



## UNIVERSIDAD DE CUENCA



### FACULTAD DE INGENIERÍA

### ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

## **“Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay”**

Trabajo final de titulación previo a la  
obtención de Título de Ingeniero Civil

**Autor:**

Eduardo Benigno Cabrera Atencia.

**Directora:**

Daniela Ballari, PhD.

**CUENCA – ECUADOR**

2016



## **“Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay”**

### **Resumen**

La correcta medición de la precipitación es fundamental para la predicción de fenómenos meteorológicos extremos y una amplia gama de aplicaciones. En los Andes ecuatorianos la precipitación es muy variable principalmente por las condiciones topográficas. Además, las redes de monitoreo son poco densas dificultando la representación espacial de la precipitación. En este contexto, las imágenes satelitales para estimar la precipitación se han vuelto de gran importancia. Sin embargo, previo a su uso es necesario realizar una evaluación que permita conocer los alcances y aplicaciones del producto satelital en la zona de estudio. El objetivo de este estudio es evaluar las estimaciones de precipitación del algoritmo GPM IMERG V03 a escala mensual utilizando series de datos de diez pluviómetros procedentes de los observatorios ecohidrológicos del Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHiCA). La zona de estudio es la provincia del Azuay y el período de análisis desde Abril del 2014 a Enero del 2015. Los resultados muestran que IMERG V03 capturan cualitativamente la precipitación mensual en el Azuay. Según cálculos de errores estadísticos e índices de detección, se encontró que, cuantitativamente, IMERG mensual estima adecuadamente la precipitación excepto para las estaciones Susudel y San Fernando. IMERG indica una prometedora perspectiva de utilidad hidrológica anticipando razonablemente mejoras en el producto sobre su predecesor TMPA, dado la capacidad de detectar lluvia ligera y precipitación sólida. A medida que más datos IMERG con nuevas versiones se liberen, más estudios en el agua y clima serán necesarios para explorar el potencial de IMERG a futuro.



**Palabras clave:** GPM, precipitación, Azuay, imágenes satelitales.

### **Abstract**

Precipitation measurements are essential for extreme weather events prediction and a broad range of applications such as agriculture, climate change and energy generation. In the Ecuadorian Andes, precipitation is highly variable, mainly because of the topographical conditions. In addition, low density of monitoring networks makes difficult spatial representation. In this context, satellite images are an important tool to estimate precipitation. However, before their use is needed to evaluate them. The objective of this study is to evaluate precipitations estimates from the GPM IMERG V03 algorithm on a monthly basis. It uses data sets of 10 rain gauges from the ecohydrological observatories of the Department of Water Resources and Environmental Sciences (iDRHiCA). The study area is Azuay province and the analysis is performed for the period April 2014 to January 2015. Results showed that IMERG V03 qualitatively estimates the monthly precipitation in Azuay. According to statistical errors and detection rates, it was found that quantitatively, IMERG properly ' estimate precipitation, except for Susudel and San Fernando stations. IMERG indicates a promising prospect of hydrological utility. It anticipates reasonably products as an improvement over its TMPA predecessor, given its ability to detect light rain and solid precipitation. As more IMERG data with new versions are released, more studies about the water and climate are going to be needed to explore future IMERG potentials.

**Keywords:** Azuay, GPM, precipitation, satellite images.



## INDICE GENERAL

Portada .....	¡Error! Marcador no definido.
Resumen .....	¡Error! Marcador no definido.
Abstract .....	¡Error! Marcador no definido.
INDICE GENERAL .....	4
Agradecimiento .....	¡Error! Marcador no definido.
1. INTRODUCCIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
1.1. <i>Justificación</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
1.2. <i>Objetivo General</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
1.3. <i>Objetivos Específicos</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
2. MARCO TEÓRICO.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1. <i>Métodos de observación de datos de precipitaciones (in-situ e imágenes de satélites)</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1. <i>Medición de Precipitación Global (GPM)</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
2.2. <i>Estudios relacionados sobre evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
2.3. <i>Comparativa de la tecnología mejorada de las imágenes GPM con su predecesor TRMM</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	¡Error! Marcador no definido.
3.1. <i>Descripción de la zona de estudio</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
3.2. <i>Descripción de los datos de precipitación in-situ. ....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2.1. <i>Pre-procesamiento de datos</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3. <i>Descripción de imágenes satelitales de precipitación GPM IMERG</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
3.4. <i>Medidas de evaluación</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
3.4.1. <i>Precipitación mensual para el periodo de estudio</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.4.2. <i>Errores estadísticos</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
3.4.3. <i>Índices de detección</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
4.1. <i>Pre-procesamiento de datos</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2. <i>Precipitación mensual para el periodo de estudio</i> ....	¡Error! Marcador no definido.



4.3. *Errores Estadísticos* ..... ¡Error! Marcador no definido.

4.4. *Índices de detección* ..... ¡Error! Marcador no definido.

4.4.1. Probabilidad de detección (POD)..... ¡Error! Marcador no definido.

4.4.2. Probabilidad de detección corregida (ETS)..... ¡Error! Marcador no definido.

4.4.3. Falsa Alarma (FAR)..... ¡Error! Marcador no definido.

4.4.4. Frecuencia de sesgo (FBI)..... ¡Error! Marcador no definido.

4.5. *Resumen de resultados*..... ¡Error! Marcador no definido.

5. CONCLUSIONES.....¡Error! Marcador no definido.

6. REFERENCIAS .....¡Error! Marcador no definido.

7. ANEXOS ..... 56

### INDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Características comparativas de GPM y TRMM. .... ¡Error! Marcador no definido.

**Tabla 2.** Comparativa de los sensores del satélite TRMM y GPM Core Observatory ¡Error! Marcador no definido.

**Tabla 3.** Comparativa de productos IMERG y TMPA. .... ¡Error! Marcador no definido.

**Tabla 4.** Datos de ubicación de los pluviómetros utilizadas para la evaluación..... ¡Error! Marcador no definido.

**Tabla 5.** Tabla de contingencia para evaluar la ocurrencia de precipitación del producto satelital ..... ¡Error! Marcador no definido.

**Tabla 6.** Promedio del Porcentaje de sesgo, RMSE, coeficiente de Pearson e índice de concordancia para los pluviómetros y el Azuay. .... ¡Error! Marcador no definido.

**Tabla 7.** Índices promedio para los pluviómetros y el Azuay. .... ¡Error! Marcador no definido.

### INDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Constelación de satélites GPM ..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 2.** Instrumentos (a) y el concepto de observación (b) de la precipitación realizado por el GPM Core Observatory..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 3.** Ubicación de la zona de estudio..... ¡Error! Marcador no definido.



**Figura 4.** Ubicación de los pluviómetros..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 5.** Imagen satelital IMERG de precipitación del mes de Abril del 2014 para el Azuay..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 6.** Curva de doble masa para los pluviómetros Quinta Balzay - Oficinas PNC (a), Piscícola Chirimachay - Virgen de El Cajas (b) Virgen de El Cajas – Toreadora (c), Zhurucay Base - Zhurucay Principal (d) y Zhurucay Base - San Fernando (e)..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 7.** Precipitación mensual para estimaciones de pluviómetros y GPM en los pluviómetros de Quinta Balzay (a), Oficinas PNC – Piscícola Chirimachay (b), Virgen de El Cajas (c), Toreadora (d), Zhurucay Principal (e), Zhurucay Base – San Fernando (f) y Susudel (g). {Los resultados GPM Oficinas PNC – Piscícola Chirimachay y GPM Zhurucay Base – San Fernando están superpuestos por localizarse en el mismo pixel..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 8.** Sesgo, raíz del error medio cuadrado (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson ( $\gamma$ ) e índice de concordancia (d) para los pluviómetros de las cuencas de Quinuas (rojo), Zhurucay (Azul) y León (verde)..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 9.** Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm de precipitación para los pluviómetros del Azuay..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 10.** Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm de precipitación para los pluviómetros del Azuay..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 11.** Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm de precipitación para los pluviómetros del Azuay..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 12.** Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm de precipitación para los pluviómetros del Azuay..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 13.** Graficas de dispersión para los pluviómetros de estudio..... ¡Error! Marcador no definido.

## INDICE DE ANEXOS

**ANEXO 1.** Algoritmo en R para extraer las estimaciones del satélite en el pixel correspondiente a cada estación. .... 56

**ANEXO 2.** Cálculo de errores estadísticos e índices de detección para las estaciones del Azuay.. 58



Universidad de Cuenca  
Cláusula de propiedad intelectual

---

Yo, Eduardo Benigno Cabrera Atencia, autor del trabajo final de titulación "Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor

Cuenca, Abril del 2016

---

Eduardo Benigno Cabrera Atencia.

C.I: 0105115133



Universidad de Cuenca

Cláusula de derechos de autor

---

Yo, Eduardo Benigno Cabrera Atencia, autor del trabajo final de titulación "Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicara afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Abril del 2016

---

Eduardo Benigno Cabrera Atencia.

C.I: 0105115133





## **Agradecimiento**

A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera.

A mis padres Benigno y Elvia por apoyarme en todo momento, por ser un ejemplo a seguir, y darme la oportunidad de tener una excelente educación.

A mis hermanos Andrés, Sonia y Mariana por ser parte importante de mi vida.

A mis profesores que me educaron con sus conocimientos y en especial a la Dra. Daniela Ballari que dirigió esta investigación.



## 1. INTRODUCCIÓN

Por su impacto social y ambiental la correcta medición de la precipitación es fundamental para la predicción de fenómenos meteorológicos extremos y una amplia gama de aplicaciones, como son la agricultura, salud, manejo de ecosistemas, gestión hidrológica, entre otros. En estas aplicaciones, la información de variabilidad espacial y temporal de la precipitación es de vital importancia para la toma de decisiones de múltiples usuarios. La calidad de los resultados de las aplicaciones está íntimamente relacionada con la calidad de datos de precipitación de entrada (Sharifi, Steinacker, & Saghafian, 2016).

La medición de la precipitación puede resultar un proceso complicado. En varias partes del mundo hay regiones con poca o ninguna información de precipitación, incluso el obtener esta información puede estar ligado a aspectos políticos, financieros y de accesibilidad (Scheel et al., 2011). Los pluviómetros ofrecen datos del punto donde son ubicados, es así que la variabilidad espacial no puede ser representada apropiadamente. En consecuencia, con el fin de mejorar la estimación de precipitación con cobertura global y continua, los sensores remotos (satélites) se convierten en una ventajosa herramienta. El Global Precipitation Measurement (GPM) es una reciente misión para medir la precipitación, sucesor del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). El satélite GPM Core Observatory fue lanzado en Febrero del 2014 y producen datos de mejor resolución espacial que TRMM (~10km x 10km para GPM y ~27km x 27km para TRMM), además de una cobertura casi global (banda de latitud 60°N–S) y resolución temporal de cada 30 minutos, también existen agregaciones diarias y mensuales (Huffman et al., 2015). GPM a diferencia de TRMM está diseñada para realizar mediciones a altitudes más elevadas y estimando lluvia ligera y/o nieve. (Hou et al., 2014).

### 1.1. Justificación

La cadena montañosa Andina, donde se localiza El Ecuador, tiene topografía compleja, que da lugar a importantes comportamientos meteorológicos y



climatológicos, mostrando una gran variabilidad en la región dependiendo de factores como la altitud, ubicación y la proximidad al mar (Muñoz et al., 2010). Así mismo, El Ecuador no cuenta con una red pluviométrica densificada y bien distribuida, característica importante para conocer la distribución espacial y temporal de la precipitación, provocando falencias en la obtención de datos de precipitación. Además las zonas de alta montaña en el Ecuador, particularmente los páramos, constituyen un ecosistema vital para el crecimiento y desarrollo de la población, siendo el principal proveedor de agua para las regiones andinas del Ecuador. Por ello, reconociendo las limitaciones de los pluviómetros los productos de la misión GPM pueden ser de gran utilidad. Sin embargo, previo a su utilización es necesario realizar una evaluación de su calidad en comparación con pluviómetros. La evaluación permite conocer los alcances y aplicaciones del producto en la zona de estudio.

Este estudio plantea evaluar las estimaciones de precipitación del producto IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) de la misión GPM a una escala mensual con series de datos de diez pluviómetros procedentes de los observatorios ecohidrológicos del Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHiCA) para la zona de la provincia del Azuay, durante el periodo de Abril del 2014 a Enero del 2015. El reducido del número de pluviómetros se debe a que, en este estudio, se utilizan únicamente pluviómetros con datos completos. Debido a lo reciente de este producto las imágenes están disponibles desde Enero del 2015 y no existen estudios relacionados hasta el momento en nuestro país.

La evaluación será puntual con correspondencia de la ubicación de los pluviómetros con su respectivo pixel en las imágenes. Los trabajos contemplados abarcarán: Primero la descarga de imágenes del producto IMERG V03 de la misión GPM para una escala mensual. Segundo la obtención, procesamiento y análisis de la calidad de datos de los pluviómetros de la zona de estudio. Tercero, se intersectan los pluviómetros con las imágenes a través del software R, encontrando la precipitación mensual del satélite con su respectivo pluviómetro. Luego se evalúa con métodos



estadísticos realizados en estudios afines (Castro, 2014; Feidas, 2010; Ochoa, Pineda, Crespo, & Willems, 2014; Scheel et al., 2011; Su, Hong, & Lettenmaier, 2008; Tang, Zeng, et al., 2016) divididos en dos grupos. Primero se consideran los errores estadísticos: sesgo, raíz del error medio cuadrado, coeficiente de correlación de Pearson e índice de concordancia. Luego, se consideran los índices de detección: probabilidad de detección, índice de sesgo, falsa alarma y probabilidad de detección corregida. Para analizar de forma cualitativa los datos se realizaron gráficos de precipitación mensual para las dos fuentes de datos.

## **1.2. Objetivo General**

Evaluar las estimaciones mensuales de precipitaciones de las imágenes satelitales GPM IMERG V03 para la zona del Azuay, comparando dichas imágenes con los datos registrados en los pluviómetros localizadas en la región.

## **1.3. Objetivos Específicos**

- Obtener datos de las imágenes GPM IMERG V03 y de las estaciones pluviométricas relacionadas con este estudio.
- Analizar la calidad de datos de los pluviómetros para el Azuay.
- Aplicar medidas de comparación entre los pluviómetros y los correspondientes píxeles de las imágenes GPM IMERG V03.
- Analizar los resultados de la correspondencia entre los pluviómetros y las imágenes GPM IMERG V03.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Métodos de observación de datos de precipitaciones (in-situ e imágenes de satélites)

El objetivo principal de la medición de precipitación es obtener datos veraces de observación en la zona de estudio. Los pluviómetros son un instrumento meteorológico que cumple con esta actividad, convirtiéndose en una plataforma de recolección de datos y unidad de comunicación. No obstante, el pluviómetro cuenta con dos aspectos que afectan a su precisión: errores en la medida puntual y error en la estimación espacial de la precipitación sobre la superficie. La estimación espacial depende básicamente de la densidad de la red de monitoreo, por ello las redes deben ser planeadas de forma que se consiga un cuadro representativo de la distribución espacial (Linsley, M, & J., 1994). En el Ecuador, al ser un país en vías de desarrollo, las redes de monitoreo son insuficientes.

Las regiones andinas de Venezuela, Colombia, Perú y Ecuador son el principal proveedor de agua con calidad excelente. Además, de proporcionar a los ríos un buen flujo base (Buytaert et al., 2006). Los Andes ecuatorianos al ser una zona de alta montaña presentan patrones de lluvia muy variables en el espacio y tiempo, haciendo difícil capturar de forma precisa la distribución espacial de la precipitación, principalmente a causa de las condiciones topográficas variables como altitud, aspecto y pendiente. Así mismo, las regiones de alta montaña debido al difícil acceso suele tener baja densidad en la red de monitoreo. Ahora bien, los inconvenientes de disponibilidad, calidad y cobertura de los pluviómetros no existen en los productos satelitales (Hunink, Immerzeel, & Droogers, 2013). Los productos satelitales ofrecen una mejor representación espacial, pero suelen requerir corrección por sesgo de una red de monitoreo confiable y realizar una evaluación favorable del producto. Además, pueden utilizarse en zonas no instrumentadas y de esta manera se evitaría problemas como: mediciones puntuales, necesidad de interpolación de datos, disponibilidad de personal y costo en la transferencia de datos (Caicedo Carrascal, 2008)



En la actualidad existen muchos satélites en el espacio que se pueden clasificar según su órbita en geoestacionarios y de órbita terrestre baja. Los geoestacionarios se mueven en el mismo sentido de la órbita de la Tierra y permanecen verticalmente sobre un punto determinado de la superficie de la Tierra. Ahora, los satélites de órbita terrestre baja tienen una órbita circular en movimiento constante, pueden ser polares o no polares. Los satélites de órbita circular proporcionan productos con información de la Tierra y su atmósfera, las cuales tienen ventajas como: libre distribución de imágenes, obtención de datos casi en tiempo real, extensa cobertura y desventajas como: requerimiento de validación y calibración de las imágenes (Ceccato & Dinku, 2010). Los satélites usan información de varios sensores para estimar la precipitación, los cuales se están desarrollando con el progreso de nuevas tecnologías. Además, las imágenes satelitales de precipitación coinciden con un periodo de tiempo y área determinada, por lo que es primordial conocer la resolución espacial y temporal específica de las imágenes.

### **2.1.1. Medición de Precipitación Global (GPM)**

Hasta la fecha un sin número de productos satelitales para medir la precipitación han sido lanzados, con diversas resoluciones espaciales y temporales, uno de ellos es TMPA (TRMM Multisatellite Precipitation Analysis) (Huffman et al., 2007) de la misión TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) lanzada a finales de 1997, proporcionando gran cantidad de información cuasi-global para investigaciones y sus aplicaciones (Chang & Hong, 2012). Los estudios y aplicaciones de productos TMPA han sido de gran importancia científica y social, como en el caso de planificación y gestión de recursos hídricos, predicción de desastres y predicción de fenómenos meteorológicos extremos. A pesar de los grandes logros en la era TRMM, los datos de precipitación tienen limitaciones como la cobertura, incertidumbre en la precipitación sólida y la estimación sobre latitudes y altitudes elevadas (Chang & Hong, 2012; Hou et al., 2014; Huffman et al., 2007; Yong et al., 2015).

Con el mismo objetivo de TRMM llega GPM (Global Precipitation Measurement) que es una misión internacional constituida por una red de satélites que proporciona la



nueva generación de productos de medición de lluvia y nieve. GMP fue lanzado por La NASA (American National Aeronautics and Space) y la JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency) el 27 de Febrero de 2014. El mismo se localiza a una altitud de 407 km en una órbita no sincronizada con el sol y continúa la estrategia de muestreo TRMM. Aunque en un futuro se espera extender las observaciones a latitudes más altas, que cubre el globo desde el Círculo Antártico al Ártico (Huffman et al., 2015), sin embargo en la actualidad, se cubre una latitud de 60°N al 60°S. Además posee instrumentos avanzados que marcarán un nuevo estándar en la medición de precipitación. El GPM Core Observatory está equipado con un sensor de lluvia activo llamado Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) y un sensor de lluvia pasivo con canales de alta frecuencia llamado GPM Microwave Imager (GMI) que mejoran la estimación de lluvia ligera y nieve, eventos que otros satélites son incapaces de medir (Sharifi et al., 2016). La constelación de GPM cuenta con un aproximado de 10 satélites durante este periodo de estudio de diferentes asociaciones internacionales (Figura 1).

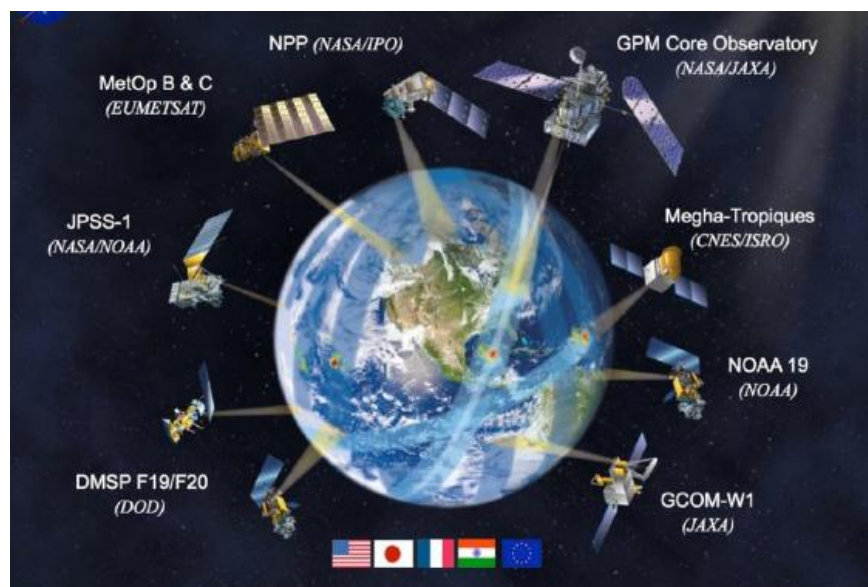


Figura 1. Constelación de satélites GPM – Fuente:  
[http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data\\_utilization/GPM\\_data\\_util\\_handbook\\_E.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf)

El DPR opera con un radar en banda Ka (35.5 GHz) llamado KaPR y un radar en banda Ku (13.6 GHz) llamado KaPR, que cubren franjas de 125 y 245 Km respectivamente. Además, las mediciones son simultáneas y superpuestas



proporcionando nueva información sobre la intensidad de precipitación ligera. Al mismo tiempo, GMI que es un radiómetro de microondas multicanal de escaneo cónico cubre una franja de 885 Km y cuenta con trece canales de frecuencia que van desde 10 GHz a 183 GHz (Huffman et al., 2015). Los instrumentos y el concepto de observación de la precipitación realizado por el GPM Core Observatory se muestran en la Figura 2.

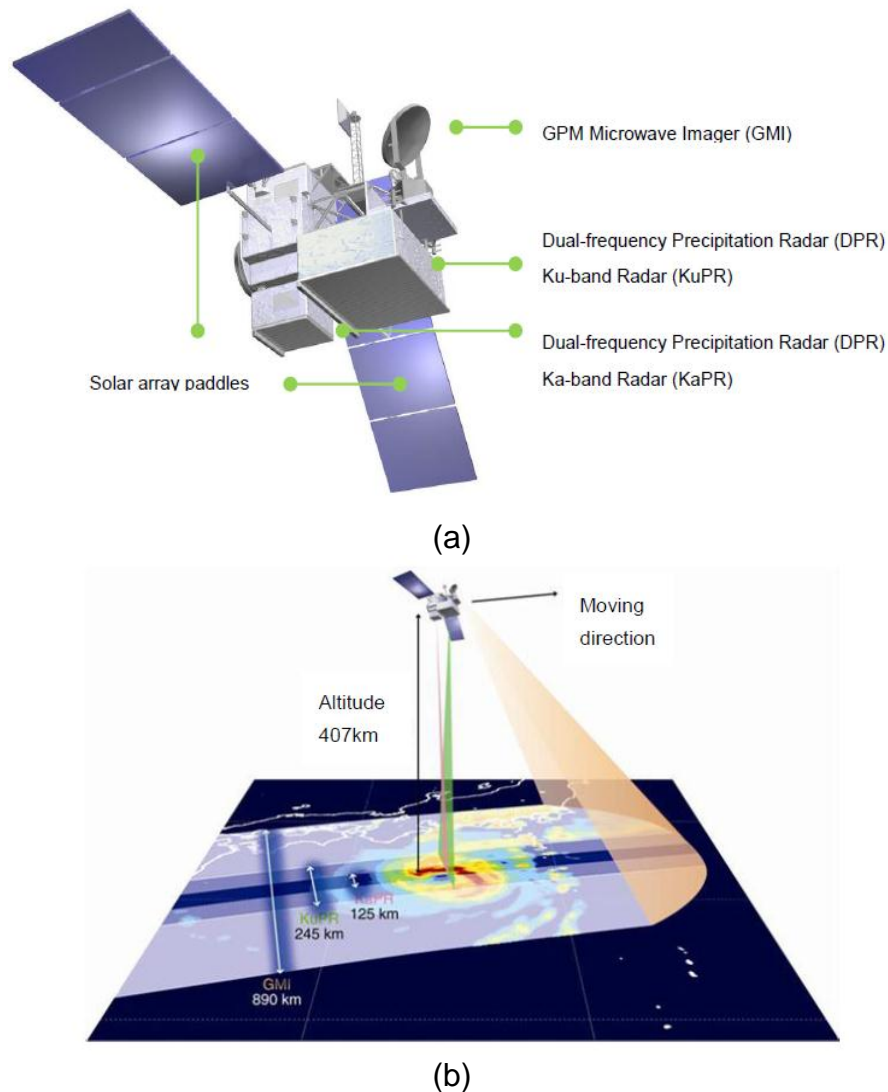


Figura 2. Instrumentos (a) y el concepto de observación (b) de la precipitación realizada por el GPM Core Observatory – Fuente:

[http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data\\_utilization/GPM\\_data\\_util\\_handbook\\_E.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf)

GPM cuenta con productos de diferentes niveles a base de varios algoritmos, este estudio se centra en el algoritmo IMERG V03 que intercalibra, fusiona e interpola





las estimaciones de los todos los sensores implicados, con una resolución espacial de  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  y una resolución temporal de 30 minutos (Huffman et al., 2015). El producto final IMERG V03 se puso a disposición de los usuarios a partir de Enero del 2015 con datos desde mediados de Marzo del 2014. Cabe destacar que la transición de TMPA a IMERG plantea seguir generando el producto TRMM 3B42/43 y 3B42RT de la versión 7, hasta que IMERG se considere estable probablemente a mediados de 2017, donde existirá una discusión amplia acerca de este tema (Huffman & Bolvin, 2015). El satélite TRMM fue dado de baja en Abril y salió de órbita en Junio del 2015.

Se ha desarrollado un portal web para el alojamiento de datos GPM y manuales de usuario (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/gpm>), otro servidor de búsqueda y acceso a datos a través de diferentes servicios web por ejemplo: OPeNDAP, GDS, WMS, WCS y conversión en varios formatos (NetCDF, HDF, KML (para Google Earth), ASCII) es Mirador (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>). Ahora, GIOVANNI-4 (Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure; (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>) es una interfaz on-line que permite la exploración, visualización, descarga y análisis estadístico de los diferentes niveles de los productos GPM.

## **2.2. Estudios relacionados sobre evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones**

Debido a la reciente liberación de datos existen pocos estudios relacionados, uno de ellos es el realizado por Tang, Zeng, et al. (2016) sobre la cuenca del río Ganjiang en el sureste de China que cuenta con una topografía compleja. Las correlaciones del producto fueron aceptables (0.63) y altos (0.87) a nivel de pixel y de cuenca respectivamente. Además, se redujo eficazmente el sesgo a valores bajos. En general este estudio muestra que el producto IMERG supera a TMPA.

En Irán, Sharifi et al. (2016) realizó un estudio comparativo de estaciones pluviométricas con los productos IMERG, TMPA-3B42 y ERA-Interim, sobre cuatro regiones de diferentes condiciones climáticas y topografía. En general, a escala



diaria IMERG supera a los otros productos, porque subestima ligeramente la precipitación, el coeficiente de correlaciones es muy bueno, el sesgo da mejores resultados en las cuatro regiones. En cuanto, a los índices de detección POD (Probability Of Detection), CSI (Critical Success Index) y FAR (False Alarm Ratio) el producto IMERG da mejores resultados. Un hecho particular, es que para precipitaciones fuertes (mayor a 15 mm/día) IMERG estima eficazmente en relación con los otros productos.

Tang, Ma, Long, Zhong, & Hong, (2016) evaluaron en la China continental el producto IMERG a escala horaria, con datos de precipitación observadas en tierra. El producto muestra mejores resultados en las medidas de evaluación estadística cuando: la evaluación se realiza en áreas extensas y cuando la resolución temporal aumenta de 3-horas a diaria. Por otro lado, IMERG necesita mejoras en altitudes altas y climas secos. Las observaciones tienen buenas estimaciones, particularmente para rangos bajos de precipitación.

El producto IMERG y TMPA-3B42 V7 fueron evaluados por Prakash, Mitra, Pai, & AghaKouchak (2016) para la detección y estimación de las lluvias intensas en toda la India a una escala temporal diaria. La evaluación mostró una mejora notable de IMERG sobre TMPA en las estribaciones del Himalaya y al noroeste de la India. Concluyendo que los resultados prometen un mejor modelado de fenómenos hidrológicos extremos utilizando productos de precipitación por satélite.

En cuanto a la evaluación de GPM en el Ecuador o regiones cercanas, no existen estudios hasta el momento, pero si existen evaluaciones de productos TRMM realizado por Ochoa et al. (2014) a escala diaria en cuencas costaneras del Ecuador y la frontera con Perú reveló que el producto satelital logra capturar la estacionalidad de la precipitación de manera cualitativa y cuantitativa. Otro estudio relacionado con el producto TRMM 3B43 es el realizado por Castro (2014) de la Universidad de Cuenca a nivel de estaciones en las regiones Costa, Sierra y Oriente del Ecuador. Esta investigación mostró que la precipitación mensual es capturada cualitativamente, los errores estadísticos e índices de detección están mejor



representados cuantitativamente en la región costanera y oriental que en la región andina.

Por lo reciente del producto y la carencia de estudios en Ecuador más específicamente en zonas Andinas como es la región del Azuay, es de vital importancia una evaluación de IMERG para posteriores investigaciones y aplicaciones.

### 2.3. Comparativa de la tecnología mejorada de las imágenes GPM con su predecesor TRMM

Las principales características y diferencias entre la misión GPM y TRMM se presentan a continuación en la Tabla 3.

	<b>GPM</b>	<b>TRMM</b>
<b>Mediciones</b>	Globales	Tropical y subtropical
<b>Detección de precipitación</b>	Lluvia, hielo y nieve	Lluvia; no detecta lluvia ligera (menor a 0.5 mm/hr)
<b>Orbita</b>	No polar	No polar
<b>Tiempo de revisita</b>	~95 minutos	~91.5 minutos
<b>Numero de orbitas</b>	16	16
<b>Cobertura</b>	65°S a 65°N de latitud	35°S a 35°N de latitud
<b>Altitud</b>	407 km	350 km (403* km)

\* Después de elevar la órbita en agosto de 2001

Tabla 1. Características comparativas de GPM y TRMM.

Las mejoras tecnológicas de GPM con respecto a TRMM son evidentes, fundamentalmente las innovaciones realizadas en sus sensores. TRMM estaba



compuesto por un sensor de precipitación PR (Precipitation Radar) y dos sensores pasivos TMI (TRMM Microwave Imager) y VIRS (Visible and Infrared Scanner) (Huffman & Bolvin, 2015), mientras que GPM está constituido por un sensor activo DPR (Dual-frequency Precipitation Radar) y un sensor pasivo GMI (GPM Microwave Imager) (NASA, 2014). DPR está constituido por dos radares; KuPR y KaPR. El instrumento KaPR detecta observaciones sensibles como precipitaciones ligeras y nevadas. La mínima intensidad de precipitación detectable para el radar KuPR y KaPR es 0.5 mm/hr y 0.2 mm/hr respectivamente (JAXA, 2016). Las especificaciones técnicas más relevantes y comparables de los sensores se presentan en la Tabla 2.

Las mediciones GMI comparadas con TMI muestran mejores resoluciones espaciales, mejoras en la detección de lluvia ligera. Ahora, comparando DPR con PR se tiene superior sensibilidad a la lluvia ligera y nieve, mejor precisión de mediciones y mejor identificación de líquidos, hielo y partículas de fase mixta (ARSET, 2015).

SENSOR	FRECUENCIA	BARRIDO	RESOLUCIÓN
<b>TRMM Satellite</b>			
<b>PR</b>	13.6 GHz	220 km (247*km)	5 a 45 km (dependiendo del canal)
<b>TMI</b>	10.7, 19.4, 21.3, 37 & 85.5 GHz	760 km (870* km)	5 km
<b>GPM Core Observatory</b>			
<b>DPR</b>	Ka 35.5 GHz	125 km	5.2 km
	Ku 13.6 GHz	245 km	5.2 km
<b>GMI</b>	10.6; 18.7; 23.8; 36.5; 89; 166 & 183 GHz	885 km	19.4km x 32.2km (10 GHz) a 4.4km x 7.3km (183 GHz)

\* Después de elevar la órbita en agosto de 2001

Tabla 2. Comparativa de los sensores del satélite TRMM y GPM Core Observatory



A partir de la combinación simultánea de datos de los sensores satelitales con datos de la respectiva constelación de satélites, se obtiene productos con las características presentadas en la Tabla 3

	<b>IMERG</b>	<b>TMPA</b>
<b>Resolución Temporal</b>	30 minutos (Agregaciones diarias y mensuales)	3 horas (Agregaciones diarias y mensuales)
<b>Resolución Espacial</b>	0.1°x0.1° (~10 x 10 km)	0.25°x0.25° (~27 x 27 km)
<b>Cobertura Espacial</b>	Global 60°S a 60°N ( 90°S a 90°N*)	Global 50°S a 50°N

\*La cobertura para IMERG es 60°S a 60°N y se extenderá a 90°S a 90°N en futuras versiones

Tabla 3. Comparativa de productos IMERG y TMPA.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio comprende la provincia de Azuay (aproximadamente 80°W, 3.7°S hasta 78.5°S, 2.5°W, localizada en la región Austral (centro-sur) del Ecuador y atravesada por la cordillera de los Andes. Limita al Norte con la provincia de Cañar, al sur con las provincias de El Oro y Loja, al este con las provincias Morona Santiago y Zamora Chinchipe, y al oeste con la provincia de Guayas. La orografía del Azuay está constituida por la hoya del Paute y parte de la del Jubones, su punto más alto es el nudo de El Cajas a 4500 msnm. El principal eje del sistema hidrográfico es el río Paute (desembocadura en el atlántico), además del río Jubones, Cañar y Naranjal (desembocadura en el Pacífico).

El clima del Azuay es variable debido a la topografía y altura. Las temperaturas más bajas está en la zona de región interandina con temperaturas entre los 2°C y 4°C,



la temperatura media predominante varía entre los 10 °C y 28 °C, y las temperaturas más altas están presentes en la parte oeste de la provincia con temperaturas entre los 24°C y 28°C. La precipitación media anual del Azuay es de 940mm mostrando al Azuay como una provincia bien dotada de recursos hídricos.

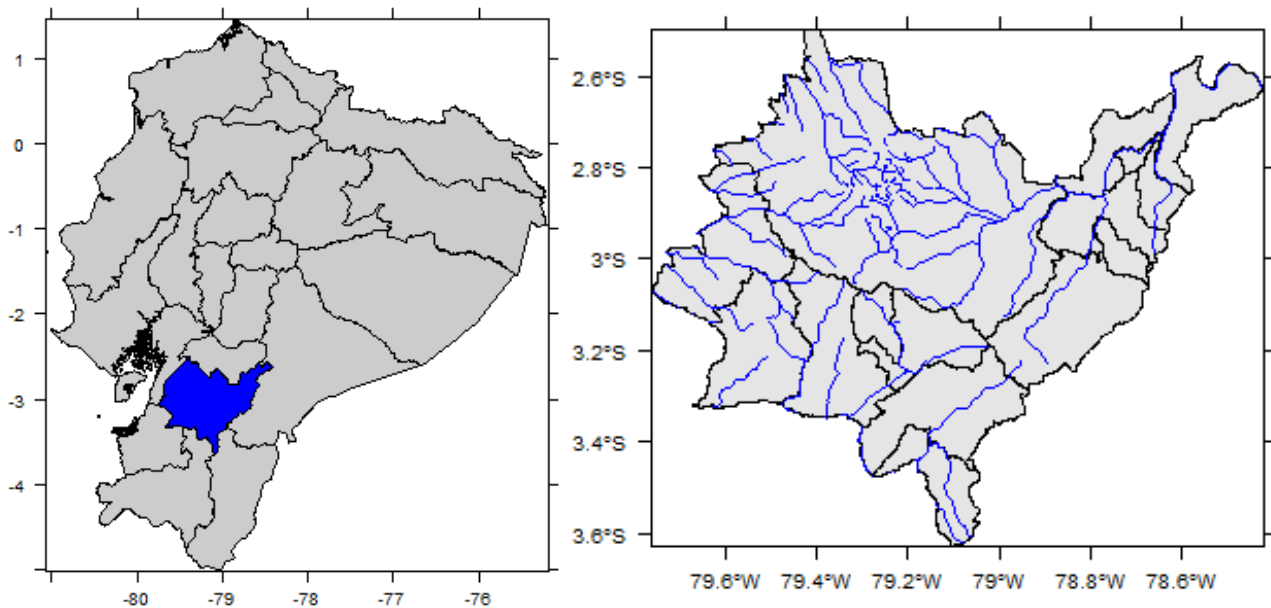


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio

### 3.2. Descripción de los datos de precipitación in-situ.

Los datos de precipitación de los pluviómetros fueron facilitados por el Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHiCA). Por concordancia entre los datos mensuales de los pluviómetros y las imágenes satelitales el presente estudio se extendió desde Abril del 2014 hasta Enero del 2015. Los pluviómetros están ubicados en zonas sobre tres cuencas: Primero, la micro-cuenca de Quinuas perteneciente al Parque Nacional Cajas (PNC), cuenta con cinco conjuntos de datos pluviométricos. Segundo, la micro-cuenca de Zhurucay que cuenta con 3 conjuntos de datos pluviométricos, está ubicada en el Cantón Girón y San Fernando, y es tributaria a la cuenca del río Rircay que forma parte de la cuenca hidrográfica del río Jubones. Cabe destacar que Zhurucay tiene alta variabilidad espacial, influenciado por las corrientes de aire del



océano pacífico, las masas de aire continentales del atlántico y la topografía de alta pendiente de la cuenca (Reinozo & Elizabeth, 2015). Por último, tenemos la sub-cuenca del río León perteneciente a la cuenca del Jubones con un solo pluviómetro en esta zona. Los datos de ubicación de los pluviómetros se muestran en la Tabla 4 y se ilustran en la Figura 4.

El limitado número de pluviómetros con los que se contó en este estudio se debió a la ausencia de datos de libre distribución para este periodo. El último anuario meteorológico publicado es del 2012, la institución encargada de dicha publicación meteorológica es el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador). Los datos pluviométricos provenientes de los observatorios de iDRHiCA son de una red de estaciones que están bajo su responsabilidad.

No.	Cuenca	Sitio	Altura	Coordenadas UTM		%
			(msnm)	X(m)	Y(m)	Vacíos
1		Quinta Balzay	2690	714623.00	9681641.00	0.62
2		Oficinas PNC	2991	709548.67	9685135.69	3.08
3	Quinuas	Piscícola Chirimachay	3314	705703.88	9688895.48	0
4		Virgen de El Cajas	3655	701110.74	9692382.23	0
5		Toreadora	3965	697618.73	9692227.08	0.01
6		Estación Principal	3780	696182.96	9661317.54	0
7	Zhurucay	Estación Base	3290	696996.74	9656651.10	0
8		Centro	3813	695968.00	9660247.00	34.63
9	León	Susudel	2048	703716.00	9622593.00	0
10	Zhurucay	San Fernando	2696	693565.00	9652985.00	0

Tabla 4. Datos de ubicación de los pluviómetros utilizados para la evaluación

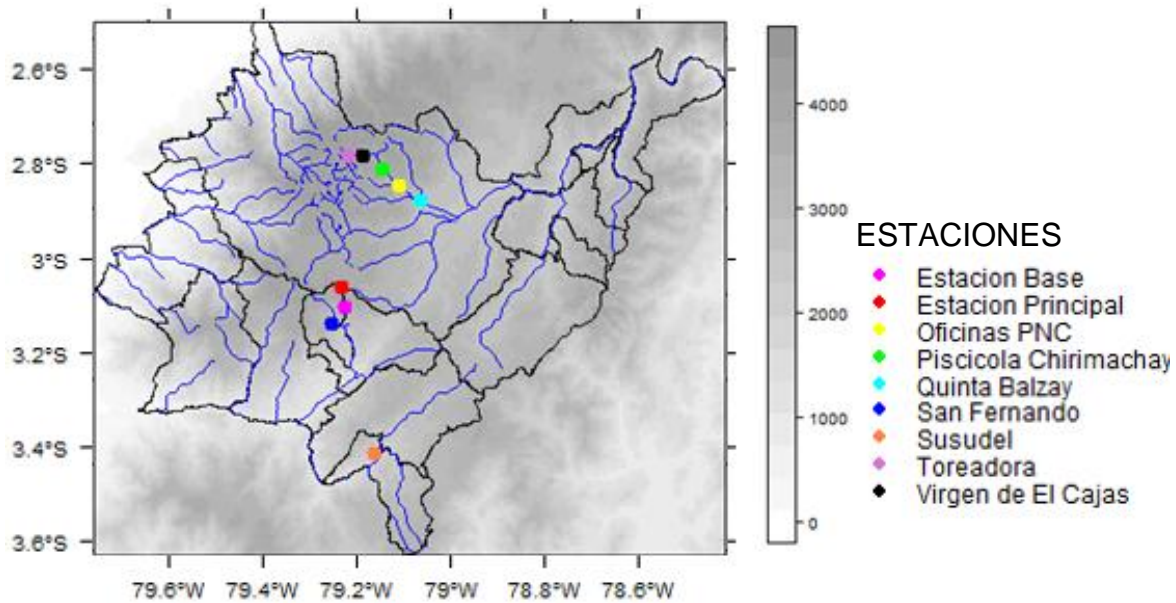


Figura 4. Ubicación de los pluviómetros.

### 3.2.1. Pre-procesamiento de datos

La calidad de los datos de los pluviómetros establece la confiabilidad de la evaluación del producto satelital por ello es necesario tener una base de datos confiable de forma que la evaluación sea correcta. La descarga de datos y verificación del buen funcionamiento de los pluviómetros se realizaba periódicamente por miembros de iDRHiCA. Además, se consideró el porcentaje de vacíos de cada pluviómetros con un máximo de 20% para ser considerado como aceptable, también se comprobó la proporcionalidad de los datos con curvas de doble masa para evaluar variaciones que conduzcan a valores erróneos. Las curvas de doble masa es la representación gráfica de la precipitación de dos pluviómetros cercanos y cuyo resultado debe ser una línea recta.

### 3.3. Descripción de imágenes satelitales de precipitación GPM IMERG





Para este estudio se utilizó el producto IMERG V03 GPM a una escala mensual, el conjunto de datos fue descargado gratuitamente (Huffman, 2015) gracias a su libre distribución. La descarga del producto con datos de precipitación para el Ecuador se realizó mediante GIOVANNI-4 en formato ncd (nc) con información espacial por píxeles. El software estadístico R fue utilizado para intersectar los pluviómetros con el respectivo píxel del producto, obteniendo las series temporales de estimaciones de precipitación mensual de IMERG para los píxeles donde se localizan los pluviómetros. La imagen satelital IMERG para el Azuay se ilustra en la Figura 5. El script para la extracción de estimaciones de las imágenes satelitales se presenta en el Anexo 1.

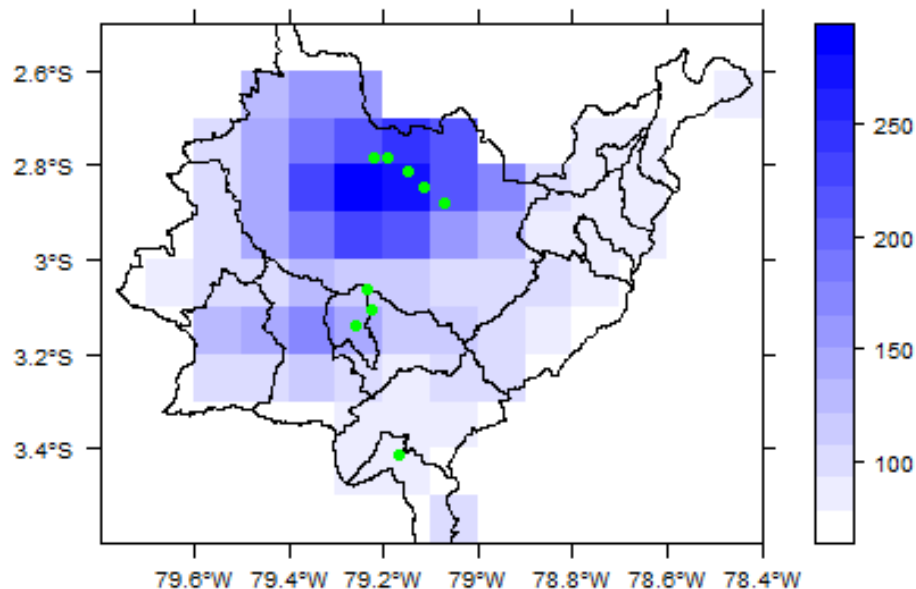


Figura 5. Imagen satelital IMERG de precipitación del mes de Mayo del 2014 para el Azuay

### 3.4. Medidas de evaluación

La evaluación es de tipo puntual con correspondencia de la ubicación de los pluviómetros con su respectivo píxel en las imágenes. Los métodos estadísticos se obtuvieron de estudios afines (Castro, 2014; Feidas, 2010; Ochoa et al., 2014; Scheel et al., 2011; Su et al., 2008; Tang, Zeng, et al., 2016) divididos en dos grupos. Primero están los errores estadísticos: sesgo, raíz del error medio cuadrado, coeficiente de correlación de Pearson e índice de concordancia. Luego los índices



de detección: probabilidad de detección, índice de sesgo, falsa alarma y probabilidad de detección corregida. Para analizar de forma cualitativa los datos se realizaron gráficos de precipitación mensual y para las dos fuentes de datos.

### 3.4.1. Precipitación mensual para el periodo de estudio

Mediante el software Microsoft Excel se realizó las gráficas de la precipitación mensual y entre el mes de Abril del 2014 y Enero del 2015 a partir de las observaciones de los pluviómetros y estimaciones del satélite. La comparación gráfica de ambos ayuda a la comprensión de los datos y permite conocer si el satélite es capaz de representar cualitativamente la precipitación en los pluviómetros del estudio.

### 3.4.2. Errores estadísticos

Varias medidas estadísticas ampliamente utilizadas se manejaron en este estudio para evaluar cuantitativamente el rendimiento del producto satelital. Las medidas aplicadas para demostrar el error y el sesgo, entre las estimaciones de precipitación y evaluar las observaciones incluyeron el sesgo relativo y raíz del error medio cuadrado. Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson e índice de concordancia para evaluar el acuerdo entre las observaciones de campo y el producto satelital.

- Sesgo Relativo: Evalúa la diferencia media entre las estimaciones del producto satelital ( $P_s$ ) y la observada por los pluviómetros ( $P_p$ ), siendo  $n$  el número de pluviómetros. El sesgo relativo puede ser positivo o negativo. Un sesgo negativo indica una subestimación de precipitación del satélite, mientras que un sesgo positivo indica sobreestimación.

$$RSesgo = \frac{\sum_{i=1}^n (Ps_{xi} - Pp_{xi})}{\sum_{i=1}^n (Pp_{xi})} \times 100$$



- Raíz del error medio al cuadrado: RMSE (por sus siglas en inglés “Root Mean Square Error”) evalúa la magnitud típica del error de las estimaciones del satélite con las de los pluviómetros con sensibilidad a los errores más grandes y así también a valores atípicos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ps_{xi} - Pp_{xi})^2}$$

- Coeficiente de correlación de Pearson ( $\gamma$ ) : Calcula el nivel de concordancia lineal entre las estimaciones y los pluviómetros. El valor del coeficiente es tal que  $-1 \leq \gamma \leq 1$ . Un valor de  $\gamma = 1$  indica correlación positiva perfecta. Si no existe correlación lineal o hay una correlación lineal débil ( $\gamma$ ) es cercano a cero.

$$\gamma = \frac{\text{cov}(Ps, Pp)}{\sqrt{\text{var}(Ps)} \times \sqrt{\text{var}(Pp)}}$$

- Índice de concordancia ( $d$ ): refleja el grado en el cual las observaciones de los pluviómetros son estimadas en forma correcta por las estimaciones del satélite. No es una medida de correlación como tal sino una medida del grado en el cual las estimaciones satelitales están libres de errores. La ventaja del índice de concordancia es que los errores y diferencias se les da su ponderación adecuada. El índice de concordancia varía de 0 a 1 con los valores más altos indican una mejor estimación del satélite.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Pp_{xi} - Ps_{xi})^2}{\sum_{i=1}^n (|Ps_{xi} - \bar{Pp}| + |Pp_{xi} - \bar{Ps}|)^2}$$



### 3.4.3. Índices de detección

Otra técnica de evaluación de la estimación por satélite es la que utiliza tablas de contingencia, la cual es una matriz de dos dimensiones en que cada elemento cuenta el número de ocurrencias en la que las observaciones de los pluviómetros y las correspondientes estimaciones satelitales detectaron precipitación superior a un umbral dado. Las posibilidades son:

- a) El satélite detecta precipitación y el pluviómetro también. (Éxito)
- b) El satélite detecta precipitación, pero el pluviómetro no. (Falsa alarma)
- c) El satélite no detecta la precipitación, pero el pluviómetro sí. (Error)
- d) El satélite no detecta la precipitación, el pluviómetro tampoco. (Correcto negativo)

Los elementos de las tablas de contingencia se definen como en la Tabla 5.

		Satélite		
		SI	NO	Total
Pluviómetro	SI	Éxitos (a)	Errores (c)	a+c
	NO	Falsas alarmas (b)	Correcto negativo (d)	b+d
Total		a+b	c+d	Total

Tabla 5. Tabla de contingencia para evaluar la ocurrencia de precipitación del producto satelital

Se realizó un análisis de detección de eventos de precipitación mediante las tablas de contingencia y los índices: probabilidad de detección (POD), probabilidad de detección corregido (ETS), falsa alarma (FAR) y sesgo (FBI) para diferentes umbrales de precipitación (5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm), y para cada pluviómetro.

Entonces:

- Probabilidad de detección: POD (por sus siglas en inglés “Probability Of Detection”) es la fracción de precipitación que fue adecuadamente estimada:



$$POD = \frac{a}{a+c}$$

Una detección perfecta del satélite da un resultado de POD de 1.

- Probabilidad de detección corregida: ETS (por sus siglas en inglés “Equitable Threat Score”) es la fracción de precipitación que fue adecuadamente detectada, ajustada por el número de detecciones ( $He$ ) que se espera que ocurran sólo por azar:

$$ETS = \frac{a - He}{a + b + c - He}$$

$$He = \frac{(a+c)(a+b)}{n}$$

Donde  $n$  es el número total de valores estimados. Una detección perfecta del satélite da un resultado de ETS de 1.

- Falsa alarma: FAR (por sus siglas en inglés “False Alarm Rate”) mide la fracción de detección de precipitación que en realidad no sucedieron; es decir, que detectó el satélite pero no los pluviómetros.

$$FBI = \frac{a+b}{a+c}$$

El índice varía entre 0 y 1. FAR tiene una connotación negativa, por ello el valor perfecto es 0 pues indica que el satélite no emitió falsas alarmas.

- Frecuencia de sesgo: FBI (por sus siglas en inglés “Frequency Bias Index”) es la proporción de la cantidad de eventos de precipitación detectados por el satélite respecto a la cantidad detectados por los pluviómetros.

$$FBI = \frac{a+b}{a+c}$$



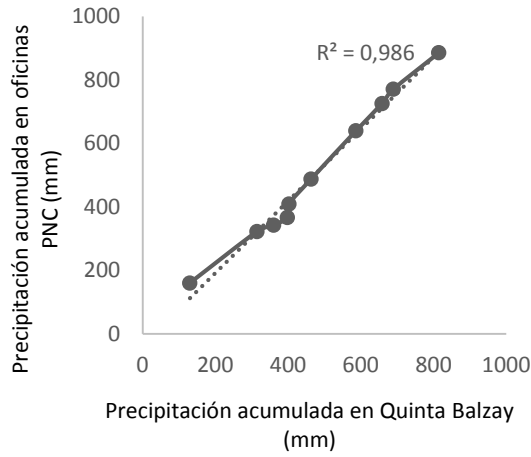
Si el FBI es menor a 1 representa que el satélite está subestimando la precipitación; mientras que un FBI mayor a 1 indica sobrestimación. Entonces, su rango es de 0 a  $\infty$ . El valor perfecto del índice es 1.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

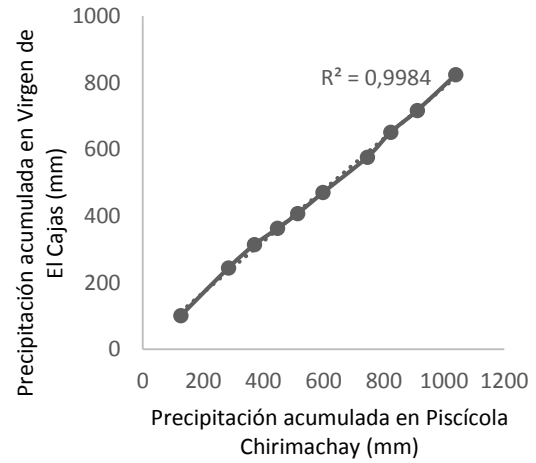
### **4.1. Pre-procesamiento de datos**

Se analizó los datos de los 10 pluviómetros. La mayoría de los pluviómetros no tienen datos faltantes o este porcentaje es muy bajo. Sin embargo, en el caso del pluviómetro Zhurucay Centro tiene el 34,63%, de vacíos lo cual sugiere excluir este pluviómetro del estudio. El análisis de porcentaje de vacíos se muestra en la Tabla 4.

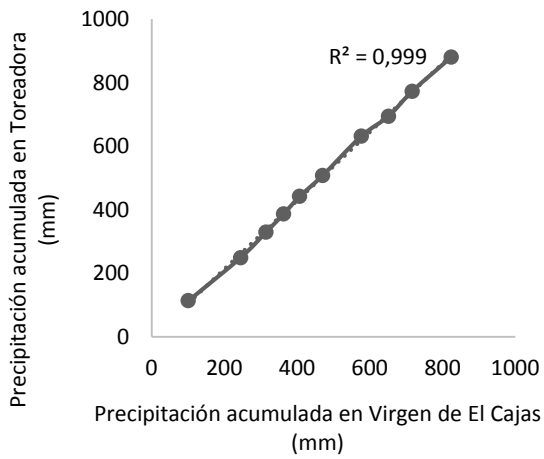
Las curvas de doble masa se realizaron entre pluviómetros cercanos y de alturas similares. Para la cuenca de Quinuas se analizó entre los pluviómetros de Quinta Balzay - Oficinas PNC, Piscícola Chirimachay - Virgen de El Cajas y Virgen de El Cajas - Toreadora. En todos los casos se mantiene una línea recta, lo que indica que existe proporcionalidad entre estos pluviómetros. Para la cuenca de Zhurucay se analizó entre los pluviómetros Zhurucay Base - Zhurucay Principal y Zhurucay Base - San Fernando, sin embargo en para esta micro-cuenca no existe proporcionalidad entre estos pluviómetros, como se mencionó anteriormente esto se debe a la alta variabilidad espacial de esta cuenca, influenciado por las corrientes de aire del océano pacífico, las masas de aire continentales del atlántico y la topografía de alta pendiente de la cuenca. Para el pluviómetro Susudel perteneciente a la cuenca del río León no se encontraron pluviómetros cercanos con datos del periodo 2014-2015, por lo que no fue posible utilizar curvas de doble masa para analizar la proporcionalidad.



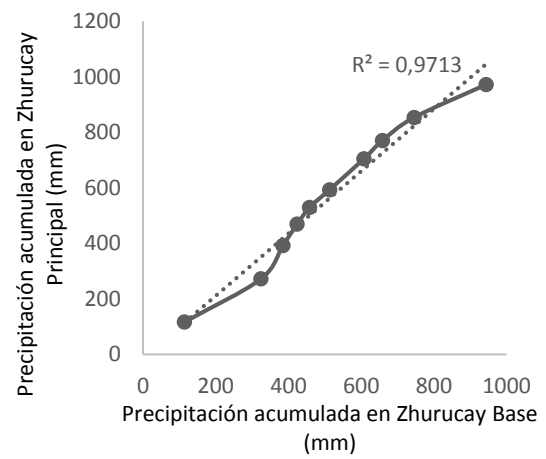
(a)



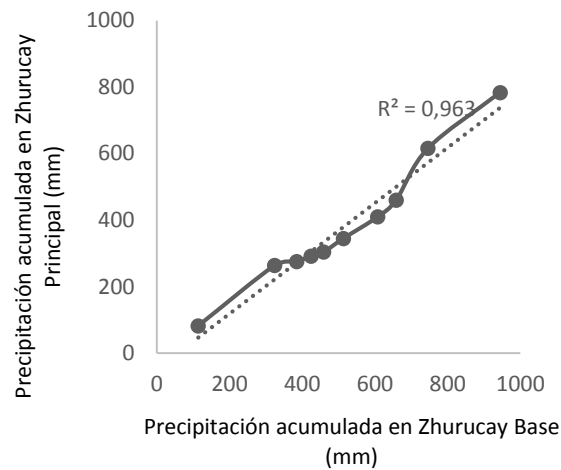
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6. Curva de doble masa para los pluviómetros Quinta Balzay - Oficinas PNC (a), Piscícola Chirimachay - Virgen de El Cajas (b) Virgen de El Cajas – Toreadora (c), Zhurucay Base - Zhurucay Principal (d) y Zhurucay Base - San Fernando (e).

#### 4.2. Precipitación mensual para el periodo de estudio

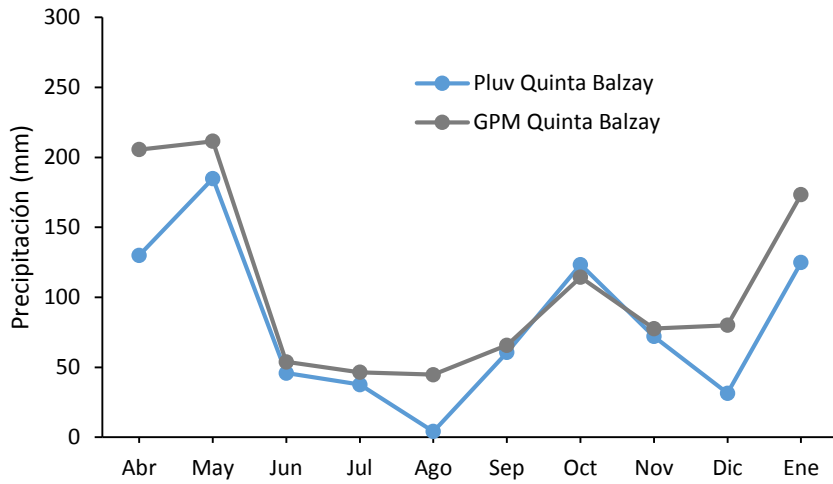
Al comparar las estimaciones de precipitación realizadas por los pluviómetros con las del producto satelital (Figura 7), se puede observar en primer lugar que la precipitación cualitativamente está representada de forma adecuada. Es decir, si bien los valores de precipitación obtenidos por el satélite no son exactos, la forma de los gráficos es correcta. Esto pasa especialmente en los pluviómetros de la cuenca de Quinuas y Zhurucay, por el contrario en el pluviómetro Susudel perteneciente a la cuenca del río León los valores estimados por el GPM presentaron para el mes de Junio discrepancia en forma cualitativa. También en San Fernando en el mes de Abril, Mayo, Junio y Diciembre el satélite no está representado adecuadamente la precipitación.

Es importante enfatizar que uno de los principales inconvenientes al utilizar un producto satelital es que los valores obtenidos para cada pixel tienen una resolución espacial determinada que limita la estimación correcta de la variable climatológica. Un ejemplo claro se da en los pares de pluviómetros Oficinas PNC – Piscícola Chirimachay y Zhurucay Base – San Fernando que por estar cercanas (Figura 4.), el satélite reporta valores idénticos por estar en el mismo pixel, mientras que los

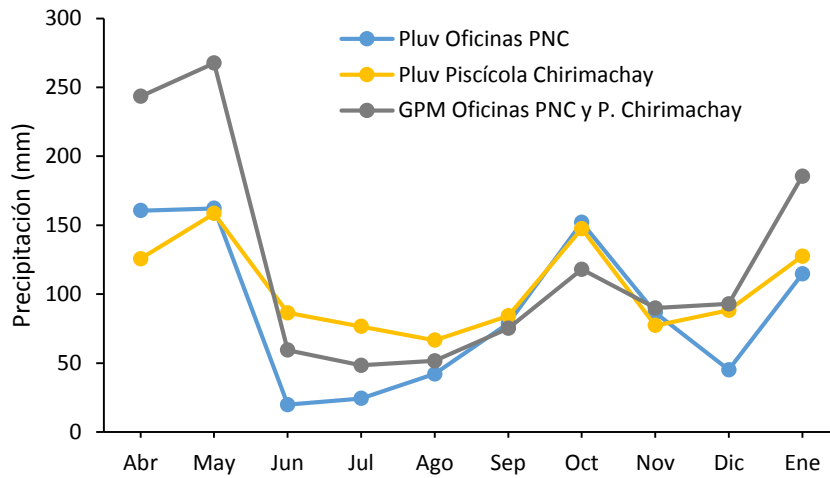




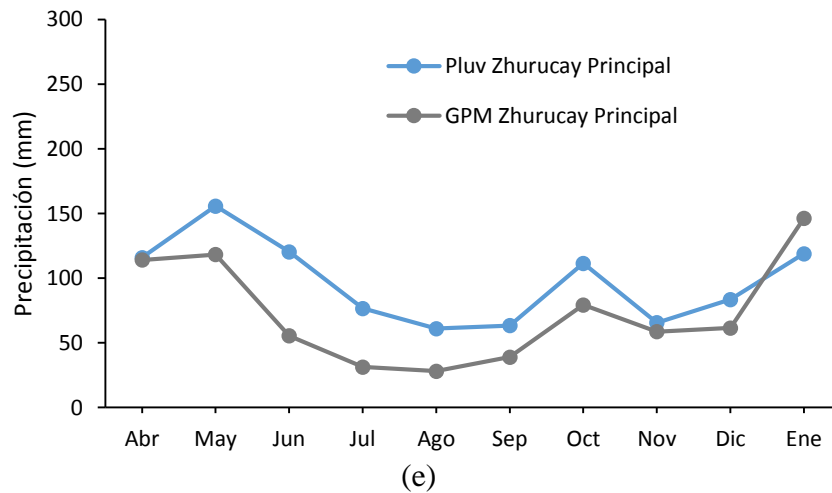
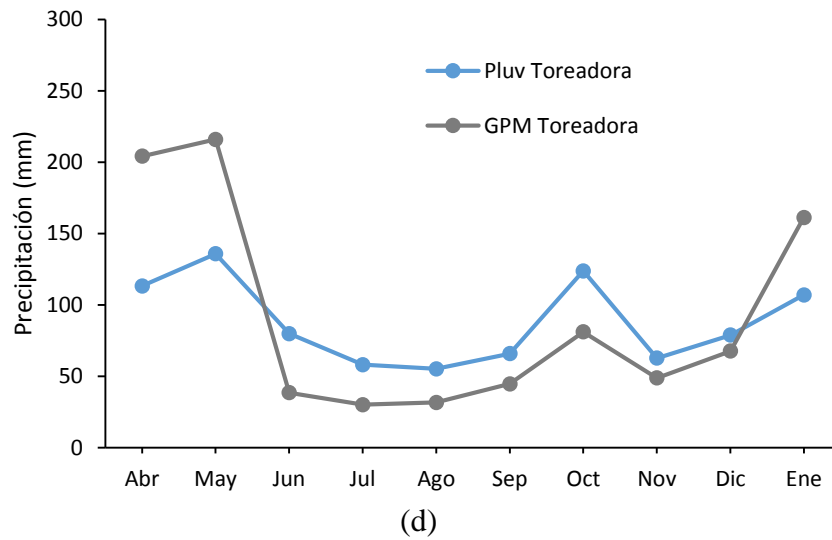
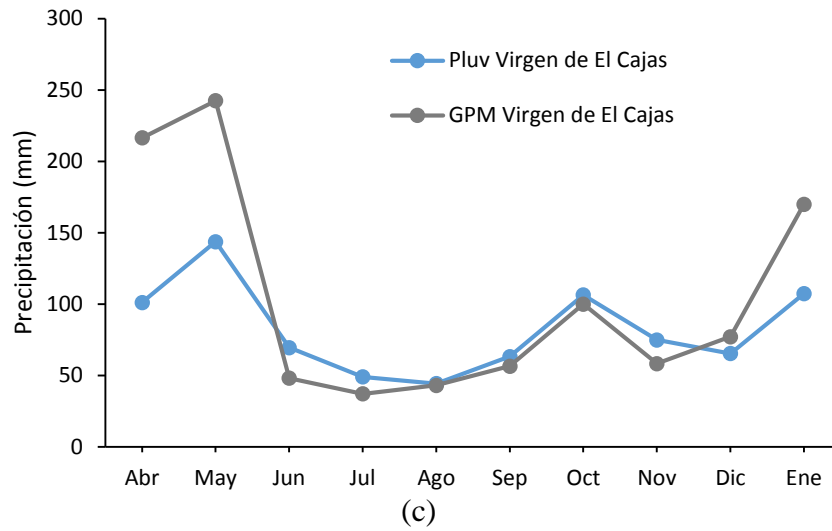
pluviómetros detectan diferencias entre sí, de esta manera los datos pluviométricos muestra la variabilidad espacial de la precipitación (Figura 7b. y 7f.).



(a)



(b)



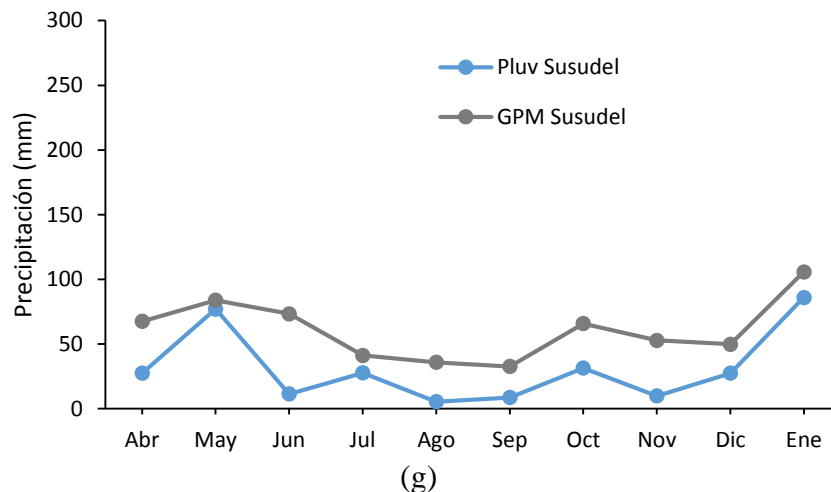
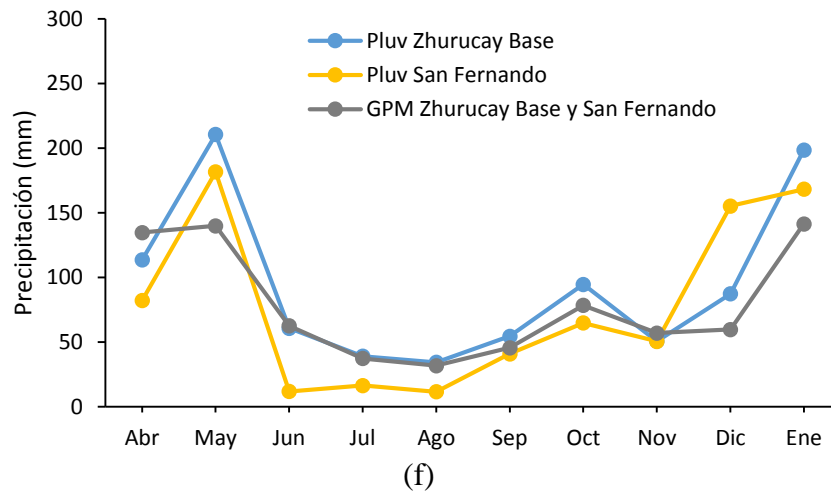


Figura 7. Precipitación mensual para estimaciones de pluviómetros y GPM en los pluviómetros de Quinta Balzay (a), Oficinas PNC – Piscícola Chirimachay (b), Virgen de El Cajas (c), Toreadora (d), Zhurucay Principal (e), Zhurucay Base – San Fernando (f) y Susudel (g). {Los resultados GPM Oficinas PNC – Piscícola Chirimachay y GPM Zhurucay Base – San Fernando están superpuestos por localizarse en el mismo pixel

### 4.3. Errores Estadísticos

Para la comparación cuantitativa entre las estimaciones satelitales y las observaciones pluviométricas se calculó el sesgo, la raíz del error medio cuadrado (RMSE), el coeficiente de correlación de Pearson ( $\gamma$ ) y el índice de concordancia (d). La Figura 8 muestra los resultados de los cálculos de estos errores y la Tabla 6 el promedio de estos cálculos para cada una de las estimaciones satelitales.

En general, se observa un sesgo relativamente elevado para cada una de los pluviómetros (Figura 8; Tabla 6). El valor más alto para la cuenca de Quinuas fue una sobreestimación (39.10%) en el pluviómetro Oficinas PNC y el valor más bajo



en la misma cuenca fue una sobreestimación (4.90%) en el pluviómetro Toreadora que es el pluviómetro con mayor altura (3946 msnm). Mientras que para la cuenca de Zhurucay el valor más alto fue una subestimación (24.70%) en el pluviómetro Zhurucay Principal y el valor más bajo fue una sobreestimación (0.60%) en el pluviómetro San Fernando. Al ser este un valor de baja magnitud (cercano a cero) probablemente hay una buena concordancia entre los datos pluviométricos y los satelitales, los cuales se comprobarán más adelante en resumen de resultados. En contraste, en la cuenca del río León el pluviómetro Susudel presenta un sesgo muy elevado en relación a las demás cuencas (94.90%). Cabe mencionar que este pluviómetro es el de menor altura con (2048 msnm). Los únicos pluviómetros que denotan subestimación son Zhurucay Principal y Zhurucay Base. En promedio, el sesgo para el Azuay es de 43.21% (Tabla 6).

En cuanto al RMSE se obtuvo un mínimo de 31.39 mm (pluviómetro Zhurucay Base) y un máximo de 56.61 mm (pluviómetro Piscícola Chirimachay). En promedio el error de los pluviómetros de la cuenca de Quinuas son las más altas, mientras que de los pluviómetros de la cuenca de Zhurucay fueron las más bajas. Cabe mencionar que RMSE da énfasis especial a errores en valores extremos ya que eleva el sesgo al cuadrado, al tener valores RMSE relativos bajos si comparamos con el estudio de Castro (2014.) y similares quiere decir que los errores son bajos, y el producto satelital está generando buenas estimaciones. En el Azuay, el promedio de RMSE es de 43.20 mm (Tabla 6).

En relación al coeficiente de Pearson ( $\gamma$ ) se obtuvo valores mínimos de 0.77 y 0.75 para los pluviómetros Zhurucay Principal y San Fernando respectivamente, valores medios entre 0.8 y 0.9 (pluviómetros: Oficinas PNC, Piscícola Chirimachay, Virgen de El Cajas, Toreadora y Susudel) y valores altos de 0.92 para los pluviómetros Quinta Balzay y Zhurucay Base. En la Figura 8 se representa estos resultados de forma cuantitativa. El análisis del desempeño del producto satelital con respecto al coeficiente de Pearson no concuerda con los resultados de sesgo y RMSE, ya que el coeficiente no representa la magnitud de los errores, sino la magnitud de la relación entre los pluviómetros y el satélite. Además el coeficiente de Pearson



muestra valores muy buenos de correlación, en promedio para el Azuay el valor es de 0.85. (Tabla 6).

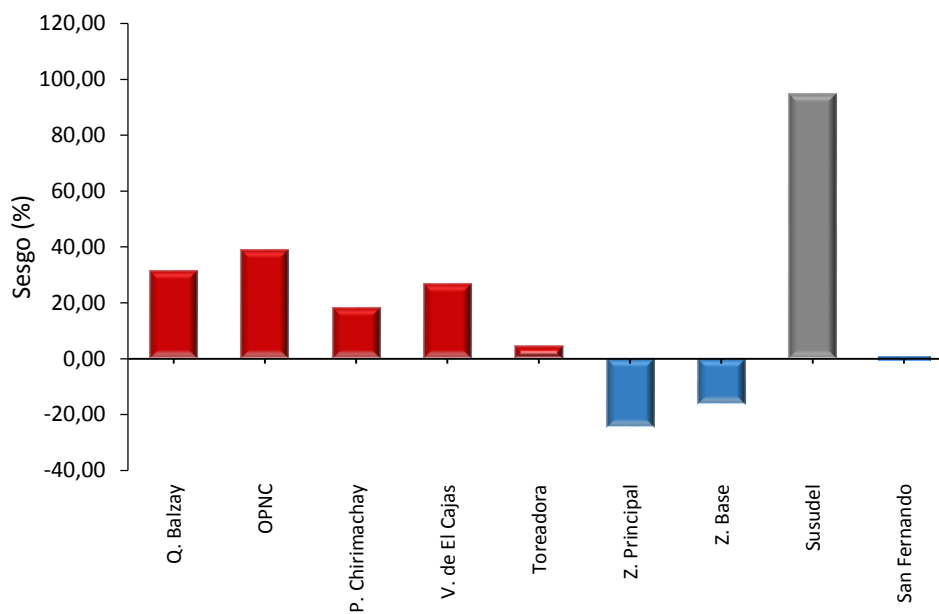
Acerca del índice de concordancia (d) se obtuvo valores mínimos entre 0.7 y 0.8 (Quinuas: Piscícola Chirimachay, Virgen de El Cajas y Toreadora; Zhurucay: Zhurucay Principal y León: Susudel), además se obtuvo valores medios de 0.83 y 0.82 (Quinuas: Oficinas PNC y Zhurucay: San Fernando) y así mismo se obtuvo valores altos de 0.9 (Quinuas: Quinta Balzay y Zhurucay: Zhurucay Base). Nótese que los valores del coeficiente de Pearson son similares con este índice (Figura 8), proporcionando información concisa sobre la estimación cuantitativa entre los pluviómetros y el producto, en promedio para el Azuay el valor es de 0.79. (Tabla 6). El índice de concordancia al ser una medida del grado en el cual las estimaciones del satélite están libres de errores y al tener valores buenos del índice, quiere decir que el desempeño del satélite es el adecuado.

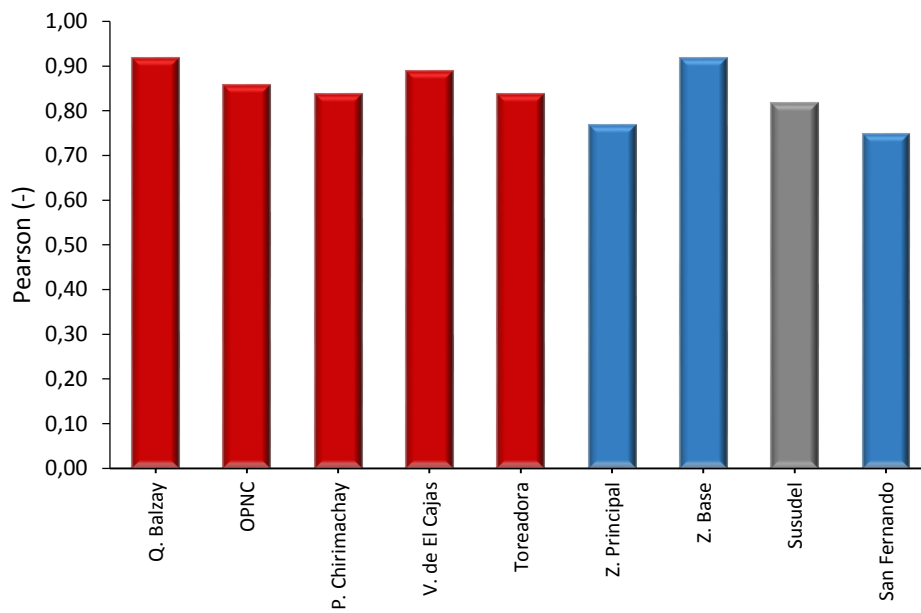
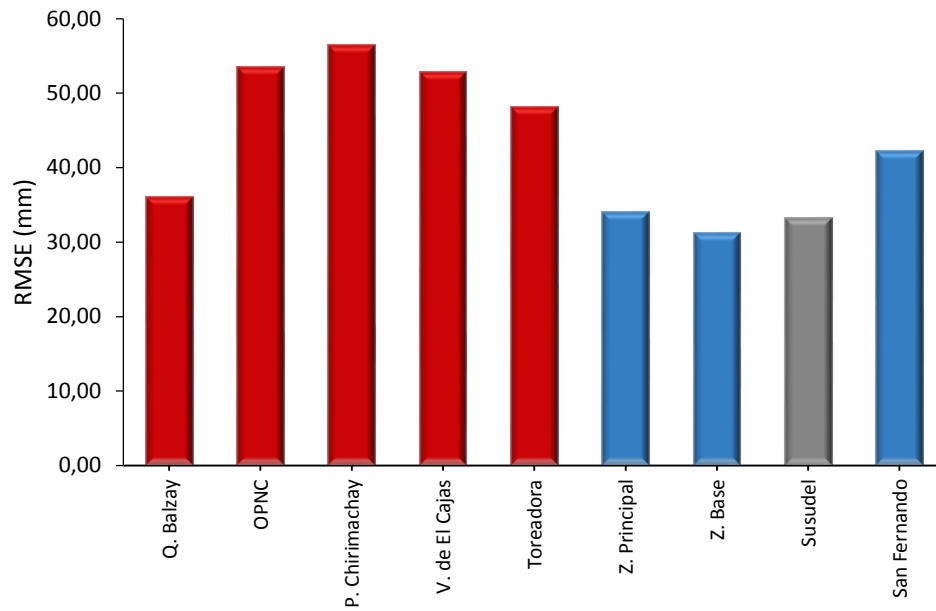
<b>Pluviómetro</b>	<b>Cuenca</b>	<b>Sesgo (%)</b>	<b>RMSE (mm)</b>	<b>Pearson (-)</b>	<b>Concordancia (-)</b>
<b>Quinta Balzay</b>	Quinuas	31.7	36.16	0.92	0.90
<b>Oficinas PNC</b>	Quinuas	39.1	53.59	0.86	0.83
<b>Piscícola Chirimachay</b>	Quinuas	18.6	56.61	0.84	0.71
<b>Virgen de El Cajas</b>	Quinuas	27.2	52.98	0.89	0.73
<b>Toreadora</b>	Quinuas	4.90	48.25	0.84	0.74
<b>Zhurucay Principal</b>	Zhurucay	-24.7	34.13	0.77	0.78



<b>Zhurucay Base</b>	Zhurucay	-16.5	31.39	0.92	0.90
<b>Susudel</b>	León	94.9	33.33	0.82	0.70
<b>San Fernando</b>	Zhurucay	0.60	42.41	0.75	0.82
<b>Azuay</b>		43.21	43.20	0.85	0.79

Tabla 6. Promedio del Porcentaje de sesgo, RMSE, coeficiente de Pearson e índice de concordancia para los pluviómetros y el Azuay.





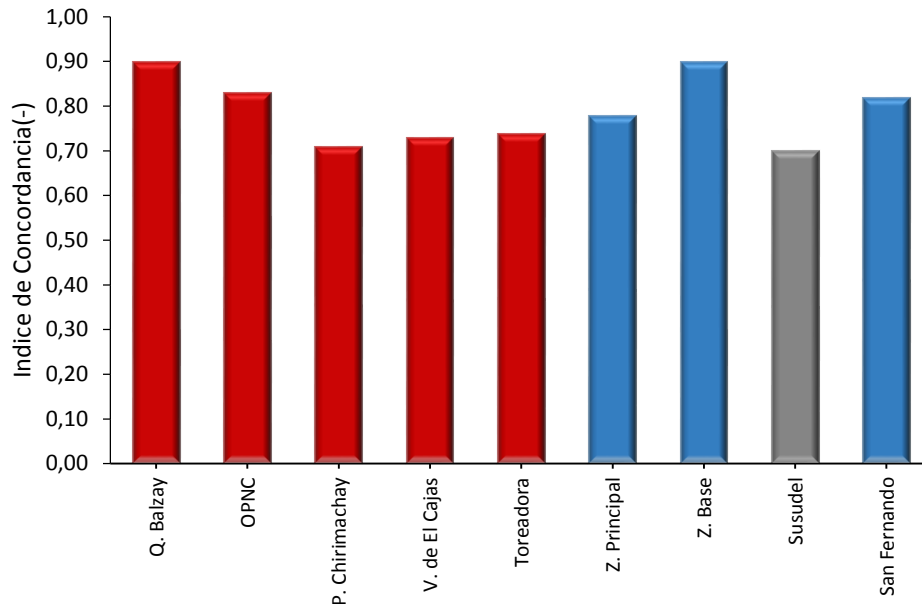


Figura 8. Sesgo, raíz del error medio cuadrado (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson ( $\gamma$ ) e índice de concordancia (d) para los pluviómetros de las cuencas de Quinuas (rojo), Zhurucay (Azul) y León (verde).

#### 4.4. Índices de detección

Los resultados de índices de detección se muestran en la Tabla 7 y en las Figuras 9, 10, 11 y 12.

Pluviómetro	Cuenca	POD	ETS	FAR	FBI
<b>Quinta Balzay</b>	Quinuas	1.00	0.28	0.24	1.11
<b>Oficinas PNC</b>	Quinuas	1.00	0.29	0.24	1.12
<b>Piscícola Chirimachay</b>	Quinuas	0.98	0.33	0.17	0.98
<b>Virgen de El Cajas</b>	Quinuas	0.93	0.41	0.17	0.93
<b>Toreadora</b>	Quinuas	0.85	0.21	0.17	0.85
<b>Zhurucay Principal</b>	Zhurucay	0.86	0.21	0	0.86
<b>Zhurucay Base</b>	Zhurucay	0.81	0.53	0	0.81
<b>Susudel</b>	León	1.00	0.04	0.47	1.77
<b>San Fernando</b>	Zhurucay	0.93	0.33	0.16	1.12
<b>Azuay</b>		0.93	0.29	0.18	1.06

Tabla 7. Índices promedio para los pluviómetros y el Azuay.





#### 4.4.1. Probabilidad de detección (POD)

Se encontró valores promedios altos POD para todas los pluviómetros, hay detección perfecta del satélite para 3 pluviómetros (Quinta Balzay, Oficinas PNC y Susudel). En el pluviómetro Piscícola Chirimachay se obtuvo un valor promedio POD de 0.98, debido a que en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para precipitación mayor a 50 mm, donde decreció a un valor de 0.9. En el pluviómetro Virgen de El Cajas se obtuvo un valor promedio POD de 0.93, porque en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para precipitación mayor a 50 y 100 mm, donde los valores decrecieron a 0.89 y 0.75 respectivamente. En el pluviómetro Toreadora se obtuvo un valor promedio POD de 0.85, debido a que en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para precipitación mayor a 50 y 100 mm, donde se obtuvo valores de 0.50 y 0.75 respectivamente. En el pluviómetro Zhurucay Principal en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para precipitación mayor a 50 y 100 mm, donde decreció a valores de 0.70 y 0.60 respectivamente. En el pluviómetro Zhurucay Base en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para precipitación mayor a 50 y 200 mm, donde decreció a valores de 0.88 y 0.00 respectivamente. En el pluviómetro San Fernando se obtuvo un valor promedio POD de 0.93, a causa de que en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para precipitación mayor a 100 mm, pues se obtuvo un valor de 0.67 (Figura 9). Obtuvimos un valor promedio de 0.93 para el Azuay lo que indica que la gran mayoría de precipitación en los umbrales en realidad ocurrió.

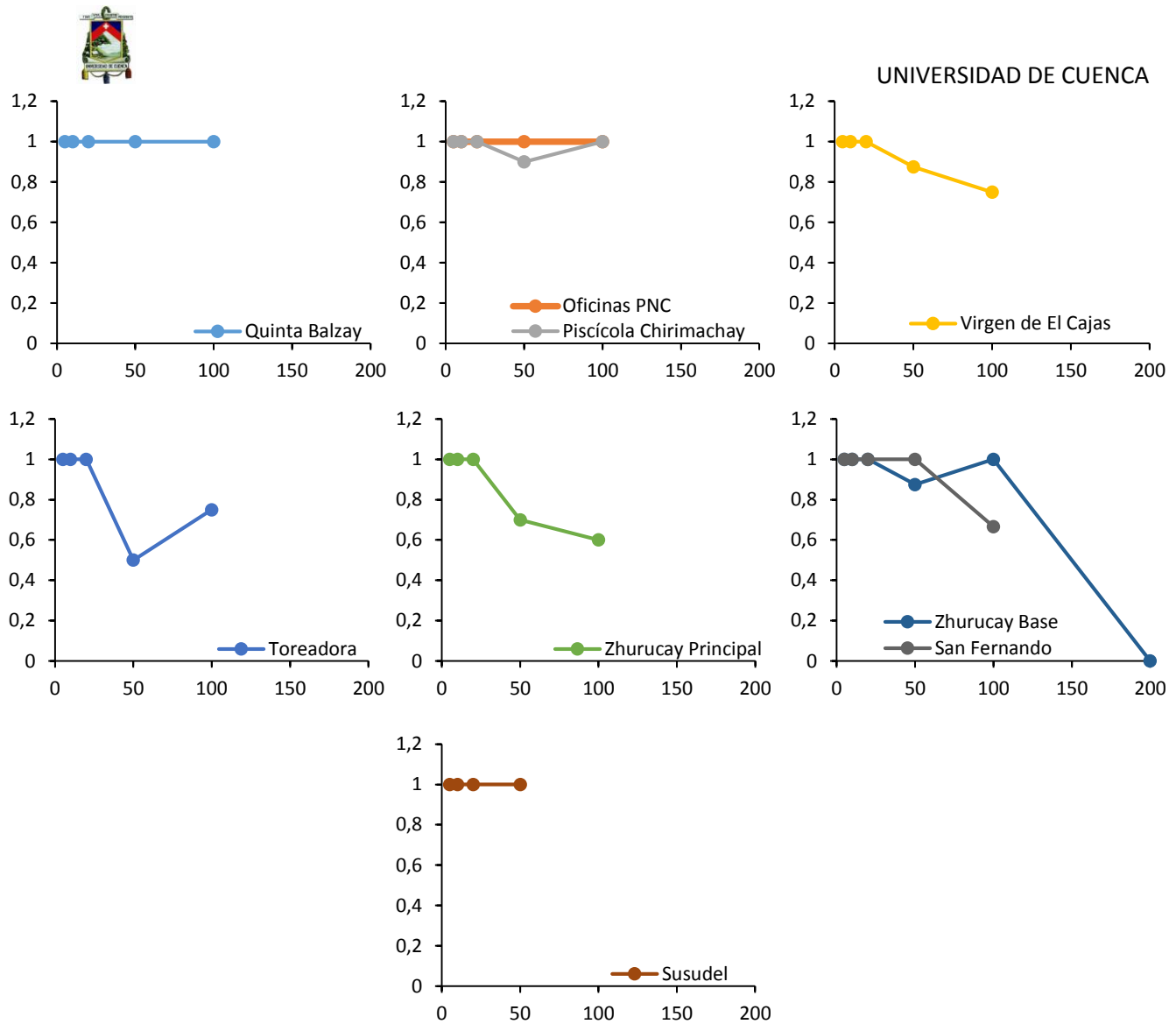


Figura 9. Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm de precipitación para los pluviómetros del Azuay.

#### 4.4.2. Probabilidad de detección corregida (ETS)

Los valores ETS fueron menores a los POD debido a que las detecciones son al azar, de igual manera también cambia la tendencia. La mayoría de pluviómetros variaron de valores promedios ETS de 0.21 a 0.41 (Quinta Balzay, Oficinas PNC, Piscícola Chirimachay, Virgen de El Cajas, Toreadora, Zhurucay Principal y San Fernando). Para Zhurucay Base se obtuvo un valor máximo de 0.53, por el contrario para Susudel se obtuvo un valor mínimo de 0.04. En general, los valores del índice ETS para todas los pluviómetros tienden a aumentar para umbrales de precipitación



entre 50 y 100 mm, pero a partir de 200 mm decrecen (Figura 10). El valor de ETS es de 0.29 en promedio para el Azuay (Tabla 8).

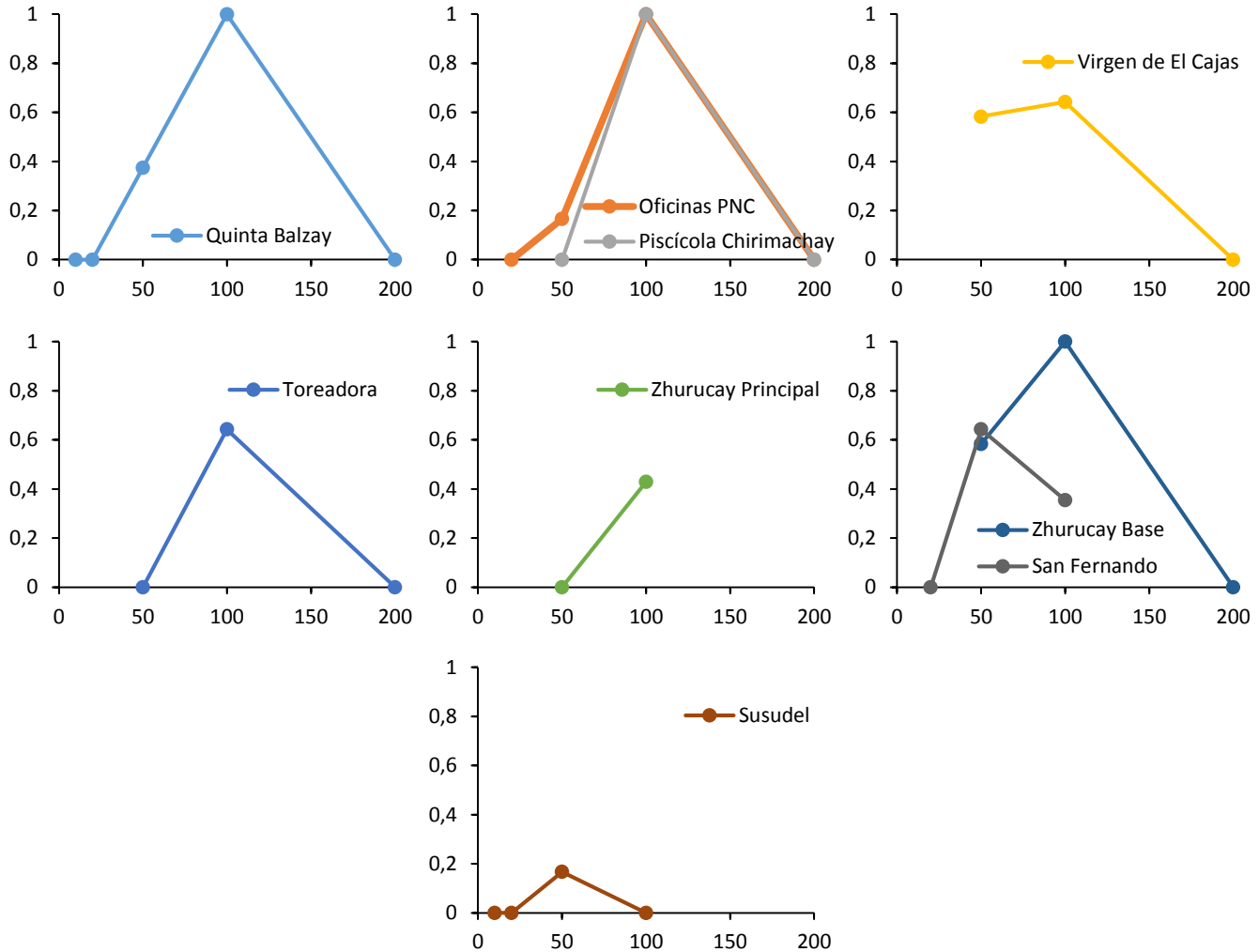


Figura 10. Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm de precipitación para los pluviómetros del Azuay

#### 4.4.3. Falsa Alarma (FAR)

En cuanto a FAR para los pluviómetros Zhuruca y Principal y Base el satélite no emitió falsas alarmas. Sin embargo, para los pluviómetros de Piscícola Chirimachay, Virgen de El Cajas y Toreadora se obtuvo un valor FAR en promedio de 0.17, debido a que para valores de precipitación mayor a 200 mm se obtuvo valores de 1.00, es decir el satélite detectó precipitaciones mayores a 200 mm, mientras que los



pluviómetros no lo hicieron. En el pluviómetro Quinta Balzay y Oficinas PNC se obtuvo un valor de 0.24 a causa de que en el primer pluviómetro existió falsas alarmas para valores de precipitación mayores a 10, 20 y 50 mm, mientras que para Oficinas PNC existió falsas alarmas para valores de precipitación mayores a 20 y 50 mm. Para el pluviómetro Susudel que es la que más falsas alarmas emitió, se obtuvo un valor FAR en promedio de 0.47. Por ultimo en el pluviómetro San Fernando se obtuvo un valor FAR de 0.16, porque se emitió falsas alarmas para precipitación mayores a 20, 50 y 100mm. FAR es 0.18 en promedio para el Azuay, lo que indica que una porción pequeña de precipitación captada por el satélite en realidad no ocurrió (Tabla 7).

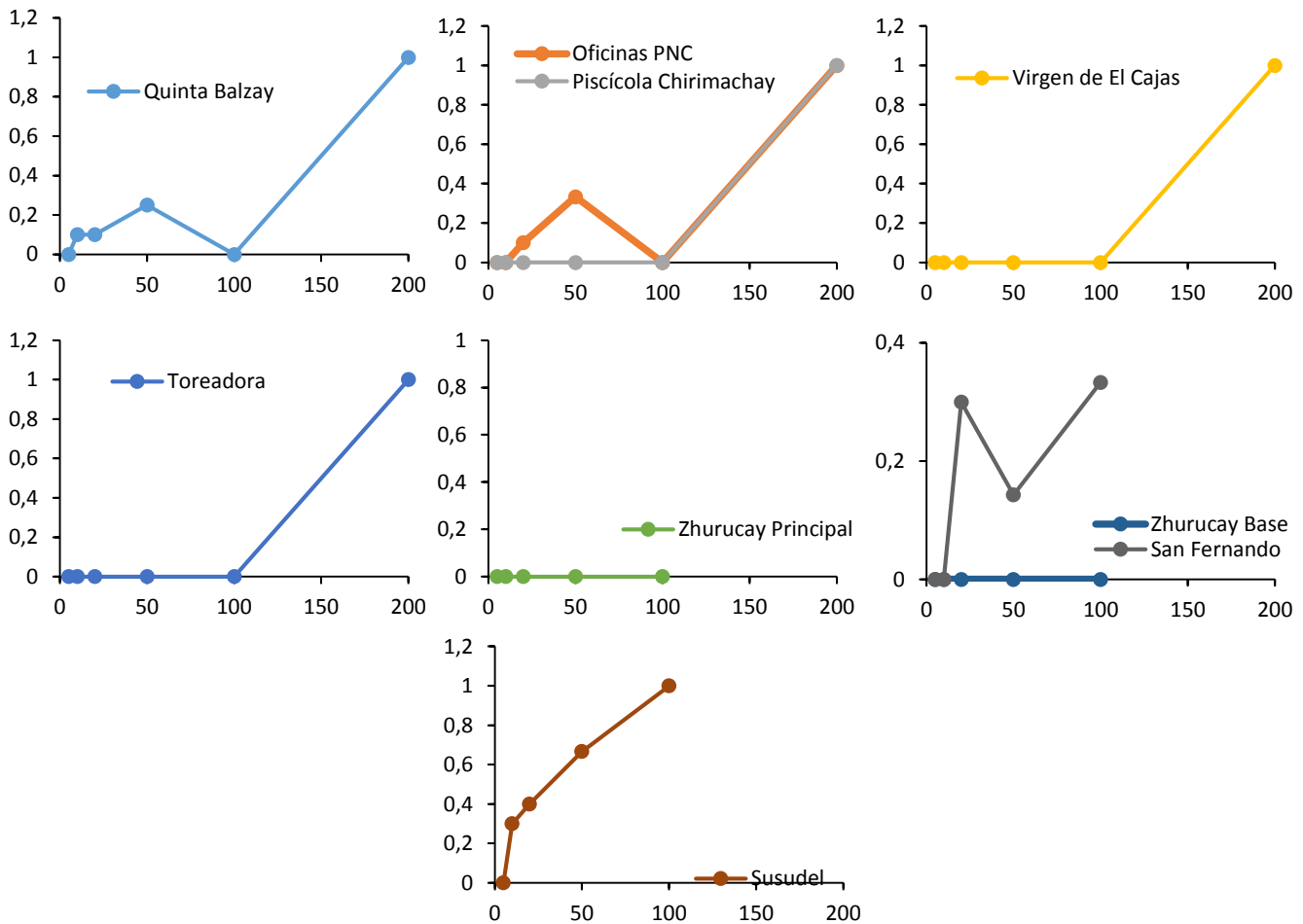


Figura 11. Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm de precipitación para los pluviómetros del Azuay



#### 4.4.4. Frecuencia de sesgo (FBI)

Para la frecuencia de sesgo (FBI) en los pluviómetros Quinta Balzay, Oficinas PNC, Susudel y San Fernando se sobreestimó la precipitación con valores muy cercanos a 1, excepto para el pluviómetro Susudel donde se obtuvo un valor FBI de 1.77. Este valor alto se obtuvo porque para precipitación mayor a 50 mm tenemos una sobreestimación de FBI igual a 3. En los pluviómetros Piscícola Chirimachay, Virgen de El Cajas, Toreadora, Zhurucay Principal y Zhurucay Base se subestimó la precipitación todos con valores cercanos a 1. En General se tiene valores buenos de FBI con un valor promedio de 1.06 para el Azuay, lo que indica que la precipitación estimada por el satélite contrasta apropiadamente con los datos de los pluviómetros.

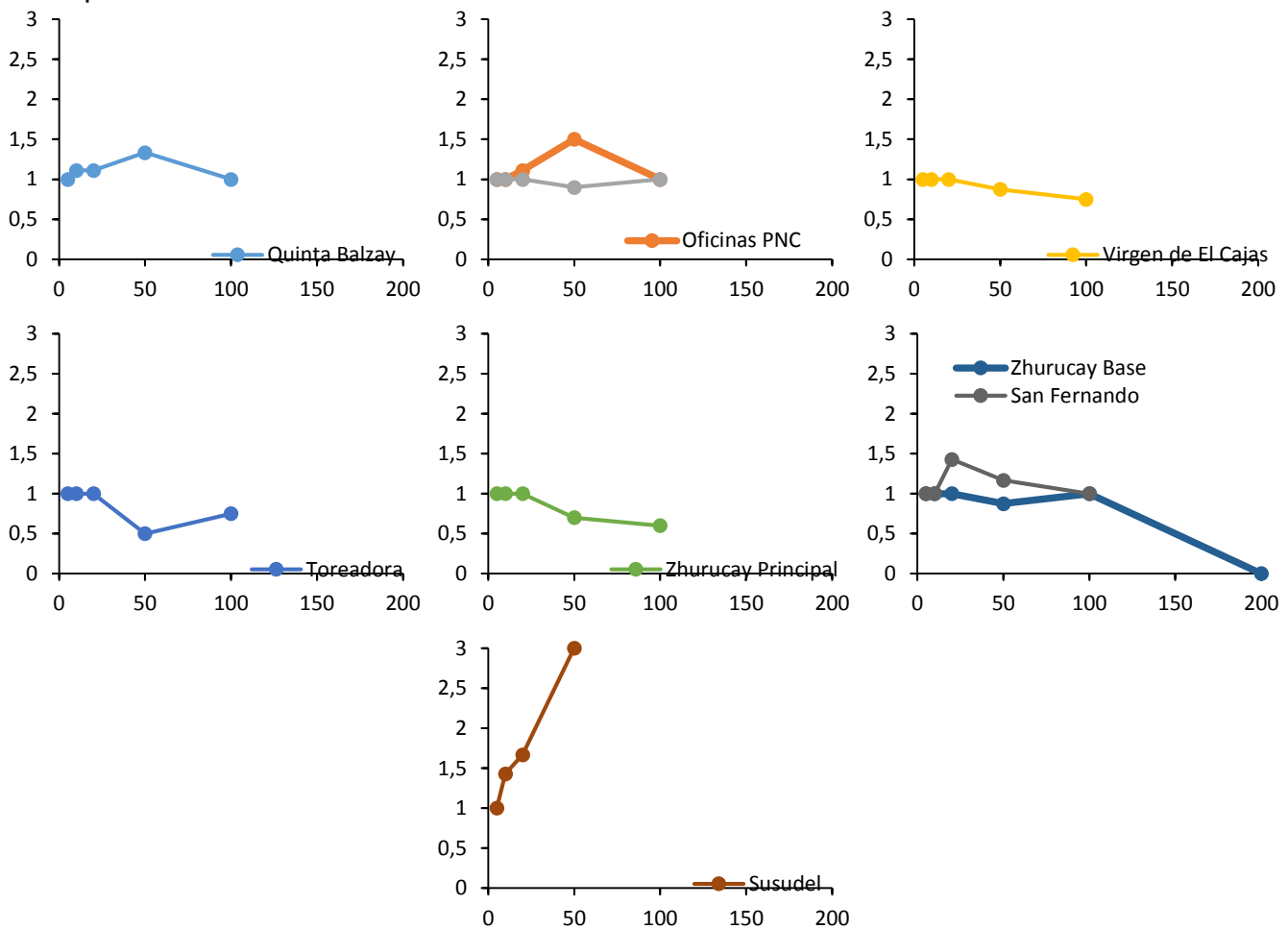


Figura 12. Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100 y 200 mm de precipitación para los pluviómetros del Azuay



#### 4.5. Resumen de resultados

En general, en **todos los pluviómetros excepto Susudel** los índices estadísticos reportaron las siguientes características: POD tenemos valor de detección alto indicando que la precipitación de los pluviómetros y los satélites fueron detectadas (Tabla 7), ETS tiende a crecer para umbrales de precipitación mayor a 50 mm y decrecer para precipitaciones mayores a 100 mm (Figura 10), FAR tiene valores bajos indicando que la proporción de precipitación detectada por satélite y no por el pluviómetro es bajo (Figura 11), y FBI tiene valores próximos al valor perfecto (Tabla 7). Ahora para Susudel POD tiene detección perfecta, ETS es el valor más bajo, FAR es el valor más alto es decir, con mayor número de falsas alarmas debido a que a partir del umbral de 10 mm el índice tiende a crecer y FBI es el valor (1.77) más alejado de 1 porque en el umbral de precipitación de 50 mm el valor FBI es de 3.0 (Figura 12).

En el pluviómetro **Quinta Balzay** las estimaciones IMERG son equivalentes cualitativamente (Figura 7). Si realizamos un análisis en la gráfica de dispersión (Figura 13) tenemos que la mayoría de estimaciones satelitales sobreestiman la precipitación y se tiene valores con bajo error al tener baja dispersión de datos, esto se ve confirmado por los valores de sesgo y RMSE (Tabla 6; Figura 8). El valor de sesgo sobreestimado relativamente alto se debe a que no hay compensación por sesgos positivos/negativos. Ahora el coeficiente de Pearson e índice de concordancia son de los más altos indicando una buena correlación, con errores bajos entre la estimación satelital y la observación pluviométrica. En resumen IMERG estima correctamente la precipitación con ligeras sobrestimaciones para el pluviómetro Quinta Balzay.

En los pluviómetros **Oficinas PNC, Piscícola Chirimachay, Virgen de El Cajas y Toreadora** las estimaciones IMERG son equivalentes cualitativamente (Figura 7). Si realizamos un análisis en la gráfica de dispersión (Figura 13) tenemos que hay aproximadamente la misma cantidad de valores que sobreestiman y subestiman la precipitación, donde las subestimaciones tienen bajo error y las sobrestimaciones



tienen alto error, esto se ve reflejado por los valores de sesgo y RMSE (Tabla 6; Figura 8). Los valores de sesgo sobreestimados relativamente altos se debe a que los valores de subestimación son bajos con relación a los valores de sobreestimación, el sesgo bajo en Toreadora a la compensación de sesgos positivos/negativos a pesar de ser valores con alta dispersión. Ahora los coeficientes de Pearson son altos indicando una buena correlación. Los índices de concordancia a pesar de ser buenos son unos de los más bajos debido a que este mide el grado en el cual la estimación satelital está libre de errores, esto era de esperarse debido a que se tienen RMSE altos. En resumen, IMERG estima correctamente la precipitación con ligera sobreestimación para estos cuatro pluviómetros en todo el periodo de estudio, excepto para los meses de Abril, Mayo y Enero porque presentan diferencias altas de precipitación entre pluviómetro y satélite (Figura 7). Nótese que Chirimachay tiene el más alto régimen de precipitación en el periodo de estudio (1038.5 mm).

En el pluviómetro **Zhurucay Principal** las estimaciones IMERG son equivalentes cualitativamente (Figura 7). Si realizamos un análisis en la gráfica de dispersión (Figura 13) tenemos que la mayoría de estimaciones satelitales subestiman la precipitación y se tiene valores con alto error al tener alta dispersión de datos, esto se ve confirmado por los valores de sesgo y RMSE (Tabla 6; Figura 8). El valor de sesgo subestimado relativamente alto se debe a que no hay compensación por sesgos positivos/negativos. Ahora el coeficiente de Pearson es de los más bajos, pero siguen siendo buenos indicando que hay una acertada correlación. El índice de concordancia es bueno esto era de esperarse por el RMSE bajo entre la estimación satelital y la observación pluviométrica. En resumen IMERG estima correctamente la precipitación con subestimación en la precipitación del pluviómetro Zhurucay Principal.

En el pluviómetro **Zhurucay Base** las estimaciones IMERG son equivalentes cualitativamente (Figura 7). Si realizamos un análisis en la gráfica de dispersión (Figura 13) tenemos que la mayoría de estimaciones satelitales sobreestiman la precipitación y se tiene los valores más bajos de error al tener muy baja dispersión



de datos, esto se ve confirmado por los valores de sesgo y RMSE (Tabla 6; Figura 8). El valor de sesgo subestimado relativamente alto se debe a que no hay compensación por sesgos positivos/negativos. Ahora el coeficiente de Pearson e índice de concordancia son de los más altos indicando una buena correlación, con errores bajos entre la estimación satelital y la observación pluviométrica. En resumen IMERG estima correctamente la precipitación con ligera subestimación del pluviómetro Zhuruca Base.

En el pluviómetro **Susudel** las estimaciones IMERG son equivalentes cualitativamente en la mayoría de meses excepto para Junio (Figura 7). Si realizamos un análisis en la gráfica de dispersión (Figura 13) tenemos que todas las estimaciones satelitales sobreestiman la precipitación y se tiene los valores altos de error al tener una alta dispersión de datos, esto se ve confirmado por los valores de sesgo y RMSE (Tabla 6; Figura 8). El valor de sesgo sobreestimado alto (94.9%) se debe a que no hay compensación por sesgos negativos. Ahora el coeficiente de Pearson es de 0.82 indicando una buena correlación, el índice de concordancia es el más bajo pero siguen siendo bueno, indicando buen acuerdo con errores relativamente altos entre la estimación satelital y la observación pluviométrica. Complementando este análisis con los resultados realizado anteriormente de los índices de detección IMERG en Susudel no tiene un buen desempeño en relación a los demás pluviómetros. Nótese que Susudel tiene el régimen de precipitación más bajo del periodo de estudio (312.3 mm).

En el pluviómetro **San Fernando** las estimaciones IMERG presenta un bajo desempeño de forma cualitativa (Figura 7). Si realizamos un análisis en la gráfica de dispersión (Figura 13) tenemos que la mayoría de estimaciones satelitales sobreestiman la precipitación y se tiene los valores altos de error al tener alta dispersión de datos, esto se ve confirmado por los valores de sesgo y RMSE (Tabla 6; Figura 8). El valor de sesgo sobrestimado cercano a cero se debe a que hay compensación por sesgos positivos/negativos. Ahora el coeficiente de Pearson es el más bajo es porque cualitativamente el satélite no representada bien la precipitación y por la alta dispersión de datos. En resumen IMERG no estima





correctamente la precipitación con relación a los otros pluviómetros en San Fernando.

Es importante destacar que los pluviómetros Oficinas PNC y Piscícola Chirimachay están muy cercanas y por tanto las estimaciones satelitales son iguales por estar en el mismo pixel; por lo que el índice POD y ETS es equivalente cuantitativa y cualitativamente, mientras que el índice FBI es equivalente cuantitativamente. Ahora, para Oficinas PNC la precipitación esta sobreestimada y para Piscícola Chirimachay esta subestimada. Además, para el índice FAR también hay semejanza cuantitativamente y en la mayoría de datos cualitativamente excepto para precipitación mayor a 50 mm en donde existe una diferencia clara (Figuras 9, 10, 11 y 12). Complementando esta discusión con la Figura 7, se puede decir que el satélite se desempeña acertadamente para los dos pluviómetros en cuanto a la correlación, el índice POD, el índice ETS, el índice FAR y el índice FBI. De este modo, el satélite puede representar cualitativamente y cuantitativamente la precipitación de los pluviómetros Oficinas PNC y Piscícola Chirimachay.

De la misma manera los pluviómetros Zhurucay Base y San Fernando tienen las mismas estimaciones satelitales, el índice POD es equivalente cuantitativa y cualitativamente; el índice ETS no muestra similitud entre los dos pluviómetros; el índice FBI para el pluviómetro Zhurucay Base la precipitación esta subestimada con un valor de 0.81 y para San Fernando esta sobreestimada con un valor de 1.12 y el índice FAR es equivalente cuantitativamente (Figura 9, 10, 11 y 12). Completando esta discusión con la Figura 7, se puede decir que el satélite se desempeña acertadamente para los dos pluviómetros en cuanto al índice POD y el índice FAR.

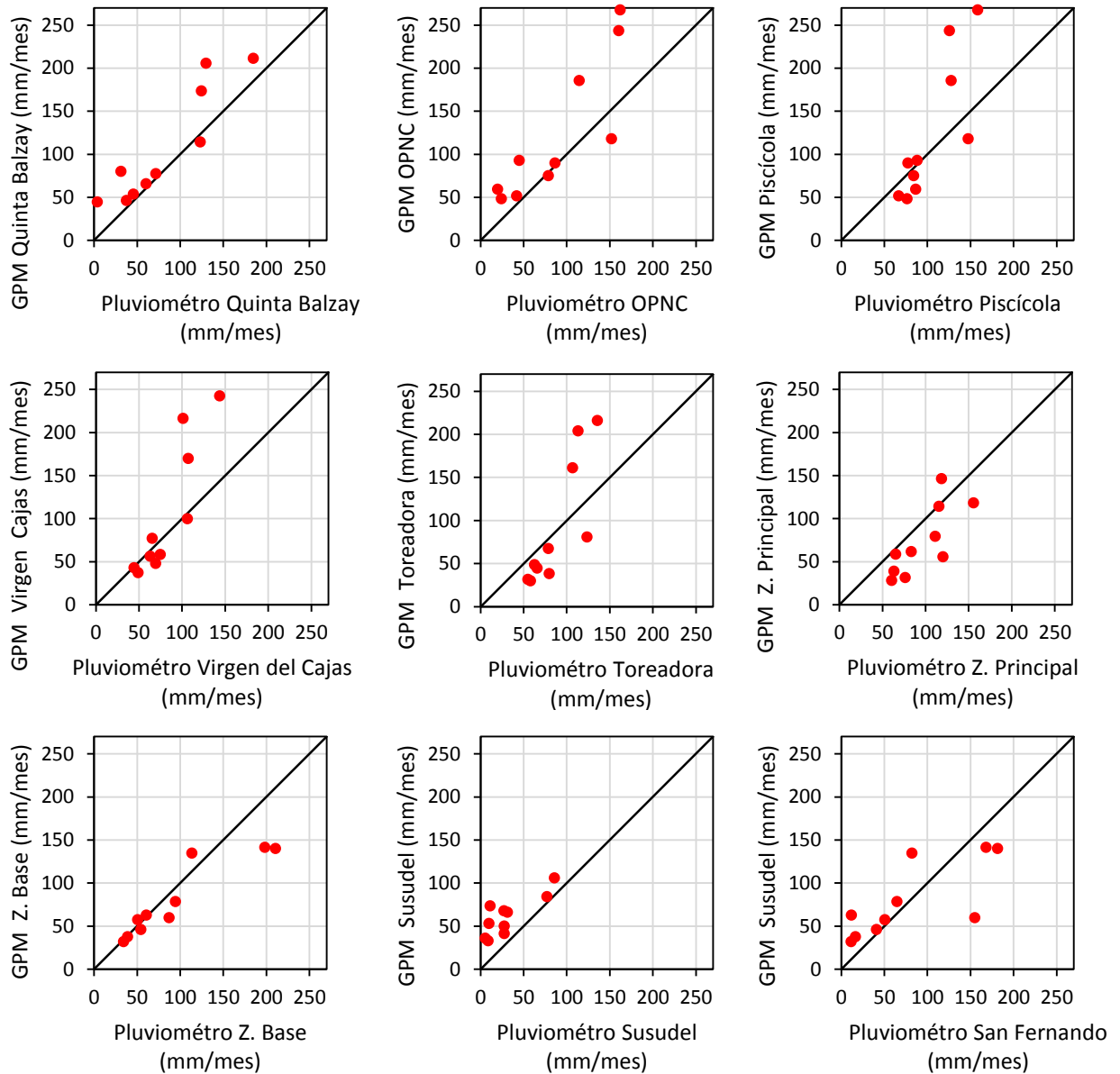


Figura 13. Graficas de dispersión para los pluviómetros de estudio

Según la Figura 13 En general, para precipitaciones menores a 100 mm hay poca dispersión, es decir se observa un buen desempeño del producto satelital, situación contraria para precipitaciones mayores a 100 mm. Ahora, para la micro-cuenca de Quinuas las precipitaciones altas son sobreestimadas. La estimación satelital de los pluviómetros menores de 3000 msnm: Quinta Balzay, Oficinas PNC, Susudel (2048



msnm) y San Fernando indican sobreestimación en la mayoría de estimaciones. Este hecho se acentúa más en Susudel, que tiene características únicas al ser el pluviómetro de menor altura, el de menor régimen de precipitación y donde todos sus valores están sobreestimados.

Comparando los resultados TRMM de Castro (2014.) para la región de la Sierra con nuestro estudio para el Azuay, todos los valores de errores estadísticos e índices estadísticos se ven mejorados por GPM. Cabe mencionar que estos resultados obtenidos pueden no ser aplicados a otras áreas de estudio. Por último en Azuay en base a los resultados estadísticos, IMERG ofrece buenas capacidades de estimación.

## **5. CONCLUSIONES**

Después de 17 años de éxito mundial de medición de precipitación, TRMM fue dado de baja y GPM es la encargada de ofrecer la próxima generación de productos globales de precipitación. Este estudio se centra en primer lugar en la estadística evaluando el producto IMERG V03 en la provincia del Azuay, debido a la concordancia entre datos pluviométricos y satelitales el periodo de estudio se limita de Abril del 2014 a Enero del 2015 a una escala mensual

Las principales conclusiones de la comparación estadística de IMERG, llevado a cabo a escala pluviométrica y de región se resumen a continuación:

1. En general IMERG da una buena estimación con los pluviómetros, los que presentaron resultados inferiores son Susudel y San Fernando, pluviómetros con el menor régimen de lluvia. Además los pluviómetros de la cuenca de Quinuas tiene buenas estimaciones, excepto para el mes de Abril, Mayo y Enero que son meses de mayor régimen de precipitación, para entender qué sucede en estos meses se recomienda realizar un estudio a una escala de tiempo más pequeña como horaria o diaria. Zhurucay Principal y Zhurucay Bases son los dos únicos pluviómetros que subestiman la precipitación.



2. A una escala de región el producto se desempeña muy bien, superando otros resultados similares de TRMM realizados en la zona andina. Además, los resultados tanto a nivel de pluviómetro y región son muy aceptables con valores aceptables de estimación.
3. Azuay, al encontrarse en una zona Andina y donde la mayoría de pluviómetros están en zonas de paramo, se puede concluir que el satélite GPM está en capacidades de estimar la precipitación ligera, pero es necesario confirmar dicha afirmación a escalas de tiempo más pequeñas pues a escala mensual los resultados no permiten evaluar este tipo de eventos.
4. Se encontró que de forma cualitativa la precipitación está representada adecuadamente por el producto satelital en el Azuay. Realizando un análisis general en los índices de detección en este estudio presenta mejores resultados de IMERG para intensidades bajas, resultados confirmados por las gráficas de dispersión donde hay mejores resultados para precipitaciones menores a 100 mm.

En conclusión, IMERG indica una prometedora perspectiva de utilidad hidrológica anticipando razonablemente mejoras en el producto sobre TMPA dada la capacidad de detectar lluvia ligera y precipitación sólida. A medida que más datos IMERG con nuevas versiones se liberan, más estudios en el agua y clima son necesarios para explorar el potencial de IMERG a futuro, Cabe mencionar que IMERG se encuentra en una fase temprana de datos, las cuales mejoraran en varias características a posteriores fechas.

Esperamos que las estimaciones de precipitación del análisis regional de la constelación de satélites GPM, pueda dar a los usuarios de precipitación por satélite una mejor comprensión de las características asociadas con las estimaciones IMERG.



## 6. REFERENCIAS

- ARSET, A. R. Se. T. P. (2015). Introducción a los datos y las aplicaciones de las mediciones de la precipitación global (p. 65). Retrieved from [http://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/GPM/Spain\\_GPM\\_week1\\_March17\\_V2.pptx.pdf](http://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/GPM/Spain_GPM_week1_March17_V2.pptx.pdf)
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 53–72.
- Caicedo Carrascal, F. M. (2008). Asimilación de precipitación estimada por imágenes de satélite en modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos, caso de estudio afluencias al embalse de Betania (Huila, Colombia).
- Castro, E. S. (2014). *Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en Región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20874/1/TESIS.pdf>
- Ceccato, P. N., & Dinku, T. (2010). Introduction to remote sensing for monitoring rainfall, temperature, vegetation and water bodies.
- Chang, N.-B., & Hong, Y. (2012). *Multiscale hydrologic remote sensing: Perspectives and applications*. CRC Press.
- Feidas, H. (2010). Validation of satellite rainfall products over Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1-2), 193–216.
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., ... Iguchi, T. (2014). The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722.
- Huffman, G.J., (2015), *GPM Level 3 IMERG Monthly 0.1 x 0.1 degree Precipitation, version 03*, Greenbelt, MD:Goddard Space Flight Center Distributed Active Archive Center (GSFC DAAC), Accessed 19 October 2015 at doi:10.5067/GPM/IMERG/MONTH/3B
- Huffman, G. J., & Bolvin, D. T. (2015). TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., ... Xie, P. (2015). NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG).



- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... Stocker, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38–55.
- Hunink, J. E., Immerzeel, W. W., & Droogers, P. (2013). Análisis de Patrones Espaciales de Precipitación en la Provincia de Tungurahua.
- JAXA, J. A. E. A. (2016). GPM Data Utilization Handbook. Retrieved March 6, 2016, from [http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data\\_utilization/GPM\\_data\\_util\\_handbook\\_E.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf)
- Linsley, M, K. A., & J., P. (1994). *Hidrología para Ingenieros*. (3rd ed.). McGraw-Hill. México, D F.
- NASA, G. S. F. C. (2014). README Document for the GPM Data. Retrieved March 8, 2016, from [ftp://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/s4pa/GPM\\_L1A/doc/README.GPM.pdf](ftp://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/s4pa/GPM_L1A/doc/README.GPM.pdf)
- Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., & Willems, P. (2014). Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific--Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 3179–3193.
- Prakash, S., Mitra, A. K., Pai, D. S., & AghaKouchak, A. (2016). From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? *Advances in Water Resources*, 88, 1–7.
- Reinozo, R., & Elizabeth, M. (2015). Estimación de la fracción de agua de evento y pre evento que aportan al caudal, mediante el uso de isótopos estables, en la Cuenca del río Zhurucay.
- Scheel, M. L. M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., & Huffman, G. J. (2011). Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2649–2663.
- Sharifi, E., Steinacker, R., & Saghafian, B. (2016). Assessment of GPM-IMERG and Other Precipitation Products against Gauge Data under Different Topographic and Climatic Conditions in Iran: Preliminary Results. *Remote Sensing*, 8(2), 135.
- Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata



Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 622–640.

Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., & Hong, Y. (2016). Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. *Journal of Hydrology*, 533, 152–167.

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

Yong, B., Liu, D., Gourley, J. J., Tian, Y., Huffman, G. J., Ren, L., & Hong, Y. (2015). Global view of real-time TRMM multisatellite precipitation analysis: implications for its successor global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(2), 283–296.



## 7. ANEXOS

**ANEXO 1.** Algoritmo en R para extraer las estimaciones del satélite en el pixel correspondiente a cada estación.

```
#Descargar e instalar los paquetes necesarios
install.packages("rgdal")
install.packages("raster")
install.packages("sp")
install.packages("rgeos")
install.packages("ncdf")
#Cargar los paquetes en la sesión
library(rgdal)
library(raster)
library(sp)
library(rgeos)
library(ncdf)
## Leer las coordenadas geográficas de las estaciones
estaciones <- read.delim("CoordenadasEstaciones.txt", header=TRUE, dec=".",
sep = "\t" )
## Convertir el archivo de texto a variable geoespacial de coordenadas
coordinates(estaciones) <- ~x+y
## Proyección de las coordenadas
proj4string(estaciones) <- CRS("+proj=utm +zone=17 +south +ellps=WGS84
+datum=WGS84 +units=m +no_defs")
estaciones<-spTransform(estaciones, CRS("+proj=longlat +datum=WGS84"))
## Leer las imagenes IMERG
## Guardar en una variable todos los nombres de los archivos .nc
files<- list.files(pattern='.nc')
## Bucle para almacenar en la variable accum las imagenes GPM IMERG para
el Azuay
for (i in 1:length(files))
{
  ## Leer imagen de un mes y convertirlo en archivo raster
  imageraster<- raster(files[i], varname= "GPM_3IMERGM_03_precipitation")
  ## Asignación de Sistema de referencia
  proj4string(imageraster) <- CRS("+proj=longlat +datum=WGS84")
  ## Leer el año y mes de la imagen
  filesyear<- substr(files[i], 44, 49)
  ## Convertir el archive en una variable de tipo SpatialGrid Data Frame
  imagesp<- as(imageraster, 'SpatialGridDataFrame')
  ## Extraer en la variable names el año y mes de la imagen
  names(imagesp) <- filesyear
  ## Acumular los mapas de todos los meses en la variable accum
  if (i == 1) ( accum<- imagesp)
  if (i!= 1) (accum<- cbind(accum,imagesp))
  ## Interpolan las estaciones con la imagen para obtener las estimaciones de
```





```
##precipitación en cada una
over<- data.frame(extract(imageraster, estaciones))
## Copiar en la variable over, el mes y año de la imagen
names(over) <- filesyear
## Acumular en variable timeseries los datos mensuales para todas las
##estaciones
ifelse (i==1, timeseries<- data.frame(t(over)), timeseries<- rbind(timeseries,
                                                                    data.frame(t(over))))
}
## Guardar en la variable timeseries los años y meses de la serie de datos
timeseries$name<- rownames(timeseries)
## Exportar la serie de datos de precipitación estimada por el satélite en las
##estaciones
write.table(timeseries,"3imerg.txt",sep="\t",row.names = FALSE,
            col.names=TRUE)
```



## ANEXO 2. Cálculo de errores estadísticos e índices de detección para las estaciones del Azuay

```
## Instalación y carga de los paquetes necesarios
install.packages("hydroGOF")
library(hydroGOF)
## Lectura de las estimaciones de precipitación por los pluviómetros
pluv<- read.delim("Pluviometros.txt", header=TRUE, sep="\t")
## Lectura de las estimaciones de precipitación por el satélite
imerg3<- read.delim("3imerg.txt", header=TRUE, sep="\t")
## Guardar en la variable ne el número de columnas (= número de
pluviómetros)
ne<-ncol(pluv)
#Indices estadisticos por estación
RMSE <- gof_resultado["RMSE",]# error medio cuadratico
r<- gof_resultado["r",] #correlacion de pearson
PBIAS<- gof_resultado["PBIAS %",] #Porcentaje de bias
i_agg<- gof_resultado["d",]#indice de acuerdo
#Indices estadisticos globales
mRMSE <- mean(RMSE)
mr<- mean(r)
mPBIAS<- mean(PBIAS)
mi_agg<- mean(i_agg)
# Indices de deteccion
## Determinar los límites de precipitación (mm) para calcular los índices.
(Umbral)
thresholds=c(5,10,20,50,100,200) # reducir porque valor maximo es de 270
## Guardar en una variable el número de límites
nt<-length(thresholds)
## Asignar ceros a las variables para guardar los índices
ResFBI<-matrix(rep(NA,ne*nt),ncol=ne)
ResFAR<-matrix(rep(NA,ne*nt),ncol=ne)
ResPOD<-matrix(rep(NA,ne*nt),ncol=ne)
ResETS<-matrix(rep(NA,ne*nt),ncol=ne)
#calculo global para todas las estaciones y todos los meses
for (l in 1:ne){ #Bluce para cada pluviometro
  for (k in 1:nt){ #Bluce para cada umbral de precipitacion
    # Tablas de contingencia
    a =ifelse(is.na(subset(data.frame(table(imerg3[,l])>=thresholds[k] &
    pluv[,l])>=thresholds[k])), Var1==TRUE, "Freq")[1,]), 0,
    subset(data.frame(table(imerg3[,l])>=thresholds[k] & pluv[,l])>=thresholds[k])),
    Var1==TRUE, "Freq")[1,]) #TRUE a verdadero ambos
    d= ifelse(is.na(subset(data.frame(table(imerg3[,l])<thresholds[k] &
    pluv[,l])<thresholds[k])), Var1==TRUE, "Freq")[1,]),
    0,subset(data.frame(table(imerg3[,l])<thresholds[k] & pluv[,l])<thresholds[k])),
    Var1==TRUE, "Freq")[1,])#TRUE d falso ambos
```



```
b= ifelse(is.na(subset(data.frame(table(imer3[,l])>=thresholds[k] &
pluv[,l]<thresholds[k])), Var1==TRUE, "Freq")[1,]),
0,subset(data.frame(table(imer3[,l])>=thresholds[k] & pluv[,l]<thresholds[k])),
Var1==TRUE, "Freq")[1,])#TRUE b falso positivo
c= ifelse(is.na(subset(data.frame(table(imer3[,l]<thresholds[k] &
pluv[,l])>=thresholds[k])), Var1==TRUE, "Freq")[1,]),
0,subset(data.frame(table(imer3[,l]<thresholds[k] & pluv[,l])>=thresholds[k])),
Var1==TRUE, "Freq")[1,])#TRUE c Falso negativo
# Cálculo de los índices de detección
POD= a/(a+c)
HE= ((a+c)*(a+b))/(a+b+c+d)
ETS=(a-HE)/(a+b+c-HE)
FAR= b/ (a+b)
FBI=(a+b)/(a+c)
# Almacenar resultados de cada pluviometro
ResFBI[k,l]<-FBI
ResPOD[k,l]<-POD
ResFAR[k,l]<-FAR
ResETS[k,l]<-ETS
}
}
## Exportar los resultados
write.table(PBIAS,"Bias.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
write.table(RMSE,"RMSE.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
write.table(r,"Pearson.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
write.table(i_agg,"acuerdo.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
write.table(ResFBI,"FBI.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
write.table(ResFAR,"FAR.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
write.table(ResPOD,"POD.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
write.table(ResETS,"ETS.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
```