mamani. 2008. Las inundaciones en Huancané. 68: 59-68.
- Chow, V Te; Maidment, D; Mays, L. 1994. Hidrologia Aplicada. 1994: 584.
- Condom, T; Rau, P; Espinoza, JC. 2011. Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998-2007 (En null). Hydrological Processes 25(12): 1924-1933.
- CREALP; UPV; HYDROCOSMOS. 2015. Rs Minerve (En null). Technical Manual v2.1 no.February.
- Devi, GK; Ganasri, BP; Dwarakish, GS. 2015. A Review on Hydrological Models. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (Icwrcoe'15) 4(Icwrcoe): 1001-1007.

- Garreaud, R. 2000. Intraseasonal Variability of Moisture and Rainfall over the South American Altiplano. *Monthly Weather Review* 128: 3337-3346.
- Gaudiani, AA. 2015. Simulación y Optimización como Metodología para Mejorar la Calidad de la Predicción en un Entorno de Simulación Hidrográfica . 2015.
- Harlan, D; Wangsadipura, M; Munajat, CM. 2010. Rainfall-Runoff Modeling of Citarum Hulu River Basin by Using GR4J. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 II*: 4-8.
- Heidinger, H; Yarlequé, C; Posadas, A; Quiroz, R. s.f. *International Journal of Remote TRMM rainfall correction over the Andean Plateau using wavelet multi- resolution analysis (En null)*. no.October 2012: 37-41.
- Hou, A; Gail, J; Kummerow, C; Marshall, J. 2011. Global precipitation measurement. *Meteorological Applications* 18(3): 334-353.
- Huffman, GJ. 2015. 28 July 2015 TMPA-to-IMERG Transition 1. no.July: 1-3.
- Huffman, GJ; Adler, RF; Bolvin, DT; Nelkin, EJ. 2010. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology 2010*: 3-22.
- Huffman, GJ; Bolvin, DT; Nelkin, EJ. 2015. Day 1 IMERG Final Run Release Notes. no.January: 1-9.
- Iahs, P; Hublart, P; Ruelland, D; Garc, I; Estudios, C De; Áridas, Z; Serena, L. 2015. Reliability of a conceptual hydrological model in a semi-arid Andean catchment facing water-use changes. no.2010: 203-209.
- El Kenawy, AM; Lopez-Moreno, JI; McCabe, MF; Vicente-Serrano, SM. 2015. Evaluation of the TMPA-3B42 precipitation product using a high-density rain gauge network over complex terrain in northeastern Iberia. *Global and Planetary Change* 133: 188-200.
- Kidd, C. 2009. *Satellite Precipitation Measurements for Water Resource Monitoring*. no.May.
- Lavado, W; Labat, D; Guyot, JL; Ronchail, J; Ordoñez, JJ. 2009. Validación de lluvia utilizando TRMM en dos cuencas amazónicas peruanas y su aplicación en modelos mensuales de balance hídrico . *Validation of rainfall using the TRMM for two Peruvian*

- Amazon basins and its inclusion in monthly water balance models. 19(1): 11-19.
- Lee, J-K; Kim, J-H; Suk, M-K. 2015. Application of bias correction methods to improve the accuracy of quantitative radar rainfall in Korea. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 8(4): 4011-4047.
- Macritchie, K. 2015. Document for the Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM). 2015: 69.
- Manz, B. 2016. Workshop: Análisis del producto satelital GPM para la región Andina. 2016.
- Narbondó, S; Crisci, M. 2016. Mejora de la estimación de caudales fluviales en Uruguay. 2016.
- NASA; JAXA. 2001. Key TRMM Facts. *Earth Science Reference Handbook 2001*: 243-254.
- Nasda. 2001. TRMM Users Handbook. 2001: 226.
- Nerini, D; Zulkafli, Z; Wang, L-P; Onof, C; Buytaert, W; Lavado, W; Guyot, J-L. 2015. A comparative analysis of TRMM-rain gauge data merging techniques at the daily time scale for distributed rainfall-runoff modelling applications. *Journal of Hydrometeorology* no.July: 150904104740009.
- Nikolopoulos, EI; Anagnostou, EN; Borga, M. 2012. Using High-Resolution Satellite Rainfall Products to Simulate a Major Flash Flood Event in Northern Italy (En null). *Journal of Hydrometeorology* 14(1): 171-185.
- Ochoa, A; Pineda, L; Crespo, P; Willems, P. 2014. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific-Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(8): 3179-3193.
- Perrin, C. 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche* no.6-7: 84-91.
- Sánchez, J. 2000. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. 2000: 3-5.
- Scheel, MLM; Rohrer, M; Huggel, C; Santos Villar, D; Silvestre, E; Huffman, GJ. 2010. Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution (En null).

Hydrology and Earth System Sciences Discussions 7(5): 8545-8586.

Serna, CR. s.f. Aplicación de modelos hidrológicos en zonas con escasa información.

Sharifi, E; Steinacker, R; Saghafian, B. 2016. Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results. *Remote Sensing* 8(2).

Tang, G; Zeng, Z; Long, D; Guo, X; Yong, B; Zhang, W; Hong, Y. 2016. Statistical and Hydrological Comparisons between TRMM and GPM Level-3 Products over a Midlatitude Basin: Is Day-1 IMERG a Good Successor for TMPA 3B42V7? *Journal of Hydrometeorology* 17(1): 121-137.

Taylor, KE. 2005. Taylor Diagram Primer. Working Paper no. January: 1-4.

Tupac Yupanqui, R; Cabrera, J; Rau, P. 2015. Evaluation of TRMM precipitation data for estimation of daily stream flows. *36th IAHR World Congress* 1998(1): 1-13.

US Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers no. March: 155.

Zubieta, R; Getirana, A; Espinoza, JC; Lavado-casimiro, W; Aragon, L. 2016. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. no. December: 1-21.

Zulkafli, Z; Buytaert, W; Onof, C; Manz, B; Tarnavsky, E; Lavado, W; Guyot, J-L. 2014. A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean–Amazon River Basins. *Journal of Hydrometeorology* 15(2): 581-592.

Zulkafli, Z; Buytaert, W; Onof, C; Manz, B; Tarnavsky, E; Lavado, W; Guyot, J. 2014. A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean – Amazon River Basins. 42: 581-592.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Script en R para el modelamiento hidrológico.

```
library(airGR)
rm(list=ls())

#Importamos el archivo de entrada
data=read.csv("C:/Users/Alex Asurza/Google
Drive/Tesis_2/MODELAMIENTO/airGR/periodos/Obs.csv")
data$Qls[data$Qls==0]=NA
data$Qmm[data$Qmm==0]=NA
DatesR=seq.Date(from=as.Date("2000/09/01"), to=as.Date("2015/12/31"), by="1 day")
DatesR=as.POSIXlt(DatesR,tz="UTC-5")
data=cbind(DatesR,data)
summary(data)
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR4J, DatesR =
data$DatesR, Precip = data$P, PotEvap = data$E)
str(InputsModel)

#Insertar periodo de calibracion
Ind_Run <- seq(which(format(data$DatesR, format = "%d/%m/%Y
%H:%M")=="01/09/2001 00:00"), which(format(data$DatesR, format = "%d/%m/%Y
%H:%M")=="31/08/2008 00:00"))
str(Ind_Run)
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J,InputsModel =
InputsModel, IndPeriod_Run = Ind_Run,IniStates = NULL, IniResLevels = NULL,
IndPeriod_WarmUp = NULL)
str(RunOptions)

#Elegir funcion objetivo
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE, InputsModel =
InputsModel, RunOptions = RunOptions, Qobs = data$Qmm[Ind_Run])
str(InputsCrit)
CalibOptions <- CreateCalibOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J, FUN_CALIB =
Calibration_Michel)
str(CalibOptions)
#CalibOptions$StartParamDistrib
#Function Calibration_Michel() allows to run the calibration step. The calibration
algorithm optimises the error criterion selected as objective function.
#This algorithm works in two steps:
```

- #1. a screening is performed using either a rough predefined grid or a list of parameter sets
- #2. a simple steepest descent local search algorithm is performed from the best set of parameters found at the first step

#Simulacion del modelo

```
OutputsCalib <- Calibration_Michel(InputsModel = InputsModel, RunOptions =
RunOptions, InputsCrit = InputsCrit, CalibOptions = CalibOptions, FUN_MOD =
RunModel_GR4J, FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE)
```

#Visualizacion

```
plot_OutputsModel(OutputsModel = OutputsModel, Qobs = data$Qmm[Ind_Run])
```

Anexo 2. Distribución temporal de las variables observadas para el periodo 2000-2015 a paso diario.

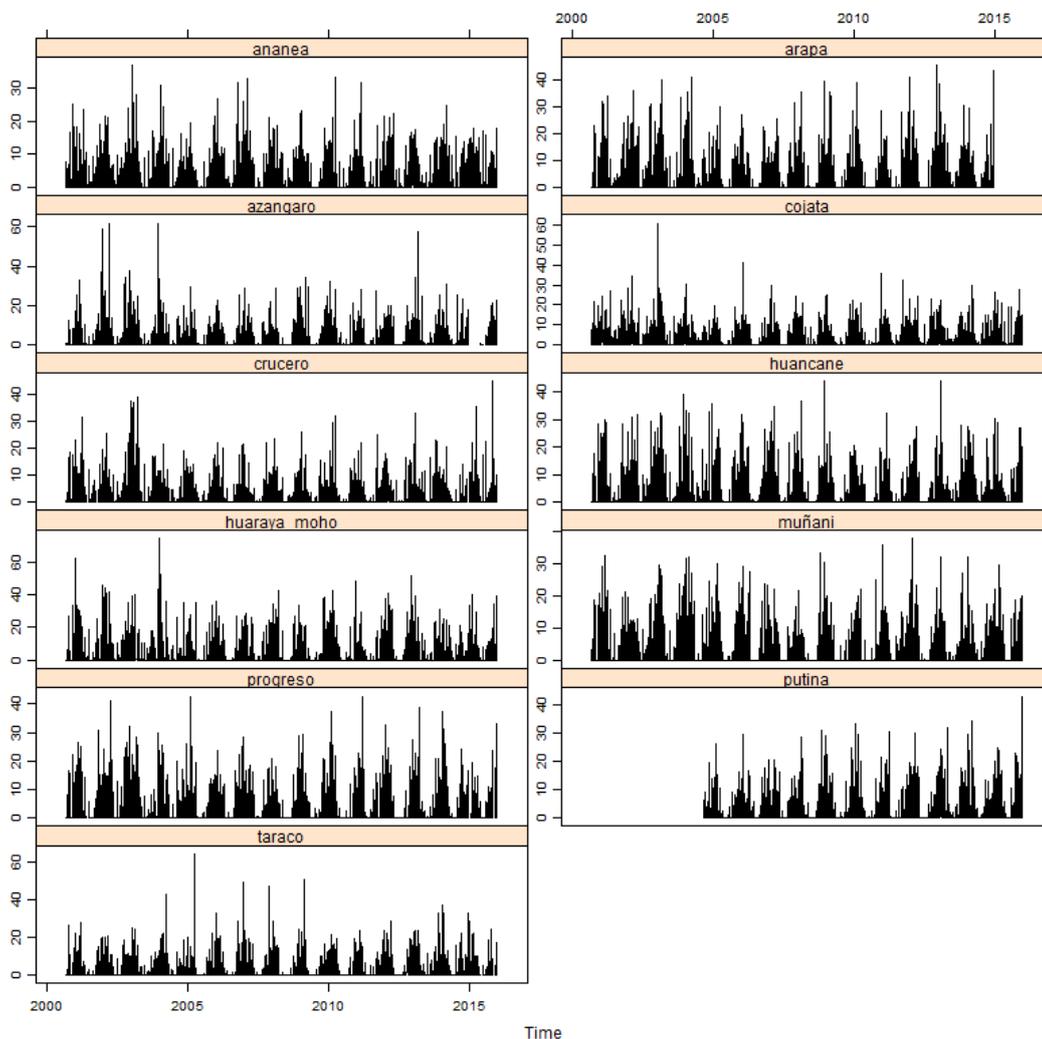


Figura 36: Precipitación diaria para las once estaciones meteorológicas consideradas. Fuente: Elaboración propia.

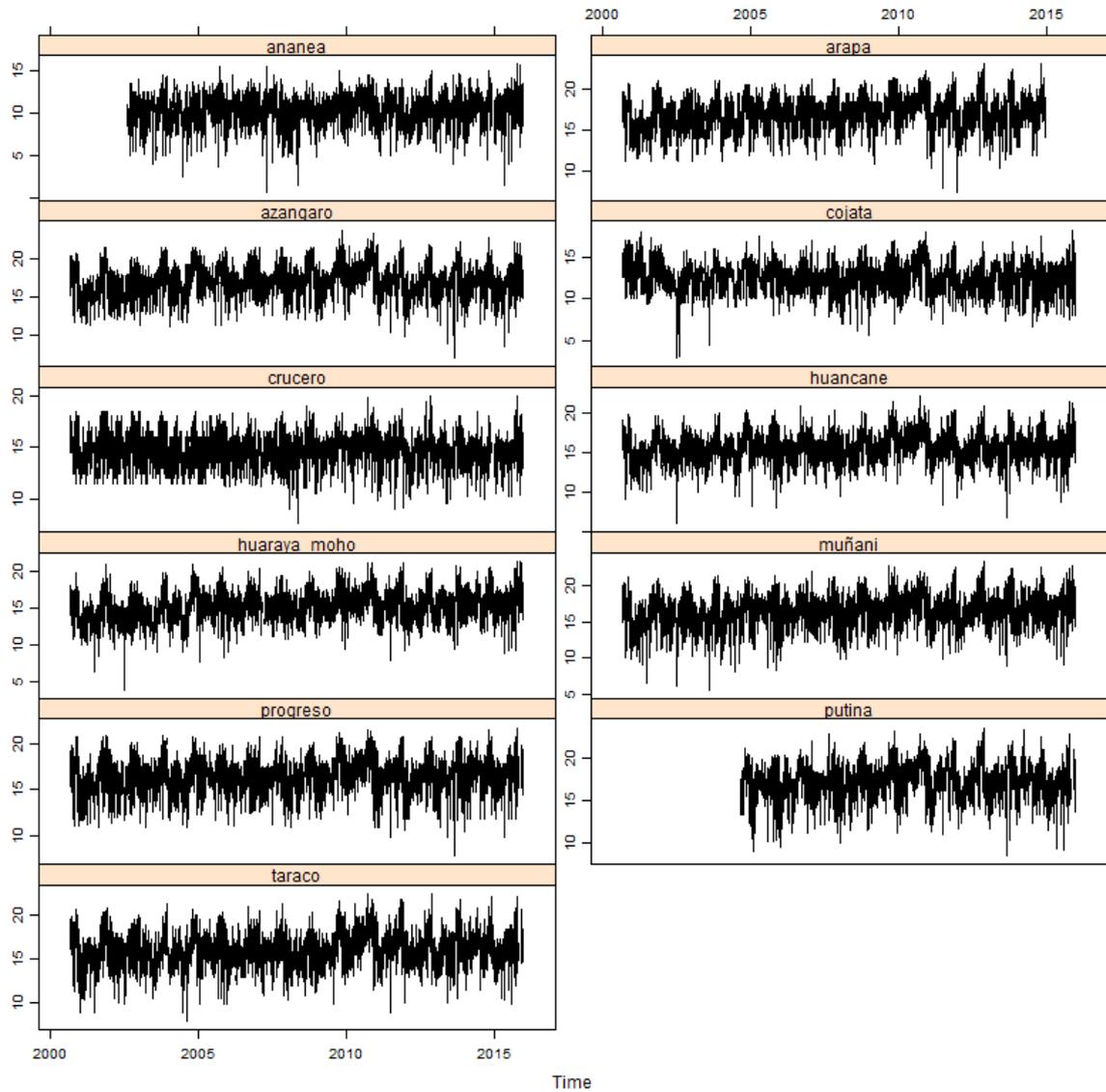


Figura 37: Temperatura máxima diaria para las once estaciones meteorológicas consideradas.

Fuente: Elaboración propia.

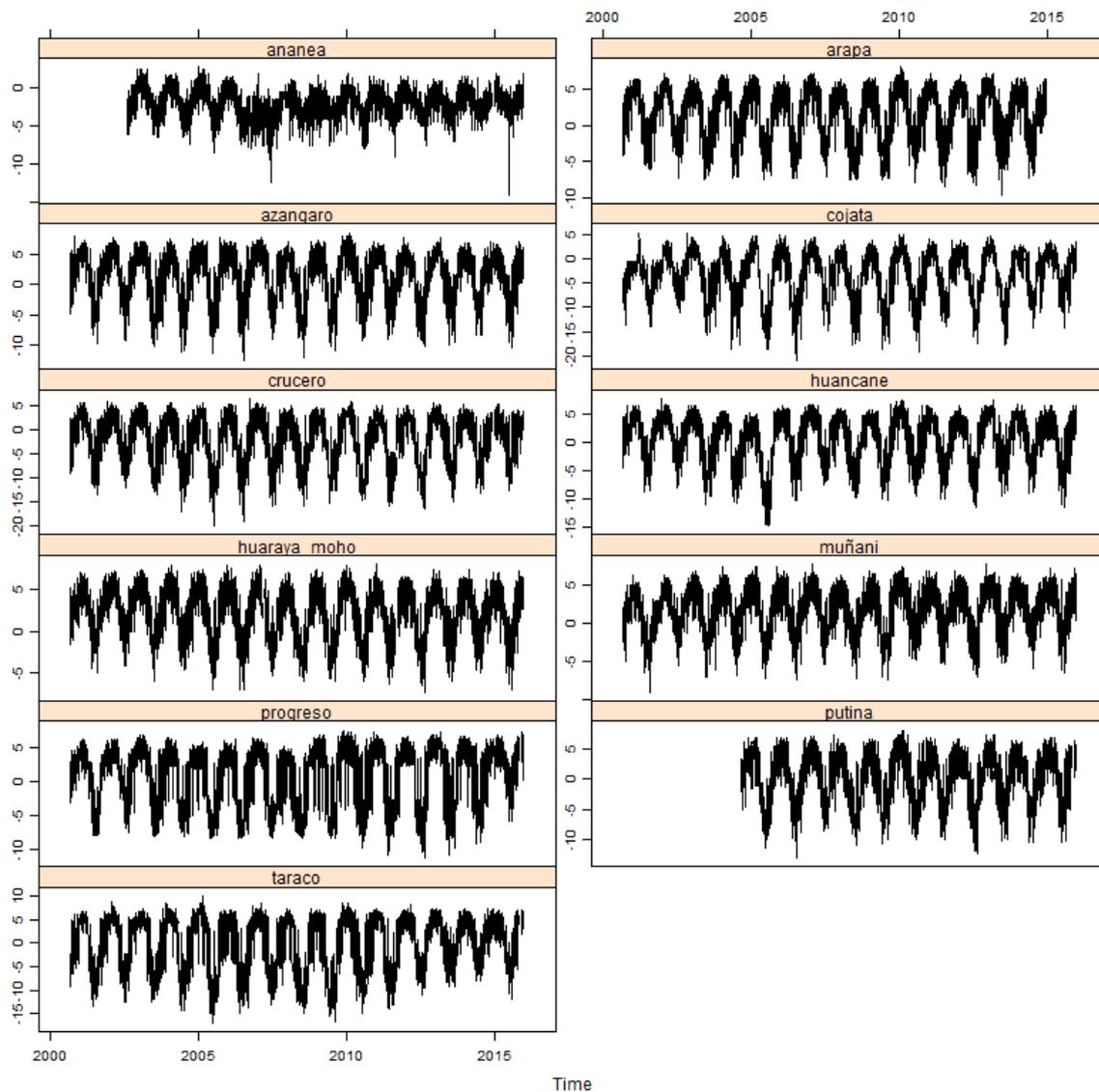


Figura 38: Temperatura mínima diaria para las once estaciones meteorológicas consideradas.
 Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Análisis gráfico y estadístico de la precipitación observada en el periodo 2000-2015

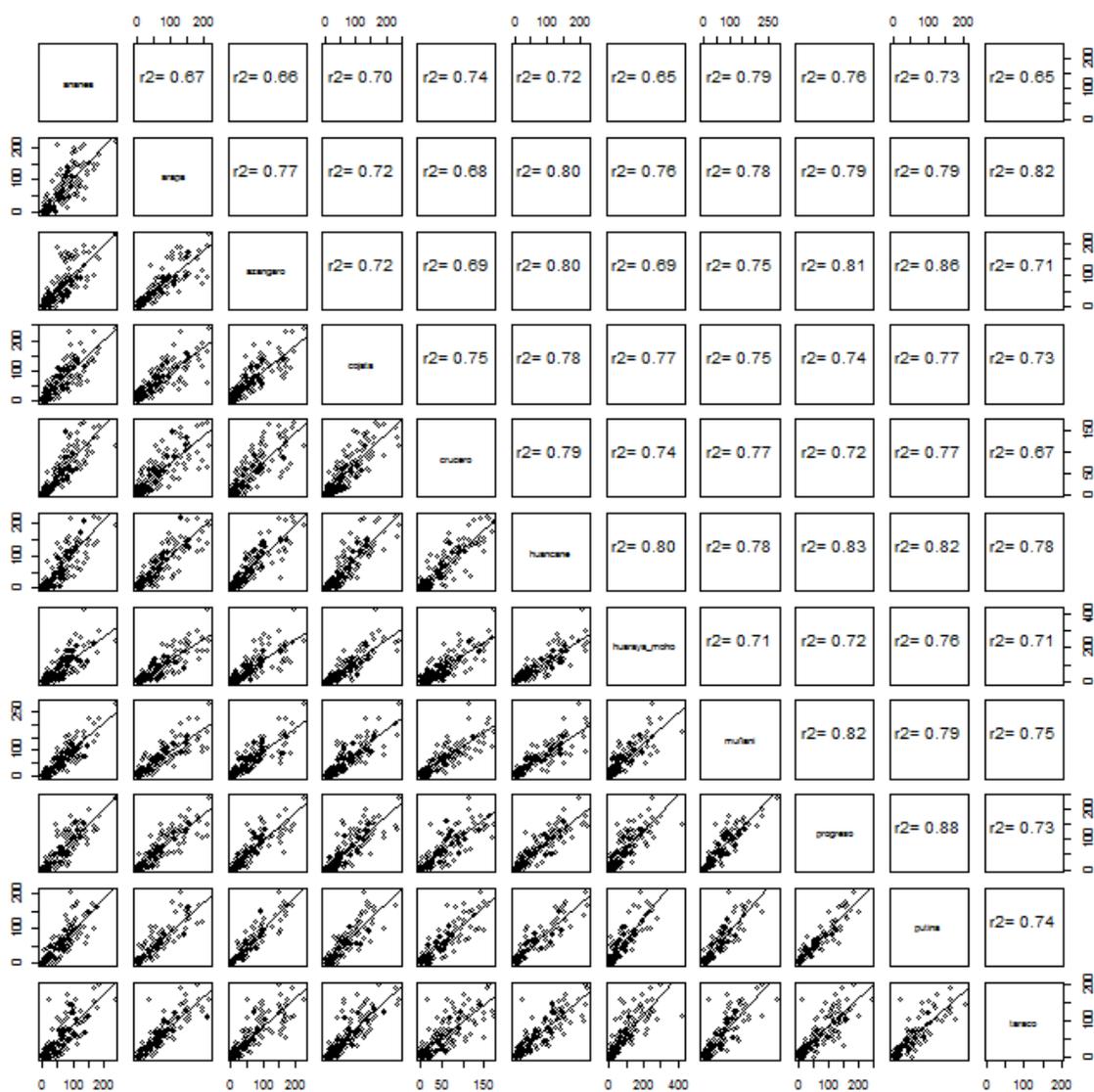


Figura 39: Coeficiente de determinación de la precipitación acumulada mensual entre las once estaciones meteorológicas consideradas.

Fuente: Elaboración propia.

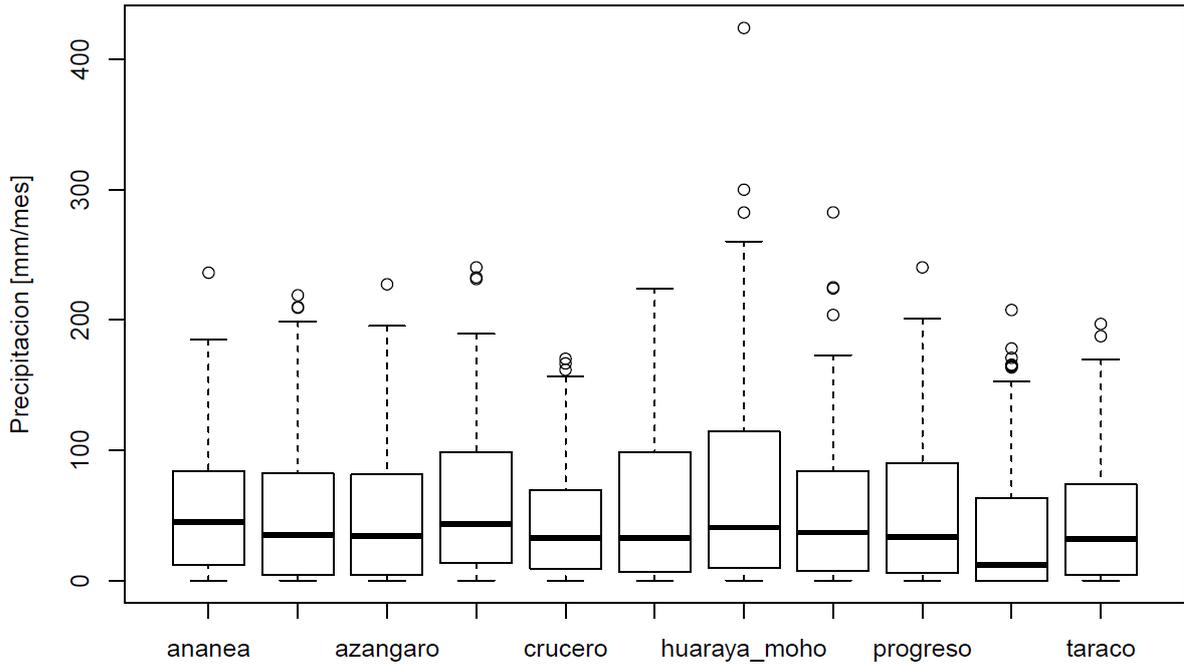


Figura 40: Diagrama de cajas de la precipitación observada mensual por cada estación meteorológica.
Fuente: Elaboración propia.

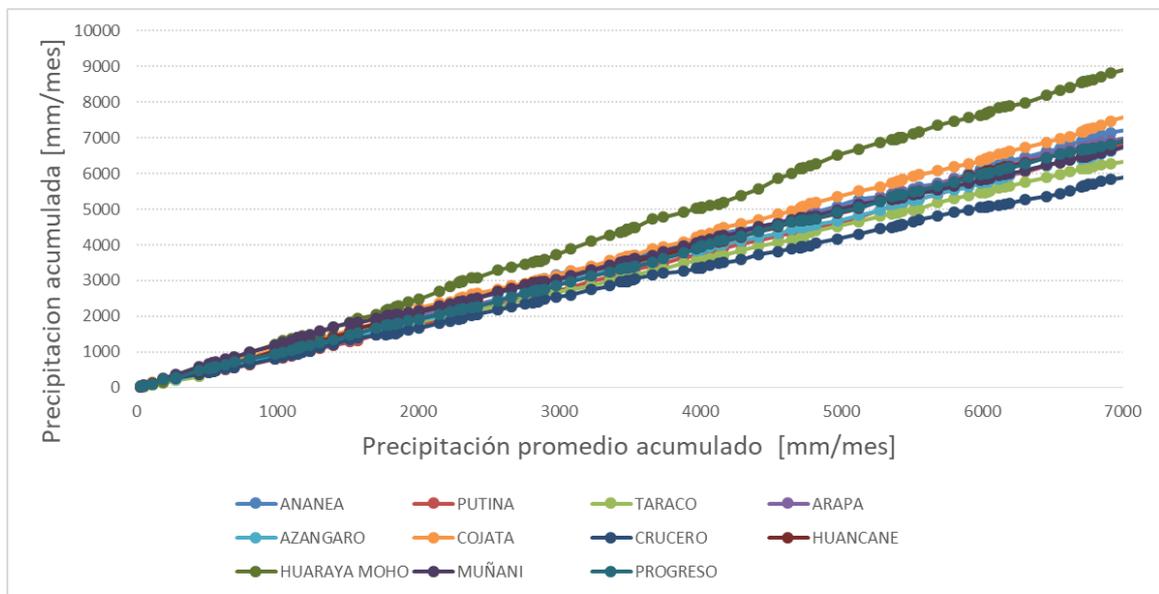


Figura 41: Curva de doble masa entre las lluvias mensuales observadas a partir de las estaciones meteorológicas. Sin presencia de quiebres o saltos notorios evidencian que son datos consistentes.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Evaluación estadística de la precipitación acumulada mensual observada. S(0.05) representa que el test es significativo al 5% de nivel de significancia. NS(0.05) representa que el test no es significativo al 5% de nivel de significancia.

Estación	Homogeneidad (T Student)	Homogeneidad (F Fischer)	% Datos faltantes
Ananea	S(0.05)	S(0.05)	0.04
Arapa	S(0.05)	S(0.05)	6.52
Azangaro	S(0.05)	S(0.05)	3.3
Cojata	S(0.05)	S(0.05)	0.13
Crucero	S(0.05)	S(0.05)	1.77
Huancane	S(0.05)	S(0.05)	0.21
Huaraya_Moho	S(0.05)	S(0.05)	1.34
Muñani	S(0.05)	NS(0.05)	0.23
Progreso	S(0.05)	S(0.05)	1.82
Putina	S(0.05)	S(0.05)	26.09
Taraco	S(0.05)	S(0.05)	1.27

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Análisis gráfico y estadístico de la temperatura mínima y máxima mensual observada en el periodo 2000-2015

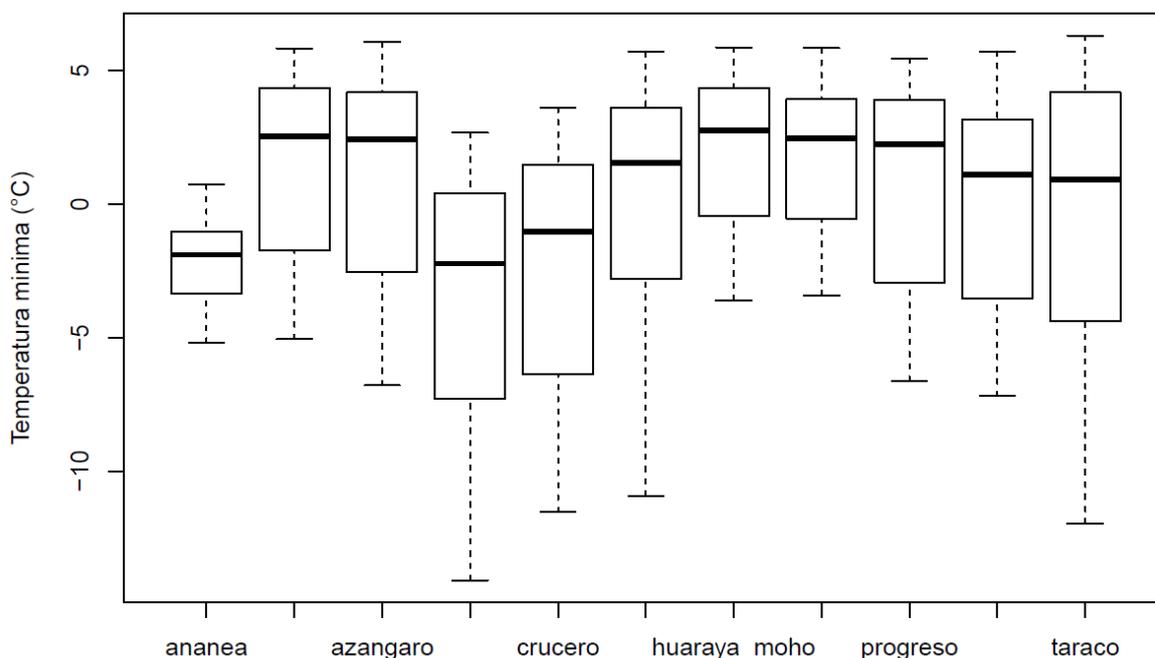


Figura 42: Diagrama de cajas de la temperatura media mínima mensual por cada estación meteorológica.

Fuente: Elaboración propia.

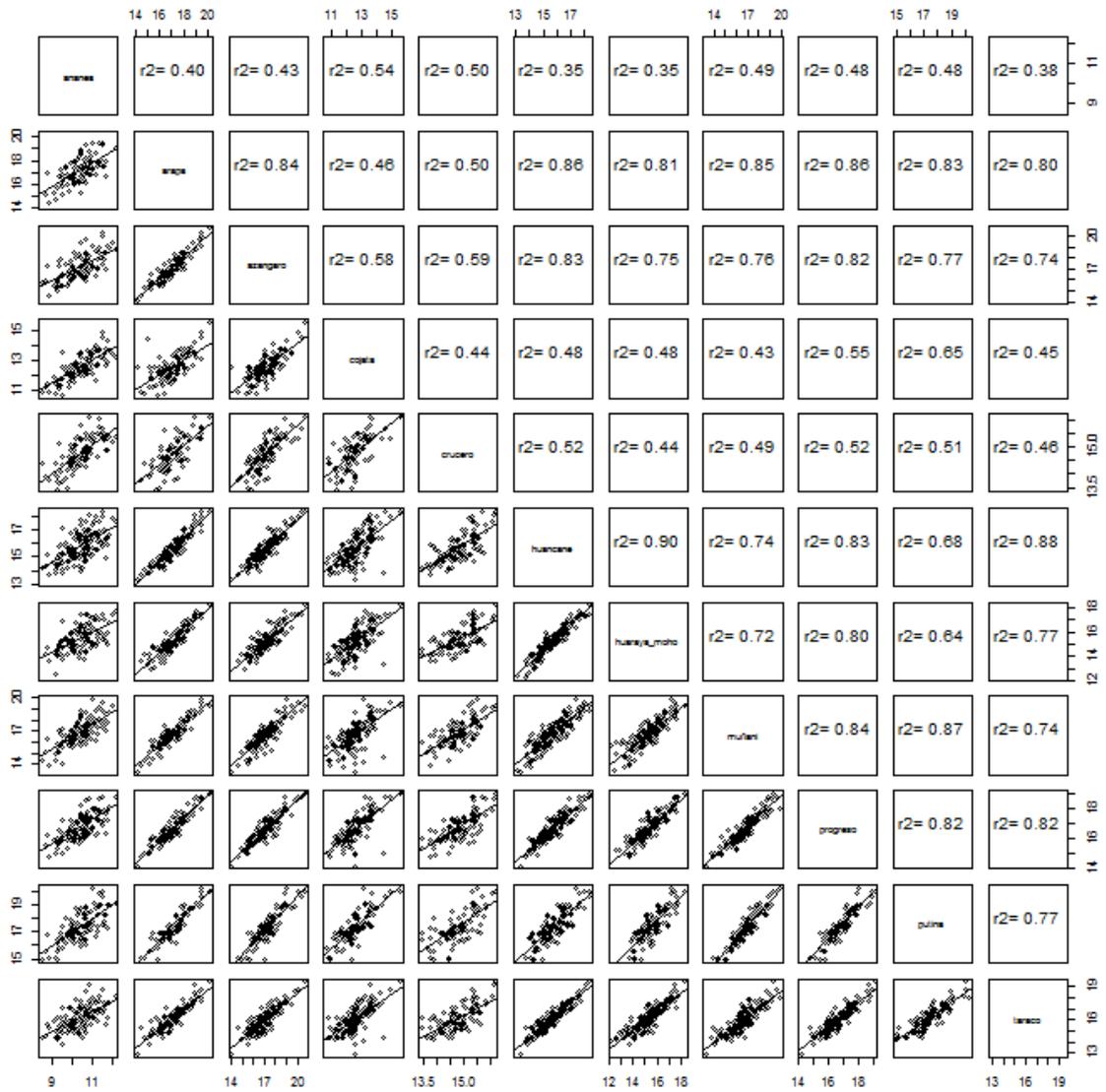


Figura 43: Coeficiente de determinación de la temperatura máxima mensual entre las once estaciones meteorológicas consideradas.
Fuente: Elaboración propia.

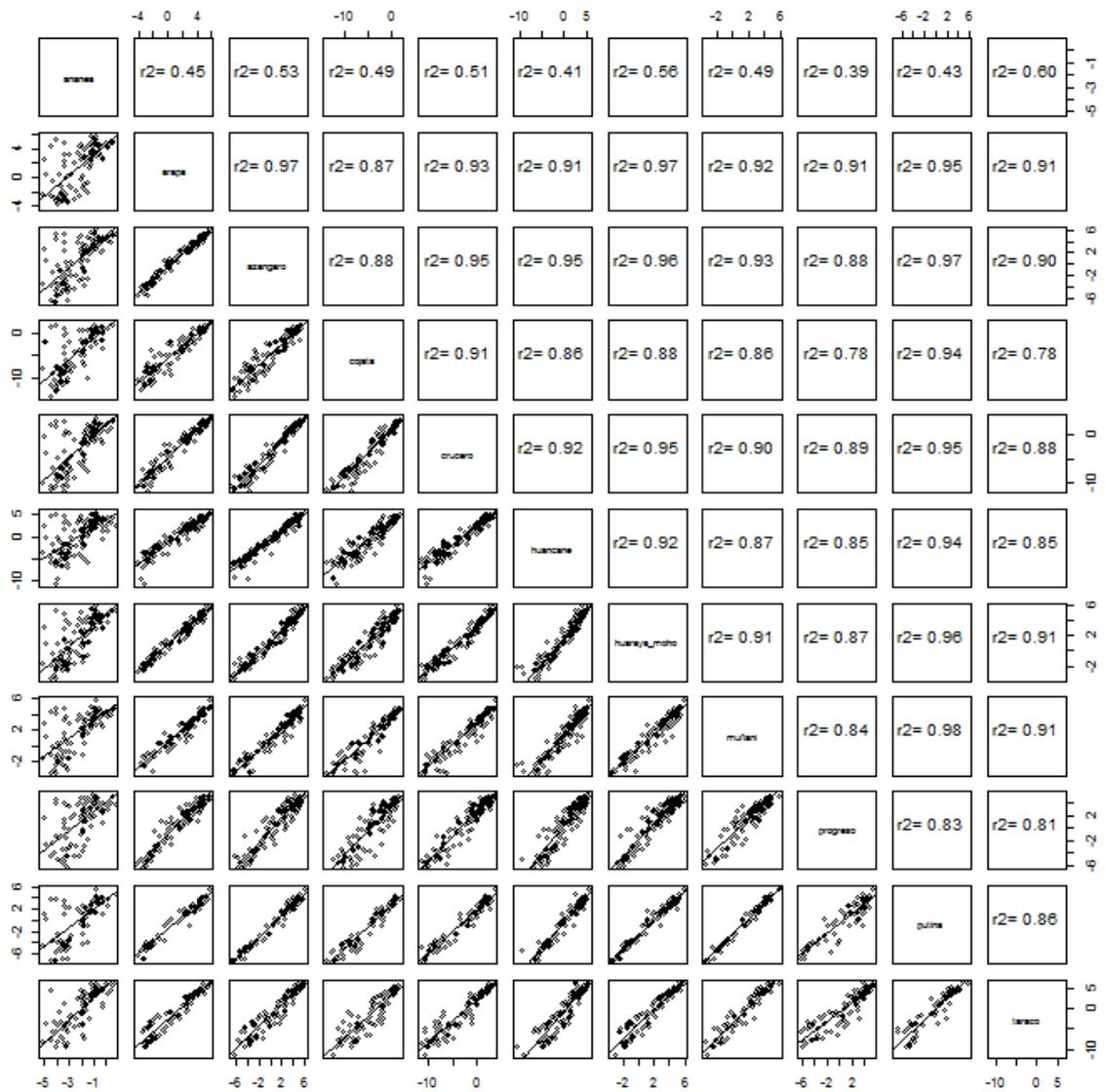


Figura 44: Coeficiente de determinación de la temperatura mínima mensual entre las once estaciones meteorológicas consideradas.
Fuente: Elaboración propia.

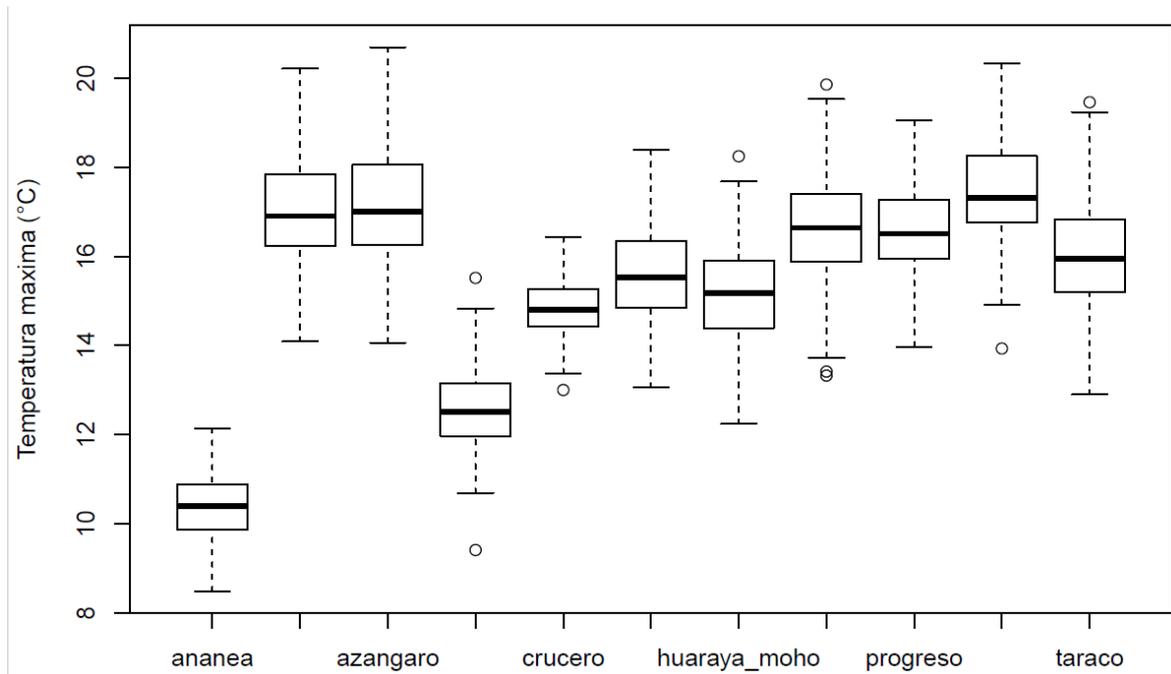


Figura 45: Diagrama de cajas de la temperatura media máxima mensual por cada estación meteorológica.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Evaluación estadística de la temperatura mínima mensual observada. S(0.05) representa que el test es significativo al 5% de nivel de significancia. NS(0.05) representa que el test no es significativo al 5% de nivel de significancia.

Estación	Homogeneidad (T Student)	Homogeneidad (F Ficher)	% Datos faltantes
Ananea	NS(0.05)	NS(0.05)	13.71
Arapa	S(0.05)	S(0.05)	7.62
Azangaro	S(0.05)	S(0.05)	0.46
Cojata	S(0.05)	S(0.05)	1.73
Crucero	S(0.05)	S(0.05)	1.61
Huancane	S(0.05)	S(0.05)	0.38
Huaraya_Moho	S(0.05)	S(0.05)	1.52
Muñani	S(0.05)	S(0.05)	1.3
Progreso	S(0.05)	NS(0.05)	2.25
Putina	S(0.05)	S(0.05)	27.5
Taraco	S(0.05)	S(0.05)	3.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Evaluación estadística de la temperatura máxima mensual observada. S(0.05) representa que el test es significativo al 5% de nivel de significancia. NS(0.05) representa que el test no es significativo al 5% de nivel de significancia.

Estación	Homogeneidad (T Student)	Homogeneidad (F Fischer)	% Datos faltantes
Ananea	S(0.05)	NS(0.05)	14.46
Arapa	NS(0.05)	S(0.05)	8.2
Azangaro	S(0.05)	NS(0.05)	1.64
Cojata	S(0.05)	S(0.05)	1.38
Crucero	NS(0.05)	S(0.05)	4.59
Huancane	NS(0.05)	S(0.05)	0.21
Huaraya_Moho	NS(0.05)	S(0.05)	1.11
Muñani	NS(0.05)	S(0.05)	0.55
Progreso	NS(0.05)	S(0.05)	1.12
Putina	S(0.05)	S(0.05)	27.23
Taraco	NS(0.05)	S(0.05)	1.55

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5. Análisis gráfico y estadístico de los caudales medios mensuales observados en el periodo 2000-2015

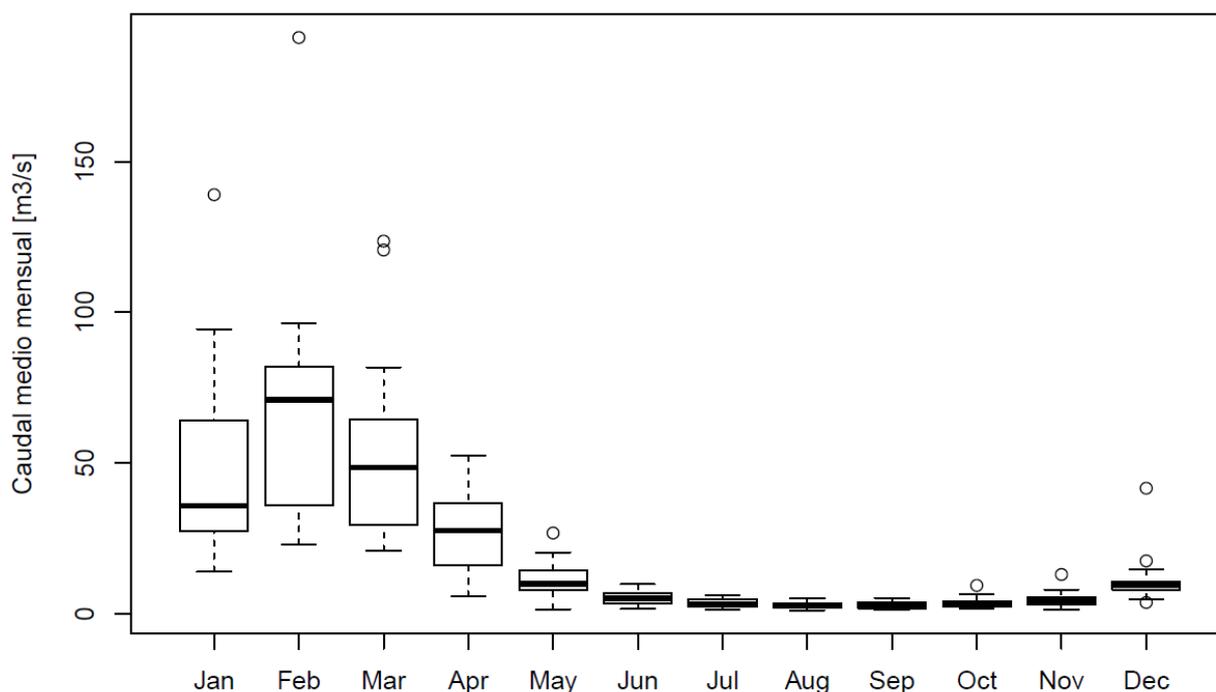


Figura 46: Diagrama de cajas de los caudales medios para cada mes según el periodo considerado.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Evaluación estadística de los caudales medios mensuales observados. S(0.05) representa que el test es significativo al 5% de nivel de significancia.

Estación	Homogeneidad (T Student)	Homogeneidad (F Ficher)	% Datos faltantes
Puente Huancané	S(0.05)	S(0.05)	0.05

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6. Análisis exploratorio de la precipitación areal observada y de los productos de precipitación satelital TRMM y GPM.

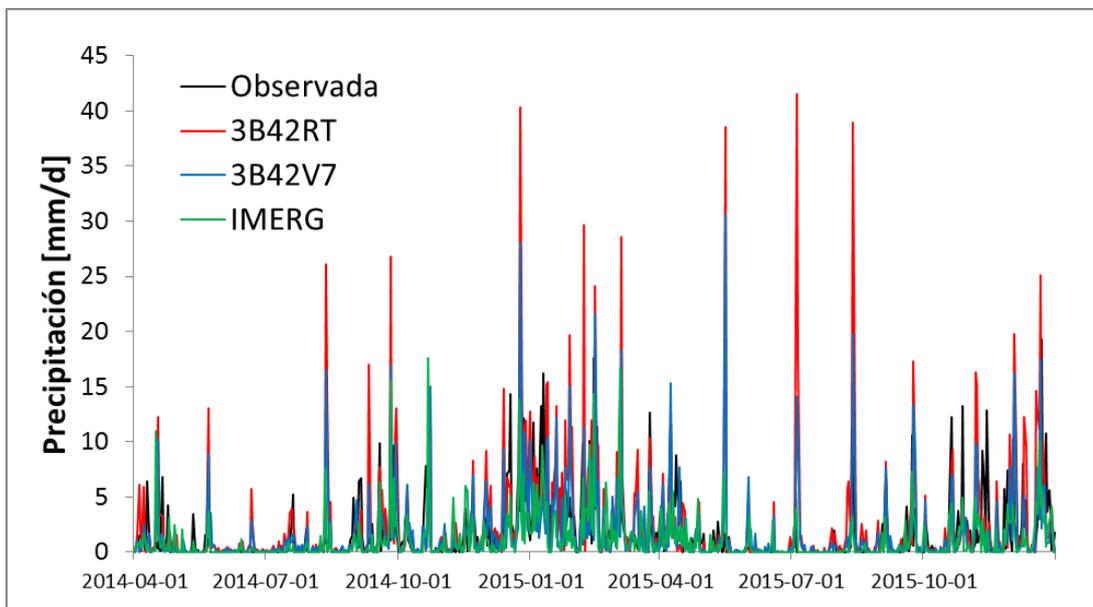


Figura 47: Serie de tiempo de la precipitación observada y los productos 3B42RT, 3B42RT e IMERG para el periodo Abril 2014 – Diciembre 2015.

Fuente: Elaboración propia.

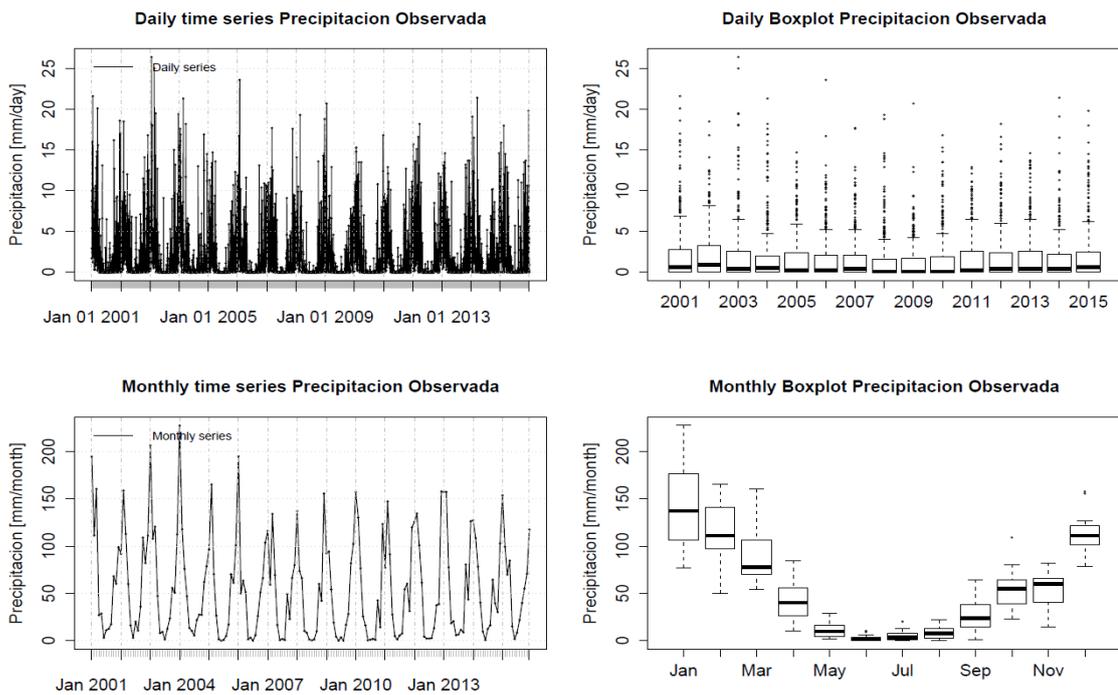


Figura 48: Visualización diaria y mensual de la precipitación observada. Hacia el lado izquierdo la serie de tiempo se muestra para el periodo Enero 2001 – Diciembre 2015. Hacia el lado derecho, el diagramas de cajas muestra la tendencia de lluvias y presencia de posibles anómalos.

Fuente: Elaboración propia.

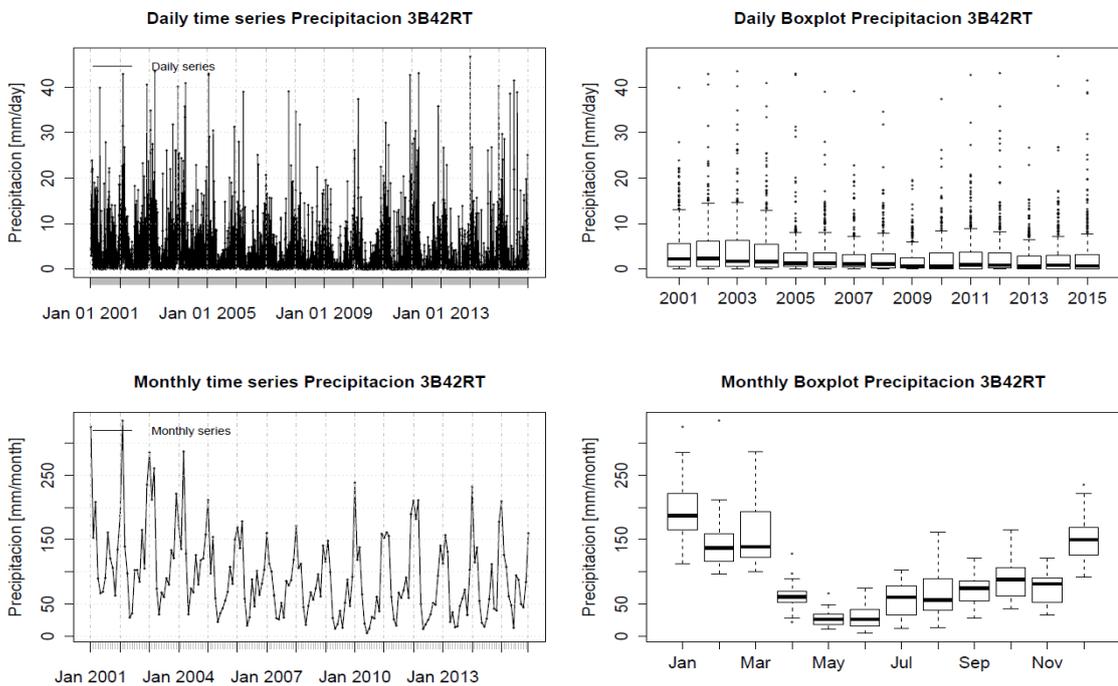


Figura 49: Visualización diaria y mensual el producto 3B42RT. Hacia el lado izquierdo la serie de tiempo se muestra para el periodo Enero 2001 – Diciembre 2015. Hacia el lado derecho, el diagramas de cajas muestra la tendencia de lluvias y presencia de posibles anómalos.

Fuente: Elaboración propia.

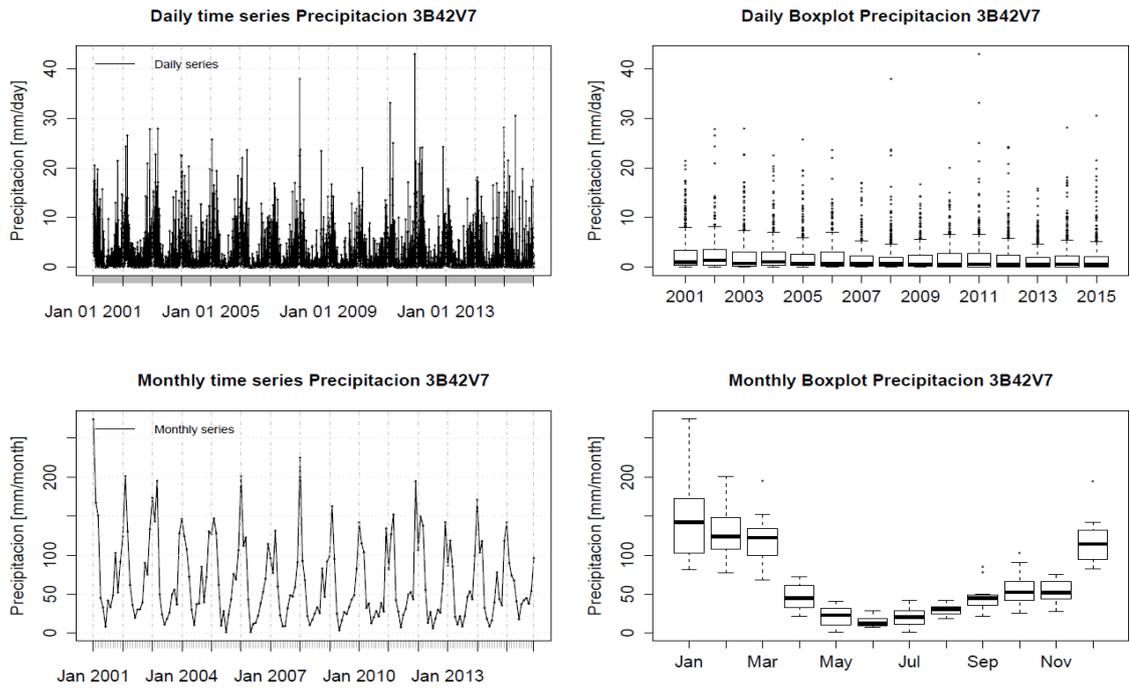


Figura 50: Visualización diaria y mensual el producto 3B42V7. Hacia el lado izquierdo la serie de tiempo se muestra para el periodo Enero 2001 – Diciembre 2015. Hacia el lado derecho, el diagramas de cajas muestra la tendencia de lluvias y presencia de posibles anómalos.
Fuente: Elaboración propia.

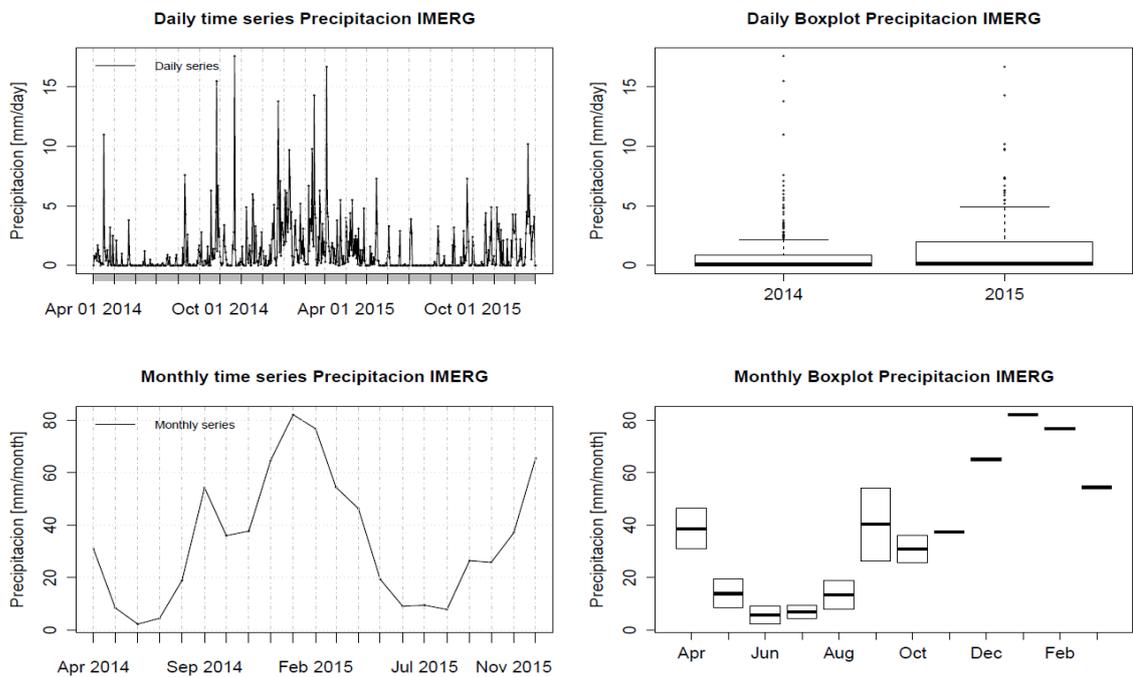


Figura 51: Visualización diaria y mensual el producto IMERG. Hacia el lado izquierdo la serie de tiempo se muestra para el periodo Abril 2014 – Diciembre 2015. Hacia el lado derecho, el diagramas de cajas muestra la tendencia de lluvias y presencia de posibles anómalos.
Fuente: Elaboración propia.

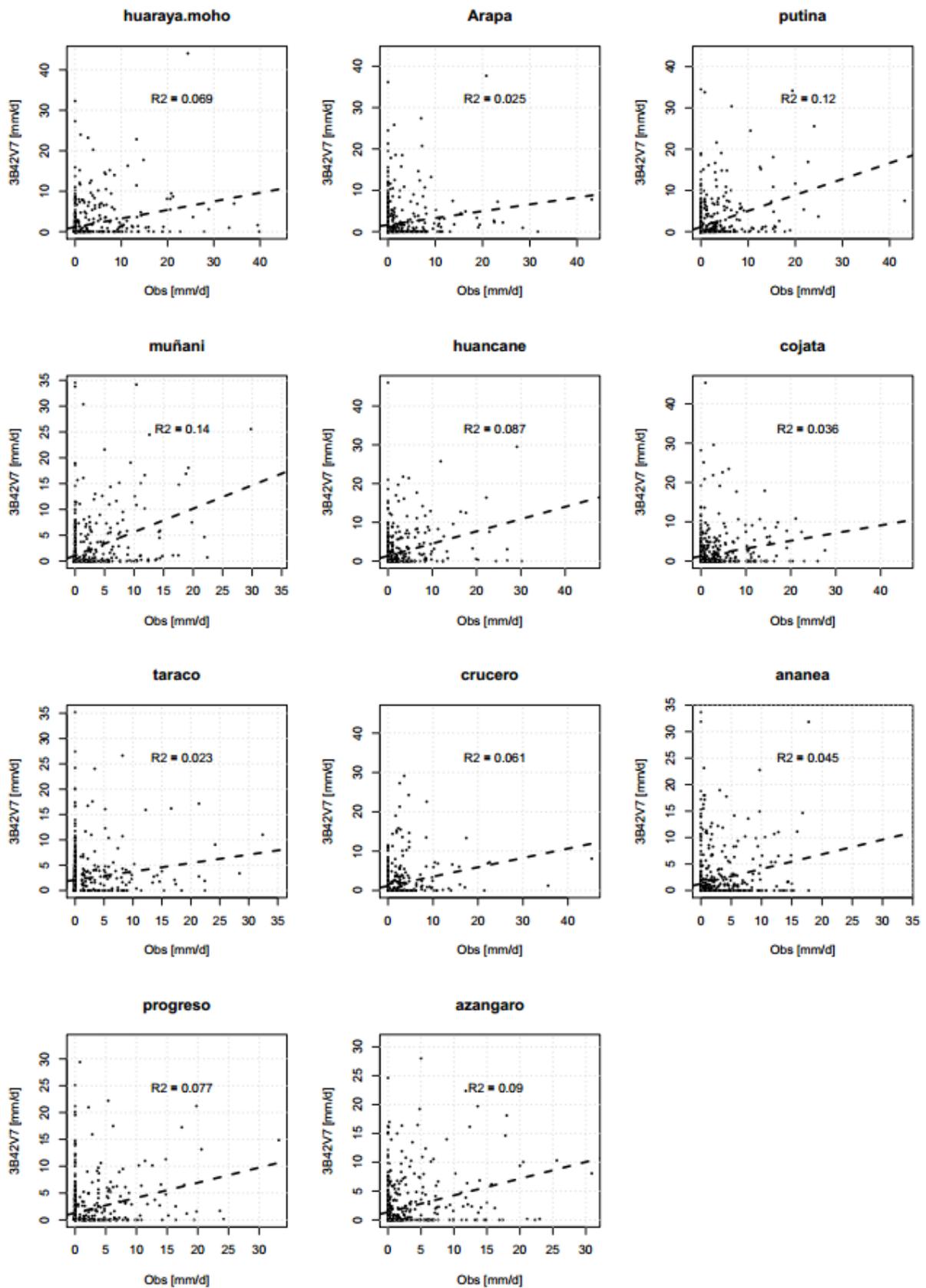


Figura 52: Regresión lineal de cada estación meteorológica considerada. Precipitación observada respecto al producto 3B42V7.

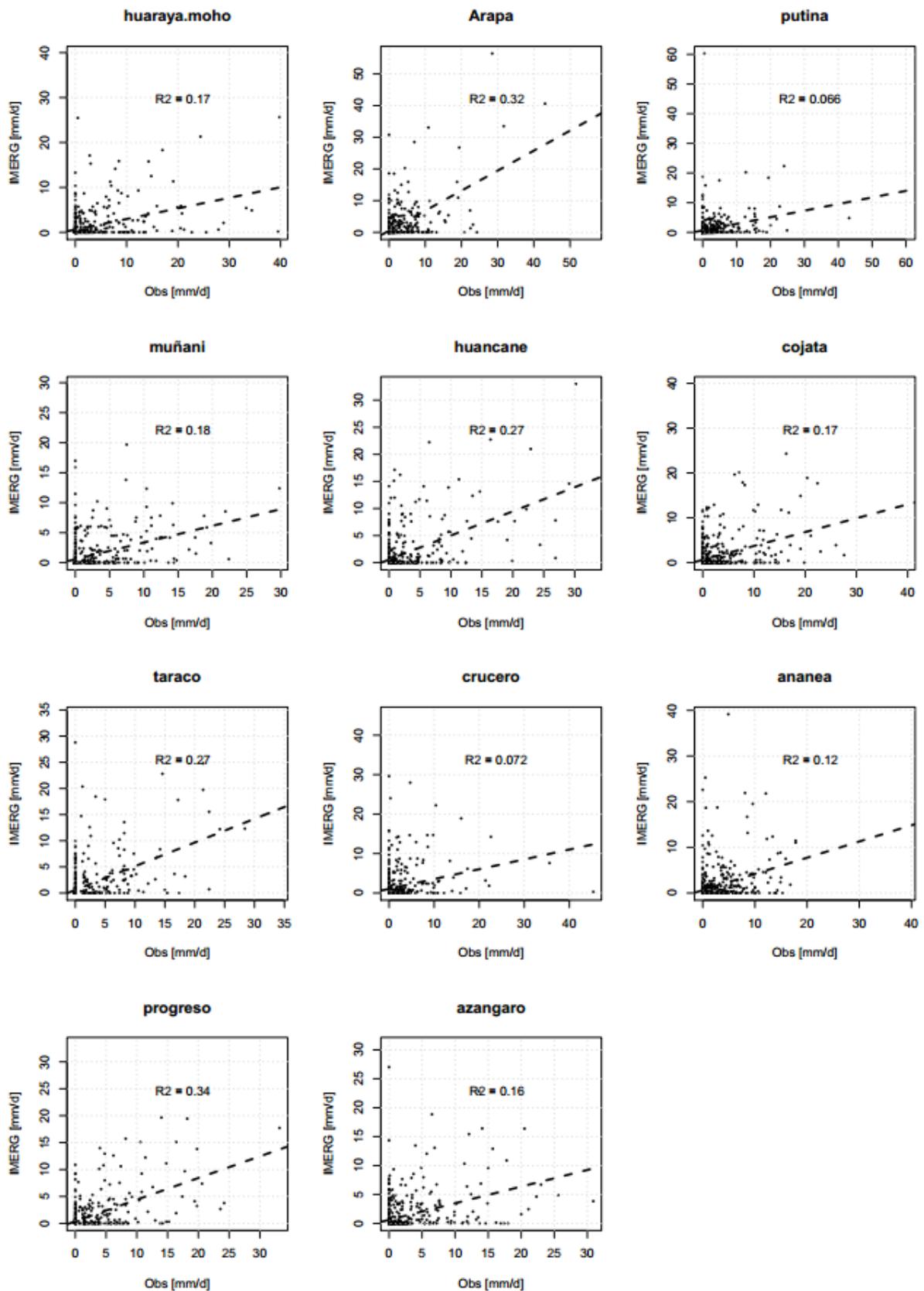


Figura 53: Regresión lineal de cada estación meteorológica considerada. Precipitación observada respecto al producto IMERG.

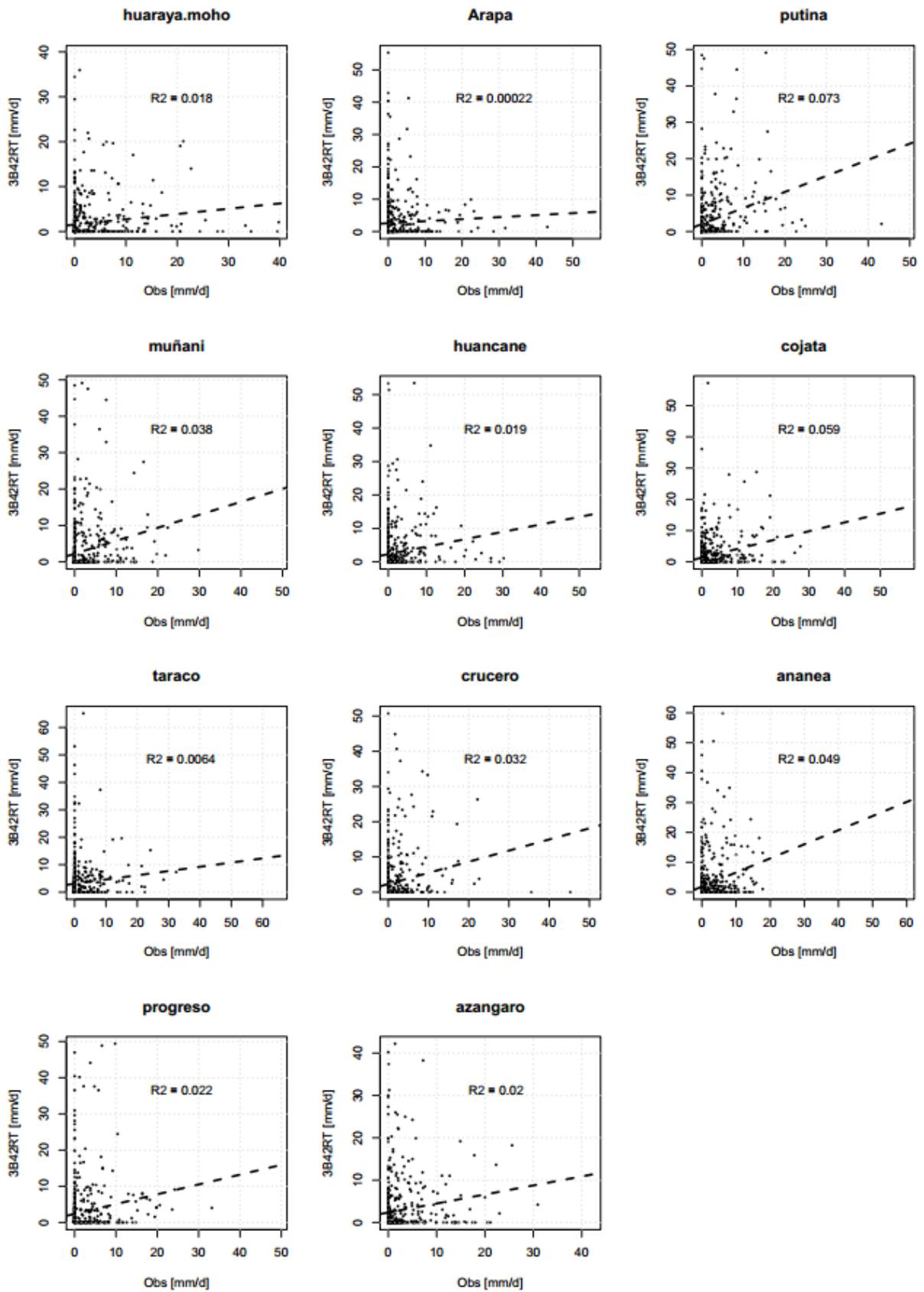


Figura 54: Regresión lineal de cada estación meteorológica considerada. Precipitación observada respecto al producto 3B42RT.

Tabla 13: Resumen de los estadísticos descriptivos para la precipitación diaria observada y satelital. Observado, 3B42RT y 3B42V7 para el periodo 2000-2015 e IMERG para el periodo 2014-2015.

Observado	3B42RT	3B42V7	IMERG
Min. : 0.000	Min. : 0.000	Min. : 0.000	Min. : 0.000
1st Qu.: 0.000	1st Qu.: 0.300	1st Qu.: 0.200	1st Qu.: 0.000
Median : 0.400	Median : 1.100	Median : 0.700	Median : 0.100
Mean : 1.822	Mean : 3.163	Mean : 2.191	Mean : 1.121
3rd Qu.: 2.400	3rd Qu.: 4.000	3rd Qu.: 2.700	3rd Qu.: 1.400
Max. :26.400	Max. :46.800	Max. :42.900	Max. :17.600

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7. Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día para el cálculo de la evapotranspiración diaria por el método de Hargreaves

Tabla 14: Radiación solar extraterrestre para el hemisferio norte y sur.

Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	4.1	6.4	9.5	13.1	13.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	46.1	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Fuente: Allen et al. (1998); citado en Sánches (2000).

Anexo 8. Tablas resumen de la comparación de los productos satelitales de precipitación y resultados del modelamiento hidrológico.

Tabla 15: Métricas de desempeño de los productos TMPA y GPM evaluados en el periodo Abril 2014 – Diciembre 2015

	3B42V7	3B42RT	IMERG
CC	0.35	0.32	0.62
PBIAS	7.90	55.60	-31.80
RMSE	3.61	5.12	2.32
R²	0.12	0.10	0.38

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Métricas de desempeño por cada producto utilizado en el modelamiento hidrológico para el Escenario I.

	Precipitación	CC	PBIAS	NSE	RMSE	NSEL	R²
Calibración [2001-2008]	Observado	0.94	-1.80	0.89	11.20	0.87	0.89
Validación periodo 1 [2008-2014]	Observado	0.89	-5.20	0.79	14.46	0.86	0.80
	3B42RT	0.60	119.90	-1.33	47.64	0.43	0.36
	3B42V7	0.65	22.20	0.32	25.83	0.80	0.42
Validación periodo 2 [2014-2015]	Observado	0.93	-12.00	0.84	8.09	0.89	0.86
	3B42RT	0.62	131.10	-2.91	40.42	-0.07	0.38
	3B42V7	0.80	7.10	0.64	12.22	0.62	0.65
	GPM	0.77	-64.40	0.11	19.32	0.56	0.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Métricas de desempeño por cada producto utilizado en el modelamiento hidrológico para el Escenario II. a) Basado en el producto 3B42RT, b) basado en el producto 3B42V7.

(a)	Precipitación	CC	PBIAS	NSE	RMSE	NSEL	R²
Calibración [2001-2008]	3B42RT	0.72	6.60	0.51	23.50	0.63	0.51
Validación periodo 1 [2008-2014]	3B42RT	0.64	-30.8	0.33	25.53	0.80	0.41
	3B42RT	0.81	-26.90	0.53	13.94	0.76	0.66
Validación periodo 2 [2014-2015]	IMERG	0.34	-82.00	-0.31	23.35	-0.43	0.12
(b)	Precipitación	CC	PBIAS	NSE	RMSE	NSEL	R²
Calibración [2001-2008]	3B42V7	0.80	-1.60	0.64	20.17	0.83	0.64
Validación periodo 1 [2008-2014]	3B42V7	0.65	-12	0.42	23.78	0.84	0.43
	3B42V7	0.84	-30.10	0.59	13.10	0.79	0.70
Validación periodo 2 [2014-2015]	IMERG	0.72	-69.50	0.03	20.14	0.41	0.51

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Análisis comparativo de la precipitación observada por cada estación meteorológica respecto a los productos IMERG, 3B42RT y 3B42V7. Comparación tomada a partir de la extracción estación-píxel.

Métricas	Huaraya Moho	Arapa	Putina	Muñani	Huancané	Cojata	Taraco	Crucero	Ananea	Progreso	Azángaro
IMERG											
PBIAS	-47	-7.3	-40.2	-34.2	-17.7	-38.4	-13.6	5.4	-30.7	-36.4	-37
R²	0.17	0.35	0.06	0.18	0.27	0.15	0.27	0.07	0.13	0.31	0.13
RMSE	4.83	3.91	4.70	3.44	3.56	4.16	3.50	4.37	3.80	3.28	3.92
3B42RT											
PBIAS	-13.9	68.8	63.9	82.4	80.6	-5.5	125.3	126.4	53.4	78.2	65.6
R²	0.02	0.00	0.07	0.04	0.02	0.05	0.01	0.03	0.05	0.02	0.01
RMSE	6.19	7.33	6.85	6.92	6.81	5.48	7.46	7.67	7.06	7.31	6.72
3B42V7											
PBIAS	-24.3	20.4	7.2	19.4	23.7	-18.6	62.2	20.1	1.8	14	12
R²	0.03	0.00	0.07	0.04	0.02	0.05	0.01	0.03	0.04	0.02	0.07
RMSE	6.00	5.81	5.21	5.17	5.27	5.21	5.40	4.99	4.82	5.07	4.66

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Parámetros calibrados para el modelamiento hidrológico en base a la precipitación observada y a los productos 3B42RT y 3B42V7.

Parámetros GR4J		X1	X2	X3	X4
Observado	Real	330.30	-2.53	51.42	3.35
	Transformada	5.80	-1.66	3.94	1.05
3B42RT	Real	134.44	-115.59	878.84	2.17
	Transformada	4.90	-5.44	6.78	0.51
3B42V7	Real	20.18	-29.26	357.72	2.19
	Transformada	3.00	-4.07	5.88	0.52

Fuente: Elaboración propia.