PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERIA

PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN SATELITAL DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL EN ZONAS DE TOPOGRAFÍA COMPLEJA

RUTH ARACELLY MÉNDEZ RIVAS

Tesis para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor supervisor:

FRANCISCO SUÁREZ POCH

Santiago de Chile, Noviembre, 2016

© 2016, Ruth Aracelly Méndez Rivas

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERIA

PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN SATELITAL DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL EN ZONAS DE TOPOGRAFÍA COMPLEJA

RUTH ARACELLY MÉNDEZ RIVAS

Tesis presentada a la comisión integrada por los profesores:

FRANCISCO SUÁREZ POCH

BONIFACIO FERNÁNDEZ

LINA MABEL CASTRO HEREDIA

AMADOR MIGUEL GUZMÁN CUEVAS

Para completar las exigencias del grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, noviembre, 2016

A Dios, a mis hijas Marcela y Sofía, mis padres y mis hermanos, que han sido el pilar fundamental en todo lo que soy.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por acompañarme y darme fortaleza durante este largo proceso lleno de experiencias e invaluables momentos que me han permitido crecer como persona, hija, madre y profesional. A mis hijas Marcela y Sofía por su ternura y cariño expresado en todo momento, a mis padres que son el pilar sobre el cual me he forjado, y a mis hermanos que me han apoyado incondicionalmente en todo momento.

A Reiner Palomino y Jorge Urrutia que siempre estuvieron conmigo en todo momento, y formaron parte de mi historia en esta importante etapa de mi vida, como amigos y como profesionales, a través de su apoyo incondicional y constante.

A Sebastián, Anahí, Lenim, Tamara, Lina, Jasón y todos los compañeros con los cuales tuve la fortuna de compartir, por su apoyo y palabras de ánimo.

A mi profesor supervisor, Francisco Suárez P., por su apoyo en este trabajo y por haber confiado en mí. También agradecer al Profesor Bonifacio Fernández por su aporte, guía y buena disposición en todo momento del trabajo de investigación.

A la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID) que a través del Programa de Becas de Cooperación Horizontal, me otorgó el financiamiento para realizar éste postgrado.

Al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la PUC, profesores, alumnos de postgrado y personal administrativo.

TABLADE CONTENIDOS

Página
AGRADECIMIENTOS iv
TABLADE CONTENIDOS v
ÍNDICE DE TABLAS vii
RESUMEN xiii
1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Hipótesis de investigación 5
1.2. Objetivos 5
1.3. Estructura de esta tesis 6

2. MATERIALES Y MÉTODOS 6

2.1. Metodología 6
2.1.1. Análisis de la calidad de datos pluviométricos 7
2.1.2. Evaluación estadística 11
2.1.3. Técnicas de corrección de sesgo 12
2.1.3.1. ISIMIP 13
2.1.3.2. SCALING 15
2.2. Datos pluviométricos y satelitales 16
2.2.1. Datos pluviométricos 16
2.2.2. Productos de precipitación satelital 17
2.2.3. Zona de estudio 28

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 29

3.1. Análisis calidad de datos pluviométricos 29

3.2. Evaluación de datos de precipitación satelital y técnicas de corrección de sesgo 39
3.2.1. CMORPH 39
3.2.2. CHIRPS 55
3.2.3. IMERG 68
4. RESUMEN Y CONCLUSIONES 78
4.1. Evaluación de las estimaciones de precipitación satelital 78
4.2. Evaluación de las técnicas de corrección de sesgo 79
BIBLIGRAFIA 81
Anexos 87
Anexo A: Curvas de doble masa 88
Anexo B: Resultado corrección de sesgo 89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Métricas estadísticas. 12
Tabla 2-2: Satélites meteorológicos GEO operativos en 2016. 19
Tabla 2-3: Satélites meteorológicos LEO operativos en 2016. 19
Tabla 2-4: Datos de entrada del algoritmo IMERG. 22
Tabla 2-5: Características de los datos de precipitación IMERG. 23
Tabla 2-6: Datos de entrada del algoritmo CMORPH. 24
Tabla 2-7: Características de los datos de precipitación CMORPH. 25
Tabla 2-8: Datos de entrada del algoritmo CHIRPS. 27
Tabla 2-8: Características de los datos de precipitación CHIRPS. 27
Tabla 3-1: Estaciones pluviométricas con porcentaje de datos disponibles del Red 1. 30
Tabla 3-2: Estaciones pluviométricas con porcentaje de datos disponibles del Red 2. 31
Tabla 3-3: Parámetros estadísticos de las series originales y reconstruidas de la Red1. 33
Tabla 3-4: Parámetros estadísticos de las series originales y reconstruidas de la Red 2. 34
Tabla 3-5: Datos cuantitativos descriptivos de estación pluviométrica Embalse Pangue. 36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Esquema metodológico.....6
Figura 2-2: Red Internacional de Satélites de la misión GPM. 21
Figura 2-3: Áreas cubiertas por el TRMM (amarillo) y por el GPM Core (azul). .21
Figura 2-4: Mapa de ubicación del área de estudio. 28
Figura 3-1: Red de estaciones pluviométricas utilizadas para evaluar las estimaciones de precipitación satelital. A) Red1, utilizado para evaluar los productos satelitales CMORPH y CHIRPS; y B) Red2, utilizado para evaluar el IMERG. 29
Figura 3-2 Serie temporal de precipitación (izquierda) y diagrama de cajaen la estación pluviométrica embalse Pangue.....36
Figura 3-3 Autocorrelaciones de las series temporales de precipitación 37
Figura 3-4: Curvas de doble masa para el periodo 2006-2015. Línea continua es la regresión entre la precipitación acumulada de referencia y la precipitación acumulada de la estación en análisis. Puntos representan la tendencia lineal.....38
Figura 3-5: Curvas de doble masa para el periodo 2014-2015.....39
Figura 3-6: Indicadores estadísticos al comparar el CMORPH con datos pluviométricos nivel anual. 41
Figura 3-7: Indicadores estadísticos al comparar el CMORPH con los datos pluviométricos monitoreados durante el invierno para el año 2015. 43
Figura 3-8: Indicadores estadísticos al comparar el CMORPH con los datos pluviométricos monitoreados durante el verano para el año 2015.....44
Figura 3-9: Desempeño de las técnicas de corrección de sesgo en los resultados de precipitación satelital obtenidos con el CMORPH. a) Sesgo, b) Coeficiente de correlación ρ y c) Coeficiente de Nash-Sutcliffe. 46
Figura 3-10: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada

sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 48

Figura 3-11: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Chillán Viejo. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 49

Figura 3-12: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Embalse Pangue. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 50

Figura 3-13: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación estacional en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 53

Figura 3-14: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación estacional en la estación Chillán Viejo. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 54

Figura 3-15: Indicadores estadísticos al comparar el CHIRPS con datos pluviométricos a nivel anual. 56

Figura 3-16: Indicadores estadísticos al comparar el CHIRPS con los datos pluviométricos para la estación de invierno. 58

Figura 3-17: Indicadores estadísticos al comparar el CHIRPS con los datos pluviométricos para la estación de verano. 59

Figura 3-18: Desempeño de las técnicas de corrección de sesgo en los datos CHIRPS. a) Sesgo, b) Coeficiente de correlación ρ y c) Coeficiente de Nash-Sutcliffe. 61

Figura 3-19: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 62

Figura 3-20: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 63

Figura 3-21: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 64

Figura 3-22: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación estacional en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 66

Figura 3-23: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación estacional en la estación Chillán Viejo. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP

(negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 67

Figura 3-24: Indicadores estadísticos al comparar el IMERG con datos pluviométricos a nivel anual. 69

Figura 3-25: Indicadores estadísticos al comparar el IMERG con los datos pluviométricos para la estación de invierno. 71

Figura 3-26: Indicadores estadísticos al comparar el IMERG con los datos pluviométricos para la estación de verano. 72

Figura 3-27: Desempeño de las técnicas de corrección de sesgo en los datos IMERG. a) Sesgo, b) Coeficiente de correlación ρ y c) Coeficiente de Nash-Sutcliffe. . 74

Figura 3-28: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 75

Figura 3-29: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Chillán Viejo. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING. 76

Figura 3-30: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Embalse Pangue. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING 77

ABSTRACT

Knowing spatiotemporal variability of precipitation is crucial for water management. In this study, three spatiotemporal high-resolution satellite precipitation databases were evaluated: CMORPH (NOAA CPC Morphing Technique), IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) and CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations). Evaluation was done in the central-south part of Chile using daily rainfall records as reference and applying two techniques of bias correction (ISIMIP and SCALING) for an analysis period from 2002 to 2015. Results show that IMERG represents best temporal variability of precipitation, reaching Pearson´s correlation up to 0.87, followed by CMORPH with correlations of 0.78 and finally CHIRPS with 0.65. On the other hand, CHIRPS presents an underestimation of 0.42 mm and an overestimation of 0.26 mm in the study area. The IMERG presents greater levels of underestimation in areas of mid-altitudes with biases of -6.08 mm, while the CMORPH underestimates in all the study area with values between -0.35 mm and -5.12 mm. Therefore, even though CHIRPS does not present the greater correlation with respect to observed data, it is preferred to use in the Center South of Chile because it presents lower range of systematic errors measured by the bias in all the study area. With regard to the bias correction method applied, the ISIMIP presents better performance that the SCALING, since it modifies the daily variability on precipitation data estimates over the average monthly precipitation data observed.

Key words: CMORPH, IMERG, CHIRPS, ISIMIP, SCALING, correction of bias, daily satellite rainfall.

RESUMEN

Conocer la variabilidad espaciotemporal de la precipitación es crucial para la gestión de los recursos hídricos. En este estudio se evaluaron tres bases de datos de precipitación satelital de alta resolución espaciotemporal: CMORPH (NOAA CPC Morphing Technique), IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) y CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations). La evaluación se realizóen la zona centro-sur de Chile utilizando registros pluviométricos a escala diaria como datos de referencia, y aplicando dos técnicas de corrección de sesgo (ISIMIP y SCALING) a cada una de estas bases de datos para un período de análisis desde el año 2002 hasta el 2015. Los resultados muestran que IMERG presenta la mejor correlación en términos de variabilidad temporal de la precipitación diaria, alcanzando valores de hasta 0.87. Luego le sigue CMORPH con correlaciones de hasta 0.78 y finalmente CHIRPS con 0.65. Por otro lado, CHIRPS presenta subestimación de hasta 0.42 mm y sobreestimación de hasta 0.26 mm en toda la zona de estudio, el IMERG presenta mayores niveles de subestimación en zonas de altitudes medias con sesgos de hasta -6.08 mm, mientras que el CMORPH subestima en toda la zona de estudio con valores entre -0.35mm y -5.12 mm. Por lo tanto, aunque CHIRPS no presenta la mayor correlación con respecto a los datos observados, es el recomendado para utilizar en el centro sur de Chile por presentar el menor rango de errores sistemáticos medidos por el sesgo en toda la zona de estudio. Con respecto al método de corrección de sesgo aplicado, el ISIMIP presenta mejor desempeño que el SCALING, debido a que modifica la variabilidad diaria de los datos de precipitación estimados sobre las medias mensuales de los datos de precipitación observados.

Palabras clave: CMORPH, IMERG, CHIRPS, ISIMIP, SCALING, corrección de sesgo, precipitación diaria satelital.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de la distribución espaciotemporal de las precipitaciones es importante para modelos hidrológicos, fluviales y de crecidas empleados en la predicción de eventos hidrometeorológicos, así como también para el análisis y pronóstico de sequías para la gestión de los recursos hídricos (Liu, 2016; Sapiano y Arkin, 2009). En la actualidad hay tres enfoques para estimar cuantitativamente la precipitación: pluviómetros, radares y sensores satelitales (Li et al., 2013). Hasta el momento los pluviómetros ofrecen las mediciones más sencillas y confiables (Ma et al., 2015). Sin embargo, los pluviómetros ofrecen mediciones puntuales, y las diferentes técnicas de interpolación para distribuirlas espacialmente tienen asociados errores potenciales (Kidd y Huffman, 2011).Los radares meteorológicos tienen la capacidad de proporcionar la estructura interna espacial de las precipitaciones en tiempo real sobre áreas extensas, presentando como inconvenientes asociados a los errores debido a la intercepción del haz en zonas montañosas.

Los sensores satelitales con fines meteorológicos (Tang et al., 2016) proporcionan una forma práctica de obtener mediciones globales de la precipitación con una alta resolución espaciotemporal. Pero ¿Qué tan bien pueden representar la variabilidad temporal de las precipitaciones los productos satelitales en una cuenca dada? O ¿Existe alguna dependencia del desempeño de los productos de precipitación satelital con respecto a la elevación? A partir del Proyecto Mundial sobre la Climatología de las Precipitaciones (Global Precipitation Climatology Project, GPCP), que proporciona registros de datos de precipitación multi-satelital desde 1979 hasta el presente (Huffman et al., 1995, 1997; Adler et al., 2003), se han desarrollado varios productos de precipitación de alta resolución (Yang, 2003; Joyce et al., 2004; Ushio et al., 2009; Hsu et al,. 2010; Dinku et al., 2010; Behrangi et al., 2010; Brocca et al., 2014; Huffman et al., 2007, 2014) que están siendo ampliamente utilizadas en diferentes tipos de modelos

para una variedad de aplicaciones: análisis y predicción meteorológica, análisis climáticos, gestión de emergencias, predicción de escorrentía, gestión del recurso hídrico, y agricultura (Ebert, 2010).

Uno de estos productos de precipitación satelital de acceso libre y ampliamente estudiado es el CMORPH (NOAA CPC Morphing Technique; 0.072°, 0.5 h)(ver la sección 2.2.2). Este algoritmo ha sido sometido a extensas evaluaciones con respecto a diferentes estimaciones de precipitación satelital, comparándolos con datos registrados por pluviómetros a diferentes escalas espaciales y temporales, en diferentes zonas de topografía compleja. Además, ha sido utilizado como dato de entrada en modelos hidrológicos para la simulación de lluvia-escorrentía (Bitew y Gebremichael, 2011; Bitew et al., 2011). Por ejemplo, Hirpa et al (2010), realizaron una evaluación en el noreste de Etiopia zona con alta variabilidad de elevación en un rango entre 240 m y 3400 m, a una escala temporal media anual y diaria, y una escala espacial de 0.25° x 0.25°, encontrando que el desempeño del CMORPH muestra dependencia de la elevación. Habib et al. (2012) lo evaluaron a una escala temporal de 3 horas y espacial de 0.25°x0.25° en la cuenca del rio Nilo con elevaciones de hasta 5000 m, sus resultados muestran que los sesgos dependen de la latitud, topografía y de la variación estacional a lo largo del área de drenaje. Haile et al. (2013) lo evaluó en una cuenca del rio Nilo, caracterizada por una alta variabilidad topográfica (elevación entre 1700 m y 3500 m) y variabilidad en las intensidades de las precipitaciones a una temporal horaria y espacial de 8x8 km. Sus resultados indican que su exactitud varía significativamente sobre el área de estudio, con errores de ± 10 mmh^{-1}, no capturan satisfactoriamente la variabilidad temporal de las precipitaciones, con correlaciones menores a 0.27 y encontraron que subestima la precipitación a nivel estacional. Shanhu et al. (2016) lo evaluaron a una escala temporal de 3 horas y escala espacial de 0.25°x0.25°, en dos cuencas en China, con elevaciones entre 427 m y 2053 m, concluyendo que sobreestima la precipitación en latitudes altas y a subestimarla en latitudes bajas. Moazami et al. (2016), lo evaluaron a

escala temporal diarias y espacial de 0.25°x0.25° en una zona de topografía compleja (con elevaciones de hasta 3000 m), incluyendo una zona desértica en la zona central del área de estudio, en Irán, concluyendo que tiende a subestimar la precipitación.

Otro producto de precipitación satelital de libre acceso es el algoritmo IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievalsfor GPM; 0.1°, 0.5 h), disponible desde marzo del 2014 (ver la sección 2.2.2). Estas estimaciones han sido evaluadas por Tang et al. (2016), a una escala temporal horario y espacial de 0.1°x0.1°, en China Continental, zona caracterizada por una topografía compleja, altas elevaciones y gran variabilidad en las intensidades de las precipitaciones. Sus resultados muestran una baja capacidad para representar la variabilidad temporal de las precipitaciones con correlaciones que no superan 0.2, principalmente en zonas montañosas. Los autores concluyen que la baja correlación encontrada puede estar asociada a la baja cantidad de pluviómetros en la zona de estudio que son utilizados para generar los datos de precipitación mensual del Centro Mundial de Climatologías de las Precipitaciones (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC), datos que utiliza el IMERG para su calibración, afectando potencialmente su desempeño. Otra evaluación fue realizada por Gaona et al. (2016) a escalas temporales de 30 minutos, horaria y mensual y a una escala espacial de 0.1°x0.1° en el país del Reino de los Países Bajos, usando como referencia mapas de precipitación de radar calibrados con mediciones pluviométricas. Sus resultados indican una ligera tendencia a subestimar (2%) la precipitación en todo el país, confirmando el potencial del GPM en ésta zona de estudio de topografía plana. Prakash et al. (2016) compararon el IMERG, el GSMap (Global Satellite Mapping of Precipitation) y el TMPA, a una escala temporal diaria y espacial de 0.25° x0.25° en la India, indicando que el IMERG y el GSMaP presentan notablemente buenos resultados en la distribución de la precipitación principalmente para bajas intensidades. Sin embargo, los tres productos satelitales presentan valores muy pequeños de correlación, mayor RMSE y

subestimación sobre el noreste de la India, zona de topografía compleja donde las precipitaciones son dominadas por los efectos orográficos.

También está el CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations), un algoritmo bastante reciente diseñado en el 2015 (ver la sección 2.2.2). Estas estimaciones fueron evaluadas por Toté et al. (2015) en Mozambique a una escala temporal de 10 días y espacial de 0.05°x0.05°. Sus resultados muestran que el CHIRPS sobrestima las frecuencias de precipitaciones y presenta mejores resultados durante la estación húmeda, donde las precipitaciones son dominadas por sistemas frontales. Otra evaluación la realizaron Funk et al. (2015), a una escala temporal mensual y espacial de 0.05°x0.05° en Colombia y Perú. Sus resultados muestran un buen ajuste en la variabilidad temporal de las precipitaciones para la estación húmeda con una correlación de 0.97 para Colombia y 0.72 para Perú.

Todas estas evaluaciones han sido realizadas en distintas zonas a nivel global, con diferentes características topográficas, y diferentes patrones climáticos, pero no se encontró una evaluación de alguno de estos productos en la zona centro sur de Chile, que pueda ser utilizado como referencia para conocer ¿Qué tan bien pueden representar la precipitación estos productos satelitales en ésta zona? O si ¿Existe alguna dependencia del desempeño de estos productos de precipitación satelital con respecto a la elevación en ésta zona caracterizada principalmente por su topografía compleja? La investigación del desempeño de estos productos de precipitación satelital es necesaria, principalmente por que ofrecen estimaciones de precipitaciones a altas resoluciones espaciales y temporales en nivel global, lo que supone una ventaja en zonas no instrumentadas, y de ser confiables pueden ser utilizados como datos de entradas en distintos tipos de modelos para distintas aplicaciones.

En ésta tesis de magister se plantea evaluar los productos de precipitación satelital a escala temporal diaria del IMERG, CMORPH y CHIRPS. Posteriormente, se aplican

dos técnicas de corrección de sesgo el ISIMIP y el SCALING y se comparan con los productos originales para evaluar su desempeño tanto corregidos como sin corregir.

1.1. Hipótesis de investigación

Las estimaciones de precipitación obtenidas de productos satelitales de alta resolución espaciotemporal pueden ser un aporte significativo para representar correctamente la precipitación diaria en cuencas de topografía compleja.

1.2. Objetivos

Evaluar las estimaciones de precipitación diaria del IMERG, del CMORPH y del CHIRPS, utilizando mediciones pluviométricas como datos de referencia en zonas de topografía compleja en el centro-sur de Chile, y aplicar dos técnicas de corrección de sesgo.

Para alcanzar éste objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

1) Realizar una evaluación estadística que permita determinar la capacidad de las estimaciones de precipitación satelital para representar la variabilidad temporal a lo largo de la zona de estudio y en base a estos resultados conocer si existe alguna dependencia del desempeño de las estimaciones con respecto a la elevación.
2) Cuantificar el error sistemático de cada una de las estimaciones de precipitación satelital con respecto a los datos observados en superficie.
3) Evaluar el desempeño de las técnicas de corrección de sesgo con respecto a los datos observados.

1.3. Estructura de esta tesis

Esta tesis de magister está organizada de la siguiente manera: en el capítulo 2 se describe la metodología utilizada para el análisis de la calidad de los datos pluviométricos, evaluación estadística, técnicas de corrección de sesgo, datos utilizados y la zona de estudio. En el capítulo 3se presentan los resultados y en el capítulo 4 se describe el resumen y conclusiones que se derivan de ésta tesis.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Metodología

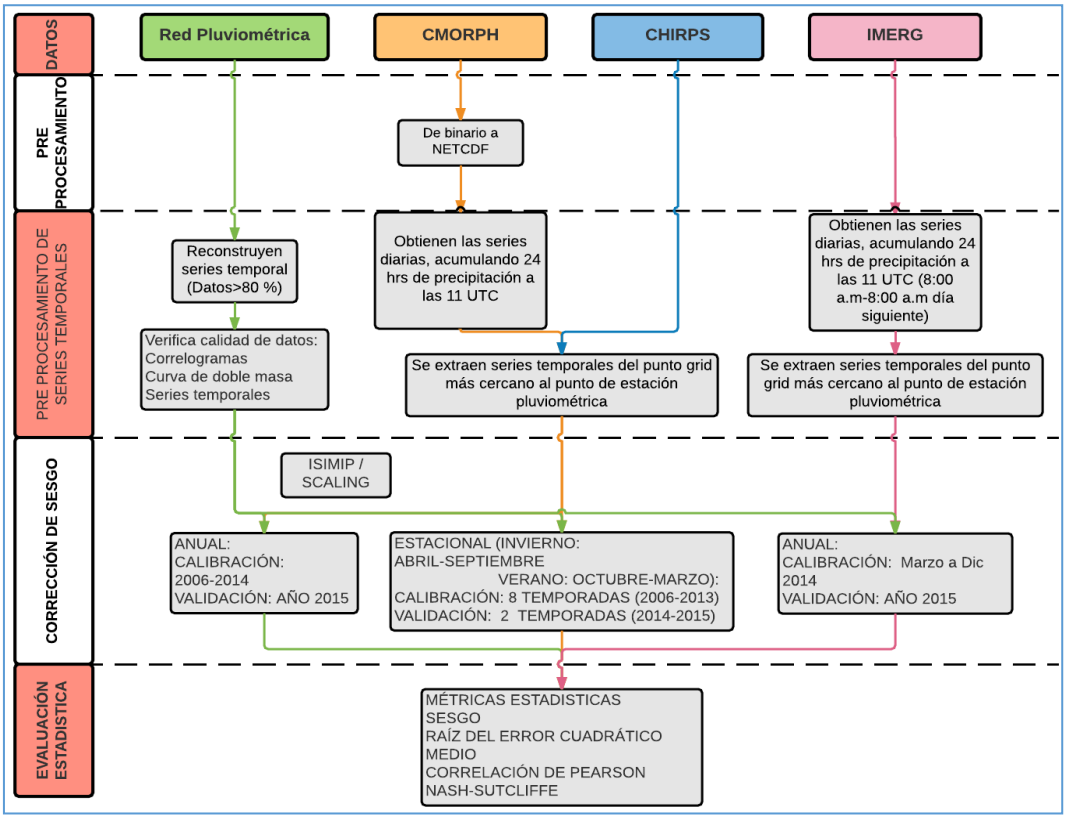


Figura 2-1: Esquema metodológico

En esta sección se describe la metodología empleada para el desarrollo de ésta tesis (Figura 2-1), para el análisis de la calidad de los datos pluviométricos, la evaluación del desempeño de los productos de precipitación satelital y de los métodos de corrección de sesgos con respecto a los datos de precipitación diaria observada. Considerando la disponibilidad de datos de los productos de precipitación satelital se definen dos periodos temporales para esta tesis de magister; Red1 que va desde el 2002 al 2015 para el CMORPH y el CHIRPS y Red2 que va desde marzo 2014 hasta diciembre 2015 para el IMERG. Con el objetivo de evaluar el desempeño del CMORPH, CHIRPS e IMERG en diferentes elevaciones, se estableció un umbral de 250 metros como criterio para separar los datos que corresponden a las estaciones pluviométricas de bajas altitudes (elevación$\leq$ 250 m) de los datos de las estaciones pluviométricas de altitudes medias (elevación$>$ 250 m).

2.1.1. Análisis de la calidad de datos pluviométricos

Previo al uso de los datos pluviométricos, se realizó una verificación de su calidad con el objetivo de detectar posibles alteraciones aleatorias de las series temporales disponibles. El primer paso consistió en analizar el porcentaje de datos faltantes en las series temporales, y en excluir del análisis todas aquellas estaciones pluviométricas que tengan más del 20% de datos faltantes, se utilizó éste criterio con el objeto de poder contar con un número de estaciones pluviométricas representativas que permitiera realizar una evaluación confiable. El análisis de los datos faltantes se realizó a nivel anual y estacional, principalmente en la temporada de invierno. Luego, se realizó la reconstrucción de las series temporales de las estaciones pluviométricas incluidas en el análisis y posteriormente se realizó un análisis de tendencia y consistencia, a través de una evaluación exploratoria de las gráficas de las series temporales, correlogramas y curva de doble masa.

2.1.1.1. Reconstrucción de las series temporales

La reconstrucción de la series temporales se realiza utilizando un modelo de regresión lineal corregido con una variable aleatoria (ecuación (2.1)) que permite conservar los parámetros estadísticos de cada serie (Fernández y Salas, 1995). Dada la naturaleza de los eventos de precipitación en la zona, y la condición de conservar la variabilidad que existe entre estaciones en la zona de estudio, se considera que este método de correlación es adecuado. En la aplicación de este método se elige como predictor a la estación con la mayor correlación con la estación pluviométrica a reconstruir (predictando), estableciéndose como restricción una correlación superior a 0.8. La reconstrucción de las series temporales fue realizada con la ecuación:

$$Y_1 = \propto * \ Y_2 + \beta + \sqrt{1 + R^2} * \ \varepsilon * \ S_Y \qquad (2.1)$$

Donde:

Y_1: Predictando o variable que se desea rellenar

Y_2: Predictor o variable que será utilizada para rellenar

β: Coeficiente de intersección de la regresión entre el predictando y el predictor

$\propto$: Pendiente de la regresión entre el predictando y el predictor

R^2: Coeficiente de determinación de la regresión entre el predictando y el predictor

ε: Error aleatorio asociado a una distribución N(0,1)

S_Y: Desviación estándar del predictando original

2.1.1.2. Inspección gráfica de las series temporales

El análisis de las series temporales consiste en encontrar componentes que correspondan a una tendencia a largo plazo, un comportamiento estacional o aleatorio. En algunas estaciones se observaron valores de precipitación altos con respecto a los valores promedios diarios, por lo que se identificó el día del evento en cada una de las estaciones y luego se realizó un análisis de la precipitación de las estaciones vecinas,

para identificar si se debía a algún evento sinóptico o si se trataba de algún error de lectura o de transcripción y posteriormente se realiza un diagrama de caja para determinar si corresponde o no a un valor atípico.

2.1.1.3. Autocorrelaciones

La autocorrelación determina la dependencia de una serie de datos entre sí o si los datos son aleatorios entre sí, así mismo se identifica si las series son estacionarias o no. En la mayoría de las series meteorológicas existe una dependencia entre un valor y el siguiente en la escala temporal, pero depende de la escala de trabajo, a escalas diarias y horarias, la autocorrelación suele ser alta. En cambio, para las escalas mensual y anual la autocorrelación suele ser baja. La dependencia se basa en las correlaciones lineales, entre las serie original y la misma serie desplazada en 1, 2, 3,…, *k* posiciones. A estas correlaciones se les llama autocorrelaciones de orden 1, 2, 3,…, *k* respectivamente (Barrera et al., 2004). En este estudio se calculan las autocorrelaciones a escalas diarias y de orden 1 hasta el orden 20, a través de la ecuación (2.2):

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k}(Y_t-\overline{Y})(Y_{t+k}-\bar{Y})}{\sigma^2} \quad (2.2)$$

Donde:

r_k: Autocorrelación desplazada en *k* tiempos.

$\bar{Y}$: Media de los valores de la serie

Y_t: Observación en el periodo del tiempo *t*

Con el autocorrelograma (valores de r_k en función de k) se identifica si las series temporales es estacionaria o no, la no estacionariedad se detecta porque los coeficientes de autocorrelación son altos y significativamente en muchos retardos de tiempos y van disminuyendo muy lentamente hasta alcanzar cero o presentar periodicidad. En cambio,

se es estacionaria, los coeficiente van decreciendo más rápidamente hasta llegar a cero (Guevara, 2014).

2.1.1.4. Curva de doble masa

Es un método útil para identificar de forma gráfica si las mediciones de las series hidrológicas fueron efectuadas en condiciones homogéneas. Esta técnica, permite detectar cambios en los procesos de adquisición de los datos, ya sea debido a cambios en la ubicación de los instrumentos, cambios en la forma de medir, errores asociados a los instrumentos o de lectura. La teoría de la curva de doble masa (Kholer, 1949; Heras, 1970; WMO, 1994), considera como base el hecho de que, representando en ejes de coordenadas las parejas de puntos definidos por los valores de la series acumuladas sucesivamente en un mismo periodo de observaciones, la curva resultante es una línea recta representando la proporcionalidad entre las series, permitiendo detectar homogeneidad en los promedios

En este estudio se comparan los registros de precipitación acumulas de la estación a la que se quiere comprobar la consistencia, con un registro acumulado constituido por el promedio de las tres estaciones más cercanas. Si la relación no presenta cambios en la pendiente, picos o saltos que manifieste una relación estable de proporcionalidad, se puede concluir que en la estación de análisis no se presentan problemas de consistencia, en caso contrario, se puede deducir que la serie presenta datos anómalos, los que son excluidos del estudio. Luego de haber eliminado los valores anómalos, se vuelve a realizar el análisis de la curva de doble masa para verificar la consistencia de los datos restantes.

2.1.2. Evaluación estadística

Los resultados que se obtienen al aplicar los métodos de corrección de sesgo, luego de haber sido calibrados, se validan calculando estadísticos con respecto a los datos de precipitación diaria pluviométrica. La evaluación se realiza para los tres productos de precipitación satelital sin corregir y corregir. Las medidas estadísticas que se utilizan son: la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el sesgo (bias), el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), y el coeficiente de correlación de Pearson (ρ). El RMSE permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados con respecto a los observados. El sesgo cuantifica la medida en que los datos simulados sobreestiman o subestiman el valor esperado de la precipitación. Un valor positivo indica la sobreestimación de la cantidad de lluvia, mientras que un valor negativo indica una subestimación. El coeficiente de NS mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Finalmente, el ρ expresa la dependencia lineal entre los valores observados y simulados en el tiempo. La Tabla 2-1 presenta las ecuaciones de cada una de las métricas estadísticas utilizadas con sus rangos y valores óptimos, donde P_E y P_S corresponden a los eventos diarios de precipitación pluviométrica observada y de satélite, respectivamente.

Tabla 2-1: Métricas estadísticas.

Estadístico	Ecuación	Rango	Óptimo
RMSE	$\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\frac{(P_S - P_E)^2}{n}}$	0,∞	0 indica un ajuste perfecto
Sesgo	$\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(P_S - P_E)$	-∞,∞	0 indica ajuste perfecto
NS	$1 - \frac{\sum_{k=1}^{n}(P_S - P_E)^2}{\sum_{k=1}^{n}(P_E - \bar{P}_E)^2}$	< 0.2 0.2,0.4 0.4,0.6 0.6,0.8 > 0.8	Insuficiente* Satisfactorio Bueno Muy Bueno Excelente
ρ	$\frac{\sum_{k=1}^{n}(P_E - \overline{P_E})(P_S - \bar{P}_S)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(P_E - \overline{P_E})^2}\, x \sqrt{\sum_{k=1}^{n}(P_S - \bar{P}_S)^2}}$	-1 , 1	1 indica un ajuste perfecto

* Molnar (2011).

2.1.3. Técnicas de corrección de sesgo

Las estimaciones de precipitación satelital frecuentemente son afectadas por errores aleatorios y sistemáticos (sesgo). En este estudio se utiliza un enfoque para la corrección de los errores sistemáticos. Se utiliza un factor de corrección de sesgo multiplicativo a través de los métodos ISIMIP (Hempel et al., 2013) y SCALING (Wetterhall et al. (2012) con estos métodos se logra corregir los sesgos del CMORPH, del IMERG y del CHIRPS. Para la implementación de estas técnicas se utilizó el código abierto construido por el grupo de meteorología de Santander de la universidad de Cantabria, en el siguiente enlace; http://www.meteo.unican.es.

La corrección de sesgo es aplicada al punto de grilla más cercano al punto de la estación meteorológica, para cada una de los productos de precipitación satelital. Se

decidió realizarlo de ésta manera y no interpolando los datos pluviométricos, debido a que la mayoría de las técnicas de interpolación en general subestiman las precipitaciones de altas intensidades y sobreestiman las de bajas intensidades (Bohling 2015) lo que puede generar resultados pocos confiables.

Los métodos de corrección de sesgo son aplicados a nivel anual y estacional, de la siguiente forma:

i. Metodología para el CMORPH y CHIRPS

Para la aplicación estacional se considera la temporada de invierno (Abril–Septiembre) y verano (Octubre–Marzo). Para la aplicación anual el periodo de calibración va desde el 2006 hasta 2014 y el periodo de validación corresponde al año 2015. Para la aplicación estacional el análisis se realiza de manera independiente por cada temporada, por ejemplo para la temporada de invierno, para el periodo de calibraciónse toman las series temporales de todos los periodos de invierno de cada año desde el 2006 hasta el 2013, y para el periodo de validación se toman los periodos de invierno del año 2014 y 2015.

i. Metodología para el IMERG

Debido a que las estimaciones IMERG están disponibles desde marzo del 2014, su tratamiento debe ser individual. Únicamente se aplican las técnicas de corrección de sesgo a nivel anual. Las series temporales que van desde marzo hasta diciembre del 2014 son utilizadas para calibrar, y las series temporales del año 2015 para validar.

2.1.3.1. ISIMIP

Se presenta un breve resumen de la metodología ISIMIP (Para mayor detalle remitirse a Hempel et al., 2013). Este algoritmo realiza la corrección de sesgo en dos pasos, primero ajusta las medias mensuales de los datos satelitales con respecto a las medias mensuales observadas, a través de un factor de corrección c, definido por:

$$c = \sum_{i=1}^{n} P_i^{D_{Obs}} \; / \sum_{i=1}^{n} P_i^{D_{Mod}} \tag{2.3}$$

Donde:

$P_i^{D_{Obs}} = Datos\ \ medios\ mensuales\ observados$

$P_i^{D_{Mod}} = Datos\ medios\ mensuales\ de\ la\ serie\ que\ quiere\ ser\ corregida$

Una vez calculado el factor multiplicativo "c" se ajustan los datos de precipitación satelital diarios, con la siguiente ecuación:

$$\tilde{P}_{ij}^{D_{Mod}} = c \cdot P_{ij}^{D_{Mod}} \tag{2.4}$$

Donde:

$\tilde{P}_{ij}^{M_{Mod}} = Dato\ diario\ satelital\ ajustado$

$P_{ij}^{D_{Mod}} = Dato\ de\ precipitación\ satelital\ diario$

$c \quad = Factor\ de\ correción\ multiplicativo$

El segundo paso, consiste en corregir la variabilidad diaria de los datos satelitales con respecto a los datos observados. Para esta corrección, se establece un umbral para separar los días y meses secos de los húmedos. Se consideran meses secos a todos aquellos que tengan una media mensual ≤ 0.01 mmd^{-1}, luego se definen los días secos únicamente en los meses húmedos. Los días secos son todos aquellos que tengan precipitación ≤ 1 mmd^{-1}. Al aplicar estos umbrales se pueden generar series temporales satelitales y observadas con diferentes número de datos, por ello, se establece que el número de días o meses secos para ambas series temporales estará determinado por el número de días o meses secos de la serie temporal observada. Posteriormente se normalizan los datos diarios satelitales y observados únicamente para los meses húmedos a través de la ecuación (2.5).

$$\delta \hat{P}_{ij}^{data} = \frac{\hat{P}_{ij}^{data}}{\hat{P}_{i}^{data}} \tag{2.5}$$

Donde:

$\hat{P}_{ij}^{data} = Precipitación\ diaria\ observada\ o\ satelital, según\ corresponda$

$\hat{P}_{i}^{data} = Precipitación\ media\ de\ los\ dias\ húmedos$

A estos datos normalizados se les aplica la función g, descrita en la ecuación (2.6).

$$g = \left[a + b \cdot \left\{\delta \hat{P}^{D_{Mod}} - \delta \hat{P}_{min}^{D_{Mod}}\right\}\right] \times \left[1 - \exp\left\{-\frac{\delta \hat{P}^{D_{Mod}} - \delta \hat{P}_{min}^{D_{Mod}}}{\tau}\right\}\right] \quad (2.6)$$

Las variables *a* y *b* son los parámetros de la función de regresión lineal, τ es la constante de decaimiento de la función exponencial, $\delta \hat{P}_{min}^{D_{Mod}}$ es valor de precipitación normalizado más bajo y $\delta \hat{P}^{D_{Mod}}$ es el dato de precipitación diario normalizado observado o satelital según corresponda. Finalmente los datos de precipitación diario son corregidos con la ecuación (2.7).

$$\tilde{P}_{i,j}^{D_{Mod}} = c \cdot \hat{P}_i^{D_{Mod}} \cdot g \quad (2.7)$$

Donde:

c $= Factor\ de\ corrección$

$\hat{P}_i^{D_{Mod}}$ $= media\ delos\ dias\ humedo\ del\ mes\ respectivo$

g $= Datos\ de\ precipitación\ normalizado\ ajustado$

2.1.3.2. SCALING

El SCALING (Wetterhall et al. 2012), realiza la corrección de sesgo al comparar la función de densidad de probabilidad de los datos observados y satelitales. La función de densidad teórica es ajustada para las series observadas y satelitales, y se usa la función de densidad acumulada inversa de la serie de datos observados para generar nuevos valores estimados. Se usa la función gamma, debido a la simetría y distribución positiva para modelar las intensidades de las precipitaciones diarias. La función de densidad de probabilidad de una distribución gamma para la variable x está defina como:

$$f(x) = \frac{\left({}^{x}/_{\beta}\right)^{\alpha-1} exp\,(-x/\beta)}{\beta\Gamma(\alpha)}\ x, \alpha, \beta < 0 \quad (2.8)$$

Dondeα es el parámetro de forma, β es el parámetro de escala y $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma inversa. Los parámetros de esta distribución de probabilidades fueron estimados

utilizando el método de máxima verosimilitud. El método fue aplicado en dos pasos. Primero se establecen el mismo números de días de lluvia en ambas series temporales (observadas y satelitales), definiendo un valor umbral como precipitación mínima. Por lo tanto, todos los valores menores a este umbral son considerados como días secos (precipitación nula). Una vez definidos los días de lluvia, se ajustan las series temporales de precipitación observada y satelital de los días húmedos a la distribución gamma, estableciéndose la siguiente función para los datos corregidos:

$$\hat{z}(t,n) = F^{-1}\left(\alpha_{obs,cal}, \beta_{obs,cal}, F\left(z_{sim,val}(t,n), \alpha_{sim,cal}\beta_{sim,cal}\right)\right) \qquad (2.9)$$

Donde*obs* se refiere al parámetro estimado a partir de las series observadas, *sim*corresponde al parámetro estimado a partir de las series satelitales y de la función gamma inversa F^{-1}, *cal*hace referencia al periodo de calibración y *val* al de validación. Una de las desventajas de usar la función gamma es que puede generar datos de precipitación excesivamente altos, con respecto a los observados, por lo que se define la precipitación diaria máxima observada como un umbral máximo en cada punto (Wetterhall et al. 2012).

2.2. Datos pluviométricos y satelitales

2.2.1. Datos pluviométricos

La red de estaciones pluviométricas utilizadas en esta tesis se presenta en la Figura 2-4 y comprende un total de 81 estaciones, 50 estaciones en la región del Biobío y 31 estaciones en la Región del Maule. Los datos fueron suministrados por la DGA (http://snia.dga.cl/BNAConsultas/), la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) (http://www.meteochile.gob.cl/inicio.php), ENDESA, AGROMET (http://agromet.inia.cl/) y algunas estaciones pluviométricas instaladas para el proyecto de investigación (FONDEF IT13I20037).

2.2.2. Productos de precipitación satelital

Los productos de precipitación satelital de acceso libre que son evaluados en esta tesis son el CMORPH, IMERG y CHIRPS. Estos productos de precipitación distribuida espacialmente utilizan diferentes mediciones realizadas por múltiplessensores de microondas (MW) e imágenes infrarrojas (IR) a bordo de satélites meteorológicos.

Los sensores a bordo de los satélites geostacionarios (GEO) se dividen en GEO-VIS para el canal visible, y GEO-IR para el infrarrojo (ver Tabla 2-2).Los sensores GEO-VIS tienen una resolución espacial de 1 km y detectan la radiación solar reflejada a longitudes de onda de 0.52 a 0.8 micrómetros (µm), este intervalo del espectro electromecánico corresponde a las longitudes de onda que pueden ser percibidas por el ojo humano, debido a que estas imágenes son producto de la radiación solar reflejada, solo pueden ser generadas durante las horas del día. Son utilizadas para medir la profundidad de las nubes. Los sensores GEO-IR generan imágenes en diferentes canales infrarrojo del espectro electromagnético en una resolución espacial de 4 km y temporal de 30 minutos en la mayor parte del mundo. Primero tenemos el canal IR de onda corta que detecta la radiación en longitudes de onda de 3.78 a 4.03 µm, es utilizada para detectar cursos fluviales, nubes de agua y de hielo basándose en la reflectividad solar y puede detectar niebla y nubes de agua durante la noche. Otro es el canal de vapor de agua para las longitudes de onda de 5.77 a 7.33µm, es utilizado para medir la humedad atmosférica, mostrando variaciones de humedad en la troposfera superior. También está el canal infrarrojo de onda larga para las longitudes de onda de 10.2 a 11.2 µm, este canal es utilizado para medir las temperaturas en la superficie y en los topes nubosos, intensidades de tormentas y en combinación con otros canales estima la humedad en niveles bajos, determina la temperatura en la superficie del mar, estima la fase del agua en las nubes, distingue entre nubes de agua y manto de nieve. Finalmente está el canal

de 12 µm conocido como ventana “sucia”. Este canal es utilizado para medir la humedad en la atmósfera baja, vapor de agua precipitable y temperatura de la superficie.

Los sensores a bordo de los satélites deórbita terrestre baja (Low Earth Orbit, LEO) (Ver Tabla 2-3) como por ejemplo el DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y el GPM-CO (Global Precipitation Measurement – Core Observatory), están divididos en microondas pasivas y microondas activas. El radar de precipitación de doble frecuencia (Dual-frequency Precipitation, DPR) a bordo del satélite GPM-CO es un ejemplo de un sensor de microondas activos que emite y mide pulsos de microondas en dos frecuencias, la frecuencia de 14 GHz para tasas de lluvias relativamente fuertes y el de 35 GHz para tasas de lluvias y nieve ligeras (Huffman et al., 2015). La medición de los pulsos de microondas proporcionan información sobre intensidad y distribución de la lluvia, tipo de lluvia, generando así mejor descripción de la estructura vertical de las precipitación.

Existe una gran cantidad de sensores de microondas pasivas, por ejemplo está la unidad avanzada de sondeo por microondas (Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU) de la NOAA en una resolución de 48 y 16 km para la frecuencia de 89 y 150 GHz, canales ideales para medir hidrometeoros sólidos, el sensor especial y generador de imágenes microondas (Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I) del DMSP, que emplea las temperaturas de brillo a 37 y 85 GHz para inferir la cantidad de agua líquida y hielo verticalmente y el generador de imágenes de microondas (GPM Microwave Imager, GMI) en frecuencias de 10.6, 18.7, 23.8, 36.5, 89, 166 y 183 GHz y una resolución espacial de 19.4 x 32.2 km para 10 GHz y de 4.4 x 7.3 km para el de 183 GHz, empleado para generar perfiles de precipitación en tres dimensiones. La desventaja que presentan las mediciones realizadas por los sensores microondas a bordo de los LEO está asociado a su disponibilidad continua en una determinada región, debido a que los LEO (ahora con el GPM) tienen un tiempo de visita en determinada zona de 1 a 2 hrs, en cambio los GEO es de 30 minutos.

Tabla 2-2: Satélites meteorológicos GEO operativos en 2016.

Agencia	Acrónimo	Lanzamiento/Fin de vida útil	Posición	Sensor
CMA/ NRSCC	FY-2E	23 Dic 2008/2017	86.5° E	S-VISSR
	FY-2D	08 Dic 2006/2015	123.5° E	S-VISSR
	FY-2G	31 Dic 2014/2018	105° E	S-VISSR
NOAA/ NASA	GOES-13	24May 2006/2016	75° W	IMAGER (GOES 12-15)/SOUNDER
	GOES-14	27 Jun 2009/2016	105° W	
	GOES-15	04 Mar 2010/2020	135° W	
ISRO	INSAT-3A	10 Ab 2003/2016	93.5° E	VHRR
	INSAT-3D	24 En 2002/2016	82° E	IMAGER/SOUNDER
ISRO/IMD	Kalpana-1	12 Sep 2002/2016	74° E	VHRR
EUMETSAT/ ESA	Meteosat-7	05 Dic 2006/2017	57.5° E	MVIRI
	Meteosat-8	28 Ag 2002/2016	3.7° E	SEVIRI
	Meteosat-9	21 Dic 2005/2019	9.5° E	SEVIRI
	Meteosat-10	05 Jul 2012/2019	0°	SEVIRI
JMA	Himawari-8	07 Oct 2014/2029	140.7° E	AHI

Fuente: http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites

Tabla 2-3: Satélites meteorológicos LEO operativos en 2016.

Agencia	Acrónimo	Lanzamiento/Fin de vida útil	Altitud	Sensor
EUMETSAT/ESA	Metop-A	19 Oct 2006/2016	827 km	AMSU-A, VHRR/3, HIRS/4, IASI, MHS
	Metop-B	17 Sep 2012/2018	827 km	
JAXA	GCOM-W1	17 May 2012/2017	700 km	AMSR-2
NASA	Aqua	04 May 2002/2016	705 km	AMSR-E, AIRS
CMA / NRSCC	FY-3B	04 Nov 2010/2016	836km	ERM-1, IRAS, MERSI-1, MWTS-1, VIRR
DoD / NOAA	DMSP-F16	18 Oct 2003/2016	850 km	SSMIS
	DMSP-F17	04 Nov 2006/2016	850 km	SSMIS
	DMSP-F18	18 Oct 2009/2016	850 km	SSMIS
NASA / INPE / JAXA	GPM Core Observatory	27 Feb 2014/2017	407 km	DPR, GMI (core)
RosHydroMet	Meteor-M N2	08 Jul 2014/2019	830 km	GGAK-M/MSGI-MKA, GGAK-M, KMSS, MSU-MR
NOAA/NASA	SNPP	28 Oct 2011/2016	833 km	CrIS

Fuente: http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites

IMERG

ElIMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) es un algoritmo que combina datos del GPM GMI/DPR con los satélites de la constelación del GPM (Medición de Precipitación Global) para generar mejores estimaciones espaciales y temporales de precipitación (Huffman et al., 2015 a,b,c). El GPM es una red internacional de satélites con el satélite principal GPM-CO (Ver Figura 2-2) diseñado especialmente para brindar observaciones globales de lluvia y nieve, impulsado por la NASA y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) como sucesora de la Misión para la Medición de Lluvia Tropical (Tropical Rainfall Measuring Analysis, TRMM). Uno de los objetivos del algoritmo IMERG es asegurar la continuidad consistente y de mayor precisión de la base de datos de precipitación iniciada con mediciones del TRMM. El satélite GPM Core fue lanzado el 27 de febrero del 2014 en órbita no polar, la que junto a los satélites de la constelación tiene un tiempo de visita de 1 a 2 horas sobre una determinada región. Con 16 orbitas por día, cubre las latitudes medias y altas (65°S-65°N de latitud), equivalente al 80% del globo cada tres horas, a diferencia del TRMM que cubría las regiones 35°S-35°N cada 15 horas y hasta 4 días en cualquier punto del globo (Ver Figura 2-3).

El GPM-CO desempeña funciones de calibración y referencia para los demás satélites que integran la constelación, tiene a bordo un DPR y un GMI. El DPR tiene un radar de 14 GHz para medir las tasas de precipitación fuertes en la zona de los trópicos y un radar de 35 GHz para medir las precipitaciones ligeras y nieve, principalmente en latitudes altas. El GMI está compuesto por un instrumento de barrido cónico de alta frecuencia que mejora la capacidad de medición con un mayor grado de detalle, incluyendo zonas de altas latitudes. Las mediciones realizadas por el GPM Core brindan información más detallada sobre la variabilidad de la precipitación en un área específica.

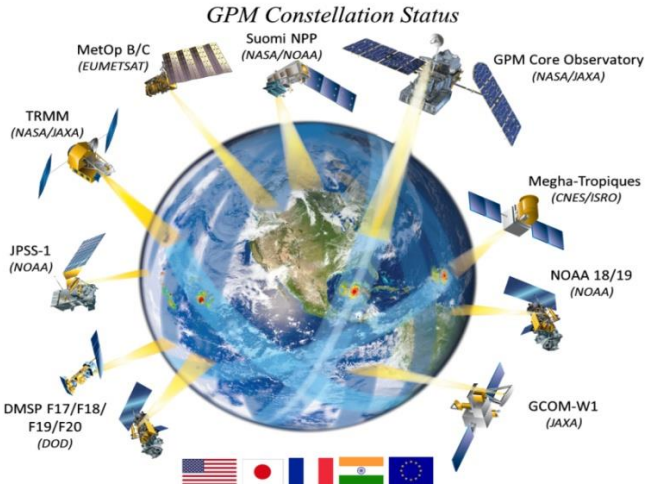


Figura 2-2: Red Internacional de Satélites de la misión GPM.

Fuente: http://pmm.nasa.gov/GPM.

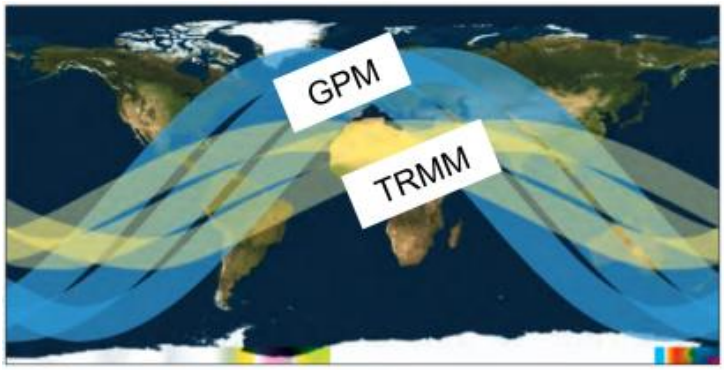


Figura 2-3: Áreas cubiertas por el TRMM (amarillo) y por el GPM Core (azul).

Fuente: nasa.gov.

El algoritmo IMERG está basado en tres métodos de estimación de precipitación multi-satélite desarrollados anteriormente: NASA TMPA (Calibración intersatelital y ajuste de la medición), Técnica de Morphing del Centro de Predicción Climática (CPC) de la NOAA (CMORPH; Interpolación del tiempo langrangiana) y PERSIANN de la Universidad de California, Irvine (calibración de microondas IR usando redes

neuronales artificiales) y el sistema de procesamiento de precipitación de la NASA (procesamiento y ensamble de datos de entrada). El IMERG utiliza como información de entrada mediciones de dos tipos de sensores diferentes: PMW e IR (Ver Tabla 2-4). Los datos de PMW hasta ahora solo están disponibles desde las plataformas de los satélites LEO. El IMERG está diseñado para compensar las limitaciones de disponibilidad de datos PMW mediante el uso de la mayor cantidad de datos PWM como sea posible y luego rellena la información faltante con estimaciones IR de los satélites GEO, a través de una interpolación lineal basada en el movimiento característico que se obtiene de las imágenes IR de las plataformas GEO. En el caso de que los datos PMW sean demasiados escasos, se utiliza el filtro de Kalman (Huffman et al., 2015).

Tabla 2-4: Datos de entrada del algoritmo IMERG.

	Acrónimo	**Nombre completo**	**Satélite**	**Agencia**
Sensor	DPR	Radar de precipitación de doble frecuencia	GPM Core	NASA, JAXA
	GMI Core	Imagen de microonda GPM	GPM Core	NASA JAXA
	SSMIS	Sensor especial de imágenes de microondas	DMPS-F16, F17, F18	DoD NOAA
	AMSR-2	Radiómetro avanzado de escaneo en microondas	GCOM-W1	JAXA
	MHS	Sondeo de humedad por microonda	Metop-A Metop-B	EUMETSAT/ESA
	MHS	Sondeo de humedad por microonda	NOAA-18 NOAA-19	NOAA
	AIRS	Espectrómetro infrarrojo	Aqua	NASA
	CrIS	Espectrómetro infrarrojo	SNPP	NOAA, NASA
Pluviómetros	Datos de precipitación de superficie mensual			GPCC

El IMERG se encuentra a una resolución temporal de 30 minutos, diaria y mensual en hora UTC. La estimación de 30 minutos es generada en tres latencias diferentes,

corrida temprana (6 horas, multi-satélite), corrida tarde (12 horas, multi-satélite) y la corrida final (Latencia de 4 meses, satélite-calibrado con estaciones en superficie). En el presente estudio se utiliza la estimación de la corrida final, que integra precipitaciones estimadas por múltiples sensores satélites de la constelación GPM y utiliza los datos mensuales del GPCC para su calibración (Huffman et al., 2015).

Tabla 2-5: Características de los datos de precipitación IMERG.

Acrónimo	**Nombre completo / Latencia**	**Resolución y cobertura espacial**	**Resolución y cobertura temporal**	**Formato de datos**
IMERG-GPM	Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM 4 meses	0.1° x 0.1° 90°S-90°N	30 minutos 12 Mar 2014 hasta la fecha	HDF4 NetCDF OpenDAP ASCII .gif, .png KML

CMORPH

En esta sección se describe brevemente la metodología del CMORPH (NOAA CPC Morphing Technique). Para ver más detalles de esta metodología, el lector puede revisar el trabajo de Joyce et al. (2004). La metodología del CMORPH consiste en dos procesos simultáneos que se inician cada media hora para la construcción de las estimaciones generadas desde los sensores SSMI (Special Sensor Microwave - Imager), AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS), AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit), y TMI(TRMM Microwave Imager) que son adquiridos (suministrados por NOAA/NESDIS), ensamblados e intercalibrados para cada periodo de 30 minutos, mientras que los vectores de movimiento de las nubes son calculados a partir de datos de imágenes IR globales geo-sincrónicas (Ver Tabla 2-6).El NESDIS (NOAA's National Environmental Satellite and Data Information Service) genera

estimaciones de precipitación a partir de la luminosidad de la temperatura en los sistemas nubosos, lo cual es medido por los sensores SSM-I/SSMIS y el GPROF para los sensores TMI.

Tabla 2-6: Datos de entrada del algoritmo CMORPH.

	Acrónimo	**Nombre completo**	**Satélite**	**Agencia**
Sensor	GMI	Imagen de microonda GPM	GPM Core	NASA
	SSM/I	Sensor especial y generador de imágenes microondas	DMSP-F14, F15	Departamento de Defensa de los EEUU
	SSMIS	Sensor especial de sonda atmosférica/ generador de imágenes microonda	DMSP-F16, F17, F18	
	AMSR-E	Radiómetro avanzado de escaneo en microondas-EOS	Aqua	JAXA
	AMSU	Unidad avanzada de sondeo por microondas	NOAA-17, 18, 19	NOAA

La resolución temporal del CMORPH es de 30 minutos (Ver Tabla 2-7), la cual fue establecida en función del intervalo de tiempo en que están disponibles los datos IR (disponibles globalmente cada 30 minutos). Debido a que las estimaciones de precipitación derivadas de las PMW están a una escala más gruesa que la grilla de 8 km, primero estas estimaciones se asignan al punto de la grilla más cercano de la red global (60° N-60° S) separadamente por cada intervalo de tiempo de 30 minutos y por cada satélite. Luego se combinan según el tipo de sensor (TMI, SSM/I, AMSU-B, AMSR-E) para periodos de 30 minutos y se guardan en archivos separados. Los datos globales IR de cada 30 minutos son utilizados para propagar las estimaciones de precipitación PMW promediados en una grilla de aproximadamente 0.727°, para que coincidan con la grilla que contiene las estimaciones de precipitación PMW.

Tabla 2-7: Características de los datos de precipitación CMORPH.

Acrónimo	Nombre completo Latencia	Resolución y cobertura espacial	Resolución y cobertura temporal	Formato de datos
CMORPH	NOAA CPC Morphing Technique 18 hrs	0.072277° (8 km en el ecuador) 60N-60S	30 minutos 2002 a la fecha	Binarios

El algoritmo establece un orden de prioridad para determinar el tipo de sensor que sería utilizado en caso de que se tenga más de una estimación derivada de PMW disponible para el mismo lugar para el intervalo de tiempo determinado. El orden de prioridad resultante, consiste en utilizar las estimaciones de TMI en primer lugar. En caso de que no haya una estimación TMI disponible, se usa la información de AMSR-E, seguido de los datos del SSMI y finalmente del AMSU-B. Cada pixel de la media hora de análisis está etiquetado con un identificador de satélite y esta información se almacena como parte de la serie de archivos CMORPH. El orden para determinar la velocidad y dirección de las nubes se realiza mediante un proceso de correlación espacial iterativo que se aplica a los datos IR. Las imágenes IR se desplazan espacialmente con respecto a las otras en todas las direcciones posibles, y el desplazamiento que produce la correlación más alta es la base del campo de movimiento. Sin embargo, debido a que la distribución espacial de las temperaturas de brillo los topes nubosos y las precipitaciones no son los mismos, los vectores de movimiento de precipitación son sometidos a un modelo estadístico que relaciona los vectores de movimiento de la nube contra las precipitaciones advectivas de radar.

Mejoras al algoritmo CMORPH (Joyce et al., 2010)

El procesamiento del CMORPH se inició el 6 de Diciembre del 2002. Desde entonces se han desarrollado e implementado numerosas mejoras al sistema de procesamiento, que han dado lugar a discontinuidades en su evolución histórica. Varios años después de haber iniciado la producción del CMORPH, se detectó que las tasas de precipitación obtenidas desde el AMSU/Sounders sobre el océano eran demasiado bajas. Por lo tanto, se desarrolló e implementó una "actualización" en la calibración del TMI-AMSR-E para eliminar las magnitudes de las estimaciones de precipitación demasiado bajas sobre el océano derivadas del AMSU. Esta actualización generó un incremento en la precipitación total oceánica en las bases de datos del CMORPH a partir de mayo del 2005, fecha en que se puso en práctica el cambio en la calibración. Así mismo, en agosto del 2005 se realizó una actualización al algoritmo del AMSU eliminando una importante deficiencia en las estimaciones de precipitación sobre la costa. Posteriormente, Vila et al. (2007) realizaron una mejora al algoritmo AMSU al incluir un índice de convección desde el canal 183 GHz y el agua líquida en las nubes (*Cloud LiquidWater*, CLW) derivado desde el AMSU-A (Joyce et al., 2010).

CHIRPS

CHIRPS (ClimateHazardsGroupInfraredPrecipitationwithStations), que en español se traduce como "Detección de amenazas climáticas mediante el monitoreo de precipitación satelital", es un conjunto de datos desarrollado por el Servicio Geológico de EEUU (U.S. Geological Survey, USGS) y el CHG (ClimateHazardsGroup) de la Universidad de California, Santa Bárbara. CHIRPS utiliza un procedimiento de estimación de precipitación bajo el enfoque de "interpolación inteligente" para crear una grilla espacialmente continua desde datos de puntos sin procesar (Funk et al., 2014). Los datos de entrada que utiliza el CHIRPS son:(1) las climatologías de precipitación

mensual (CHPclim); (2) observaciones satelitales de sensores IR GEO proporcionados por dos fuentes de la NASA, el centro de Predicción Climática (CPC) y el Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC); (3) producto TRMM 3B42 de la NASA;(4) datos de precipitaciones estimadas por el modelo atmosférico del sistema de pronósticos climáticos de la NOAA, versión 2, (CFSv2); y (5) datos observados en superficie proporcionados por varios servicios meteorológicos nacionales y regionales (Funk et al., 2014) (VerTabla 2-8).

Tabla 2-8: Datos de entrada del algoritmo CHIRPS.

Tipo	**Acrónimo**	**Nombre completo**	**Agencia**
Sensor satelital	GEO-IR	Imágenes Infrarrojos proporcionados por los satélites Geoestacionarios	NASA
Algoritmo de recuperación satelital	TRMM 3B42	Misión para medir precipitación tropical en forma de lluvia producto de precipitación 3B42	NASA y JAXA
Climatologías de precipitación	CHPClim	Climate Hazards Group's Precipitation Climatology	USGS
Estimaciones de modelos atmosféricos	CFSv2	Sistema de pronósticos climáticos, versión 2	NOAA
Datos de pluviómetros			Varias fuentes

Tabla 2-9: Características de los datos de precipitación CHIRPS.

Acrónimo	**Nombre completo**	**Resolución y cobertura espacial**	**Resolución y cobertura temporal**	**Formato de datos**
CHIRPS	Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations 2 días	0.05° 50N-50S	24 h 1981 a la fecha	NetCDF

2.2.3. Zona de estudio

Esta investigación está realizó utilizando información de las regiones del Maule y del Biobío, las cuales están ubicada en la zona centro-sur de Chile entre las latitudes 34°59'S y 38°28'S y longitudes 70°21'O y 73°30'O (Figura 2-4). Ambas regiones tienen un área total de 67,365 km^2. La zona de estudio se caracteriza por presentar topografía compleja, destacando la Cordillera de los Andes, con una altura promedio de 4,000 m, la cual actúa como una barrera climática natural. Las precipitaciones son generalmente de origen frontal, los meses más lluviosos van desde abril hasta septiembre con valores entre el 60 y 70 % de la precipitación total anual, estableciendo un ciclo anual bien definido caracterizado por un máximo invernal y un periodo estival. A este régimen se le conoce como régimen mediterráneo (CONAMA, 2016). La zona de estudio presenta una gran variabilidad espacial en la distribución de las precipitaciones, con precipitaciones anuales de 1,200 mm en la costa y de aproximadamente 2,100 mm en la cordillera. El régimen de precipitaciones está dominado por las inestabilidades de vaguadas en el cinturón de los Oestes, o paso de sistemas frontales, y por la posición del Anticiclón semipermanente del Pacifico Sur (Pizarro y Montecinos, 2000).

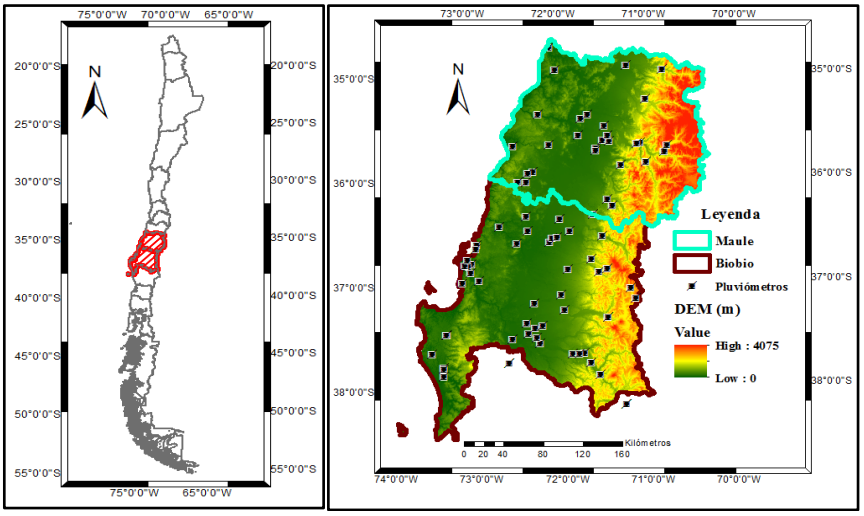


Figura 2-4: Mapa de ubicación del área de estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis calidad de datos pluviométricos

Luego de haber analizado la calidad de los datos disponibles, se obtiene la red pluviométrica (Figura 3-1) que es utilizada para la evaluación de los productos de precipitación satelital y de las técnicas de corrección de sesgo. Para la Red1 se obtuvieron un total de 18 estaciones pluviométricas y para la Red2 59 estaciones pluviométricas.

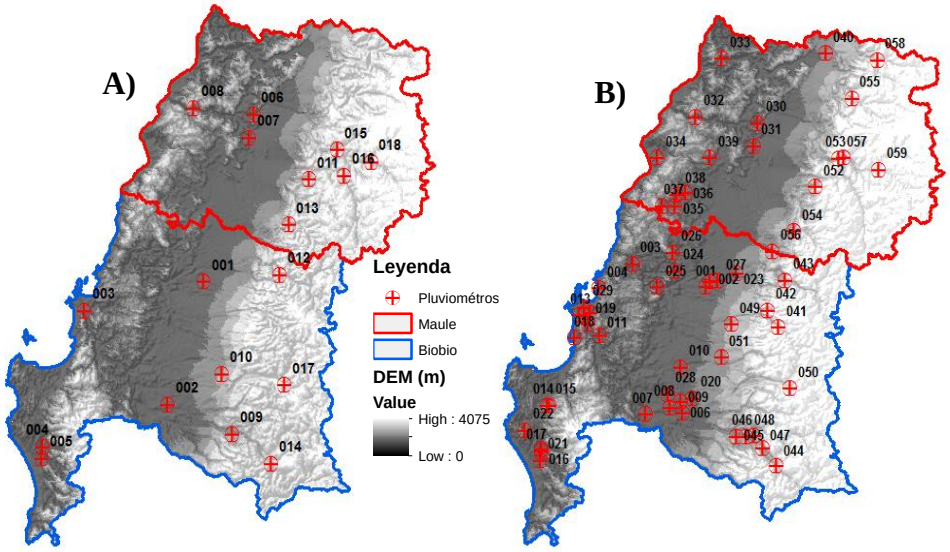


Figura 3-1: Red de estaciones pluviométricas utilizadas para evaluar las estimaciones de precipitación satelital. A) Red1, utilizado para evaluar los productos satelitales CMORPH y CHIRPS; y B) Red2, utilizado para evaluar el IMERG.

En la Tabla 3-1 y Tabla 3-2 se presentan las estaciones pluviométricas de la Red1 y Red2 con el identificador (Id) asignado, precipitación media, precipitación máxima, elevación sobre el nivel del mar en metros y el porcentaje de datos disponibles.

Tabla 3-1: Estaciones pluviométricas con porcentaje de datos disponibles del Red 1.

Id	Estación Pluviométrica	Precipitación media (mm d^{-1})	Precipitación máxima (mm d^{-1})	Elevación (mts)	Datos Disponibles (%)
001	Chillan Viejo	2.53	112.00	111	100.00
002	Los Angeles	2.75	111.00	126	100.00
003	Rio Biobio En Desembocadura	2.30	93.30	7	90.94
004	Cañete DGA	3.30	102.00	67	100.00
005	Cañete Agromet	2.49	95.50	44	87.10
006	Claro en Rauquen	1.45	76.20	74	100.00
007	Loncomillo Brisas	1.42	80.80	80	97.5
008	Maule en Forel	2.23	154.50	57	98.69
009	Rio Biobio en Rucalhue	3.91	150.70	263	97.10
010	Rio Laja Tucapel	3.12	152.30	295	85.16
011	Ancoa en el Morro	3.42	153.00	428	99.81
012	Rio Ñuble En San Fabian N 2	4.06	136.50	454	94.72
013	Longavi en la Quiriquina	3.28	151.30	456	93.51
014	Embalse Pangue	8.79	182.00	517	84.83
015	Armerillo	5.10	217.00	529	99.86
016	Río Melado en el Salto	3.33	175.30	720	85.90
017	Abanico	5.13	160.50	811	99.67
018	Cipreses	3.20	118.00	968	100.00

Tabla 3-2: Estaciones pluviométricas con porcentaje de datos disponibles del Red 2.

ID	**Estación Pluviométrica**	**Precipitación media (mm d^{-1})**	**Precipitación máxima (mm d^{-1})**	**Elevación (mts)**	**Datos Disponibles (%)**
001	Chillan Viejo	2.78	64.00	111	100
002	Canal De La Luz En Chillan	2.43	63.60	128	100
003	Rio Itata En Coelemu	2.28	52.00	29	100
004	Estero Bellavista en Tomé	2.68	89.70	15	100
005	EsteronNonguen Frente UBB	3.25	102.50	19	97
006	Rio Duqueco en Cerrillos	2.61	67.20	127	96
007	Rio Biobio En Coihue	2.64	73.00	62	94
008	Los Angeles	3.02	72.50	126	100
009	Estero Quilque Los Angeles	2.91	75.00	143	99
010	Rio Laja Ag.Arr. Del Salto (Rec.R.Laja)	2.83	82.60	143	91
011	Estero Hualqui En Desembocadura	2.64	70.00	30	84
012	Rio Biobio En Desembocadura	3.42	99.00	7	95
013	Concepción DGA	3.26	88.30	19	100
014	Curanilahue	4.84	100.00	144	100
015	Estero Plegarias antes Jta Río Curanilahue	5.14	119.90	144	94
016	Cañete DGA	3.61	69.00	67	100
017	Río Leiva en Puente Camino a Contulco	3.33	63.40	56	100
018	Coronel	2.28	69.20	14	99
019	Chiguayante	3.00	78.30	24	100
020	Human	3.16	77.00	194	99
021	Cañete Agromet	3.25	56.10	44	100
022	Lebu	4.94	98.20	199	100
023	Sta Rosa	2.81	76.80	202	100
024	Portezuelo	2.27	60.20	99	100
025	Nueva Aldea	1.84	56.70	96	100
026	Ninhue	2.05	81.00	151	100
027	Bernardo O'higgins, Chillán	2.66	73.00	156	100

ID	Estación Pluviométrica	Precipitación media (mm d^{-1})	Precipitación máxima (mm d^{-1})	Elevación (mts)	Datos Disponibles (%)
028	María Dolores	2.98	79.00	120	100
029	Carriel Sur, Concepción	2.31	79.20	19	100
030	Claro en Rauquen	1.65	66.00	74	100
031	Loncomillo Brisas	1.57	74.00	80	100
032	Maule en Forel	2.56	100.40	57	98
033	Mataquito en Licanten	1.99	95.00	18	93
034	Chanco	1.78	67.50	175	99
035	Los Despachos	1.75	53.10	163	100
036	Cauquenes	1.26	36.00	165	85
037	Coronel de Maule	1.89	76.00	156	100
038	Santa Sofia	1.76	71.00	152	99
039	Sauzal	1.72	52.50	204	100
040	General Freire, Curico Ad	1.59	92.50	232	100
041	Diguillin en San Lorenzo	5.08	124.50	722	100
042	Rio Chillan En Esperanza N 2	5.22	100.20	596	100
043	Rio Ñuble En San Fabian N2	4.26	104.75	454	100
044	Embalse Pangue	8.79	176.10	517	100
045	Rio Biobio en Rucalhue	4.02	94.50	263	100
046	Río Huequecura Aguas Arriba de Embalse Angostura	4.04	97.20	329	95
047	Río Biobio en Culebra	6.56	130.40	344	100
048	Río BB puente Piulo	4.49	116.60	290	100
049	Navidad	3.23	70.70	310	98
050	Abanico	5.50	114.00	811	98
051	Yungay	3.99	112.40	269	100
052	Ancoa en el Morro	2.89	107.70	428	100
053	Armerillo	5.33	196.00	529	100
054	Longavi en la Quiriquina	3.67	99.70	456	100
055	Palos en Colorado	3.00	88.70	600	100
056	Perquilauquen en San Manuel	2.81	77.92	278	89
057	Río Maule en Armerillo	5.07	202.30	478	99
058	Río Teno dj Claro	2.60	85.70	657	99
059	Cipreses	3.40	104.00	968	100

De acuerdo a los estadísticos que se presentan en la Tabla 3-3 y Tabla 3-4se observa un buen desempeño de la metodología empleada al verificar que las series conservan los principales estadísticos de la muestra y la variabilidad natural que existe en la serie original.

Tabla 3-3: Parámetros estadísticos de las series originales y reconstruidas de la Red1.

ID	Estación Pluviométrica	Precipitación media		Desviación Estándar	
		Original	Rellenado	Original	Rellenado
001	Chillan Viejo	2.53	2.53	8.31	8.31
002	Los Angeles	2.75	2.75	8.45	8.45
003	Rio Biobio En Desembocadura	2.41	2.30	7.81	7.76
004	Cañete DGA	3.29	3.29	8.84	8.84
005	Cañete Agromet	2.85	2.48	7.99	7.52
006	Claro en Rauquen	1.45	1.45	5.83	5.84
007	Loncomillo Brisas	1.46	1.42	5.98	5.91
008	Maule en Forel	2.26	2.23	9.42	9.36
009	Rio Biobio en Rucalhue	4.03	3.91	10.68	10.55
010	Rio Laja En Tucapel	2.79	3.12	8.85	9.20
011	Ancoa en el Morro	3.43	3.42	11.98	11.97
012	Rio Ñuble En San Fabian N 2	3.89	4.06	12.08	12.22
013	Longavi en la Quiriquina	3.51	3.28	11.38	11.04
014	Embalse Pangue	8.66	8.79	22.10	22.01
015	Armerillo	5.08	5.10	18.62	18.53
016	Río Melado en el Salto	3.88	3.33	14.00	13.05
017	Abanico	5.15	5.13	13.33	13.31
018	Cipreses	3.20	3.20	11.30	11.30

Tabla 3-4: Parámetros estadísticos de las series originales y reconstruidas de la Red 2.

	Estación Pluviométrica	**Precipitación media**		**Desviación estándar**	
		Original	Reconstruido	Original	Reconstruido
001	Chillan Viejo	2.78	2.78	8.11	8.11
002	Canal De La Luz En Chillan	2.43	2.43	7.30	7.30
003	Rio Itata En Coelemu	2.28	2.28	6.91	6.91
004	Estero Bellavista en Tomé	2.64	2.68	8.62	8.63
005	Esteron Nonguen Frente a U del BB	3.27	3.25	9.75	9.71
006	Rio Duqueco en Cerrillos	2.63	2.61	7.77	7.83
007	Rio Biobio En Coihue	2.56	2.64	8.11	8.25
008	Los Angeles	3.02	3.02	8.69	8.69
009	Estero Quilque En Los Angeles	2.82	2.91	8.33	8.45
010	Rio Laja Ag.Arr. Del Salto	2.72	2.83	8.71	8.65
011	Estero Hualqui En Desembocadura	2.48	2.64	6.99	8.09
012	Rio Biobio En Desembocadura	3.05	3.42	10.14	10.85
013	Concepción DGA	3.26	3.26	9.12	9.12
014	Curanilahue	4.84	4.84	12.55	12.55
015	Estero Plegarias Jta Río Curanilahue	5.31	5.14	14.03	13.72
016	Cañete DGA	3.61	3.61	9.47	9.47
017	Río Leiva Puente Camino a Contulco	3.33	3.33	8.67	8.67
018	Coronel	2.31	2.28	6.79	6.75
019	Chiguayante	2.97	3.00	8.99	9.02
020	Human	3.20	3.16	8.61	8.56
021	Cañete Agromet	3.25	3.25	7.62	7.62
022	Lebu	4.88	4.94	11.98	12.07
023	Sta Rosa	2.81	2.81	8.71	8.71
024	Portezuelo	2.27	2.27	7.31	7.31
025	Nueva Aldea	1.84	1.84	6.14	6.14
026	Ninhue	2.05	2.05	7.55	7.55
027	Bernardo O'higgins, Chillán Ad	2.66	2.66	8.27	8.27
028	María Dolores	2.98	2.98	9.16	9.16
029	Carriel Sur, Concepción	2.31	2.31	7.41	7.41

	Estación Pluviométrica	**Precipitación media**		**Desviación estándar**	
		Original	Reconstruido	Original	Reconstruido
030	Claro en Rauquen	1.65	1.65	6.28	6.28
031	Loncomillo Brisas	1.57	1.57	5.88	5.88
032	Maule en Forel	2.59	2.56	9.12	9.02
033	Mataquito en Licanten	1.86	1.99	8.07	8.08
034	Chanco	1.79	1.78	6.06	6.04
035	Los Despachos	1.75	1.75	5.98	5.98
036	Cauquenes	1.02	1.26	3.66	4.22
037	Coronel de Maule	1.89	1.89	7.03	7.03
038	Santa Sofia	1.77	1.76	6.17	6.15
039	Sauzal	1.72	1.72	5.89	5.89
040	General Freire, Curico Ad	1.60	1.59	6.79	6.79
041	Diguillin en San Lorenzo	5.08	5.08	13.88	13.88
042	Rio Chillan En Esperanza N 2	5.23	5.22	14.16	14.16
043	Rio Ñuble En San Fabian N 2	4.21	4.26	12.17	12.21
044	Embalse Pangue	9.00	9.00	22.37	22.37
045	Rio Biobio en Rucalhue	4.02	4.02	10.48	10.48
046	Río Huequecura Aguas ArribaEmbalse Angostura	3.84	4.04	11.14	10.60
047	Río Biobio en Culebra	6.37	6.56	17.15	16.72
048	Río BB puente Piulo	4.31	4.49	12.62	12.06
049	Navidad	3.24	3.23	9.47	9.40
050	Abanico	5,59	5,50	14,19	14,09
051	Yungay	3.99	3.99	11.28	11.28
052	Ancoa en el Morro	2.89	2.89	10.07	10.07
053	Armerillo	5.33	5.33	17.70	17.70
054	Longavi en la Quiriquina	3.67	3.67	10.90	10.90
055	Palos en Colorado	2.99	3.00	10.67	10.67
056	Perquilauquen en San Manuel	2.26	2.81	7.68	8.57
057	Río Maule en Armerillo	4.92	5.07	16.97	17.08
058	Río Teno dj Claro	2.40	2.60	8.70	9.40
059	Cipreses	3.40	3.40	10.73	10.73

Luego se realizó el análisis de consistencia, a través de la inspección gráfica de las series temporales anuales y multianuales observándose un comportamiento estacional, con un ciclo anual formado por un período seco y un período húmedo. Se eliminó un

valor atípico identificado en la estación pluviométrica ubicada en el embalse Pangue (Figura 3-2). En la Tabla 3-5 se presentan los estadísticos descriptivos de la serie temporal.

Tabla 3-5: Datos cuantitativos descriptivos de estación pluviométrica Embalse Pangue.

Estadístico	Valor (mmd^{-1})
No. de observaciones	3652
Mínimo	0,000
Máximo	253,100
1° Cuartil	0,000
Mediana	0,000
3° Cuartil	3,700
Media	8,861

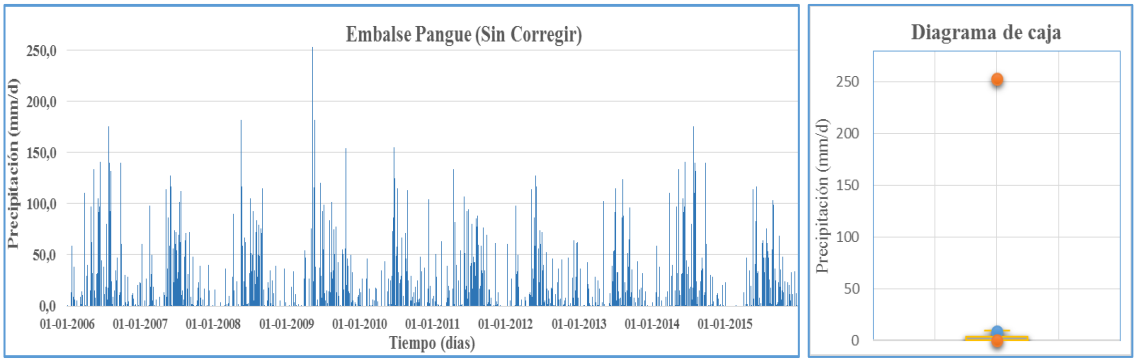


Figura 3-2 Serie temporal de precipitación (izquierda) y diagrama de cajaen la estación pluviométrica embalse Pangue.

La Figura 3-3 presenta las autocorrelaciones de las series temporales diarias analizadas para el periodo 2006 hasta el 2015, con valor significativamente diferente de cero para el coeficiente de orden 1, indicando la dependencia de la serie de datos entre sí. Además se observa como los coeficientes van decreciendo hasta llegar a cero en

tiempo de retardos igual a 20, para la mayoría de las estaciones pluviométricas analizadas en este estudio indicando que la serie son estacionarias.

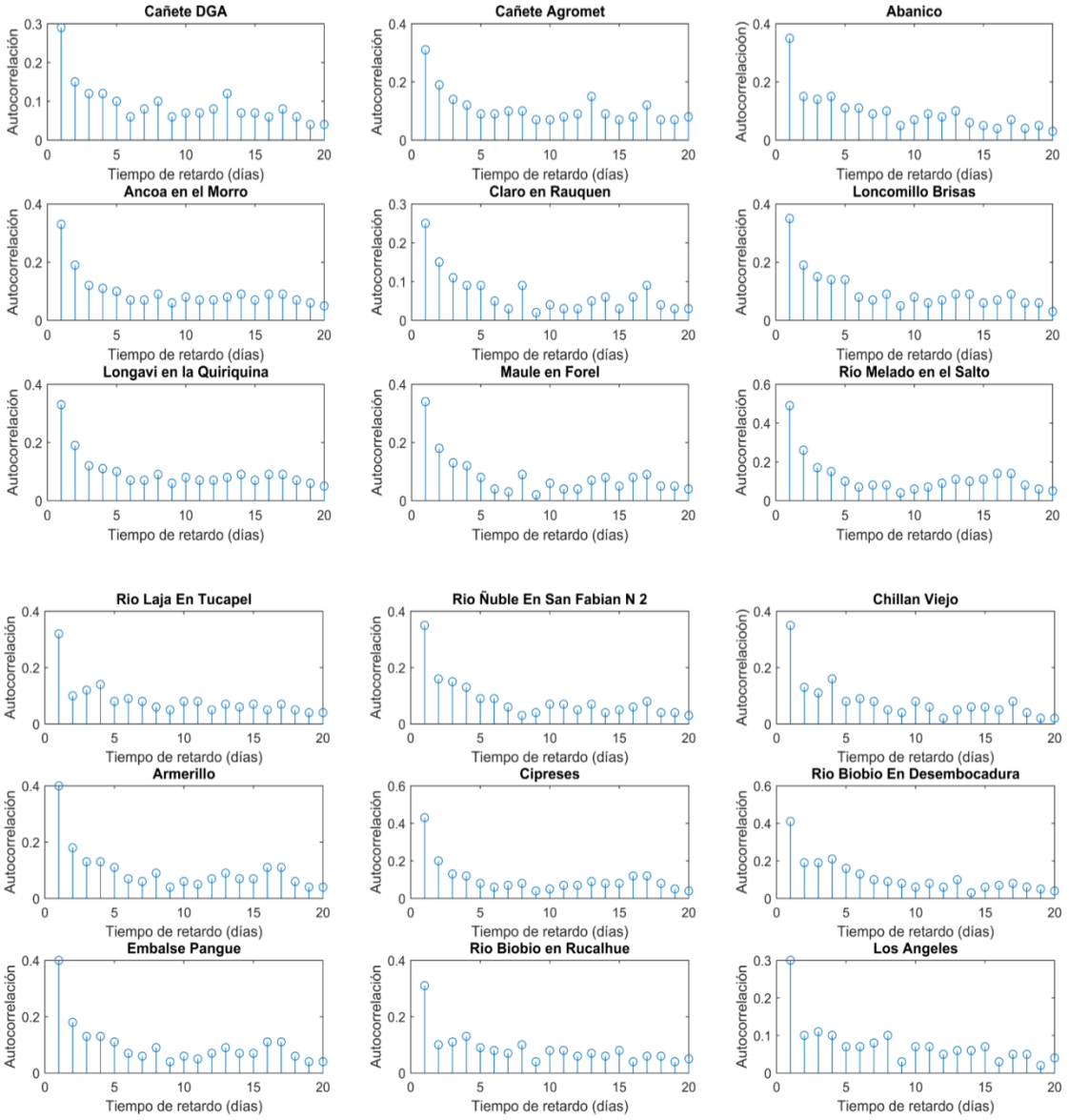


Figura 3-3 Autocorrelaciones de las series temporales de precipitación

En la Figura 3-4 y la Figura 3-5 se observan las curvas de doble masa de quince estaciones utilizadas en los dos periodos de evaluación de este estudio. En el Anexo A se encuentran las estaciones pluviométricas restantes del total consideradas para este estudio. Estas curvas de doble masa muestran la homogeneidad de los datos.

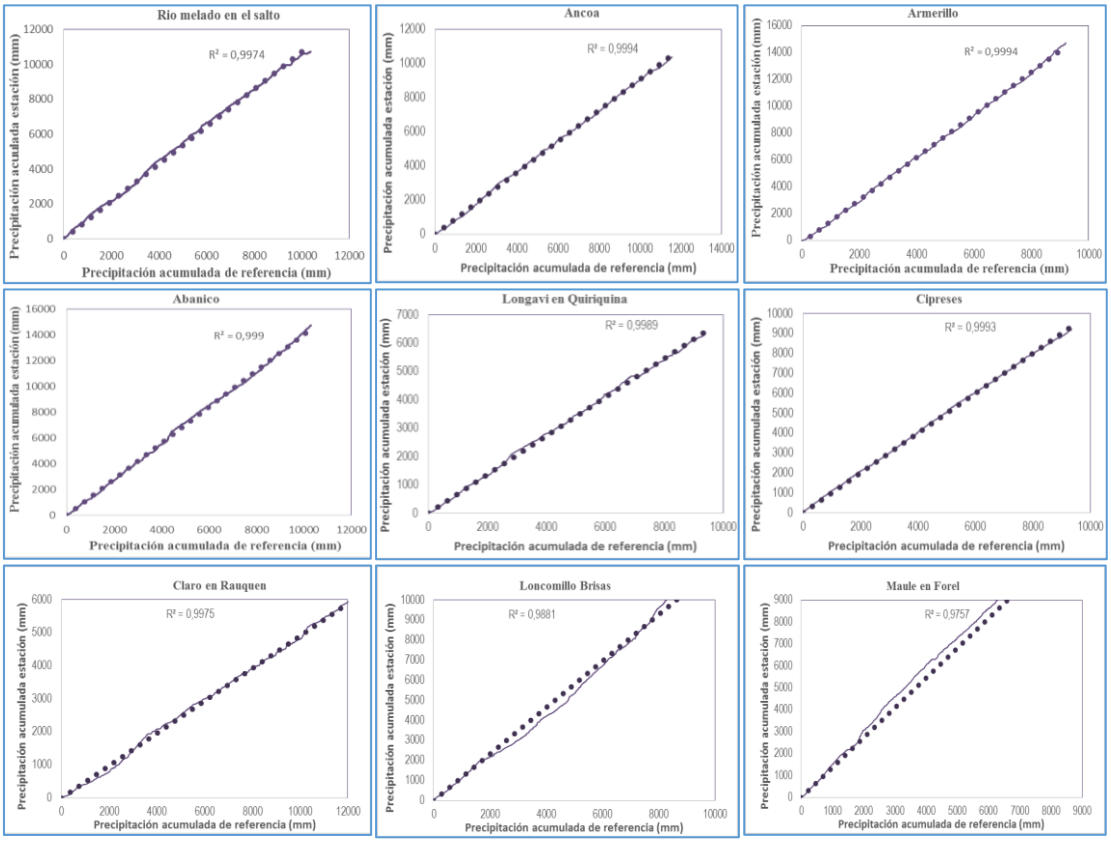


Figura 3-4: Curvas de doble masa para el periodo 2006-2015. Línea continua es la regresión entre la precipitación acumulada de referencia y la precipitación acumulada de la estación en análisis. Puntos representan la tendencia lineal.

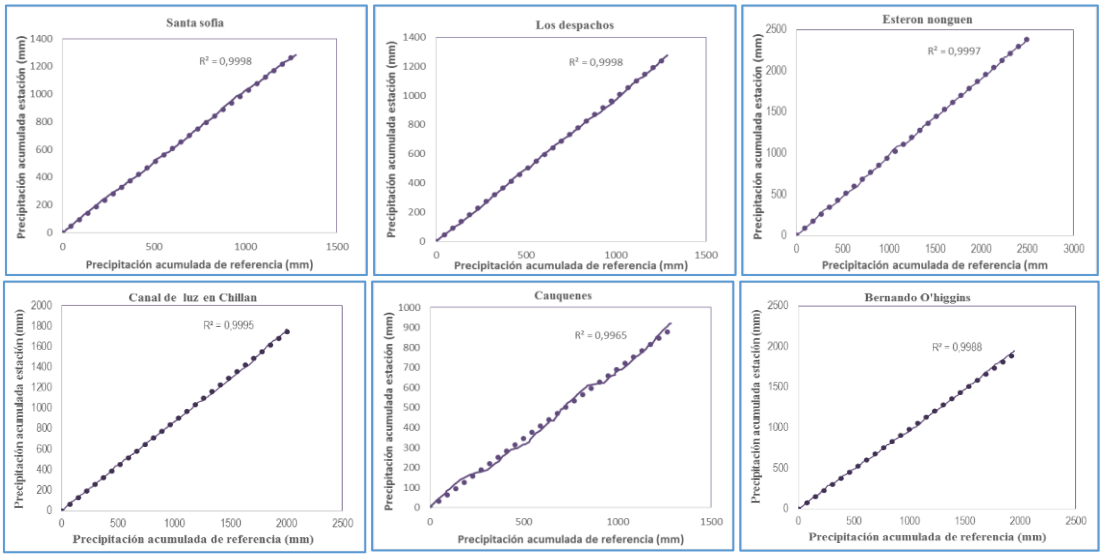


Figura 3-5: Curvas de doble masa para el periodo 2014-2015.

3.2. Evaluación de datos de precipitación satelital y técnicas de corrección de sesgo

3.2.1. CMORPH

3.2.1.1. Análisis a nivel anual sin corrección de sesgo

En la Figura 3-6 se presentan los resultados de las métricas estadísticas al comparar las estimaciones a escala diaria del CMORPH con respecto a los datos pluviométricos para el periodo del año 2015. Según estos resultados, se observa que el CMORPH representa satisfactoriamente la variabilidad temporal de las precipitaciones diarias sobre la costa y el valle con correlaciones de hasta 0.78, contrario a lo que ocurre en las altitudes medias, donde se obtienen correlaciones de hasta 0.36. Con respecto al error medido por el RMSE, se observa que varía sobre toda la zona de estudio, desde 4.4 mm sobre la costa hasta 18.2 mm en la zona de altitudes medias, estos valores muestran altas desviaciones de los valores de precipitación satelital con respecto a los valores observados en términos de magnitud, por ejemplo, 4.4 mm equivale aproximadamente al

100 % de la precipitación media anual observada en la zona de altitudes bajas, y 18.2 mm al 205% de la precipitación media anual observada en la zona de altitudes medias. Al analizar la tendencia a sobreestimar o subestimar de las estimaciones CMORPH, se observa que subestima en toda la zona de estudio con valores entre -0.35 mm hasta -5.12 mm, presentando mayor tendencia a subestimar en la zona de altitudes medias con -5.12 mm que equivale aproximadamente al 58% de la precipitación media anual observada. Estos resultados son coherentes con las observaciones de Moazami et al. (2016), el cual concluyó que las estimaciones del CMORPH tienden a subestimar la precipitación. Los resultados también muestran la dependencia del CMORPH con respecto a la altitud y a la topografía, en términos de sesgos, correlación y RMSE, de manera similar a lo reportado por Habib et al. (2012). Al analizar los resultados del coeficiente de NS, se observa un mal desempeño del CMORPH, obteniéndose un valor máximo de 0.28 y un valor mínimo de -11.61.

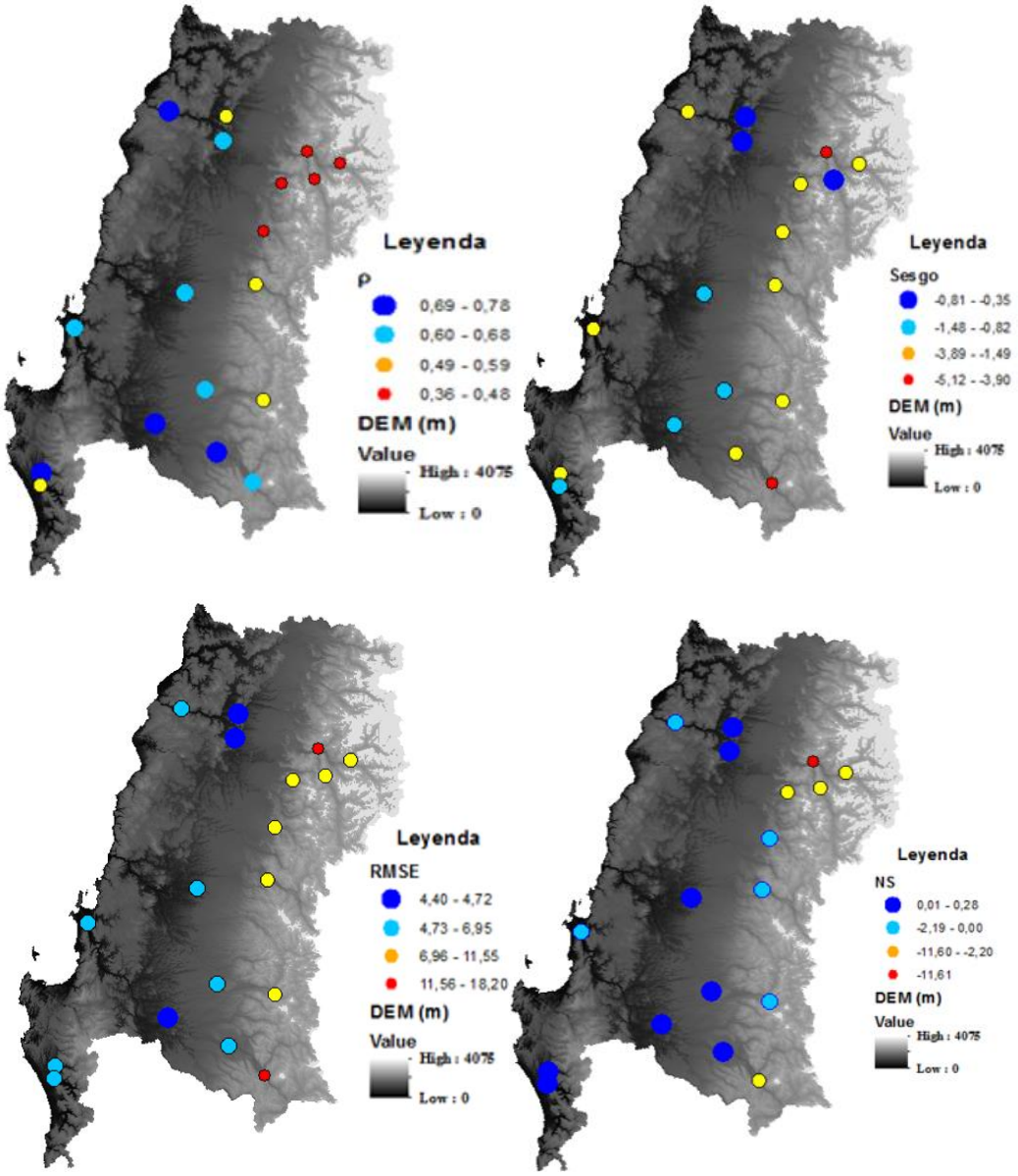


Figura 3-6: Indicadores estadísticos al comparar el CMORPH con datos pluviométricos nivel anual.

3.2.1.2. Análisis a nivel estacional sin corrección de sesgo

En la Figura 3-7 se presenta el desempeño de los datos del CMORPH para la temporada de invierno y en la Figura 3-8 para la temporada de verano. En la temporada de invierno se tienen precipitaciones medias entre 2.4 y 13 mm, y precipitaciones máximas entre 55 y 185 mm. Por su parte, en verano se tienen precipitaciones medias entre 0.1 y 1 mm, y precipitaciones máximas entre 8.1 y 35 mm. De acuerdo a los resultados obtenidos, el CMORPH presenta mejor desempeño para la temporada de invierno, periodo en que se reportan las mayores frecuencias de precipitaciones y de mayor intensidad. En invierno, el CMORPH presenta mejor capacidad para representar la variabilidad temporal en zonas de bajas altitudes, principalmente sobre la costa y el valle. Por otra parte, durante la temporada de verano, se observa que el CMORPH tiene una buena capacidad para representar la precipitación en zonas de bajas altitudes, aunque sobre la costa tiende a ser más deficiente con respecto a los resultados obtenidos en invierno. En ambas temporadas (invierno y verano), CMOPRH tiende a subestimar las precipitaciones con sesgos de hasta -14.20 mm durante el invierno y de hasta -2.53 mm durante el verano. Para la temporada de invierno se presentan los sesgos más altos en la zona de alta montaña; en cambio, en el verano, los sesgos más altos se observan en toda la zona de estudio.

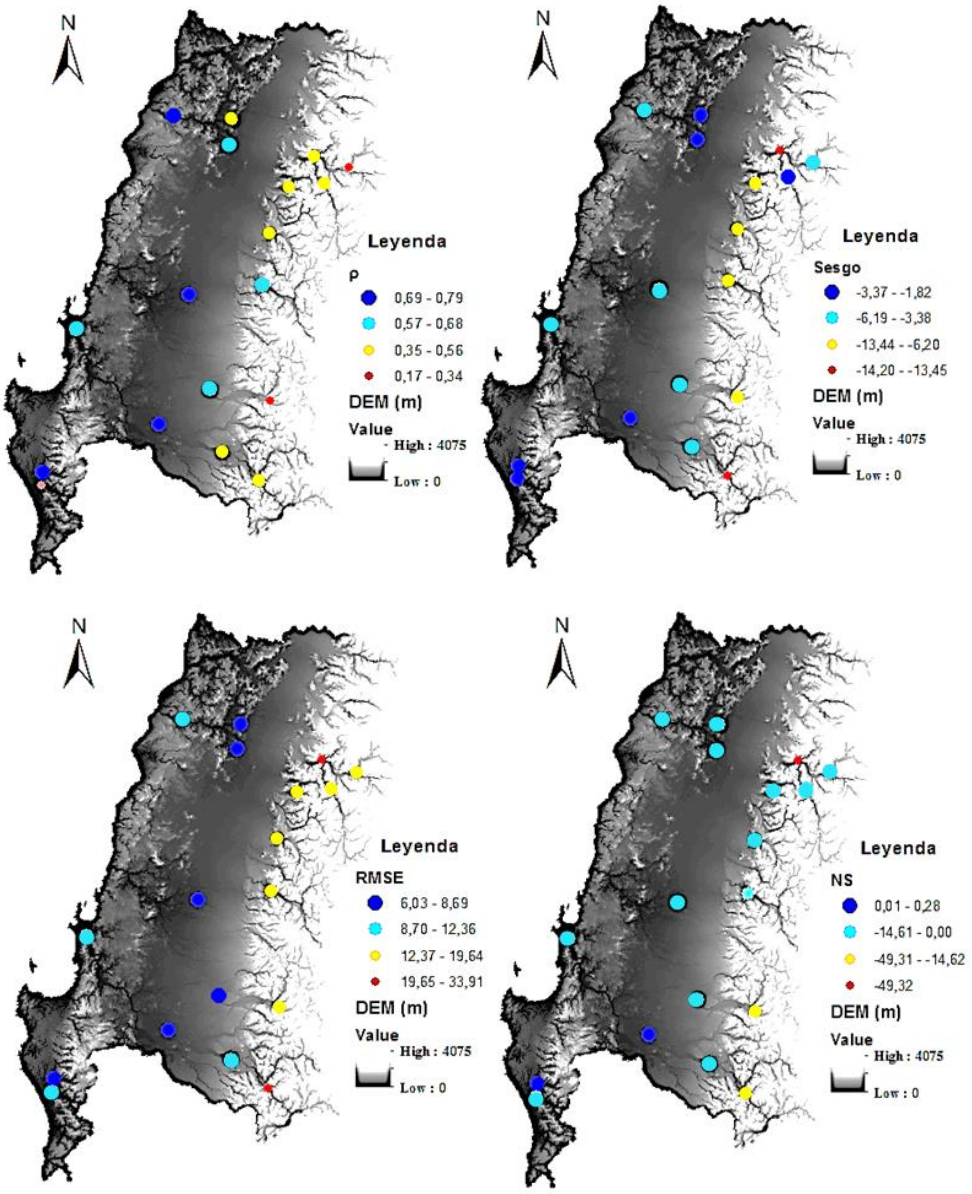


Figura 3-7: Indicadores estadísticos al comparar el CMORPH con los datos pluviométricos monitoreados durante el invierno para el año 2015.

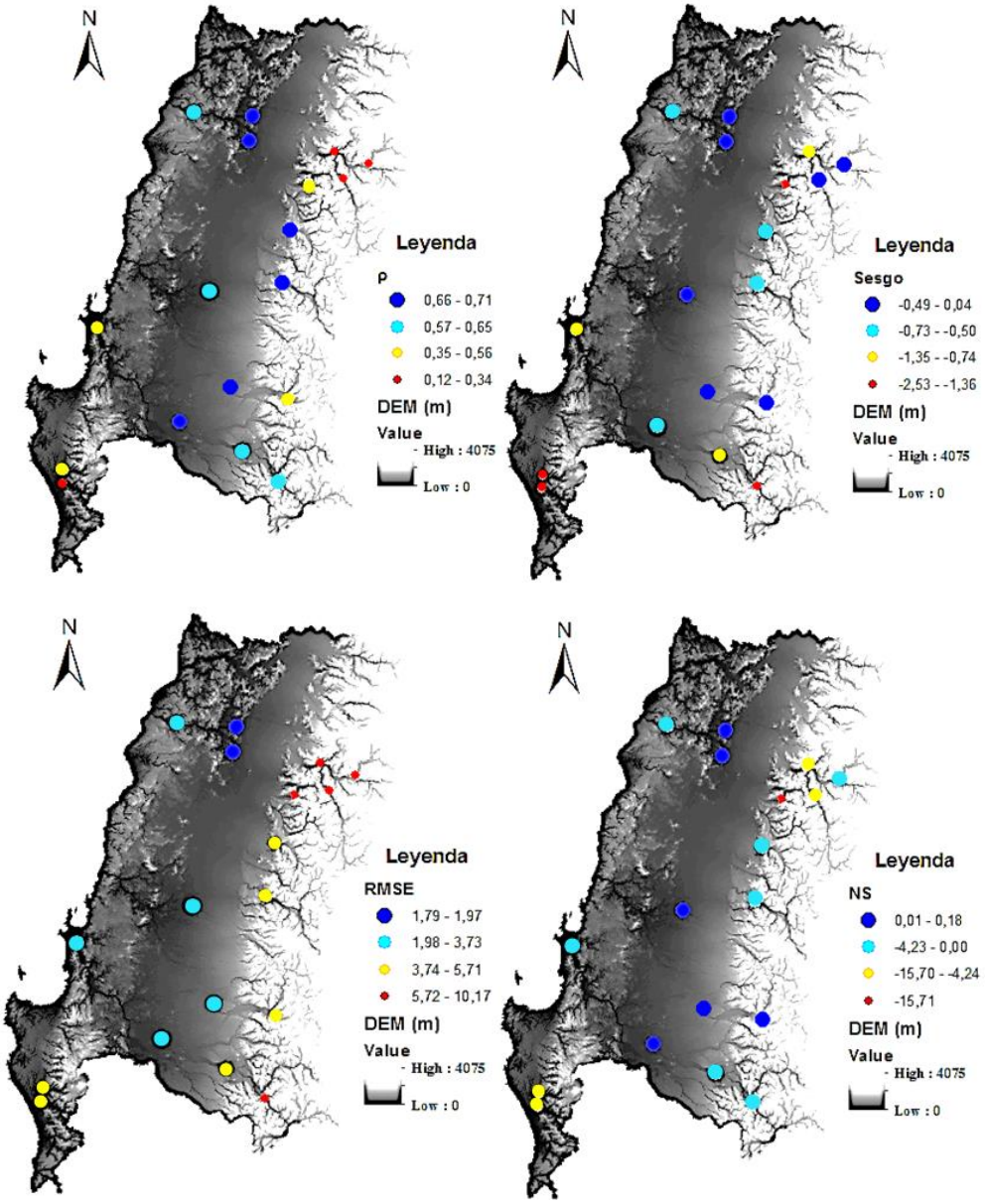


Figura 3-8: Indicadores estadísticos al comparar el CMORPH con los datos pluviométricos monitoreados durante el verano para el año 2015.

3.2.1.3. Análisis a nivel anual con corrección de sesgo

En la Figura 3-9 se observa el desempeño de las técnicas de corrección de sesgo al punto de la grilla de CMORPH más cercano a las estaciones pluviométricas ubicadas sobre la zona de altitudes bajas y altitudes medias. En el eje de las abscisas se indican las estaciones desde la 001 hasta la 018. Las estaciones pluviométricas con un Id desde 001 hasta la 009 corresponden a las estaciones pluviométricas de bajas elevaciones. A partir de la estación 010 hasta la 018 se muestran las estaciones pluviométricas de altitudes medias. El término CRUDO hace referencia al valor de precipitación diaria del CMORPH sin corregir. Al evaluar las correlaciones se observa que el ISIMIP presenta mejor desempeño que el SCALING en la representación de la variabilidad temporal con una correlación mínima de 0.5 y una máxima de 0.78. En términos de corrección de sesgo el SCALING presenta mejor desempeño que el ISIMIP, principalmente en zonas de altitudes medias, zonas en donde el CMORPH presenta los sesgos más altos (de hasta -5.12 mm). En resumen las estimaciones CMORPH sin corregir presentan valores de sesgo entre -0.35 hasta -5.12 mm, al ser corregidos con el ISIMIP se reducen a valores entre -1.28 hasta 0.7 y con el SCALING se reducen a valores entre -1.46 hasta 0.35 mm. Al analizar los resultados del coeficiente de Nash, se observa que el ISIMIP es ligeramente mejor que el SCALING, esto puede estar relacionado a que el SCALING reduce el sesgo, pero no mejora las correlaciones, ni reduce el RMSE, en cambio el ISIMIP reduce el sesgo y mejora las correlaciones, pero no reduce el RMSE.

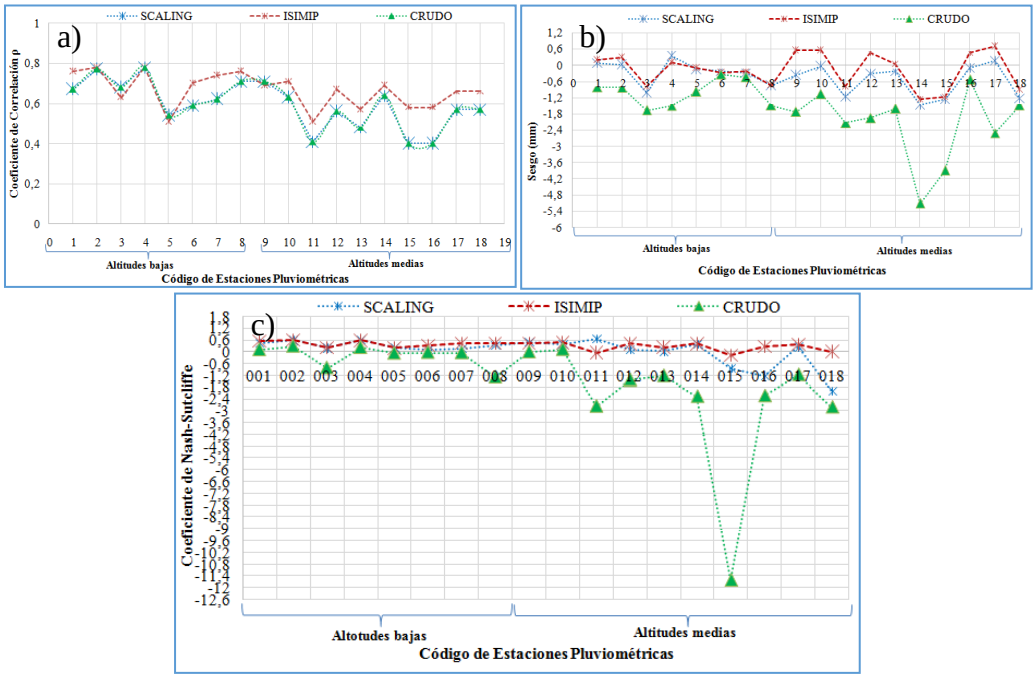
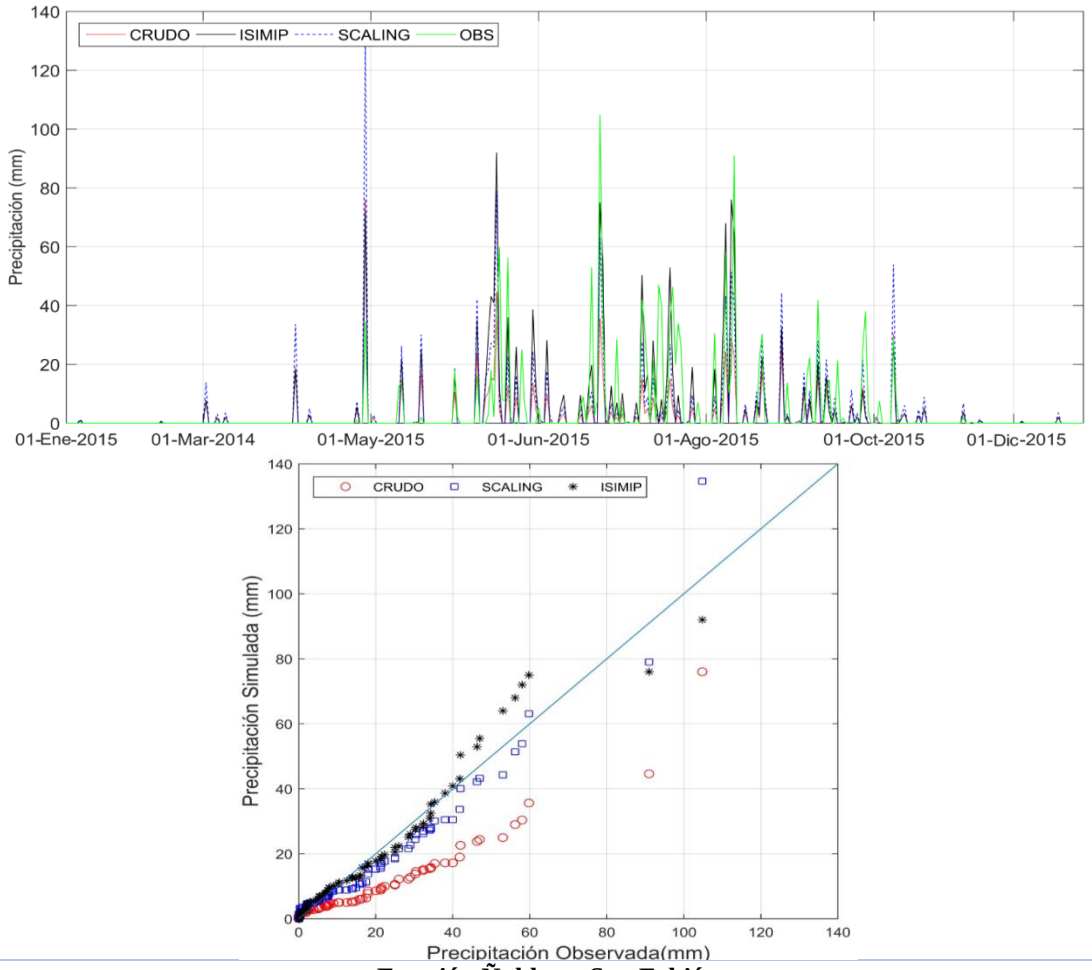


Figura 3-9: Desempeño de las técnicas de corrección de sesgo en los resultados de precipitación satelital obtenidos con el CMORPH. a) Sesgo, b) Coeficiente de correlación ρ y c) Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

La Figura 3-10, Figura 3-11, Figura 3-12, muestran el efecto de la metodología de corrección de sesgo aplicada a las series de precipitaciones diarias a nivel anual para tres puntos de estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes niveles de elevación: Chillán viejo a 111 m.s.n.m., Ñuble en San Fabián a 454 m.s.n.m. y Embalse Pangue a 517 m.s.n.m. Se comparan los datos de precipitación corregidos, sin corregir y los observados. Esto se hace manera gráfica y mediante indicadores estadisticos. De acuerdo a los indicadores estadisticos calculados, se observa un buen desempeño de la metodología ISIMIP en comparación al SCALING. Con el ISIMIP se mejoranlas correlaciones de 0.56 a 0.66 (Figura 3-10) de 0.67 a 0.78 (Figura 3-11) y de 0.64 a 0.69 (Figura 3-12). En todos los casos se reduce el sesgo, donde la reducción del sesgo más

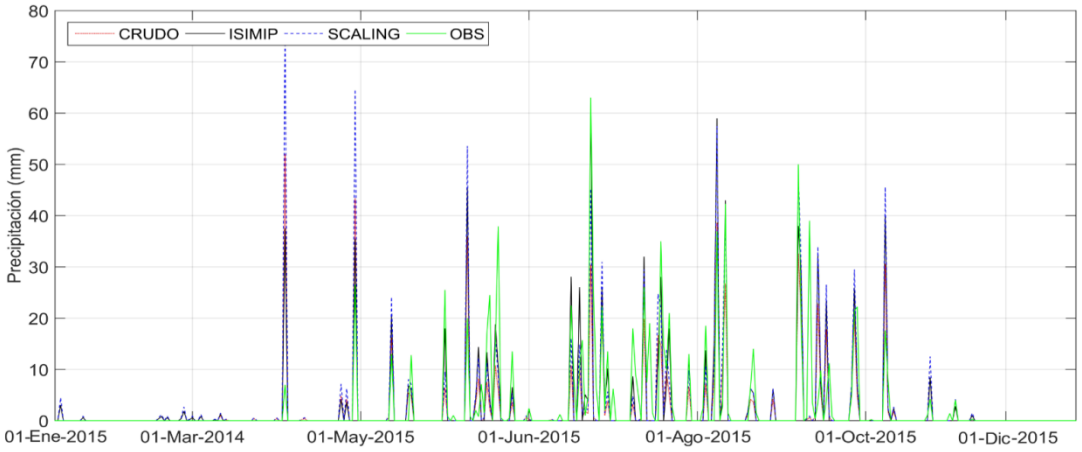
importante se observa en la estación pluviometrica en Embalse el Pangue (Figura 3-12). En este caso, el sesgo pasa de -5.12 a -1.46 mm, lo que ocurre enla estación meterorológica de mayor elevación. Con relación al coeficiente NS, se observan variaciones de los valores que van desde -1.41 hasta 0.33 para la estación pluviométrica Ñuble en San Fabian (Figura 3-10) , mientras que para Chillán Viejo (Figura 3-11) el coeficiente NS pasa de 0.11 a 0.58. Para la estación pluviométrica Emblase Pangue , el coeficiente NS mejora de -2.23 a 0.41. El RMSE se reduce ligeramente para todo los puntos de estaciones meteorológicos. En el caso a Ñuble en San Fabian pasa de 10.3 a 10.2 mm, en Chillán Viejopasa de 5.9 a 5.4 mm, y en la estación pluviométrica Emblase Pangue pasa de 15.0 a 14.5 mm.

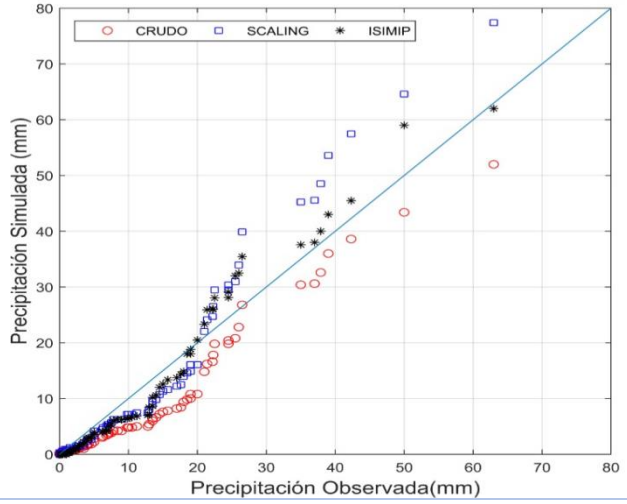
Con respecto al SCALING, éste algoritmo mejora los sesgos.Sin embargo, tiende a incrementar el RMSE y no presenta mejoras en las correalciones.En la estación meteorológica Ñuble en San Fabián, se observa que el sesgo se reduce pasando de -1.96 a -0.32 mm, el coeficiente de correlación se mantiene en 0.56, el coeficiente de NS mejora ligeramente de -1.41 a 0.09 con respecto al valor observado y el RMSE tiene un incremento tenue de 0.9 mm, pasando de 10.3 a 11.3 mm. Un desempeño similar se observa tanto en la estación Chillán Viejo como en la estación meteorológica ubicada en el Embalse Pangue, tanto en términos de variabilidad temporal, como en sesgo, RMSE y NS.



Estación Ñuble en San Fabián				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.56	10.33	-1.96	-1.41
ISIMIP	0.66	10.16	0.09	0.33
SCALING	0.56	11.26	-0.32	0.09

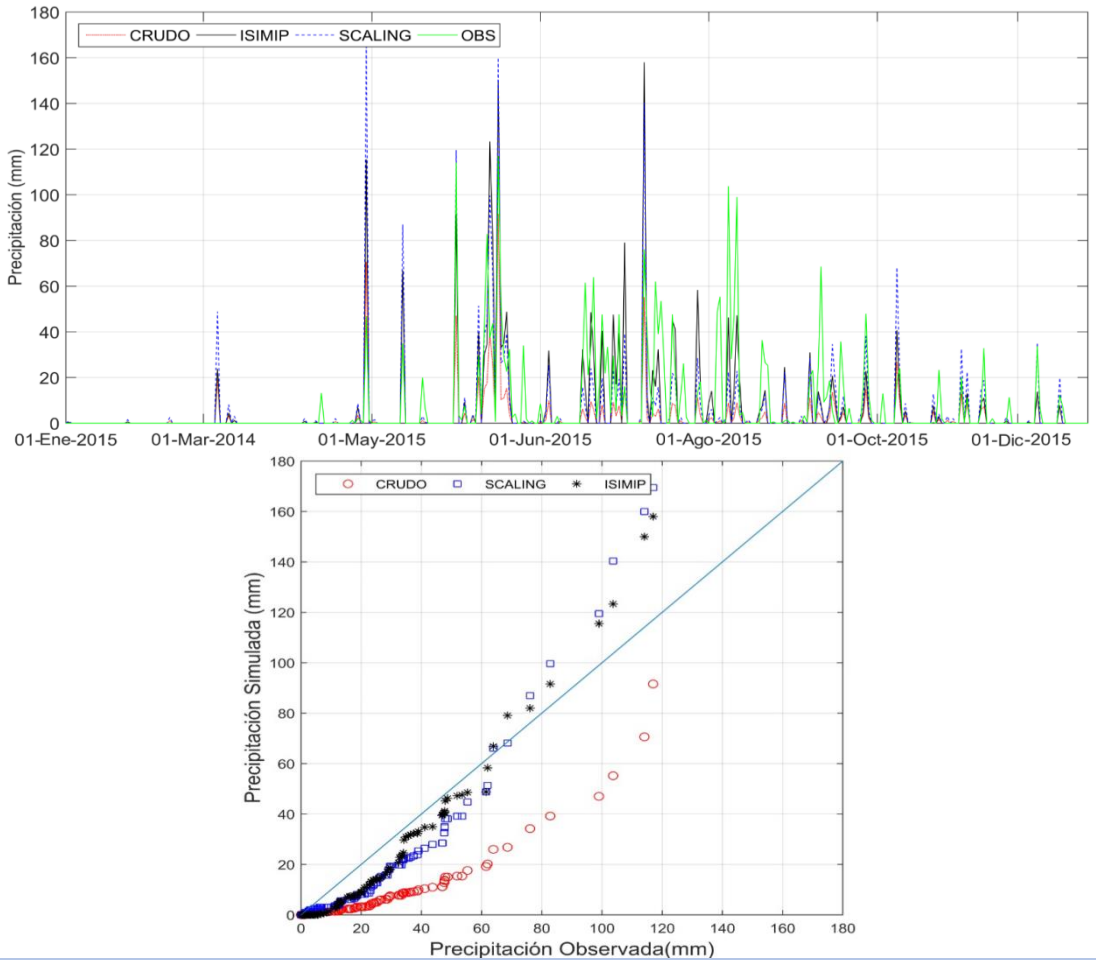
Figura 3-10: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.





Chillán Viejo				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.67	5.92	-0.82	0.11
ISIMIP	0.78	5.39	-0.12	0.58
SCALING	0.67	7.07	0.07	0.42

Figura 3-11: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Chillán Viejo. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.



Embalse Pangue				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.64	14.95	-5.12	-2.23
ISIMIP	0.69	14.52	-1.46	0.41
SCALING	0.64	15.76	-1.73	0.32

Figura 3-12: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Embalse Pangue. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.

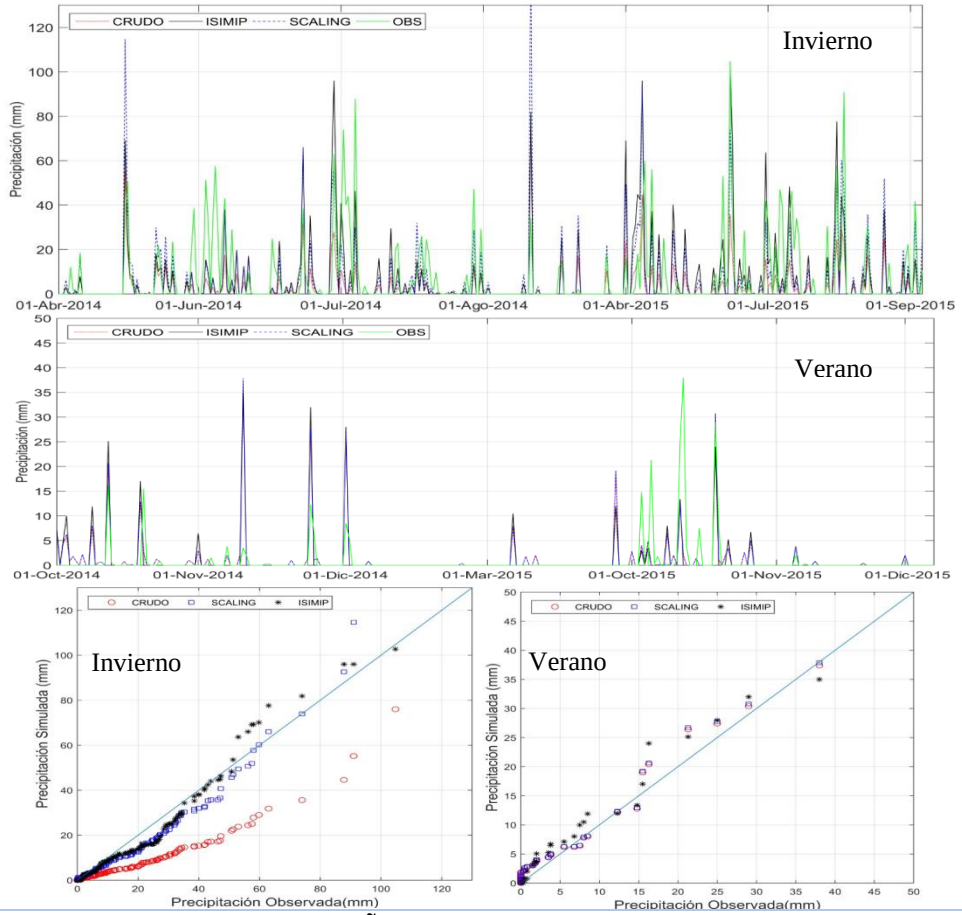
3.2.1.4. Análisis a nivel estacional con corrección de sesgo

La Figura 3-13 y Figura 3-14 presentan el desempeño de las metodologías de corrección de sesgo utilizadas en este estudio considerando las temporadas de invierno y verano, mediante la comparación de los datos de precipitación corregida y sin corregir. Las técnicas de corrección de sesgo presentan un buen desempeño para la estación de invierno, correspondiente al periodo lluvioso, mientras que en verano estas técnicas no funcionan bien. Esto probablemente se deba a que el verano es un periodo con baja frecuencia e intensidades de precipitaciones. Por ejemplo, en el mes de enero del 2015 no se reportan precipitaciones. Al analizar la información de la estación meteorológica de Ñuble de San Fabián para la temporada de invierno, con precipitación media y máxima observada para el periodo de validación de 7.4 y 104.8 mm, respectivamente, se observa un buen desempeño de las técnicas de corrección de sesgo con respecto al periodo de verano con precipitación media y máxima observada de 0.8 y 38 mm, respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos en Ñuble de San Fabián, se observa que el ISIMIP funciona mejor que el SCALING. Por ejemplo, para el invierno el ISIMIP mejora el coeficiente de correlación de 0.52 a 0.59, disminuyendo el sesgo desde -4.4 hasta -0.69 mm, y mejora ligeramente el coeficiente NS desde -2.40 hasta 0.26, e incrementa ligeramente el RMSE en 0.23 mm (equivalente al 3% de la precipitación media) con respecto al RMSE obtenido de los valores sin corregir. Por otro lado, en el verano la correlación disminuye, el sesgo aumenta, el coeficiente NS no mejora y el RMSE incrementa en 1.39 mm. Con el SCALING ninguna de las medidas estadísticas mejora.

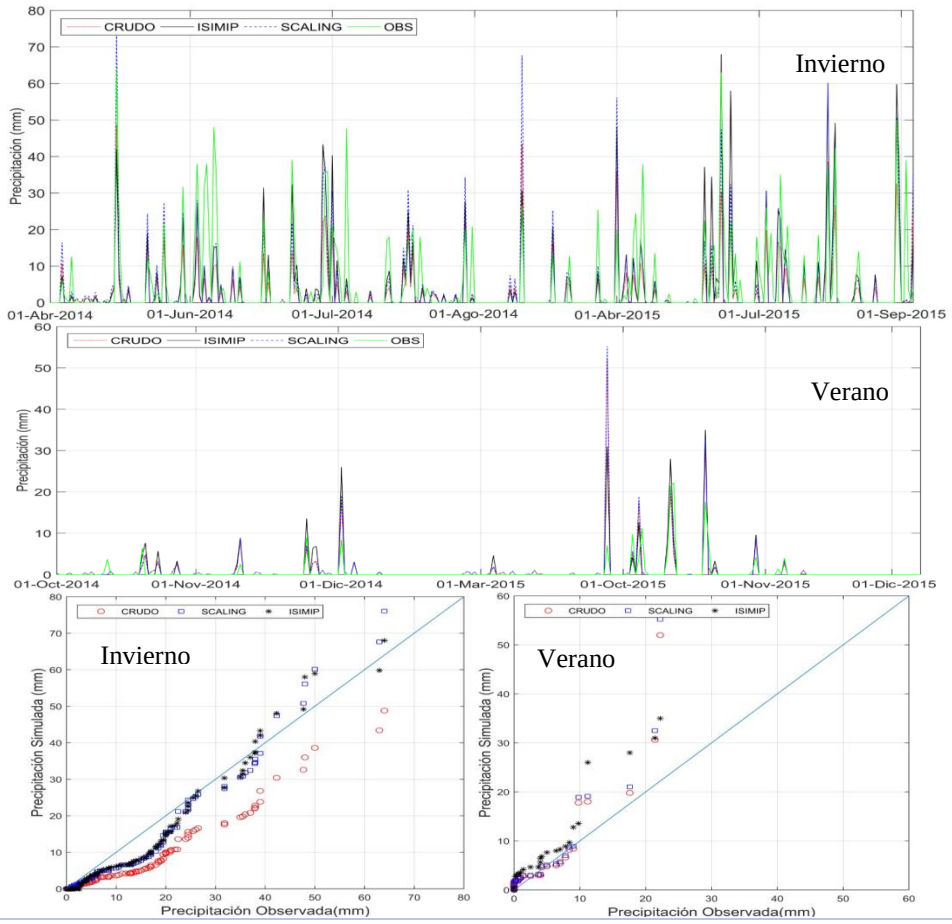
Al analizar los resultados de la estación meteorológica ubicada en Chillan Viejo para la temporada de invierno, se observan una precipitación media y una máxima de 4.7 y 64 mm, respectivamente. En el verano, la precipitación media es de 0.5 mm y la

precipitación máxima es de 22.2 mm. El ISIMIP es bastante eficiente para corregir las precipitaciones en la temporada de invierno, aumentando la correlación desde 0.71 hasta 0.72, disminuyendo el sesgo desde -2.36 hasta -0.92, mejorando el coeficiente NS desde-0.42 hasta 0.47, y manteniendo el RMSE. En cambio, para la temporada de verano donde se reportan precipitaciones ligeras, el ISIMIP reporta mejora en términos del RMSE pasando de 3.4 a 2.8 mm. Además, la correlación pasa de 0.60 a 0.74 y el coeficiente NS mejora de 0.36 a 0.53. En términos de sesgo, la mejora es leve, pasando de 0.29 a 0.33. Con la técnica SCALING no se observan mejoras. Para la temporada de invierno se observa que ambas técnicas de corrección de sesgo sobreestiman para valores de precipitación mayor a 50 mm y lo mismo ocurre para la estación de verano en donde se reportan bajas tasas de precipitación.



Ñuble en San Fabián								
Datos	**Invierno**				**Verano**			
	ρ (-)	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS(-)**	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.52	14.06	-4.40	-2.40	0.47	4.28	0.23	-0.01
ISIMIP	0.59	14.29	-0.69	0.26	0.42	4.96	0.25	0.05
SCALING	0.52	15.45	-1.04	0.05	0.47	4.31	0.25	0.00

Figura 3-13: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación estacional en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.



Chillán Viejo								
Datos	**Invierno**				**Verano**			
	ρ (-)	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS(-)**	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS(-)**
Crudo	0.71	7.88	-2.36	-0.42	0.60	3.38	0.29	0.36
ISIMIP	0.72	7.88	-0.92	0.47	0.74	2.76	0.33	0.53
SCALING	0.71	8.03	-0.93	0.39	0.60	3.59	0.34	0.35

Figura 3-14: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación estacional en la estación Chillán Viejo. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.

3.2.2. CHIRPS

3.2.2.1. Análisis a nivel anual sin corrección de sesgo

En la Figura 3-15 se observa el desempeño del CHIRPS en la zona de estudio. Se observan correlaciones entre el rango de 0.34 hasta 0.65 en toda la zona de estudio. Las estimaciones de precipitación CHIRPS presenta valores de sesgo entre 1.00 y -2.42 mm, subestimando en zonas de altitudes medias. Con respecto al RMSE, éste presenta los errores de mayor magnitud (~17.8 mm) en las zonas de alta de montaña, mientras que los errores en zonas de bajas altitudes alcanzan los 5.9 mm. Al analizar el coeficiente NS se observan valores entre -2.19 hasta 0.40, mostrando un mal desempeño en zonas de alta montaña. En general CHIRPS presenta sesgos bastante bajos, sobre todo si es comparado con el CMORPH. Esto se debe a que el algoritmo del CHIRPS utiliza un enfoque más complejo para estimar la precipitación, ya que además de incluir un esquema de interpolación inteligente para distribuir la precipitación a nivel de malla (Funk et al., 2014), utiliza datos de elevación media, índice topográfico compuesto por la red de acumulación de flujo, aspecto y pendiente, e incluye la altitud y longitud como posibles variables de predicción, y finalmente utiliza datos de precipitación observada en superficie para la corrección de sesgo. Estas características no se consideran en el CMORPH, ya que sólo utiliza datos de satélite para derivar tasas de precipitación.

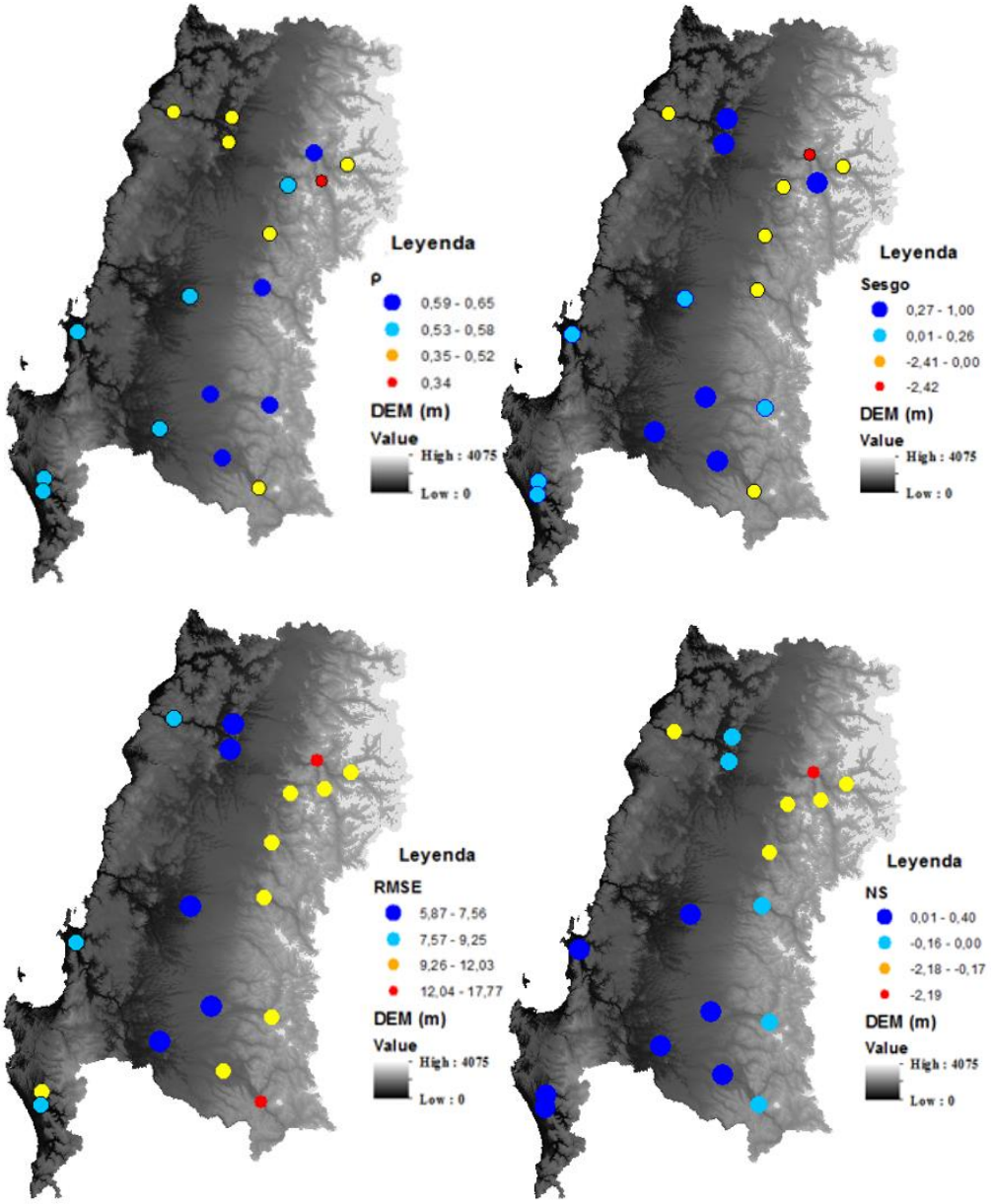


Figura 3-15: Indicadores estadísticos al comparar el CHIRPS con datos pluviométricos a nivel anual.

3.2.2.2. Análisis a nivel estacional sin corrección de sesgo

En la Figura 3-16 se presenta el desempeño de los datos CHIRPS para la temporada de invierno y en la Figura 3-17 para la temporada de verano. El CHIRPS, al igual que el CMORPH, presenta mejor desempeño en el invierno que en el verano, lo que puede estar asociado a que en este periodo se reportan las mayores intensidades y frecuencias de precipitaciones. En invierno presenta mejor desempeño para representar la variabilidad temporal en zonas de bajas altitudes, en cambio en verano se observa un desempeño homogéneo en términos de altitud, sin embargo, se observa un pobre desempeño en zonas de altitudes medias. En invierno CHIRPS sobrestima la precipitación en zonas de altitudes medias y a subestima en zonas de bajas altitudes. En cambio, para el verano, CHIRPS subestima la precipitación en toda la zona de estudio.

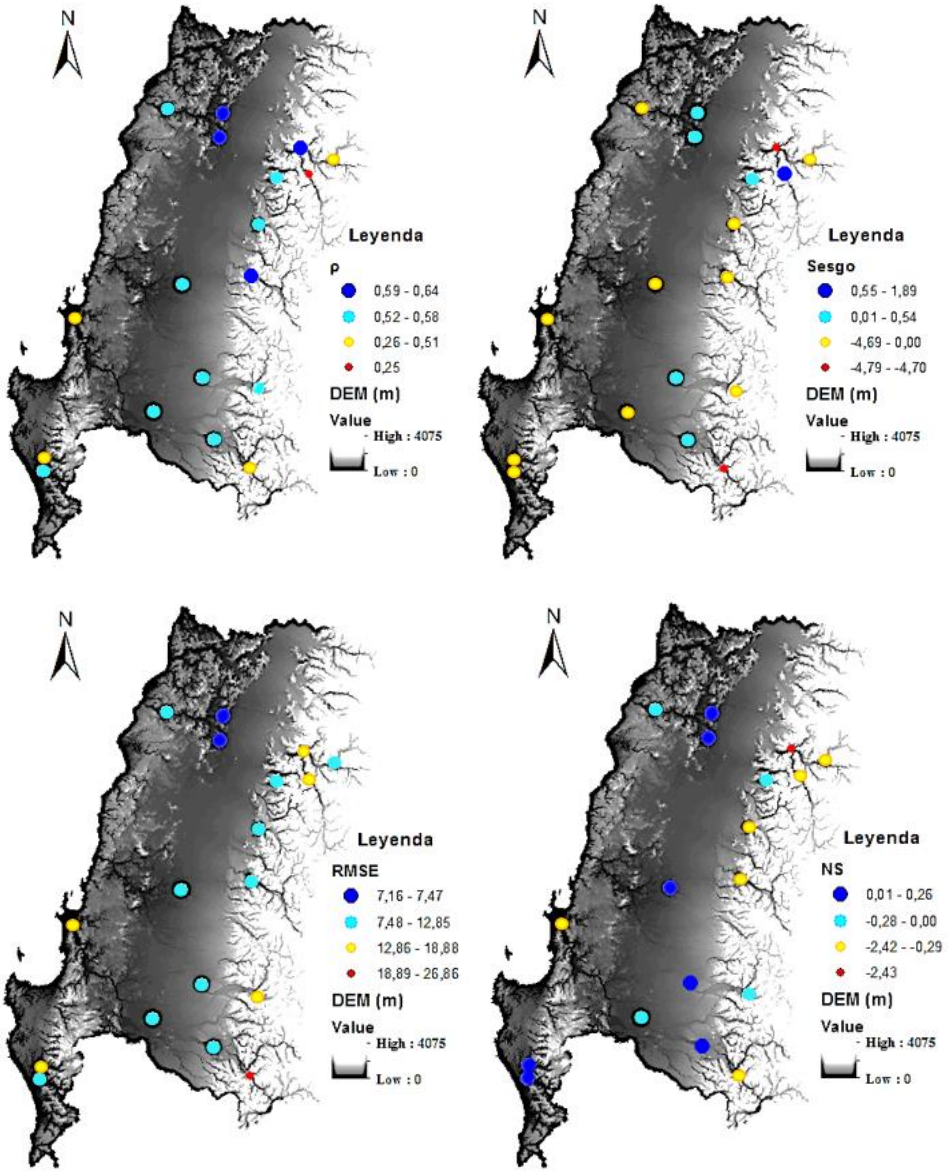


Figura 3-16: Indicadores estadísticos al comparar el CHIRPS con los datos pluviométricos para la estación de invierno.

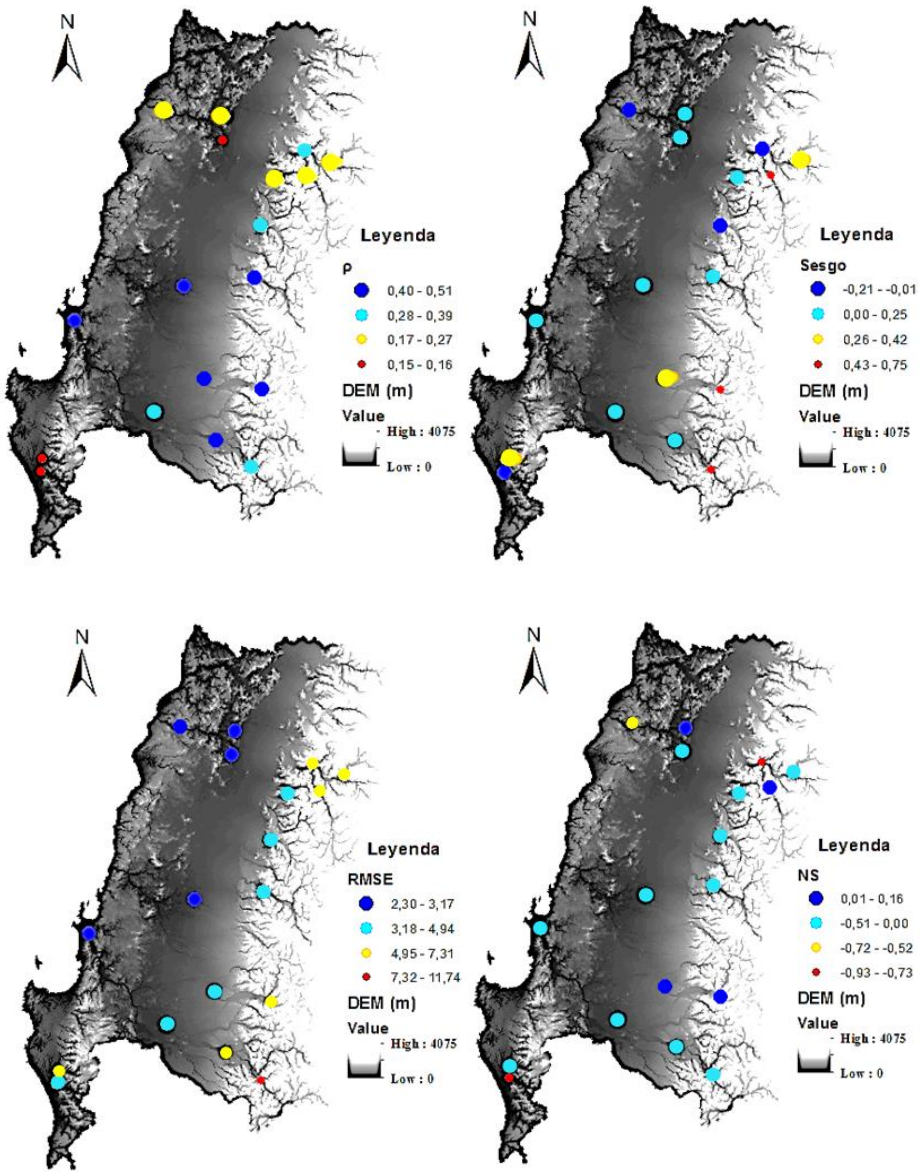


Figura 3-17: Indicadores estadísticos al comparar el CHIRPS con los datos pluviométricos para la estación de verano.

3.2.2.3. Análisis a nivel anual con corrección de sesgo

En la Figura 3-18 se muestra el desempeño de las técnicas de corrección de sesgo aplicadas al punto grilla CHIRPS más cercano a las estaciones pluviométricas. Al analizar las correlaciones, no se observan mejoras ni con el SCALING ni con el ISIMIP. Con respecto al sesgo, las estimaciones sin corregir (crudo) presenta sesgos entre 1.00 y -2.42, el ISIMIP reduce los sesgos a valores entre 1.21 y -0.31 y el SCALING los reduce a valores entre 1.15 y -0.41. El ISIMIP presenta mejor desempeño en cuanto a la reducción de la subestimación, ya que pasa de -2.42 (crudo) a -0.31 mm, mientras el SCALING lo reduce desde -2.42 (crudo) hasta -0.41 mm, en cambio cuando se analiza la medida en que se mejora el nivel de sobrestimación, el SCALING (sesgo de 1.15 mm) funciona mejor que el ISIMIP (sesgo de 1.21 mm).Con respecto al coeficiente NS, se observa que ambas técnicas de corrección de sesgo presentan mejoras similares, a cualquier altitud dentro de las cuencas. En general se observa que el CHIRPS no es corregido significativamente con los métodos presentados, esto probablemente se debe a que estas estimaciones incluyen un complejo algoritmo que incluye datos fisiográficos y topográficos, además de observaciones en superficie para la corrección de sesgos.

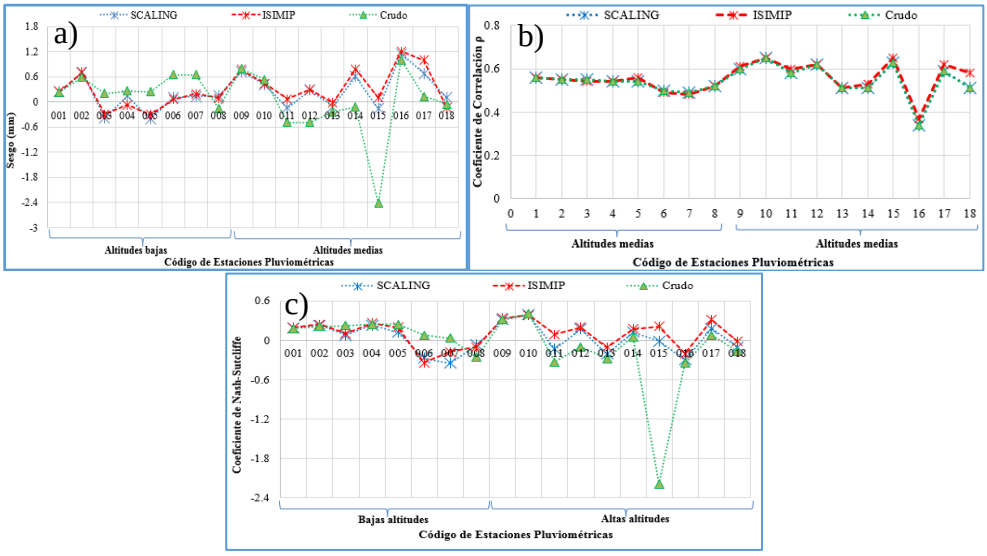
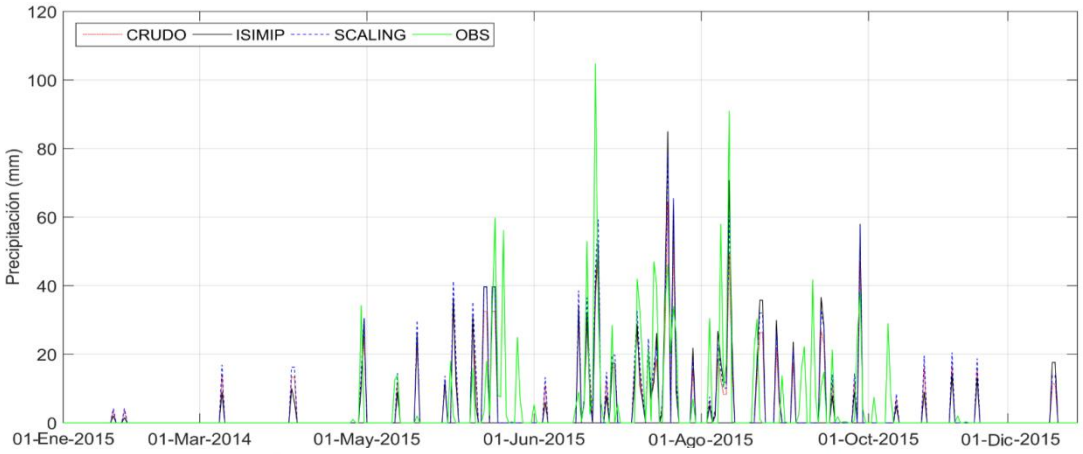
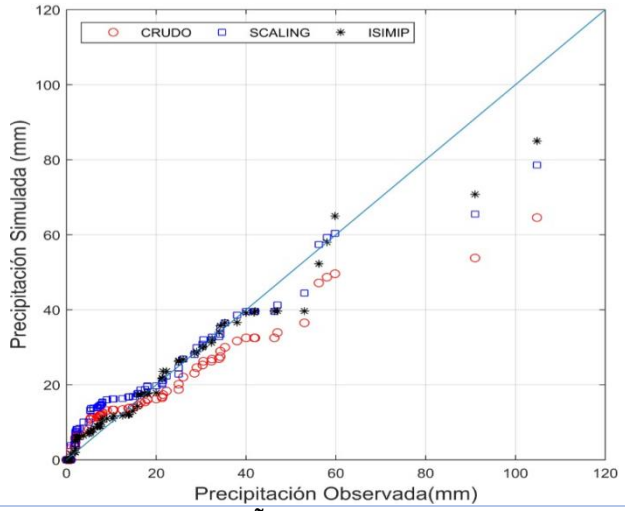


Figura 3-18: Desempeño de las técnicas de corrección de sesgo en los datos CHIRPS. a) Sesgo, b) Coeficiente de correlación ρ y c) Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

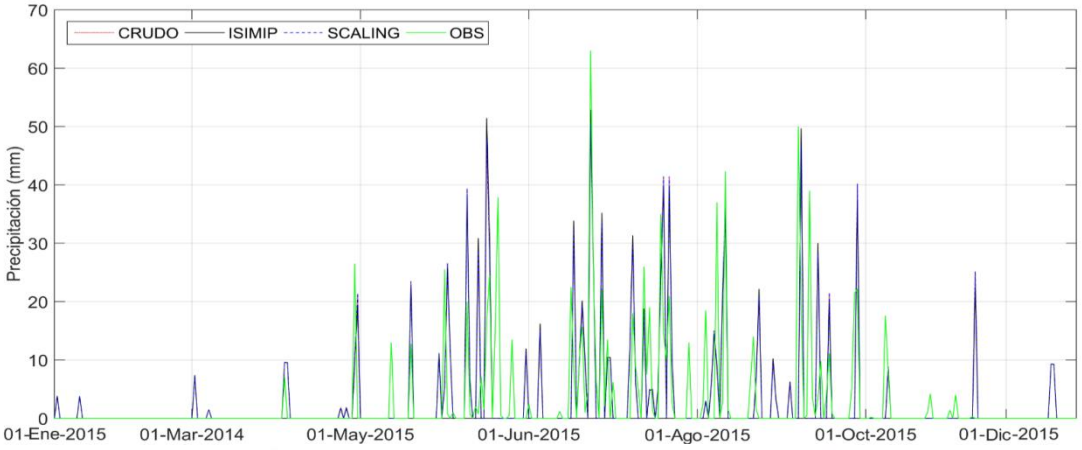
Se presenta el desempeño de las técnicas de corrección de sesgo aplicadas a las estimaciones de precipitación correspondiente al CHIRPS a escala diaria, para las estaciones meteorológicas Ñuble en San Fabián (Figura 3-19), Chillán Viejo (Figura 3-20), y Embalse Pangue (Figura 3-21). Se observa que las técnicas de corrección de sesgo no presentan un desempeño eficiente con el CHIRPS, principalmente al comparar con los resultados obtenidos para el CMORPH. En términos generales los sesgos no son reducidos, las correlaciones presenta mejoras ligeras, y el RMSE tiende a permanecer constante, aunque el coeficiente de NS tiende a mejorar ligeramente.

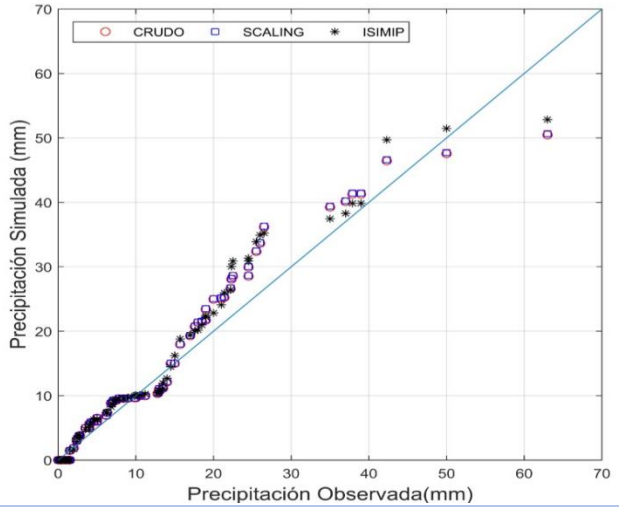




Estación Ñuble en San Fabián				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.62	9.8	-0.49	-0.10
ISIMIP	0.62	10.26	-0.06	0.17
SCALING	0.62	10.35	0.28	0.16

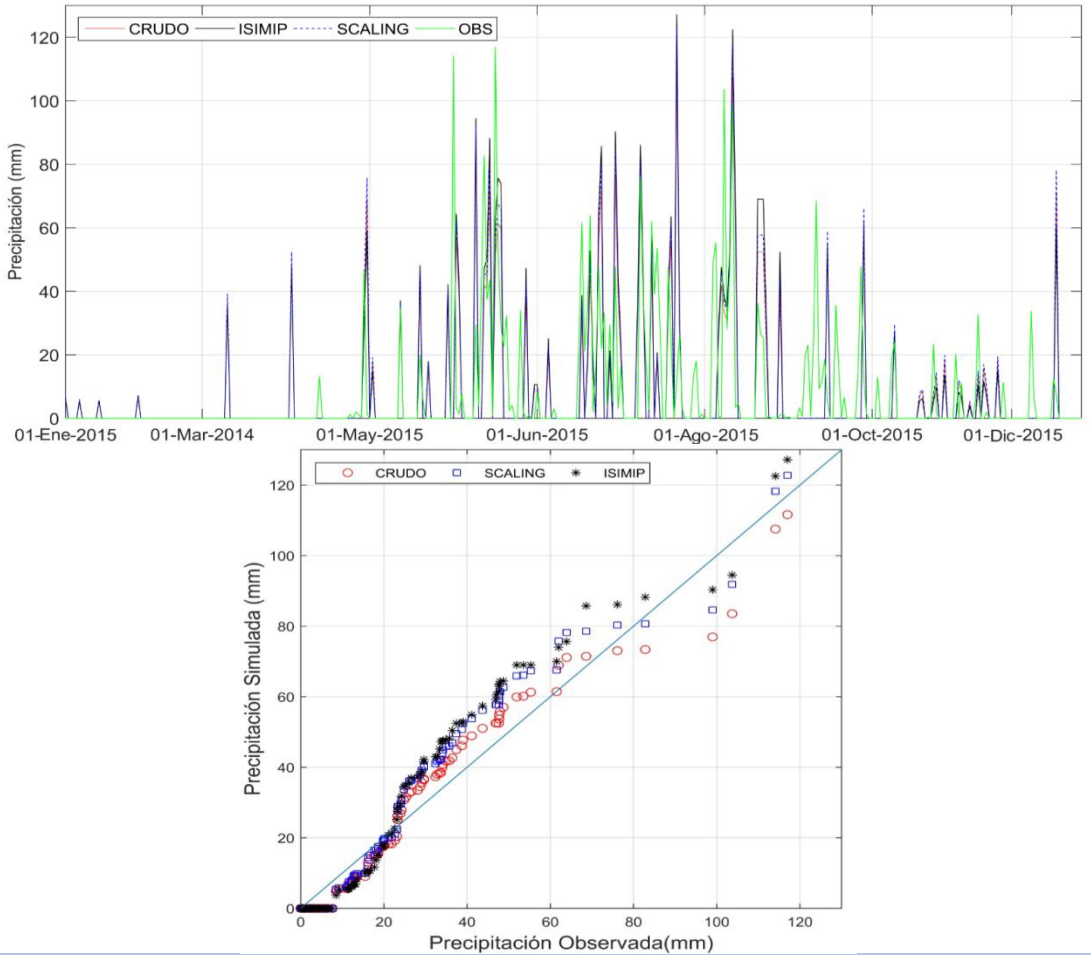
Figura 3-19: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.





Estación Chillán Viejo				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.56	7.56	0.23	0.18
ISIMIP	0.56	7.64	0.22	0.19
SCALING	0.56	7.58	0.23	0.19

Figura 3-20: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.



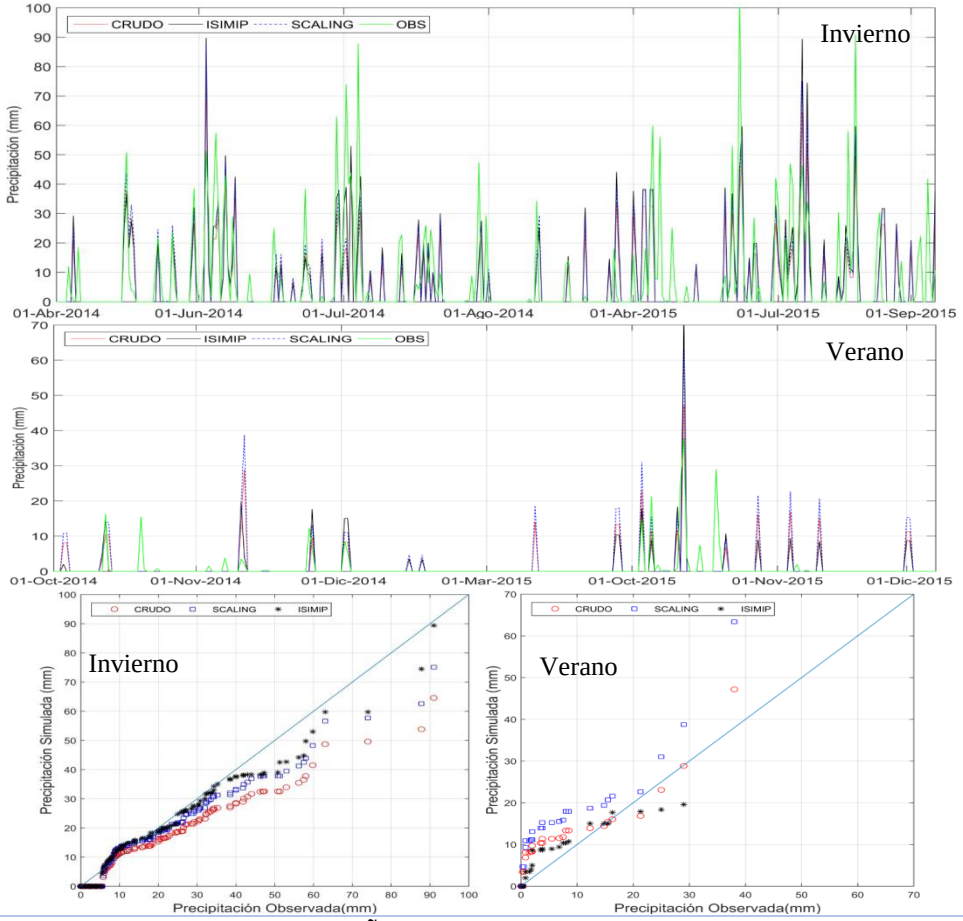
Embalse Pangue				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.51	17.77	-0.12	0.05
ISIMIP	0.53	18.02	0.32	0.17
SCALING	0.51	18.70	0.61	0.10

Figura 3-21: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.

3.2.2.4. Análisis estacional con corrección de sesgo

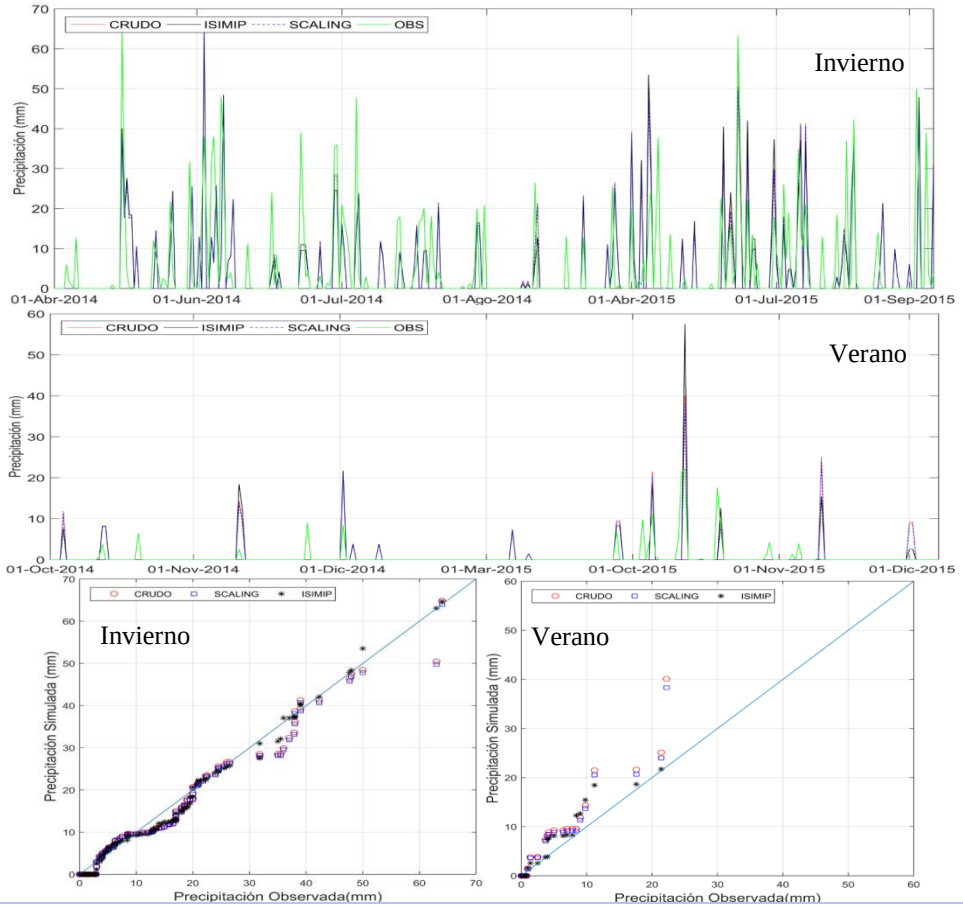
En la Figura 3-22 y Figura 3-23 se presentan el desempeño de las técnicas de corrección de sesgo utilizadas en este estudio a los datos del CHIRPS considerando las estaciones de invierno y verano. Se observa que el CHIRPS tiene la misma capacidad de representar la variabilidad temporal de las precipitaciones en ambas temporadas, las cuales no son mejoradas al aplicar las técnicas de corrección de sesgo. Con relación al desempeño del ISIMIP y el SCALING en términos de reducción de sesgo, de acuerdo a la

Figura 3-22 y Figura 3-23, se observa que para intensidades de precipitaciones menores a 50 mm, que el ISIMIP y el SCALING funcionan bastante bien, pero para intensidades de precipitación mayores a 50 mm, subestiman en invierno y sobreestiman en verano. Se observa que en Ñuble San Fabián para la temporada de invierno se reduce el nivel de subestimación de 27 % (sin corregir) a 9% al ser corregido con el ISIMIP y a 15% al ser corregido con el SCALING, estos son porcentajes relativos con respecto a la precipitación media observada en invierno. En verano se observa que con el ISIMIP se reduce la sobreestimación pasando de 43% (sin corregir) a 27% (corregido), en cambio con el SCALING se incrementa pasando de 43% (sin corregir) a 91%, estos son porcentajes relativos con respecto a la precipitación media observada en verano. En Chillán Viejo se observa que para el invierno la subestimación se reduce de 9.5% (sin corregir) a 8% con el ISIMIP y se incrementa de 9.5% (sin corregir) a 11% con el SCALING, porcentajes relativos a la precipitación media observada para el invierno y para el verano se observa que la sobrestimación se reduce de 50% (sin corregir) a 48% con el ISIMIP y con el SCALING lo disminuye de 50% (sin corregir) a 44% (corregido SCALING), estos porcentajes son relativos con respecto a la precipitación media observada en verano.



Ñuble en San Fabián								
Datos	**Invierno**				**Verano**			
	ρ (-)	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.60	12.81	-2.00	-0.32	0.51	4.53	0.36	0.13
ISIMIP	0.62	12.92	-0.63	0.15	0.62	4.29	0.23	0.37
SCALING	0.60	13.08	-1.10	-0.02	0.51	5.51	0.77	0.22

Figura 3-22: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación estacional en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.



Chillán Viejo								
Datos	**Invierno**				**Verano**			
	ρ (-)	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.55	9.75	-0.45	0.04	0.51	3.37	0.27	0.24
ISIMIP	0.55	9.99	-0.38	0.08	0.58	3.59	0.26	0.33
SCALING	0.55	9.69	-0.52	0.03	0.51	3.24	0.24	0.23

Figura 3-23: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación estacional en la estación Chillán Viejo. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.

3.2.3. IMERG

3.2.3.1. Análisis a nivel anual sin corrección de sesgo

En la Figura 3-24 se presentan los indicadores estadísticos utilizados para conocer el desempeño de las estimaciones de precipitación generadas por el IMERG en la zona de estudio. Se observa que el IMERG representa muy bien la variabilidad temporal de las precipitaciones, con correlaciones de hasta 0.87 a lo largo de toda la zona de estudio. Se observa que en la zona de alta montaña el IMERG tiende a subestimar la precipitación, donde los sesgos más altos son de aproximadamente -6.1 mm(~76% de la precipitación media diaria anual en zonas de altitudes medias que aproximadamente corresponde a 8 mm), y los sesgos más bajos se observan en zonas de baja altitud, en un rango entre 1.1 y -1.4 mm. En toda la zona de estudio se observan sesgos en un rango de 1.2 hasta -6.1 mm. Con respecto al RMSE, los valores más altos se observan en zonas de altitudes medias, alcanzando valores de hasta 19.8 mm, mientras que en las zonas de baja elevación este rango varía entre 4.3 y 13.1 mm. De acuerdo al coeficiente de NS, el IMERG es eficiente en zonas de bajas altitudes alcanzando valores de hasta 0.76. Por el contrario, en zonas de elevaciones medias, el coeficiente NS alcanza valores que varían entre 0 y -3.63.

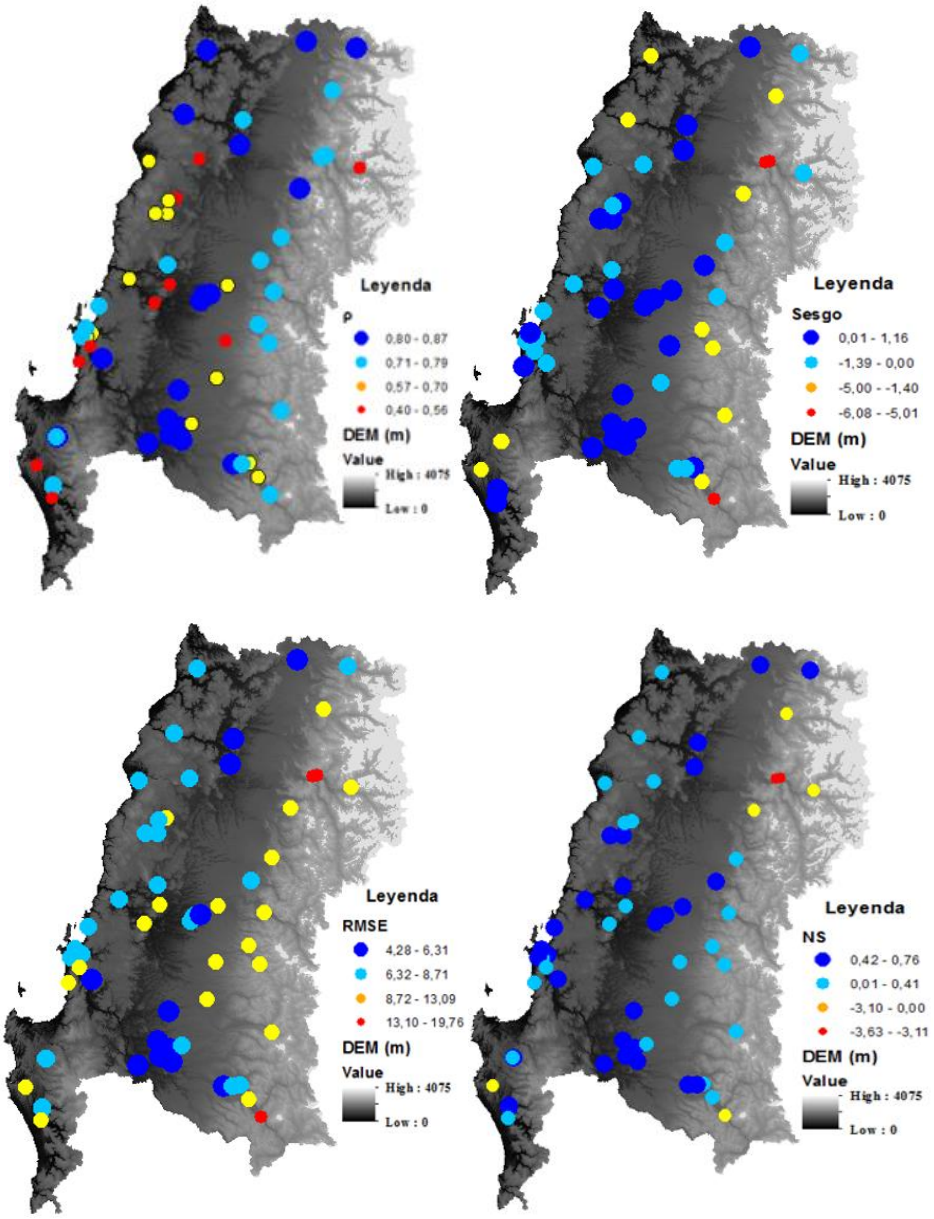


Figura 3-24: Indicadores estadísticos al comparar el IMERG con datos pluviométricos a nivel anual.

3.2.3.2. Análisis estacional sin corrección de sesgo

En la Figura 3-25 se presenta el desempeño del IMERG en la temporada de invierno y en la Figura 3-26 correspondiente a la temporada de verano. Se observa que el IMERG tiene mejor desempeño en la temporada de invierno, período en que se reportan las mayores intensidades y frecuencias de precipitaciones. El rango de correlaciones más altas se alcanza en el periodo de invierno (0.4-0.89), mientras que para la temporada de verano se observan las correlaciones más bajas (0.10- 0.79). Se observa que para la temporada de invierno el IMERG sobreestima las precipitaciones en altitudes bajas y subestima en altitudes medias. En cambio en verano, no se observa ninguna dependencia con respecto a los cambios de elevación que presenta la topografía de la zona de estudio. Con respecto al coeficiente de NS, en la temporada de verano el IMERG presenta un nivel de eficiencia más bajo que para la temporada de invierno.

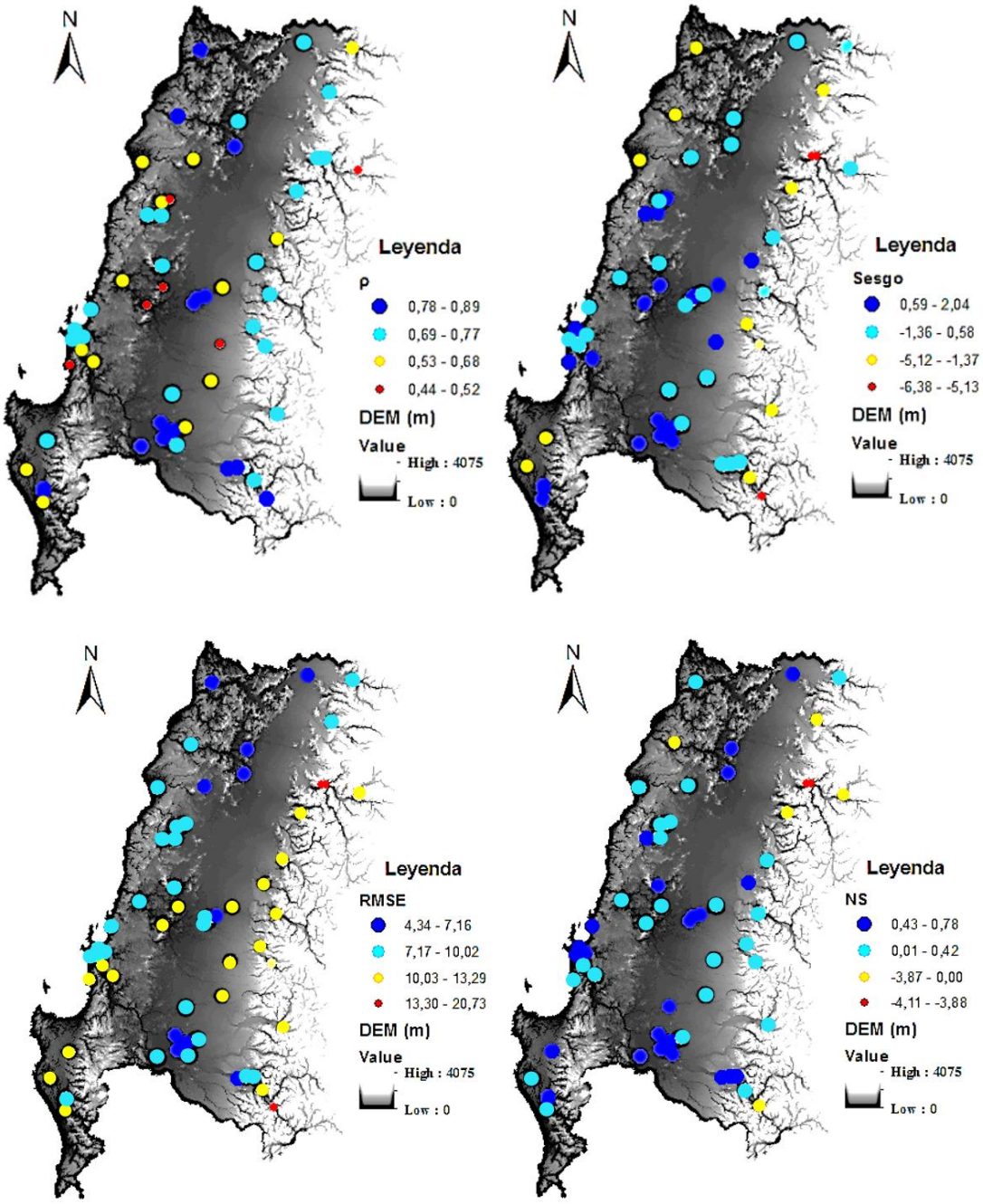


Figura 3-25: Indicadores estadísticos al comparar el IMERG con los datos pluviométricos para la estación de invierno.

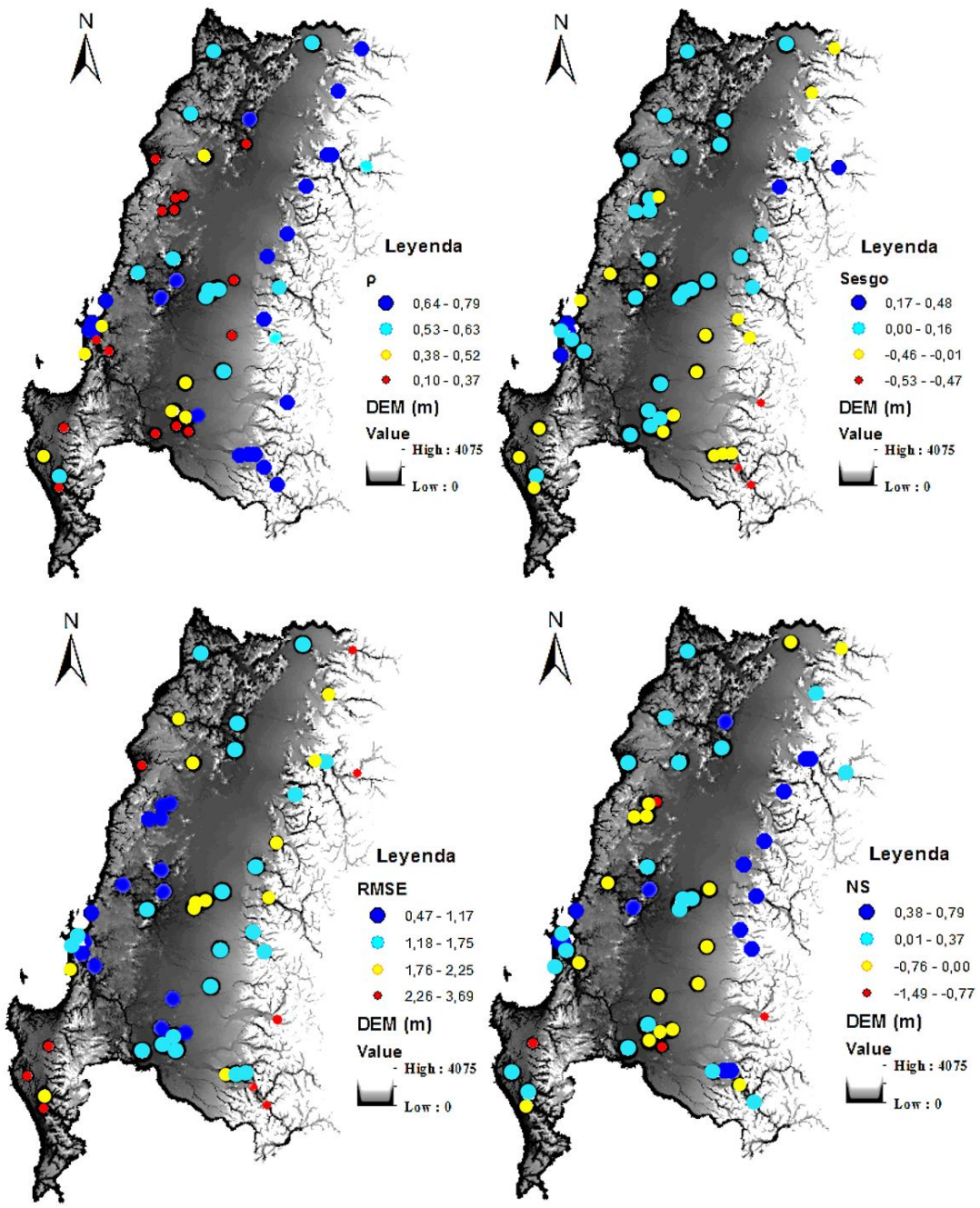


Figura 3-26: Indicadores estadísticos al comparar el IMERG con los datos pluviométricos para la estación de verano.

3.2.3.3. Análisis a nivel anual con corrección de sesgo

En la Figura 3-27 se presenta el desempeño de las estimaciones del IMERG sin corregir y corregidas con las dos técnicas utilizadas en este estudio. Estas correlaciones no mejoran significativamente al aplicar las técnicas de corrección de sesgos. Al comparar los sesgos se observa que el SCALING funciona mejor con valores entre -3.7 hasta 3.0 mm, contrario a los datos sin corregir que tienden a subestimar las precipitaciones con un sesgo de hasta -6.1 mm, similar a los resultados encontrados por Prakash et al. (2016). Las estimaciones de precipitación sin corregir presentan sesgos en el espectro -6.08 hasta 1.16, al aplicar el ISIMIP se observan sesgos en el rango de -3.98 hasta 4.52 mm, reduciendo las subestimaciones, e incrementando las sobreestimaciones. En términos de magnitud, las estimaciones que presentan el error más grande corresponden a los datos corregidos por el ISIMIP que presenta un RMSE de hasta 25.2 mm. De todos modos, el SCALING presenta resultados similares. Al igual que las estimaciones del CHIRPS, el IMERG no es corregido significativamente por las técnicas utilizadas en este estudio, lo que puede estar asociado a: (i) al algoritmo de corrección de sesgo integrado al algoritmo IMERG, así como a los datos pluviométricos (GPCC) utilizados en su calibración; y (ii) a la poca robustez estadística de las correcciones de sesgo, debido a su poca disponibilidad de datos.

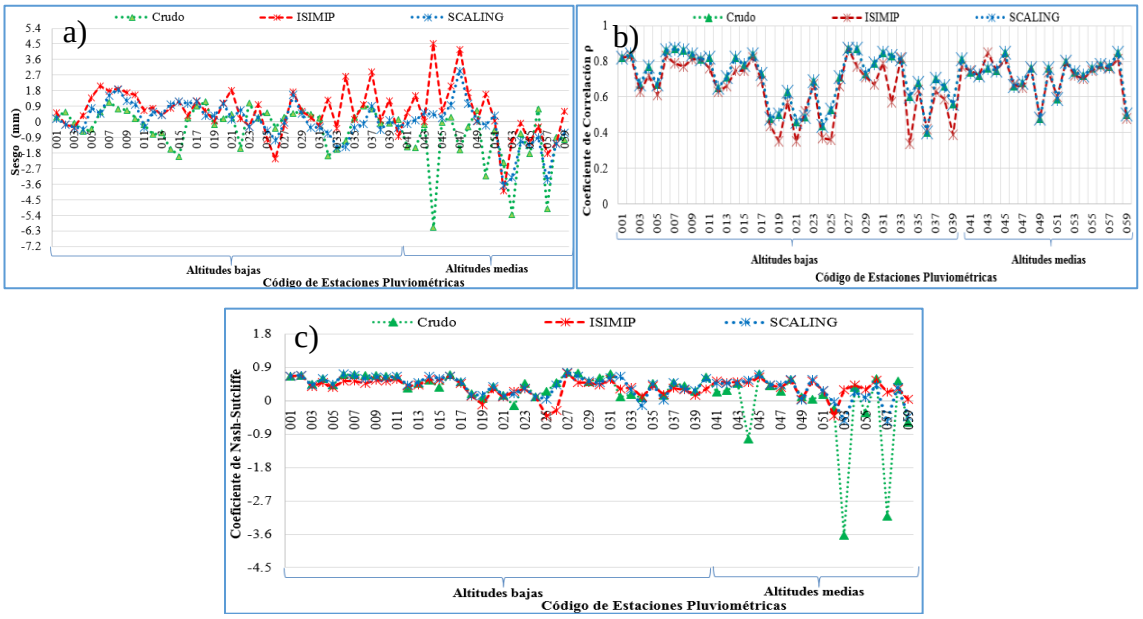
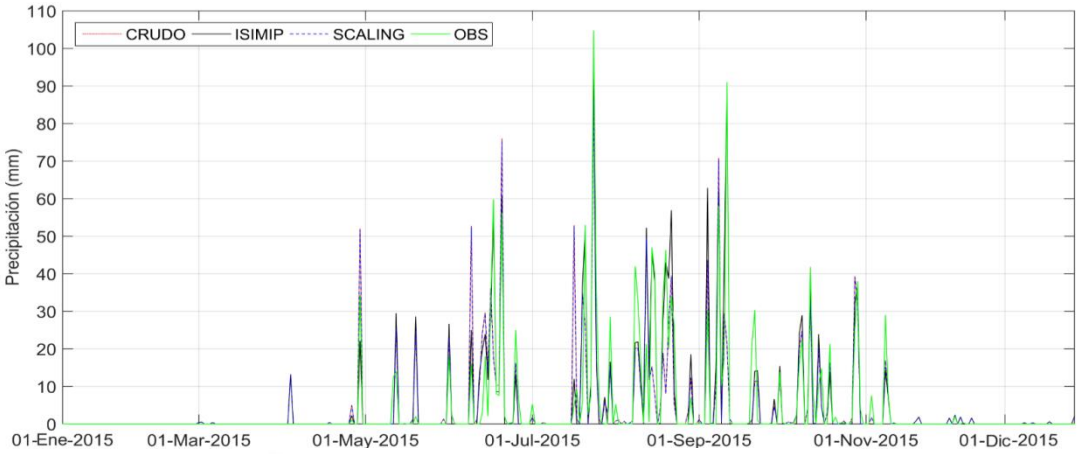
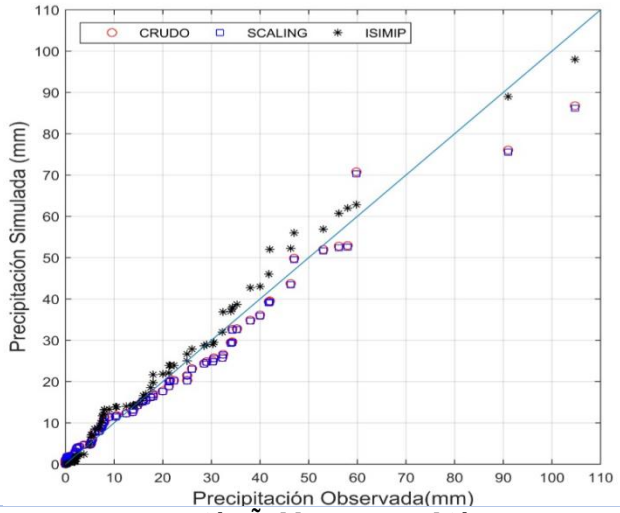


Figura 3-27: Desempeño de las técnicas de corrección de sesgo en los datos IMERG. a) Sesgo, b) Coeficiente de correlación ρ y c) Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

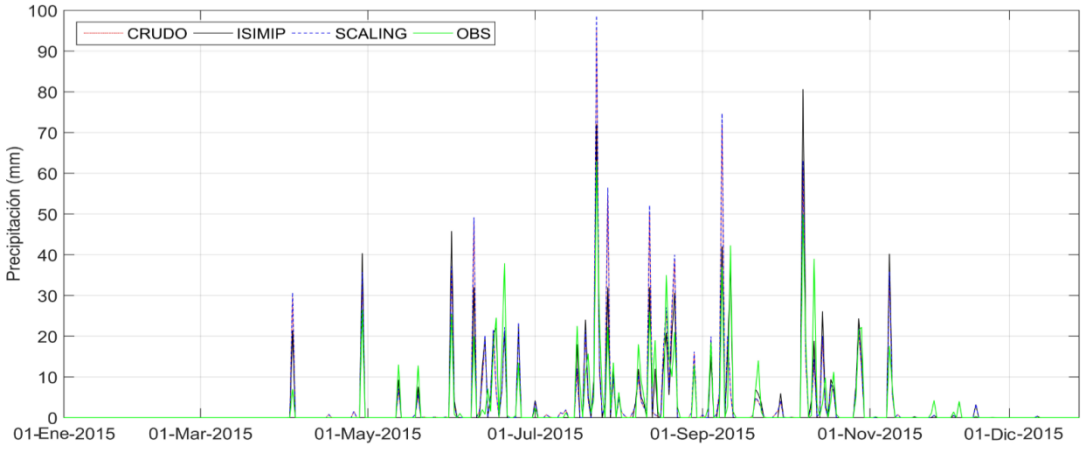
En la Figura 3-28, Figura 3-29 y Figura 3-30 se presenta el desempeño de las técnicas de corrección de sesgo aplicadas en este estudio a las estimaciones de precipitación IMERG a escala diaria, para el punto grilla más cercana a cada estación pluviométrica analizada(Chillán Viejo, Ñuble en San Fabián y Embalse Pangue). Se observa que el ISIMIP presenta mejores indicadores estadísticos en las tres estaciones pluviométricas en términos de coeficiente de NS, de sus correlaciones y del RMSE. En términos de reducción de sesgo, ninguna de las técnicas de corrección presenta un buen desempeño. Esto puede estar asociado, tanto a los datos de entrada que utiliza el algoritmo IMERG como a la poca robustez estadística del análisis, debido a la disponibilidad de datos (se utilizan solo 10 meses del 2014 como período de calibración).

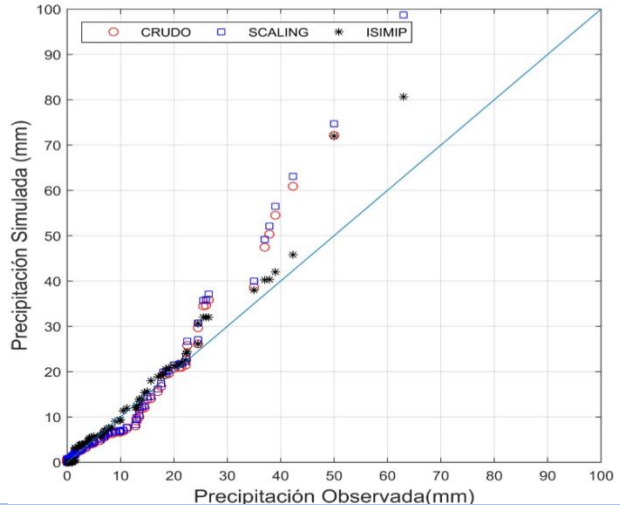




Estación Ñuble en San Fabián				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.76	8.11	-0.14	0.47
ISIMIP	0.85	5.52	0.31	0.78
SCALING	0.76	8.10	-0.17	0.47

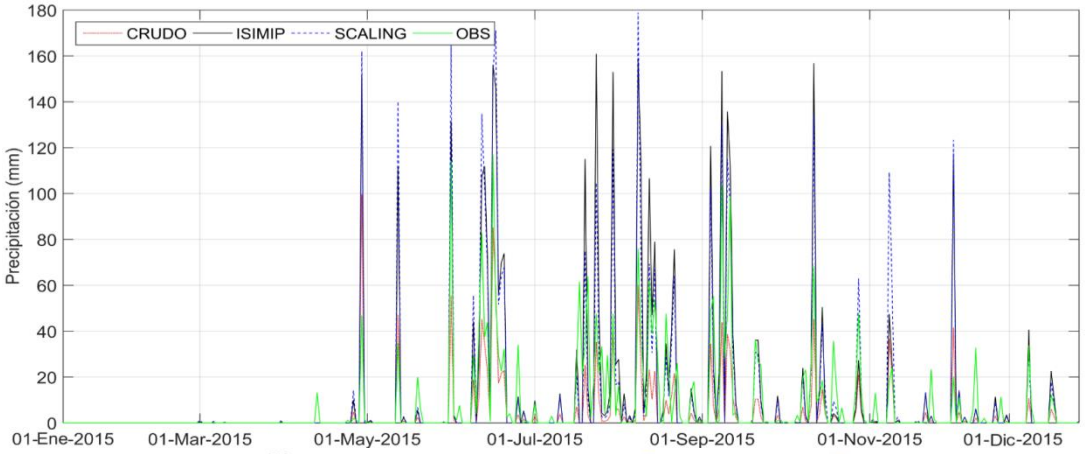
Figura 3-28: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Ñuble en San Fabián. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.

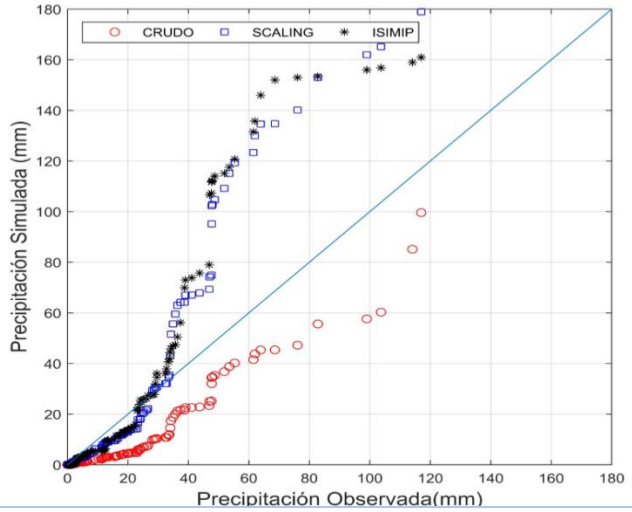




Estación Chillán Viejo				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.82	5.76	0.31	0.66
ISIMIP	0.89	4.24	0.28	0.78
SCALING	0.82	5.99	0.42	0.66

Figura 3-29: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Chillán Viejo. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING.





Embalse Pangue				
Datos	**Corr**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS**
Crudo	0.79	11.82	-3.71	-0.04
ISIMIP	0.81	20.12	3.59	0.59
SCALING	0.81	19.15	3.04	0.60

Figura 3-30: Precipitación diaria corregida y sin corregir para el período de validación anual en la estación Embalse Pangue. Serie temporal observada, estimada sin corregir y corregida. Relación 1:1 datos sin corregir (rojo), y corregidos ISIMIP (negro) y SCALING (azul) con respecto a los datos observados. Métricas estadísticas al usar ISIMIP y SCALING

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

4.1. Evaluación de las estimaciones de precipitación satelital

En este estudio se evaluaron tres productos satelitales de alta resolución espacial y temporal que estiman la precipitación: CMORPH, IMERG y CHIRPS, utilizando datos pluviométricos a escala diaria, como datos de referencia en la zona centro-sur de Chile a nivel anual y estacional. El análisis estacional considera dos temporadas: invierno (abril-septiembre) y verano (octubre-marzo). Para realizar estas evaluaciones se utilizaron cuatro medidas estadísticas: el sesgo (bias), el RMSE, el coeficiente de correlación de Pearson (ρ) y el coeficiente de NS.

Los resultados muestran correlaciones en un rango desde 0.36 hasta 0.78 para el CMORPH, desde 0.34 hasta 0.65 para el CHIRPS y desde 0.40 hasta 0.87 para el IMERG a nivel anual. De acuerdo a estos resultados el IMERG presenta mejor desempeño para representar la variabilidad temporal de las precipitaciones, al compararlo con el CMORPH y el CHIRPS. Al analizar la correlación espacial entre las tres estimaciones de precipitación y los datos pluviométricos a través de las correlaciones temporales calculadas a partir de las precipitaciones diarias en cada una de las estaciones pluviométricas distribuidas de forma no homogénea en toda la zona de estudio, se observa que el CMORPH presenta mejor desempeño en zonas de baja altitud (ρ de hasta 0.78) que en zonas de altitudes medias (ρ desde 0.34), mostrando dependencia de su desempeño en función de la altitud. Por su parte, el IMERG y el CHIRPS presentan el mismo desempeño a los largo de la zona de estudio.

Las tres estimaciones de precipitación presentan mejor desempeño en representar la variabilidad temporal de las precipitaciones en la temporada de invierno. El IMERG alcanza las correlaciones más alta (entre 0.4 y 0.89) distribuidas a lo largo de toda la zona de estudio para el invierno con respecto al CMORPH (entre 0.17 y 0.79) y al CHIRPS (entre 0.25 y 0.64). En verano las correlaciones disminuyen en el IMERG

(rango entre 0.1 y 0.79), en el CMORPH (rango entre 0.12 y 0.71) y el CHIRPS (rango entre 0.15 y 0.51).

El IMERG, CMORPH y CHIRPS presentan campos de precipitación similares en términos de RMSE sobre toda la zona de estudio, con valores entre 4.4 y 19.8 mm a nivel anual. Para toda la zona estudio, el CMORPH subestima las tasas de precipitación con sesgos entre -0.4y -5.1 mm, alcanzando los sesgos más altos en zonas de altitudes medias. El CHIRPS sobrestima las precipitaciones en zonas de bajas altitudes con sesgos de hasta 1 mm y las subestima en zonas de altitudes medias con sesgos de hasta -2.4 mm. El IMERG sobrestima las precipitaciones en toda la zona de estudio, principalmente sobre la costa y el valle, y en 8 estaciones pluviométricas ubicadas en zonas de altitudes medias subestima las tasas de precipitación con valores de hasta -6.1 mm.

4.2. Evaluación de las técnicas de corrección de sesgo

Se evaluó el desempeño de dos técnicas de corrección de sesgo, el ISIMIP y el SCALING, aplicadas a las estimaciones de precipitación satelital del CMORPH, IMERG y CHIRPS. Las estimaciones del CMORPH sin corrección presentan sesgos que van entre -0.35 hasta -5.12 mm. Al aplicar el ISIMIP los sesgos fueron reducidos entre -1.28 hasta 0.7 mm, y con el SCALING entre -1.46 hasta 0.35 mm. Al comparar los resultados obtenidos al aplicar el ISIMIP y el SCALING al CMOPRH, el SCALING funciona mejor que el ISIMIP en términos de reducción de sesgo. En cambio, cuando se comparan los campos de precipitación obtenidos en términos de RMSE, correlación y coeficiente NS, se observa que el ISIMIP funciona mejor que el SCALING.

Con relación a los resultados obtenidos en los campos de precipitación IMERG y CHIRPS al ser sometidos a las técnicas de corrección de sesgo, no se observan mejoras especialmente en el IMERG. La razón por la que los datos del IMERG no presentan

mejoras con el ISIMIP y el SCALING es que el algoritmo del IMERG incluye como dato de entrada información obtenida de estaciones pluviométricas para su calibración. El CHIRPS tampoco presenta mejoras con las técnicas de corrección de sesgo ISIMIP y SCALING, lo que puede estar asociado a que el algoritmo CHIRPS incluye como dato de entrada, información pluviométrica, y además utiliza los datos del CMORPH, TRMM 3B42, datos de elevación media e índice topográficos compuestos por la red de acumulación de flujo, aspecto y pendiente.

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que de los tres productos de precipitación satelital evaluados (CMORPH, IMERG y CHIRPS), el IMERG representa de mejor manera la variabilidad temporal de las precipitaciones en la zona de estudio, principalmente en zonas de altitudes medias. Por otro lado, el CHIRPS es el que presenta el menor rango de errores sistemáticos (medidos por el sesgo), con respecto a los datos obtenidos para el IMERG y el CMORPH. Asimismo, los resultados muestran que el ISIMIP funciona mejor en términos de reducción del error medido por el RMSE y mejora el desempeño medido por el coeficiente NS, principalmente en zonas de altitudes medias.

BIBLIGRAFIA

Abebe S. Gebregiorgis and Faisal Hossain (2014). Estimation of Satellite Rainfall Error Variance Using Readily Available Geophysical Features. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52

A. Behrangi, B. Imam, K. L. Hsu, S. Sorooshian, T. J. Bellerby, and G. J. Huffman (2010) "REFAME: Rain estimation using forward-adjusted advection of microwave estimates,"J. Hydrometeor., 11 (6), 1305–1321.

Bitew, M.M.; Gebremichael, M. Assessment of satellite rainfall products for streamflow simulation in medium watersheds of the Ethiopian highlands. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011, 15, 1147–1155.

Bitew, M.M.; Gebremichael, M.; Ghebremichael, L.T.; Bayissa, Y.A. Evaluation of high-resolution satellite rainfall products through streamflow simulation in a hydrological modeling of a small mountainous watershed in Ethiopia. J. Hydrometeorol. 2011, 13, 338–350.

Bohling, G. (2005). "Kriging." Kansas Geological Survey, Tech. Rep.http://www.people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Kriging.pdf

Boushaki, F.I., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Park, G.-H., 2009. Mahani, S.; Shi, W. Bias adjustment of satellite precipitation estimation using ground-based measurement: A case study evaluation over the Southwestern United States. J. Hydrometeorol. 10, 1231–1242.

Bhatti HA., Rientjes T., Haile AT., Habib E., Verhoef W., 2016. Evaluation of Bias Correction Method for Satellite-Based Rainfall Data. MDPI AG, Basilea, Suiza Sensores de 2016, 16 (6), 884; doi: 10.3390 / s16060884.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), (2016). Estudio de Variabilidad Climática de Chile para el siglo XXI.

CarolienToté, Domingos Patricio, Hendrik Boogaard, Raymond van der Wijngaart, Elena Tarnavsky y Chris Funk, 2015; Evaluation of Satellite Rainfall Estimates for Drought and Flood Monitoring in Mozambique. Remote Sens. 2015, 7(2), 1758-1776; doi:10.3390/rs70201758.

Chris Funk, Pete Peterson, Martin Landsfeld, Diego Pedreros, James Verdin, Shraddhanand Shukla, Gregory Husak, James Rowland, Laura Harrison, Andrew Hoell y Joel Michaelsen, 2015; The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Climate Hazards Group http://dx.doi.org/10.15780/G2RP4Q (2015).

Chris Kidd, George Huffman, 2011; Global precipitation measurement. Meteorological Applications. Vol. 18; 334-353.

EBERT, E. E. (2010) "Neighborhood Verification of High Resolution Precipitation Products" M. Gebremichael, F. Hossain (eds.), Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, DOI 10.1007/978-90-481-2915-7_8.

EBERT, E. E.; JANOWIAK, J. E.; KIDD, C. (2007) "Comparison of Near-Real-Time Precipitation Estimates from Satellite Observations and Numerical Models." Bull. Amer. Meteor. Soc., v. 88, p. 47-64.

G. J. Huffman, R. F. Adler, B. Rudolf, U. Schneider, and P. R. Keehn (1995) "Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain gauge analysis, and NWP model precipitation information,"J. Climate, 8 (5), 1284–1295.

Habib, E. ElSaadani, M. Haile, 2012: Climatology-focused evaluation of CMORPH and TMPA satellite rainfall products over the Nile Basin. J. Appl. Meteorol. Climatol. 51, 2105–2121.

Haile, A.T., Habib, E., Rientjes, T., 2013: Evaluation of the climate prediction center (CPC) morphing technique (CMORPH) rainfall product on hourly time scales over the source of the Blue Nile River. Hydrol. Process. 1829–1839.

HarisAkram Bhatti, Tom Rientjes, AlemsegedTamiru Haile, Emad Habib y WouterVerhoef, 2016; Evaluation of Bias Correction Method for Satellite-Based Rainfall Data. Sensors 2016, 16(6), 884; doi:10.3390/s16060884.

Hirpa, F. A., M. Gebremichael, and T. Hopson, 2010: Evaluation of high-resolution satellite precipitation products over very complex terrain in Ethiopia. J. Appl. Meteor. Climatol., 49, 1044–1051.

Hong, Yang, 2003: PERSIANN-CCS: Precipitation Estimation From Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Network - Cloud Classification System.

Huffman, G. J., R. F. Adler, D. T. Bolvin, G. Gu, E. J. Nelkin, K. P. Bowman, Y. Hong, E. F. Stocker, and D. B. Wolf, 2007: The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. Journal of Hydrometeorology, 8, 38–55.

G. Huffman, D. Bolvin, D. Braithwaite, K. Hsu, R. Joyce, P. Xie, 2015: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG), version 4.4. NASA's Precipitation Processing Center, accessed 31 March, 2015, ftp://arthurhou.pps.eosdis.nasa.gov/gpmdata/

Funk, C.C., Peterson, P.J., Landsfeld, M.F., Pedreros, D.H., Verdin, J.P., Rowland, J.D., Romero, B.E., Husak, G.J., Michaelsen, J.C., and Verdin, A.P., 2014, A quasi-global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p., http://dx.doi.org/10.3133/ds832.

Guoqiang Tang, Yingzhao Ma, Di Long, LingzhiZhong, Yang Hong, 2016; Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. J. Hydrology, 533, 152-167.

Gebremichael, F. Hossaim (eds.); Satellite Rainfall Applications for Surface 193 Hydrology, DOI 10.1007/978-90-481-2915-7_11: Springer Science+Business Media B.V.

Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin, and P. Xie, 2004: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution.. J. Hydromet., 5, 487-503.

K. Hsu, A. Behrangi, B. Imam, and S. Sorooshian, 2010 “Extreme precipitation estimation using satellite-based PERSIANN-CCS algorithm,” in Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, M. Gebremichael and F. Hossain, Eds. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 3-22.

Liu, Zhong, 2016: Comparison of Integrated Multisatellite Retrievals for GPM (IMERG) andTRMMMultisatellite Precipitation Analysis (TMPA) MonthlyPrecipitation Products: Initial Results. Journal of Hydrometeorology, 17, 777-790.

Ma, Y., Zhang, Y., Yang, D., Farhan, S.B., 2015; Precipitation bias variability versus various gauges under different climatic conditions over the Third Pole Environment (TPE) region. J. of Climatology, Vol. 35, Pag. 1201-1211.

M. R. P. SAPIANO AND P. A. ARKIN, 2009: An Intercomparison and Validation of High-Resolution Satellite Precipitation Estimates with 3-Hourly Gauge Data. Journal of Hydrometeorology, 10, 149-166.

Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

M.F. Rios Gaona, A. Overeem, H. Leijnse y R. Uijlenhoet, 2016 ; First-year evaluation of GPM-rainfall over the Netherlands: IMERG Day-1 Final Run (V03D). J. Hydrometeorology, doi 10.1175/JHM-D-16-0087.1.

Prakash Santya, Ashis K. Mitra, Amir AghaKouchak, Zhong Liu, HamidrezaNorouzi, and D.S. Pai, 2016; A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region. Journal of Hydrology (2016) doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.029

Pendergrass, Angeline & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 29 Oct 2015. "The Climate Data Guide: GPCP (Monthly): Global Precipitation Climatology Project."https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-monthly-global-precipitation-climatology-project.

Paola Salio, Maria Paula Hobouchian, Yanina GarciaSkabar and Daniel Villa (2015). Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network, Atmospheric Research 163 (2015) 146-161.

R.R.E. Vernimmen, A. Hooijer, Mamenun, E. Aldrian, y A.I.J.M. van Dijk, 2012; Evaluation and bias correction of satellite rainfall data for drought monitoring in Indonesia. Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 133–146, 2012.

R. F. Adler, G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin (2003). “The version 2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present),”J. Hydrometeor, 4 (6), 1147–1167.

Rioseco, Reinaldo y Tesser, Claudio: Cartografía Interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva. Julio, 2016.

Robert J. Joyce, PingpingXie, Yelena Yarosh, John E. Janowiak and Phillip A. Arkin, 2010 "CMORPH: A "Morphing" Approach for High Resolution Precipitation Product Generation" Satellite Rainfall Applications for Surface 23 Hydrology, DOI 10.1007/978-90-481-2915-7_2.

Ruiz, J.J. (2009) "Evaluación de Diferentes Metodologías para la Calibración de las Estimaciones de Precipitación CMORPH sobre Sudamérica," Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.4, 473 – 488.

Saber Moazami, Saeed Golian, Yang Hong, Chen Sheng &M.RezaKavianpour, 2016; Comprehensive evaluation of four high-resolution satellite precipitation products under diverse climate conditions in Iran. Hydrological Sciences Journal. Vol.61, Iss.2, 2016.

Thomas M. Smith, Phillip A. Arkin, John J. Bates, George J. Huffman, 2006; Estimating Bias of Satellite-Based Precipitation Estimates. Journal of Hydrometeorology. Vol. 7, 841-856.

Tufa Dinku, Stephen J. Connor, and Pietro Ceccato (2010) "Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over Mountainous Regions of Africa and South America" M.

T. Ushio, T. Kubota, S. Shige, K. Okamoto, K. Aonashi, T. Inoue, N. Takahashi, T. Iguchi,M. Kachi, R. Oki, T. Morimoto, and Z. Kawasaki (2009). "A Kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data," J. Meteor. Soc. Jpn., 87A, 137–151.

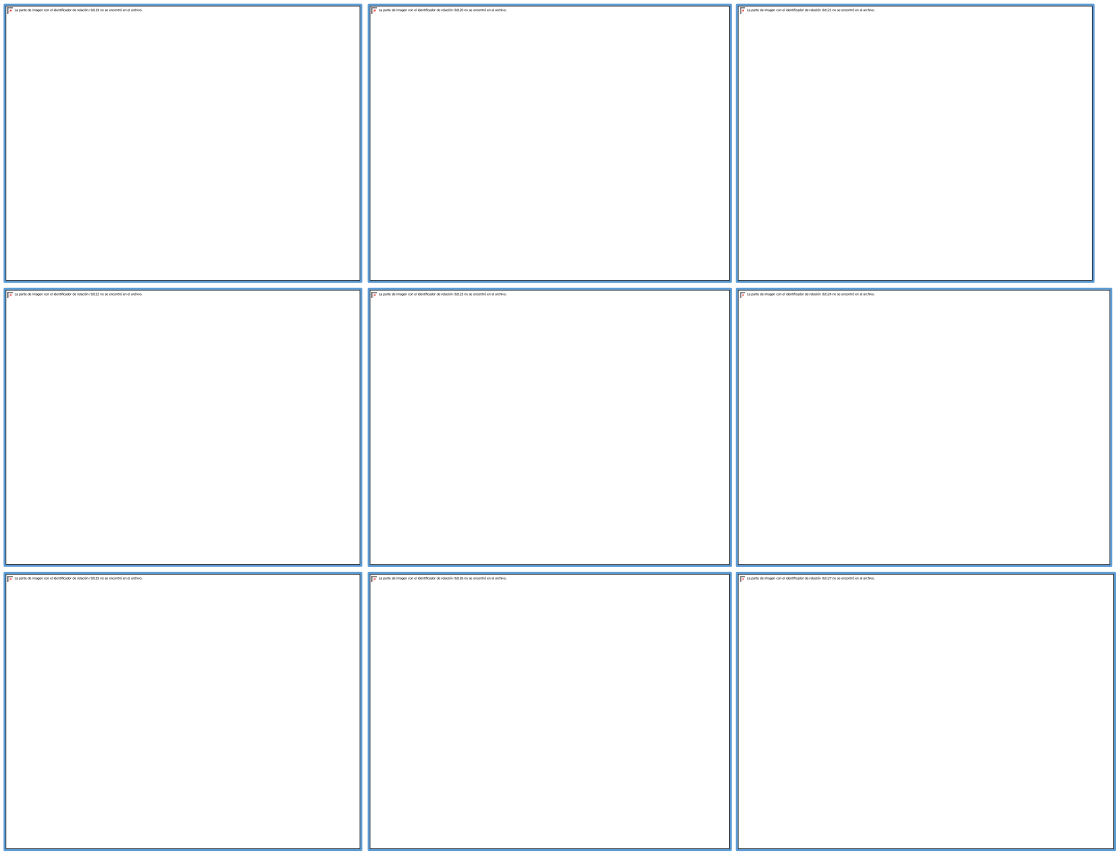
Vila, D., R. Ferraro, and R. Joyce, 2007: Evaluation and improvement of AMSU recipitation retrievals. J. Geophys. Res., 112, D20119, doi:10.1029/2007JD008617.

Vila, D.A. Goncalves, L.G.G. Toll, D.L. Rozante, 2009: Statistical evaluation of combined daily gauge observations and rainfall satellite estimates over continental South America. J. Hydrometeorol. 10, 533–543.

Zhe Li, Dawen Yang, Yang Hong, 2013; Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River. J. Hydrology 500, 157-169.

Anexos

Anexo A: Curvas de doble masa



Anexo B: Resultado corrección de sesgo

1. CMORPH

Estación Rio Laja en Tucapel				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.63	6.31	-1.07	0.12
ISIMIP	0.71	8.78	0.55	0.49
SCALING	0.63	8.00	-0.04	0.39
Estación Rio Biobio en Rucalgue				
Crudo	0.71	6.74	-1.74	-0.01
ISIMIP	0.69	12.04	0.55	0.46
SCALING	0.71	8.08	-0.37	0.49
Estación Los Angeles				
Crudo	0.77	4.40	-0.83	0.28
ISIMIP	0.78	5.59	0.29	0.61
SCALING	0.77	5.09	0.02	0.58
Río Biobio en Desembocadura				
Crudo	0.68	6.77	-1.68	-0.81
ISIMIP	0.63	7.58	-0.79	0.24
SCALING	0.68	6.72	-1.02	0.19
Cañete DGA				
Crudo	0.78	5.91	-1.51	0.22
ISIMIP	0.73	6.72	1.1	0.50
SCALING	0.78	7.99	0.35	0.61
Cañete Agromet				
Crudo	0.54	6.95	-0.99	-0.08
ISIMIP	0.51	8.85	-0.10	0.20
SCALING	0.54	8.32	-0.15	0.22
Abanico				
Crudo	0.57	11.55	-2.52	-1.16
ISIMIP	0.66	13.16	0.7	0.41
SCALING	0.57	13.8	0.16	0.24
Ancoa en el Morro				
Crudo	0.41	11.49	-2.14	-2.72
ISIMIP	0.51	11.86	-0.78	-0.03
SCALING	0.41	12.114	-1.17	0.65
Armerillo				
Crudo	0.40	18.20	-3.90	-11.61
ISIMIP	0.58	16.13	-1.18	-0.16
SCALING	0.40	18.69	-1.27	-0.84

(Continuación)

Claro en Rauquen				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.59	4.72	-0.35	-0.03
ISIMIP	0.70	4.19	-0.27	0.33
SCALING	0.59	4.90	-0.22	0.11
Loncomillo Brisas				
Crudo	0.62	4.48	-0.46	-0.05
ISIMIP	0.74	3.91	-0.23	0.44
SCALING	0.62	4.69	-0.29	0.17
Longavi en la Quiriquina				
Crudo	0.48	9.61	-1.62	-1.21
ISIMIP	0.57	11.11	0.03	0.25
SCALING	0.48	11.32	-0.23	0.02
Maule en Forel				
Crudo	0.71	6.86	-1.49	-1.28
ISIMIP	0.76	6.07	-0.75	0.44
SCALING	0.71	6.6	-0.76	0.31
Río Melado en el Salto				
Crudo	0.40	9.75	-0.55	-2.2
ISIMIP	0.58	11.34	0.46	0.29
SCALING	0.40	9.96	-0.11	-1.26
Cipreses				
Crudo	0.57	10.58	-1.5	-2.77
ISIMIP	0.66	11.42	-0.9	0.02
SCALING	0.57	10.66	-1.24	-2.02

2. CHIRPS

Estación Rio Laja en Tucapel				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.65	7.44	0.54	0.40
ISIMIP	0.65	7.30	0.43	0.38
SCALING	0.65	7.22	0.41	0.39
Estación Rio Biobio en Rucalgue				
Crudo	0.60	9.75	0.79	0.32
ISIMIP	0.61	9.57	0.77	0.34
SCALING	0.60	9.63	0.72	0.31
Estación Los Angeles				
Crudo	0.55	7.16	0.59	0.21
ISIMIP	0.55	7.36	0.71	0.24
SCALING	0.55	7.33	0.69	0.23
Río Biobio en Desembocadura				
Crudo	0.55	9.25	0.20	0.22
ISIMIP	0.54	8.57	-0.30	0.10
SCALING	0.55	8.25	-0.38	0.08
Cañete DGA				
Crudo	0.54	10.31	0.26	0.24
ISIMIP	0.55	10.39	0.29	0.26
SCALING	0.54	10.06	0.14	0.23
Cañete Agromet				
Crudo	0.54	8.72	0.24	0.24
ISIMIP	0.56	7.60	-0.31	0.20
SCALING	0.54	7.52	-0.41	0.12
Abanico				
Crudo	0.59	12.01	0.13	0.08
ISIMIP	0.62	12.78	0.99	0.31
SCALING	0.59	12.56	0.68	0.18
Ancoa en el Morro				
Crudo	0.58	10.18	-0.49	-0.33
ISIMIP	0.60	10.45	0.07	0.09
SCALING	0.58	10.36	-0.14	-0.13
Armerillo				
Crudo	0.63	15.18	-2.42	-2.19
ISIMIP	0.65	14.93	0.10	0.21
SCALING	0.63	14.99	-0.16	-0.01

(Continuación)

Claro en Rauquen				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.50	5.94	0.65	0.08
ISIMIP	0.49	5.13	0.06	-0.34
SCALING	0.50	5.14	0.10	-0.27
Loncomillo Brisas				
Crudo	0.49	5.87	0.65	0.03
ISIMIP	0.48	5.36	0.19	-0.18
SCALING	0.49	5.15	0.13	-0.35
Longavi en la Quiriquina				
Crudo	0.51	9.76	-0.24	-0.28
ISIMIP	0.51	10.07	-0.02	-0.11
SCALING	0.51	9.88	-0.11	-0.21
Maule en Forel				
Crudo	0.52	8.24	-0.15	-0.26
ISIMIP	0.52	8.51	0.09	-0.10
SCALING	0.52	8.60	0.14	-0.07
Río Melado en el Salto				
Crudo	0.34	12.03	1.00	-0.35
ISIMIP	0.37	12.30	1.21	-0.2
SCALING	0.34	12.29	1.15	-0.3
Cipreses				
Crudo	0.51	10.32	-0.05	-0.17
ISIMIP	0.58	9.57	-0.13	-0.02
SCALING	0.51	10.49	0.1	-0.11

1. IMERG

Diguillin en San Lorenzo				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.74	10.52	-1.4	0.23
ISIMIP	0.75	11.44	0.52	0.53
SCALING	0.74	11.06	-0.1	0.46
Rio Chillan en Esperanza N°2				
Crudo	0.72	10.85	-1.43	0.27
ISIMIP	0.72	13.59	1.5	0.50
SCALING	0.72	11.80	0.12	0.47
Canal de la Luz en Chillán				
Crudo	0.84	6.86	0.58	0.69
ISIMIP	0.83	6.01	-0.14	0.69
SCALING	0.84	5.66	-0.16	0.69
Río Itata en Coelemu				
Crudo	0.67	7.87	-0.07	0.44
ISIMIP	0.63	8.35	-0.27	0.38
SCALING	0.67	7.40	-0.32	0.42
Estero Bellavista en Tomé				
Crudo	0.77	7.21	-0.56	0.59
ISIMIP	0.72	10.35	0.36	0.50
SCALING	0.77	7.52	-0.41	0.59
Esteron Nonguen Frente a U del BB				
Crudo	0.67	7.9	-0.39	0.43
ISIMIP	0.61	12.90	1.42	0.36
SCALING	0.67	10.37	0.82	0.45
Rio Biobio en Rucalhue				
Crudo	0.85	5.83	-0.01	0.72
ISIMIP	0.81	7.85	0.62	0.64
SCALING	0.85	6.28	0.29	0.71
Río Duqueco en Cerrillos				
Crudo	0.86	5.87	0.57	0.71
ISIMIP	0.83	11.53	2.06	0.53
SCALING	0.86	5.68	0.48	0.72
Rio Biobio en Coihue				
Crudo	0.87	5.58	1.15	0.71
ISIMIP	0.79	9.27	1.79	0.53
SCALING	0.87	6.39	1.52	0.68
Los Angeles				
Crudo	0.86	6.31	0.80	0.68
ISIMIP	0.77	11.68	1.96	0.46
SCALING	0.86	9.01	1.90	0.59

Estero Quilque en los Angeles				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.84	5.72	0.68	0.69
ISIMIP	0.81	9.73	1.68	0.55
SCALING	0.84	6.88	1.24	0.65
Rio Laja Aguas Arriba del Salto				
Crudo	0.81	5.83	0.23	0.66
ISIMIP	0.81	11.27	1.55	0.53
SCALING	0.81	7.37	1.01	0.63
Estero Hualqui en Desembocadura				
Crudo	0.82	5.55	-0.18	0.67
ISIMIP	0.76	8.17	0.69	0.57
SCALING	0.82	5.46	-0.27	0.66
Río Biobio en Desembocadura				
Crudo	0.65	8.32	-0.72	0.34
ISIMIP	0.63	12.23	0.83	0.40
SCALING	0.65	10.75	0.59	0.42
Concepción DGA				
Crudo	0.71	7.39	-0.62	0.48
ISIMIP	0.66	10.96	0.41	0.43
SCALING	0.71	9.41	0.42	0.50
Curanilahue				
Crudo	0.82	7.29	-1.57	0.55
ISIMIP	0.75	11.33	0.81	0.57
SCALING	0.82	9.94	1.02	0.66
Estero Plegarias Junta Río Curanilahue				
Crudo	0.78	8.71	-1.95	0.36
ISIMIP	0.75	12.56	1.16	0.55
SCALING	0.78	11.55	1.17	0.60
Cañete DGA				
Crudo	0.78	6.80	0.25	0.61
ISIMIP	0.75	8.08	0.69	0.56
SCALING	0.78	7.46	0.69	0.61
Río Leiva en Puente Camino a Contulco				
Crudo	0.73	7.69	0.91	0.52
ISIMIP	0.69	8.85	1.22	0.46
SCALING	0.73	8.18	1.16	0.51

Río Huequecura Aguas Arriba de Embalse Angostura				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.66	8.00	0.31	0.41
ISIMIP	0.67	11.15	2.07	0.42
SCALING	0.66	9.05	0.97	0.43
Río Biobio en Culebra				
Crudo	0.68	9.48	-1.6	0.25
ISIMIP	0.65	19.42	4.223	0.37
SCALING	0.68	16.03	2.99	0.43
Río BB Puente Piulo				
Crudo	0.76	6.88	-0.23	0.57
ISIMIP	0.76	10.02	1.69	0.55
SCALING	0.76	8.67	1.03	0.57
Coronel				
Crudo	0.48	9.63	1.16	0.20
ISIMIP	0.44	8.70	0.63	0.13
SCALING	0.48	7.91	0.34	0.15
Chiguayante				
Crudo	0.50	9.42	-0.15	0.07
ISIMIP	0.35	11.52	0.0	-0.10
SCALING	0.50	10.25	0.35	0.15
Human				
Crudo	0.63	8.25	0.21	0.39
ISIMIP	0.57	11.52	1.1	0.32
SCALING	0.63	9.89	1.05	0.39
Cañete Agromet				
Crudo	0.46	9.82	0.43	0.15
ISIMIP	0.35	16.79	1.87	0.11
SCALING	0.46	9.43	0.20	0.13
Lebu				
Crudo	0.49	11.81	-1.49	-0.14
ISIMIP	0.52	12.20	0.23	0.25
SCALING	0.49	14.79	0.7	0.18
Santa Rosa				
Crudo	0.69	9.26	1.08	0.47
ISIMIP	0.67	7.87	-0.24	0.32
SCALING	0.69	7.51	-0.24	0.35
Portezuelo				
Crudo	0.44	10.44	0.29	0.11
ISIMIP	0.37	13.83	0.98	0.10
SCALING	0.44	10.38	0.26	0.11

Nueva Aldea				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.53	9.16	0.54	0.25
ISIMIP	0.36	8.21	-0.98	-0.42
SCALING	0.53	7.26	-0.50	0.05
Ninhue				
Crudo	0.71	8.48	-0.31	0.50
ISIMIP	0.66	7.44	-2.15	-0.27
SCALING	0.71	7.24	-1.04	0.42
Navidad				
Crudo	0.48	11.97	0.68	0.11
ISIMIP	0.48	11.07	0.02	0.04
SCALING	0.48	11.02	0.06	0.02
Bernardo O'higgins, Chillán Ad				
Crudo	0.87	6.06	0.30	0.76
ISIMIP	0.87	5.83	-0.20	0.75
SCALING	0.87	5.58	-0.04	0.76
María Dolores				
Crudo	0.87	5.27	0.47	0.74
ISIMIP	0.77	11.72	1.73	0.49
SCALING	0.87	7.61	1.54	0.66
Carriel Sur, Concepción				
Crudo	0.73	7.08	0.69	0.52
ISIMIP	0.71	7.50	0.62	0.49
SCALING	0.73	6.58	0.48	0.53
Abanico				
Crudo	0.76	9.90	-3.09	0.04
ISIMIP	0.74	15.14	1.59	0.53
SCALING	0.76	11.39	-0.19	0.58
Yungay				
Crudo	0.59	10.65	-0.48	0.17
ISIMIP	0.60	11.18	0.04	0.27
SCALING	0.59	11.66	0.36	0.27
Ancoa en el Morro				
Crudo	0.80	10.13	-2.34	-0.22
ISIMIP	0.80	12.42	-3.98	-0.41
SCALING	0.80	11.94	-3.65	-0.03
Armerillo				
Crudo	0.74	19.76	-5.29	-3.63
ISIMIP	0.72	17.36	-1.09	0.29
SCALING	0.74	17.53	-3.22	-0.53

Claro en Rauquen				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.79	5.38	0.43	0.61
ISIMIP	0.67	6.97	0.26	0.43
SCALING	0.79	4.53	-0.30	0.49
Loncomillo Brisas				
Crudo	0.85	4.28	0.25	0.72
ISIMIP	0.79	4.74	-0.19	0.57
SCALING	0.85	3.85	-0.29	0.63
Longavi en la Quiriquina				
Crudo	0.72	9.49	-0.69	0.36
ISIMIP	0.70	10.50	-0.08	0.42
SCALING	0.72	9.34	-1.12	0.24
Maule en Forel				
Crudo	0.83	7.46	-1.94	0.10
ISIMIP	0.57	18.82	1.31	0.32
SCALING	0.83	7.22	-0.66	0.66
Palos en Colorado				
Crudo	0.76	9.44	-1.85	-0.32
ISIMIP	0.75	9.15	-1.20	0.30
SCALING	0.76	9.13	-1.33	0.08
Perquilauquen en San Manuel				
Crudo	0.78	8.12	0.80	0.60
ISIMIP	0.77	7.01	-0.26	0.55
SCALING	0.78	6.53	-0.85	0.42
Mataquito en Licanten				
Crudo	0.81	7.14	-1.58	0.16
ISIMIP	0.82	6.92	-0.35	0.36
SCALING	0.81	7.00	-1.44	0.29
Rio Maule en Armerillo				
Crudo	0.77	18.63	-5.01	-3.11
ISIMIP	0.76	15.84	-1.82	0.23
SCALING	0.77	16.52	-3.34	-0.56
Rio Teno dj Claro				
Crudo	0.85	6.75	-0.85	0.54
ISIMIP	0.81	7.59	-1.23	0.32
SCALING	0.85	7.04	-1.28	0.37
Chanco				
Crudo	0.60	7.25	-1.12	0.09
ISIMIP	0.34	23.55	2.65	0.10
SCALING	0.60	7.00	-1.42	-0.14

Los Despachos				
Datos	**ρ (-)**	**RMSE (mm)**	**Sesgo (mm)**	**NS (-)**
Crudo	0.68	8.49	0.30	0.46
ISIMIP	0.64	8.83	0.19	0.41
SCALING	0.68	6.88	-0.29	0.45
Cauquenes				
Crudo	0.40	9.30	0.92	0.15
ISIMIP	0.42	9.98	1.02	0.16
SCALING	0.40	6.30	-0.13	0.02
Coronel de Maule				
Crudo	0.70	7.87	0.80	0.49
ISIMIP	0.63	14.65	2.89	0.35
SCALING	0.70	8.19	0.93	0.49
Santa Sofía				
Crudo	0.66	6.94	-0.07	0.40
ISIMIP	0.59	8.02	0.13	0.30
SCALING	0.66	6.30	-0.46	0.32
Sauzal				
Crudo	0.56	7.32	-0.08	0.26
ISIMIP	0.39	15.22	1.27	0.15
SCALING	0.56	7.70	0.08	0.28
General Freire, Curicó Ad				
Crudo	0.81	4.91	0.17	0.65
ISIMIP	0.77	0.67	-0.79	0.32
SCALING	0.81	4.41	-0.27	0.60
Cipreses				
Crudo	0.50	13.09	-0.96	-0.59
ISIMIP	0.48	15.44	0.63	0.04
SCALING	0.50	13.26	-0.63	-0.43