

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La precipitación desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones y análisis, forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua. Es considerada también como una variable hidrológica transcendental, como parte del ciclo hidrológico, y su impacto en la tierra genera la escorrentía.

Por lo que, la precipitación se convierte en una herramienta importante, ya que a partir de los datos de precipitación que proporcionan las estaciones meteorológicas, permite estimar la escorrentía que es importante en el área de la ingeniería hidrológica, como ser: el diseño de infraestructuras, prevención de inundaciones, gestión de recursos hídricos, modelaciones hidrológicas, entre otros.

Para que estos resultados esperados en los estudios hidrológicos tengan mayor precisión y sean representativos, estimando su correspondiente magnitud y comportamiento del agua en un sistema fluvial, es razonable contar con la mayor cantidad de datos de precipitación, para luego procesarlos a través de los modelos de lluvia – escorrentía, y después establecer la norma que gobierna dichos sucesos.

Asimismo, la forma más directa de medir la precipitación sobre la superficie terrestre, es mediante pluviómetros (Día Pluviométrico en Bolivia de 08:00 am a 08:00 am), pero por factores técnicos o económicos a menudo las estaciones meteorológicas presentan datos faltantes en su registro histórico de precipitación, que pueden ser periodos cortos y/o largos e incluso se llegan a cerrar temporalmente o definitivamente, como por ejemplo: en el departamento de Tarija se cerraron las estaciones de San Lorenzo, Sella Méndez, San Mateo, Tarija Cancha, Pampa Redonda, Tolomosa, Rincón de la Victoria, Monte sud, Obrajes, Gamoneda, Erquis Norte, Calderillas, La Angostura, San Pedro, Padcaya, Corana. Así como estas estaciones, existe la posibilidad que otras estaciones también puedan dejar de funcionar y como consecuencia dejen de registrar los datos de información pluviométrica, generando una incertidumbre en la cantidad de lluvia en esos puntos (estaciones).

En la actualidad existen fuentes de información alternativas de precipitación, provenientes de la percepción remota de las mediciones que realizan los satelitales que se encuentran orbitando las 24 horas del día a kilómetros sobre la superficie terrestre y dicha información se encuentra disponible de manera libre y a disposición en la web a diferentes escalas temporales, entre ella la escala temporal diaria que puede llegar a ser útil para completar los datos faltantes en estas estaciones meteorológicas.

La estimación de precipitación mediante productos satelitales ofrece ventajas frente a las estaciones de medición en tierra, tanto en escala espacial como temporal. A diferencia de las estaciones terrestres, que pueden verse afectadas por la ubicación y la disponibilidad de datos, los productos satelitales proporcionan mediciones continuas, lo que minimiza la presencia de datos faltantes. Además, estos productos satelitales tienen la capacidad de abarcar prácticamente casi en todo el mundo, lo que permite obtener información sobre áreas remotas o de difícil acceso. Esta cobertura global y la capacidad de generar datos de manera uniforme hacen que los productos satelitales sean herramientas útiles.

Entre las fuentes de información de manera libre y disponible en la web se halla el producto satelital CHIRPS por sus siglas en inglés “The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations” el cual proporciona datos de precipitación diaria desde el año 1981 hasta el presente, con una resolución espacial de 0.05° ($5\text{km} \times 5\text{km}$) y una cobertura cuasi - global (50°N - 50°S).

Para el uso de la información pluviométrica proporcionada por el producto satelital CHIRPS en estudios hidrológicos como una fuente de información alternativa, antes debe realizarse una comparación con los datos de las estaciones en tierra (estaciones meteorológicas administradas por el SENAMHI) y sus datos del satélite para verificar si ambas mediciones tienen correlación, mediante parámetros estadísticos, debido a que las estaciones meteorológicas realizan mediciones de forma directa por la percepción humana en los equipos de medición, mientras que el satélite capta la información mediante observaciones infrarrojas de las nubes que tienen características específicas que pueden ser detectadas mediante longitudes de onda.

La presente investigación planteó una metodología con el enfoque cuantitativo, de alcance correlacional y de diseño no experimental.

Finalizado el análisis de los datos de precipitación diaria emitidos por el producto satelital CHIRPS, se identificó deficiencias en estimar las precipitaciones diarias, lo que no permitió completar los datos faltantes en las estaciones meteorológicas del SENAMHI.



Figura 1.1: Estimación de la precipitación observada por satélites.

Fuente: <https://aclarandoeltiempo.blogspot.com/2016/06/aclarando-algunas-consultas.html>.

1.2. Planteamiento del problema

En los estudios hidrológicos de una cuenca hidrográfica al momento de realizar un análisis de los datos de precipitación, especialmente si se utilizan estaciones de medición diaria que son proporcionados por el SENAMHI, generalmente en su mayoría se suelen encontrar días donde no se registran observaciones los cuales pueden deberse a factores técnicos o económicos de la estación.

El registro discontinuo de precipitación diaria que puede ser por periodos cortos o periodos extensos e inclusive cuando una estación pluviométrica se encuentra inactiva genera un vacío en el registro histórico de las precipitaciones dejando a la estación como no representativa de la zona de estudio y además dejando como incertidumbre la altura de precipitación caída en ese lugar en esos periodos que podrían ser bastante húmedos.

La información pluviométrica es una de las variables principales cuando se realiza los estudios hidrológicos en una determinada cuenca hidrológica, porque su aplicación en modelos de precipitación – esorrentía ayuda a estimar los caudales, debido a que en

nuestro medio es difícil acceder a esta información por la poca cantidad de estaciones hidrométricas que existen, por lo tanto, contar con un mayor registro de precipitación podría lograr compensar esta escasez de información.

Entre los estudios hidrológicos de una cuenca hidrográfica, donde la información de precipitación diaria tiene mayor utilidad son: modelaciones hidrológicas, pronóstico de inundaciones, obras de protección fluvial, la gestión de cuencas hidrográficas, el estudio de sequías, la gestión de riesgo de inundaciones, la gestión de los recursos hídricos y el diseño de obras hidráulicas.

En este sentido, la lluvia al ser una variable principal en los estudios hidrológicos, debido a que influye en el cálculo de la escorrentía, contar con información más completa en las estaciones pluviométricas mejora la precisión en las estimaciones de la cantidad de agua que puede ingresar al sistema fluvial de la cuenca.

1.2.1. Formulación del problema

¿Cuál es la relación entre los datos de precipitación diaria del producto satelital CHIRPS y los datos de precipitación diaria de las estaciones del SENAMHI para la aplicación en los estudios hidrológicos desarrollados en la cuenca del río Tolomosa del departamento de Tarija – Bolivia?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar estadísticamente los datos de precipitación diaria del satélite CHIRPS con los datos de estaciones tierra para corroborar en la aplicación de los estudios hidrológicos desarrollados en la Cuenca del Río Tolomosa del departamento de Tarija – Bolivia.

1.3.2. Objetivos específicos

- Verificar la homogeneidad de los datos de precipitación diaria de las estaciones del SENAMHI mediante el análisis de consistencia visual - gráfico, doble masa y métodos estadísticos, para corroborar que los datos sean confiables y consistentes.
- Comparar los datos de precipitación diaria de las estaciones del SENAMHI y los datos del producto satelital CHIRPS mediante parámetros estadísticos en cuanto a magnitud y detección de días de precipitación.

- Calcular los coeficientes de correlación de Pearson entre los datos de las precipitaciones de las estaciones del SENAMHI y los datos de precipitación del producto satelital CHIRPS.
- Analizar las correlaciones y los parámetros estadísticos en cuanto a magnitud y detección de días de precipitación, para interpretar la aproximación de las mediciones de precipitaciones entre el producto satelital CHIRPS y las estaciones del SENAMHI a escala temporal diaria.

1.4. Justificación

La presente investigación pretende aplicar los conocimientos adquiridos durante la trayectoria de la Carrera, haciendo hincapié a las materias de hidrología, recursos hídricos y estadística que serán base fundamental en la aplicación de sus metodologías, conceptos y principios para el desarrollo de esta investigación.

Esta investigación busca promover el uso más frecuente de las herramientas tecnológicas, en el campo de la hidrología. Dado de que estas herramientas tecnológicas están evolucionando a un ritmo acelerado, su constante actualización proporciona un apoyo, generando fuentes alternativas de información, que complementarían de manera más efectiva, además que se encuentra a nuestro alcance en la web de manera accesible y gratuita, aunque para su uso siempre debe ser previamente evaluada y analizada.

Entre los avances tecnológicos que existen en nuestro medio son los productos satelitales de precipitación, que cuentan con información continua y con una escala espacial cuasi global, pudiendo llegar a ser una fuente alternativa, para completar los datos faltantes de precipitación en las estaciones meteorológicas, que es uno de los problemas más comunes que se tiene en nuestro medio.

La presente investigación tiene por objetivo verificar y analizar el producto satelital de precipitación, mediante una comparación estadística para corroborar su uso y completar los datos faltantes de precipitación diaria en las estaciones pluviométricas como una alternativa de información proveniente de este producto satelital que recibe el nombre de CHIRPS.

El estudio se realizará en la cuenca del río Tolomosa, siendo considerada una cuenca estratégica para la ciudad de Tarija, cuyo escurrimiento es utilizado para riego, agua potable y generación de energía eléctrica a través del proyecto múltiple de San Jacinto.

1.5. Delimitación de la investigación

1.5.1. Temática

Este trabajo de investigación se centrará en comparación estadística en cuanto a magnitud y detección de días de precipitación, como también en analizar mediante el coeficiente de correlación de Pearson, si las estimaciones del producto satelital y las mediciones de estaciones del SENAMHI tienen semejanza, corroborando su posible aplicación para completar datos faltantes en las estaciones del SENAMHI.

1.5.2. Espacial

El presente trabajo de investigación se enfoca en la cuenca del Río Tolomosa del departamento de Tarija, que cuenta con un área aproximada de 467 km², por lo que solo se tomará en cuenta las estaciones disponibles del SENAMHI en el área de estudio, cumpliendo también con la densidad mínima de estaciones necesarias para la validación de los datos, mediante la comparación estadística y correlación.

1.5.3. Temporal

El periodo de estudio se define entre los años 2000 y 2021 debido a que la mayor cantidad de estaciones del SENMAHI disponibles en el área de estudio, pudo coincidir con una información completa durante esos años. No se pretendió completar datos porque, además de ser datos diarios y la cantidad para rellenar era considerable y complejo, también se estaría generando mayor incertidumbre al momento de realizar la comparación estadística con los datos del producto satelital.

1.6. Hipótesis

¿Los datos satelitales de precipitación diaria del producto satelital CHIRPS será una fuente alternativa de información confiable y accesible para la aplicación en los estudios hidrológicos desarrollado en la cuenca del río Tolomosa del departamento de Tarija – Bolivia, para completar los datos faltantes de precipitación de las estaciones meteorológicas?

1.6.1. Identificación de variables

- Variable Independiente: Precipitación diaria
- Variable dependiente: Estudios hidrológicos

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

La aplicación de información de precipitación de productos satelitales en regiones tanto internacional como nacional han obtenido diferentes resultados entre ellos tenemos los siguientes:

(Gavilán et al., 2018) en el trabajo “Metodología operativa para la generación de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y validación de los resultados” se realizó pruebas estadísticas para ver la correlación que existe entre la precipitación diaria medida en la estación meteorológica INTA oro Verde y la estimada por el satélite TRMM del producto 3B42 donde los resultados muestran que existe una correlación regular entre las variables medidas y estimadas por el satélite y que es posible utilizar el producto 3B42 de la misión TRMM para tener datos pluviométricos en lugares donde no se encuentran estaciones meteorológicas disponibles para la región, donde se realizó el estudio en la cuenca Arroyo Las Conchas ubicada en el Sur del departamento de Paraná, provincia Entre Ríos - Argentina.

(Lujano et al., 2023) En el trabajo “Evaluación de Productos de Precipitación Satelital sobre la Cuenca del Lago Titicaca” se analizaron los datos de imágenes satelitales de GSMaP, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN con mediciones de pluviómetros para un periodo 2003 – 2016 en escalas de tiempo diaria y mensual. Una de sus principales conclusiones menciona que en la escala de tiempo diaria y mensual los resultados mostraron que PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS estaban más de acuerdo con las mediciones de pluviómetros, pero con un gran sesgo.

(Noriega, 2018) En el Trabajo “Evaluación y tratamiento estadístico de datos de precipitación de los productos TRMM y CHIRPS y su aplicación práctica en la cuenca Andina del Río Beni” se realizó una evaluación del producto original de ambas Estimaciones de Precipitación Satelital (TRMM-3B42 y CHIRPS) comparando sus

valores de precipitación diaria con la información de estaciones terrestres en el periodo 1998-2016. Se combinaron ambos tipos de información (satelital: pixel y terrestre: puntual) empleando el modelo Suavizado Doble Kernel (SDK) obteniendo nuevos productos, denominados productos combinados SDK. Los productos originales se evaluaron a nivel diario (capacidad de detección), a nivel mensual (para evaluar la capacidad de estimación) y anual (año hidrológico, para poder evaluar la distribución espacial de la precipitación). Los productos combinados se evaluaron a nivel mensual y anual (igual que los productos originales). A partir de este análisis, se concluye que el producto original TRMM-3B42 ofrece un desempeño un poco mejor que CHIRPS en la capacidad de detección de precipitación y su uso en aplicaciones hidrológicas, que requieran información diaria con aceptable distribución de la frecuencia de la precipitación.

(Calle, 2016) en el trabajo “Análisis y Evaluación de los datos de Precipitación de los satélites TRMM y GPM, en las 4 macro regiones climáticas de Bolivia” realiza un análisis y evaluación de los datos de precipitación de los satélites TRMM (algoritmo 3B43 v7) y GPM (algoritmo IMERG v03) con relación a los datos de los pluviómetros del SENAMHI. En sus conclusiones señala que las precipitaciones frontales, orográficas y convectivas que se presenta en una región y que tienen gran volumen en el cual abarcan grandes superficies debido a la presencia de la vegetación, hace posible la recarga de humedad en la atmosfera para su posterior precipitación ya sea orográfica o convectiva y por lo tanto estas precipitaciones tienen una aceptable estimación por los satélites TRMM y GPM con la resolución espacial de éstos.

Haciendo un enfoque a la región de Tarija en el cuadro N° 16 “Tabla resumen de los coeficientes de correlación lineal y coeficiente de determinación SENAMHI/GPM y SENAMHI/TRMM (periodo abril 2014 – enero 2016)” se puede observar que estos coeficientes tienen una aceptable correlación.

2.2. Fundamento Teórico.

2.2.1. El ciclo hidrológico

El ciclo del agua puede definirse de manera general como un proceso natural en el que este elemento esencial para la vida se mueve constantemente tanto en la superficie

terrestre como en la atmósfera, alternando entre sus diferentes estados: líquido, vapor y hielo. Dentro de este ciclo, las precipitaciones son un componente fundamental, ya que representan la forma en que el agua regresa a la superficie terrestre, alimentando ríos, lagos y acuíferos, y sosteniendo la vida en el planeta.

El agua es vital; sin ella, la Tierra sería un lugar inhóspito e inhabitable. Sin embargo, también puede representar un riesgo natural que impacta directa e indirectamente a los seres humanos. Por estas razones, es crucial entender el comportamiento del ciclo hidrológico y sus efectos, prestando especial atención a la precipitación, que juega un papel clave en la redistribución del agua y en el mantenimiento de los ecosistemas. Conocer estos aspectos es esencial en diversos ámbitos y situaciones.



Figura 2.1: El ciclo hidrológico.
Fuente: <https://www.ciclohidrologico.com/>

2.2.2. La precipitación.

La precipitación es un fenómeno natural generado por la condensación del vapor de agua que cae de las nubes en forma líquida o sólida y que se depositan en el suelo por el movimiento de caída libre vertical que sufren las partículas, debido a la aceleración de la gravedad de la tierra.

El término de precipitación puede comprender a la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío, la cencellada blanca, la escarcha y la precipitación de la niebla.

Para expresar la cantidad de precipitación, se mide la profundidad vertical de agua que cubre una proyección horizontal de la superficie de la tierra y su unidad generalmente es

representada en milímetros (volumen/área) o en kilogramo por metro cuadrado (masa/área) (OMM, 2017: 209).



Figura 2.2: La precipitación.
Fuente: Rodríguez, (2004).

2.2.2.1. Formación de la precipitación

La producción de precipitación requiere de cuatro condiciones:

1. Un mecanismo que produzca el enfriamiento del aire.
2. Un mecanismo que produzca la condensación.
3. Un mecanismo que favorezca el crecimiento de las gotas de nube.
4. Un mecanismo que produzca una acumulación de humedad de intensidad suficiente para dar lugar a las tasas de lluvias observables.

El crecimiento de las gotas de agua se debe a dos procesos que permiten incrementar el tamaño de ellas, hasta un nivel tal que venzan la resistencia del aire y caigan a la superficie de la tierra como precipitación; se conocen como proceso de los cristales de hielo y proceso de coalescencia. La coalescencia, es un proceso mediante el cual las pequeñas gotitas aumentan su tamaño debido al contacto con otras gotas por colisión. Las gotas de agua se comportan como cuerpos en caída libre sujetas a las fuerzas de gravedad y resistencia del aire. En el equilibrio, la velocidad de caída (velocidad terminal), es proporcional al cuadrado del radio de la gota; por lo tanto, las gotas de mayor magnitud, descienden más rápido que las pequeñas, arrastrándolas en su paso e incorporándolas a su propia masa. De ese modo se van formando partículas de mayor tamaño.

Las gotas que precipitan están expuestas al proceso de evaporación hasta que llegan al suelo (Ver Figura 2.3). Por ello, debe existir una fuente de alimentación de la humedad

necesaria para compensar las pérdidas y producir la lluvia. Dicha fuente se debe a un proceso de convergencia de un flujo horizontal neto de vapor de agua hacia la columna de aire sobre el área de lluvia, flujo que proviene desde zonas de divergencia en la atmósfera superior (Copa, 2018: 11)



Figura 2.3: Esquema representativo del mecanismo de formación de precipitación.
Fuente: Sánchez, (2011).

Los factores más importantes que conllevan a una precipitación significativa son: la colisión y la fusión de las partículas de la nube y de la precipitación. La colisión entre la nube y las partículas de la precipitación se presenta debido a diferencias en velocidades de caída como resultado de diferencias de tamaño (las partículas más pesadas caen más rápidamente que las partículas más pequeñas que son levantadas por las corrientes aéreas ascendentes y en algunos casos se evaporan). Las partículas que chocan se unen formando partículas más grandes, y el proceso se puede repetir varias veces, hasta cuando las gotas tienen el suficiente tamaño como para que puedan caer (Sánchez, 2011: 79).

2.2.2.2. Precipitación según el proceso que la forma:

2.2.2.2.1. Precipitación convectiva.

Es la que se produce a partir de la evaporación de aguas superficiales, generando grandes volúmenes de vapor de agua que tiende a elevarse por ser aire cálido y se enfría por el proceso adiabático, siendo seco o húmedo. Este vapor de agua se agrupa en zonas denominadas células de convección, desde las cuales pueden continuar elevándose hasta alcanzar grandes alturas, donde alcanzan las condiciones necesarias que producen la condensación e inminentemente la precipitación (Villón, 2011: 71).

Este tipo de lluvia es típico de las nubes cúmulos y cumulonimbus que generan lluvias muy intensas de duración corta y abarcando zonas reducidas (Mejía, 2006: 87), ver Figura 2.4.



Figura 2.4: Precipitación por Convección.

Fuente: Calle, (2016).

2.2.2.2. Precipitación orográfica.

Se produce a partir de los vientos cargados de humedad, debido al vapor de agua que se encuentran por encima de las superficies de agua y es arrastrado hasta ser interceptado con un accidente geográfico, como montañas, y recorre sus laderas hasta ascender grandes alturas donde se encuentra las condiciones necesarias para la condensación y, en consecuencia, la precipitación (Villón, 2011: 72).

En cadenas de montañas con altitudes significativas, la precipitación es mucho mayor en barlovento (antes de la divisoria de aguas). Mientras que, en montañas con altitudes más bajas, la mayor precipitación se produce en sotavento (después de la divisoria de aguas) debido a que los volúmenes de vapor de agua continúan en ascenso (Mejía, 2012: 87).

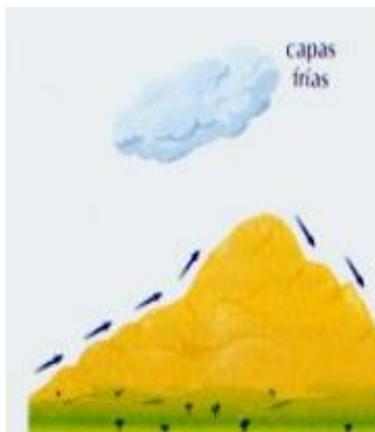


Figura 2.5: Precipitación Orográfica.

Fuente: Calle, (2016).

2.2.2.2.3. Precipitación frontal.

Se genera cuando existe un cruce entre dos masas de aire, una con temperatura más caliente que la otra. Al entrar en contacto, estas masas de aire pueden crear una superficie imaginaria, similar a un plano inclinado, donde la masa de vapor de agua más caliente experimenta un ascenso brusco a elevaciones mayores hasta alcanzar una altura donde las condiciones sean adecuadas para producirse la condensación y precipitación (Villón, 2011: 72).

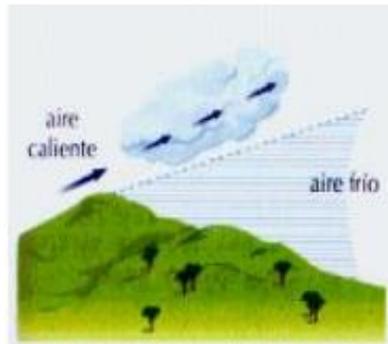


Figura 2.6: Precipitación Frontal.
Fuente: Calle, (2016).

2.2.2.3. Precipitación según la forma en que cae

2.2.2.3.1. Llovizna

Esta forma de precipitación se caracteriza por tener partículas de agua cuyos diámetros oscilan entre 0,1 y 0,5 mm. Su descenso hacia la superficie del suelo es tan lento que, en ocasiones, parece que flotan en el aire (Villón, 2011: 70). La velocidad de caída de estas pequeñas partículas no supera los 3 m/s. Las nubes que dan origen a este tipo de precipitación se encuentran a una altura baja y son del tipo estratiforme (Calle, 2016: 8)

2.2.2.3.2. Lluvia

Esta forma de precipitación que está compuesta por partículas cuyos diámetros de partículas oscilan entre 0,5 mm y 3 mm. Debido al mayor tamaño de sus diámetros, alcanzan velocidades de caída entre un rango de 3 a 7 m/s. Es la forma de precipitación más común que se presenta durante las épocas húmedas y se origina en nubes situadas a baja altura, donde la temperatura es superior a 0 °C (Calle, 2016: 8).

2.2.2.3.3. Chubasco

Se genera a partir de la precipitación por convección y las nubes que dan origen a este tipo de lluvia son los cúmulos o cumulonimbus. Tienen la característica de presentarse durante

periodos cortos, pero con gran intensidad. El diámetro de sus partículas es superior a los 3 mm y tienen una velocidad de caída superior a los 7 m/s (Calle, 2016: 8).

2.2.2.3.4. La nieve, el granizo y el pedrisco

Se trata de precipitaciones que descienden en forma sólida y tienen una geometría bastante compleja e irregular. Sus diámetros son variables, ya que durante su descenso pueden aglomerarse entre sí y medir varios centímetros.

2.2.3. Medidores de precipitación

La medición de precipitación hace referencia a determinar la cantidad de agua o lámina de agua precipitada durante un periodo de tiempo sobre la superficie del terreno. En hidrología es fundamental conocer de manera exacta los valores de precipitación, para ello independientemente de cualquier método de medición se debe obtener muestras representativas en la zona en lo que refiera la medición. La aplicación de estaciones pluviométricas es una de las maneras tradicionales para medir la precipitación en tierra, aunque su ubicación debe ser en lugares donde cumpla las condiciones mínimas necesarias para su instalación, mantenimiento y su manejo adecuado. Existen otros métodos de medición más complejas como los radares y satélites meteorológicos, aunque para aplicarlos es necesario conocer a fondo sus características de error (OMM, 2020: 93).

2.2.3.1. Pluviómetros

Un pluviómetro es un recipiente colector por lo general en forma de cilindro recto que almacena el agua captada a través de una boca horizontal con un área estandarizada que oscila entre 200 cm² a 500 cm² que se considera un tamaño muy práctico. Para medir la altura de precipitación almacenada en el pluviómetro se utiliza una probeta graduada o una varilla medidora graduada (OMM, 2020: 95).

La lectura de la cantidad de agua almacenada en el pluviómetro generalmente se realiza cada 24 horas (En Bolivia a las 08:00 h), generándose con ello registros de valores diarios. En lugares de difícil acceso o zonas apartadas donde es escasamente habitadas es complejo realizar las mediciones de manera diaria, entonces, surge la necesidad de medir las precipitaciones para periodos más extensos como mensual o anual, por lo cual se utilizan pluviómetros totalizadores que tienen la característica principal de acumular el agua durante largos periodos (Villón, 2011: 74).

Ventajas de medir con un pluviómetro:

- Medición directa y puntual
- Costos más accesibles
- Simplicidad en instalación, mantenimiento y manejo.

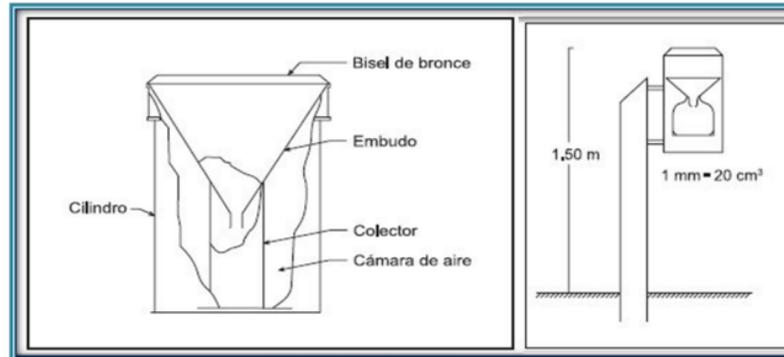


Figura 2.7: Pluviómetro.
Fuente: Copa, 2018.

2.2.3.2. Pluviógrafos

Es un instrumento, que registra la información de precipitación más detallada, como su distribución temporal o la variación de intensidades. El pluviógrafo registra estos valores, generalmente en un papel gráfico con coordenadas apropiadas que tiene un rango en cuanto a altura de registro. El gráfico resultante recibe el nombre de pluviograma (Mejía, 2006: 89).

Ventajas de medir con un pluviógrafo:

- Registro de medición automático
- Mayor Precisión en la medición
- Almacena datos a largo plazo
- Detecta intensidades

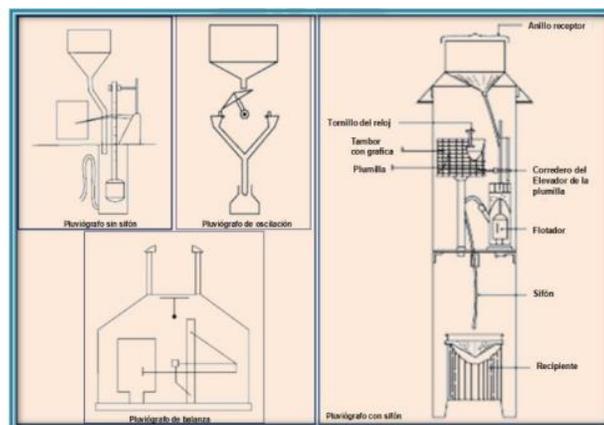


Figura 2.8: Pluviógrafo.
Fuente: Copa, (2018).

2.2.3.3. Radar Meteorológico

Un radar meteorológico, o radar meteo, es un tipo de radar usado en meteorología para localizar precipitaciones, calcular sus trayectorias y estimar sus tipos (lluvia, nieve, granizo, etc.) (Erena et al., 2012: 5).

Su diseño le permite ubicar zonas de precipitación, medir su intensidad, su desplazamiento y su tipo. La precisión de su medición depende de la frecuencia que tenga, para hidrometeoros pequeños como la niebla, la llovizna, la nieve débil se emplean frecuencias más altas (35 y 94 GHz), el cual en el campo de la investigación tiene un uso más frecuente (OMM, 2017: 798).

El funcionamiento del radar meteorológico está basado a través de pulsos, cuando este encuentra a su objetivo, devuelve una señal que es denominada como eco el cual tiene una amplitud, una fase y una polarización.

La amplitud está relacionada con la distribución del tamaño y con el número de partículas en el volumen (pulso) iluminado por el haz del radar. Se emplea para determinar un parámetro denominado factor de reflectividad (Z) que permite estimar la intensidad de la precipitación mediante relaciones empíricas. Una aplicación fundamental consiste en detectar, localizar y estimar la precipitación al nivel del suelo de forma instantánea, casi continuamente, y en grandes áreas (OMM, 2020: 108).

Ventajas de medir con un radar meteorológico:

- Cobertura amplia geográficamente, proporcionando datos sobre la precipitación.
- Detección en tiempo real
- Detección de patrones en movimiento de sistemas de tormentas
- Visualizar las nubes y la precipitación en 3D



Figura 2.9: Radar meteorológico.

Fuente: Erena et al., (2012).

2.2.3.4. Sensores y satélites

Partiendo desde la perspectiva histórica, los satélites, comenzaron una nueva era para la meteorología con la primera misión exitosa del satélite de observación de televisión en infrarrojo (TIROS-1, 1960), que a partir de ese momento el Sistema Mundial de Observaciones cambio completamente, iniciando así varias misiones satelitales consecutivas con el objetivo de cada vez realizar más avances en materia que permita comprender la dinámica de la atmosfera y el clima.

Una de las diferencias primordiales entre mediciones de la superficie terrestre y de los satélites es la escala espacial y temporal. En la escala espacial ha logrado una cobertura mundial de manera continua con periodos de observaciones frecuentes, que, a comparación de las redes de observación que se encuentran en zonas pobladas, cuando, siendo en realidad que la mayoría de la superficie terrestre esta aún deshabitada, por lo que existe bajo muestreo en las observaciones. En la dimensión temporal los satélites proporcionan sus registros de manera casi instantánea mientras que las mediciones en tierra se integran en cierto intervalo de tiempo para promediar fluctuaciones instantáneas (OMM, 2017: 942).

En términos generales, los sensores instalados en satélites para el monitoreo de la atmósfera emplean radiación electromagnética (emr) de dos maneras: de forma pasiva, captando la emr que emana de la superficie terrestre o de la atmósfera; y de manera activa, generando su propia emr para explorar la atmósfera y evaluar las características de la superficie.

Para la estimación de lluvia desde el espacio está basado en la medición de la cantidad de radiación reflejada y emitida a través de las cimas de las nubes. La mayor parte de la radiación no penetra profundamente en las regiones nubosas que contienen partículas de tamaño similar o superior al de la longitud de onda de radiación. Así pues, si se exceptúan las longitudes de onda más largas, la mayor parte de la radiación proviene de las regiones superiores de las nubes precipitantes y, por consiguiente, solo es posible relacionarla con la lluvia superficial (OMM, 2020: 115).

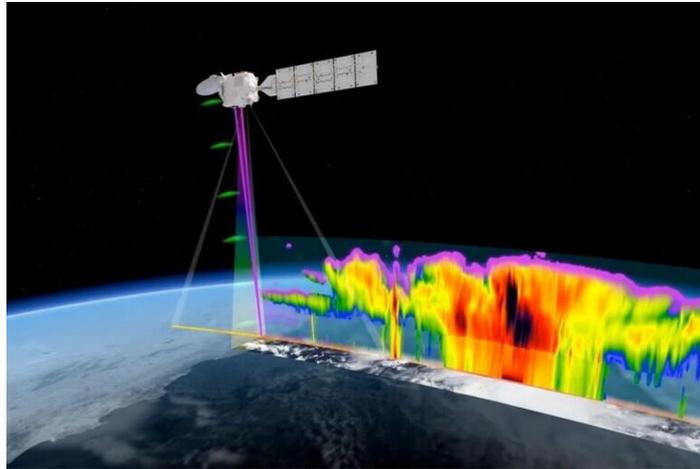


Figura 2.10: Satélite Meteorológico.

Fuente: Noriega, (2018).

2.2.4. Densidad mínima recomendada de estaciones pluviométricas

Definir una red mínima de estaciones permitirá utilizar la información de la precipitación, evitando deficiencias graves en el desarrollo y gestión de recursos hídricos. Se debe contar con un número de estaciones mínimo que sea capaz de poder representar el patrón de lluvia en una determinada área de interés. De acuerdo al documento de la OMM No 168 de la Organización Meteorológica Mundial “Guía de Prácticas Hidrológicas”, la densidad mínima de estaciones pluviométricas recomendada es como se muestra en la Figura 2.11.

Unidad fisiográfica	Precipitación		Evaporación	Flujo fluvial	Sedimentos	Calidad del agua
	No registradoras	Registradoras				
Costa	900	9 000	50 000	2 750	18 300	55 000
Montaña	250	2 500	50 000	1 000	6 700	20 000
Planicie interior	575	5 750	5 000	1 875	12 500	37 500
Montes/ondulaciones	575	5 750	50 000	1 875	12 500	47 500
Islas pequeñas	25	250	50 000	300	2 000	6 000
Áreas urbanas	–	10 a 20	–	–	–	–
Polos/tierras áridas	10 000	100 000	100 000	20 000	200 000	200 000

Figura 2.11: Valores mínimos recomendados densidad de estaciones (superficie, en km² por estación).

Fuente: Guía de Prácticas Hidrológicas OMM, (2020).

2.2.5. Nubes

Las nubes consisten en un conjunto de pequeñas gotas de agua, cristales de hielo, o una combinación de ambos, que se sitúan por encima de la superficie terrestre y son visibles

desde el punto de observación. El diámetro máximo de las partículas líquidas es aproximadamente de 200 μm , mientras que las gotas más grandes se clasifican como llovizna o lluvia. (OMM, 2017: 508).

Proporcionan una información esencial para los satélites meteorológicos, especialmente para aquellos que estiman la precipitación. Cuando ocurre el proceso de la formación de la precipitación implica la existencia de gotas de nube de gran tamaño y/o de partículas de hielo en la nube, que frecuentemente se extiende hacia su parte superior, es captado por el satélite y es un indicador que presupone la intensidad de lluvia que varía con la tasa de dilatación de la cima de las nubes a baja temperatura ($T < 235 \text{ K}$) (OMM, 2020: 116).

2.2.5.1. Tipos de Nubes

Entre los tipos de nubes se tiene: Cirrus, Cúmulos, Estratos, Nimbus.

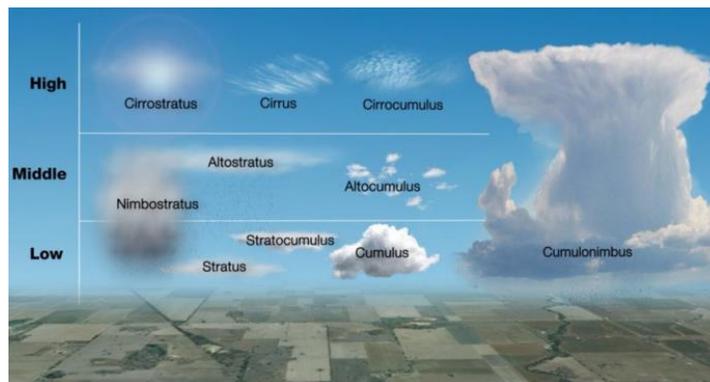


Figura 2.12: Tipos de Nubes.

Fuente: Calvo, J. (2019).

2.2.5.1.1. Cirrus

Son nubes de alto nivel, blancas ligeras de aspecto fibroso o filamentosas. Aparecen especialmente cuando el aire está seco.

2.2.5.1.2. Cúmulos

Son nubes de desarrollo vertical que se forman por acción convectiva y generalmente son las que producen precipitación.

2.2.5.1.3. Estratos

Son considerados como nubes de bajo nivel; por lo general, se encuentran alrededor de las montañas.

2.2.5.1.4. Nimbos

Son de nivel medio, generalmente se presentan en forma conjunta con las nubes tipo estratos, tomando como nombre nimbostratos. Estas forman una capa lo suficientemente gruesa como para impedir el paso de la luz del sol, y son las responsables de las lluvias intermitentes (Calle, 2015: 9).

2.2.6. Principios y Fundamento de Teledetección

2.2.6.1. Definición de Teledetección

La Percepción Remota, también conocida como Teledetección, es la ciencia y el arte de recopilar información valiosa (espacial, espectral y temporal) sobre un objeto, área o fenómeno mediante el análisis e interpretación de datos de imágenes obtenidas por un equipo que no está en contacto directo con lo que se estudia.

La Teledetección se define como el conjunto de conocimientos y técnicas empleadas para identificar características físicas y biológicas de objetos a través de mediciones a distancia, sin necesidad de contacto físico. La percepción remota no solo incluye los procesos que permiten capturar imágenes desde el aire o el espacio, sino también el tratamiento posterior de estas imágenes en el marco de una aplicación específica.

En otras palabras, la Teledetección se refiere a la técnica de obtener y procesar datos de la superficie terrestre utilizando sensores ubicados en plataformas espaciales. Esto se basa en la interacción electromagnética entre la Tierra y el sensor, donde la fuente de radiación puede ser el sol (Teledetección pasiva) o el propio sensor (Teledetección activa).

Existen dos tipos de percepción remota:

Percepción Pasiva: Es cuando se utilizan fuentes de radiación de energía natural como la radiación solar y la radiación emitida por la interacción tierra atmósfera.

Percepción Activa: Se presenta cuando la irradiación utilizada proviene de una fuente artificial, por ejemplo, desde el mismo sensor.

Cuando la energía de la radiación entra en contacto con la superficie terrestre, ésta presenta 4 diferentes comportamientos:

1. Parte será reflejada con ángulo similar al de incidencia
2. Parte será reflejada uniformemente hacia todas las direcciones
3. Parte será absorbida por el objeto y se calentará luego esta será reflejada en la banda térmica hasta que se enfríe.

4. Parte es transmitida a otros objetos o a la superficie de la tierra sin ser reflejada hacia el sensor.

Un sistema de teledetección se encuentra compuesto esencialmente por 2 elementos: la plataforma (satélite) y el sensor (sensor remoto), sin restarle importancia a los demás elementos como el objeto, la fuente de energía, el sistema de transmisión y la función del usuario (Copa, 2018: 26).

2.2.6.2. Componentes de un sistema de Teledetección

En la Figura 2.13 se puede observar el procedimiento de la teledetección el cual incluye siete etapas.

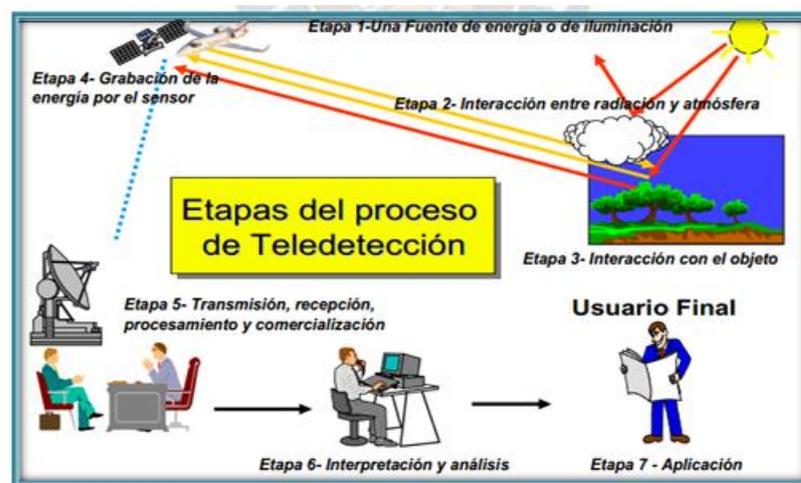


Figura 2.13: Etapas del proceso de Teledetección

Fuente: Copa, (2018).

Etapa 1.- Fuente de energía o iluminación. - El principio de todo proceso de teledetección se encuentra necesariamente una fuente de energía para “iluminar” la superficie terrestre, que podrá ser el sol o una energía generada por el propio sensor, que se encuentra en una plataforma, ya sea un avión o satélite.

Etapa 2- Interacción entre radiación y atmósfera. - Durante el trayecto entre la fuente de energía y los objetos, la radiación interactúa con la atmósfera. Una segunda interacción ocurre durante el trayecto entre los objetos y el sensor.

Etapa 3- Interacción con el objeto. - Una vez llegada al objeto, la energía interactúa con la superficie del objeto y esta interacción depende de las características de la radiación y de la superficie.

Etapa 4- Grabación de la energía por el sensor. - Una vez que la energía es emitida por el objeto, esta debe ser captada a distancia (por un sensor que no está en contacto con el objeto) para ser grabada en el sistema del sensor/plataforma.

Etapa 5- Transmisión, recepción, procesamiento. - La energía grabada por el sensor es transmitida o entregada a una estación de recepción donde la información es traducida en imágenes (digitales o fotográficas), generalmente en relación directa con la comercialización.

Etapa 6- Interpretación y análisis. - Se requiere una interpretación visual y/o digital de la imagen procesada para extraer la información deseada sobre el objeto.

Etapa 7- Aplicación. - La última etapa del proceso consta en utilizar la información extraída de la imagen para conocer mejor el objeto de manera que permita la resolución de un problema en particular (Copa, 2018: 28).

2.2.6.3. Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales son una forma de capturar información espacial de manera indirecta, almacenada en forma de matrices. Cada unidad de la imagen, conocida como "píxel", refleja un valor que es proporcional a la reflectancia del suelo en la zona correspondiente de la imagen.

Pixel: El píxel es la unidad visual más pequeña en una imagen satelital. El sensor capta la radiancia promedio de un objeto en la superficie que coincide con el tamaño del píxel. Este valor se convierte en un número, conocido como nivel digital, que se utiliza para el procesamiento digital de las imágenes. Cada píxel tiene un valor numérico, ya sea entero o real, que representa el nivel digital (ND) detectado, el cual se traduce en un tono de gris en la pantalla. La combinación de múltiples píxeles forma la imagen, que se puede interpretar como una matriz con coordenadas de fila y columna (Copa, 2018: 36).

2.2.6.4. Resolución de las imágenes satelitales

La radiación que emite o refleja la superficie del elemento en estudio es un fenómeno continuo que se presenta en cuatro dimensiones: espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia. Para que un sensor pueda capturar esta información, debe muestrear y discretizar este continuo. La forma en que se realiza este muestreo determina los cuatro tipos de resolución utilizados en teledetección (Avalos, 2012: 21):

- Resolución espacial. Tamaño que representa cada elemento de la imagen (píxel), es decir, el área espacial a que corresponde la información.
- Resolución temporal. Indica el intervalo de tiempo necesario entre cada imagen obtenida.
- Resolución espectral. Indica la anchura espectral y número de bandas para las cuales es sensible el sensor. Cada banda corresponde a un canal de información, de forma que, a mayor número de bandas más variables de caracterización.
- Resolución radiométrica. Es indicativa de la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad de diferenciar variaciones de intensidad de la señal captada. Se expresa mediante el número de bits necesarios para registrar la información de cada píxel. Cuanto mayor sea la resolución radiométrica, la imagen captada contendrá un mayor nivel de detalle.

2.2.6.5. Productos de teledetección de precipitación

Los productos de teledetección de precipitación consisten en datos obtenidos a través de satélites que estiman la cantidad y distribución de precipitaciones en la superficie terrestre. Utilizando sensores avanzados, los satélites miden la humedad atmosférica y analizan las características de las nubes. Los diferentes productos generados ofrecen diferentes resoluciones espaciales y temporales. Para su validación de estos datos se realiza mediante comparaciones con estaciones meteorológicas en el suelo, garantizando su precisión y utilidad (Avalos, 2012: 25).

2.2.7. Producto Satelital de Precipitación CHIRPS

El producto satelital CHIRPS (Grupo de Peligros Climáticos de Precipitaciones Infrarrojas con Estaciones), fue desarrollado por el Grupo de Peligros Climáticos (CHG) de la Universidad de California, Santa Bárbara (UCSB), en Estados Unidos.

Es un producto se basa en técnicas de interpolación “inteligente” y ofrece una alta resolución espacial de 0.05° , permitiendo estimar la precipitación con un extenso periodo de registro que abarca desde el año 1981 hasta la actualidad.

Su medición se fundamenta en observaciones infrarrojas de duración de nubes frías (CCD). El algoritmo de CHIRPS está integrada por información satelital de precipitación basadas en CCD de 0.05° a escalas diarias, pentadales y mensuales. Esta información se combina con datos de estaciones meteorológicas, generando un producto de información

preliminar en aproximadamente 2 días y un producto final con una latencia de aproximadamente de 3 semanas. Además, se emplea un nuevo procedimiento de combinación que incorpora la estructura de correlación espacial de las estimaciones CCD para asignar pesos de interpolación

El proceso de CHIRPS este compuesto por tres componentes principales los cuales son: la climatología de precipitación del grupo de riesgos climáticos (CHPclim), la precipitación infrarroja del grupo de riesgos climáticos solo por el satélite (CHIRP) y el procedimiento de combinación de estaciones que produce CHIRPS.

El producto satelital CHIRPS fue desarrollado con el principal objetivo de monitorear las sequías agrícolas, pero también fue enfocándose en evaluar el desempeño durante la temporada de precipitación húmeda de cada ubicación. (Funk et al., 2015: 3).

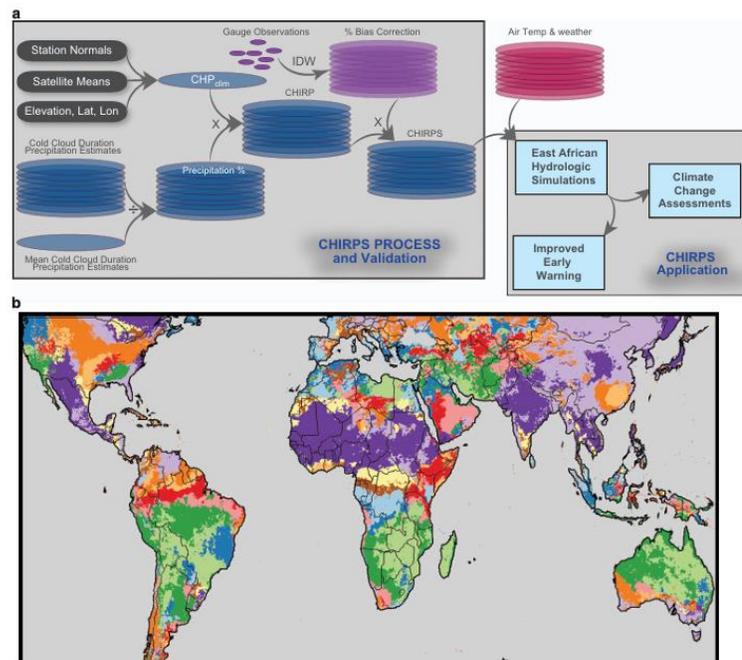


Figura 2.14: Descripción general del proceso y validación de CHIRPS.
Fuente: Funk et al., (2015).

2.2.7.1. Resolución espacial

La resolución espacial del producto satelital CHIRPS es de 0.05° (aprox. 5 km de cada lado de pixel de su grilla de precipitación).

2.2.7.2. Resolución temporal

Las resoluciones temporales que tiene el producto satelital CHIRPS son a escalas diarias, pentadales y mensuales. En el presente trabajo se utilizará la escala temporal diaria.

2.2.8. Análisis de consistencia de las series de precipitación

Antes de iniciar cualquier análisis o emplear los datos observados de las estaciones pluviométricas, es fundamental llevar a cabo una verificación a los valores de precipitación.

Es importante considerar que, a medida que se extiende el periodo de medición aumenta posibilidad de errores sistemáticos (Mejía , 2012: 69).

Los errores sistemáticos también reciben el nombre de “inconsistencia” y se presenta como saltos o tendencias, y no homogeneidad, lo que indica un cambio de los datos a lo largo del tiempo. Su causa puede surgir debido a factores naturales o la intervención de la mano humana.

La inconsistencia de la información y la no homogeneidad en las series hidrológicas repercute en sus características estadísticas como la media, desviación estándar y la correlación serial.

Para evaluar, detectar y eliminar estos errores sistemáticos se realiza el análisis de consistencia mediante criterios físicos y métodos estadísticos (Villón, 2016: 308).

Los procesos por el cual puede realizarse el análisis de consistencia son los siguientes:

- Análisis Gráfico Visual
- Análisis de doble masa
- Análisis estadístico

En el presente trabajo los procesos seleccionados para la evaluar la consistencia de las series de precipitaciones se desglosan a continuación.

2.2.8.1. Análisis gráfico – visual

El análisis gráfico – visual o también conocido como análisis exploratorio gráfico, se utiliza con el fin de comprobar tendencias y cambios en la serie de tiempo por medio visual. Este método es considerado como el primer análisis a realizar antes de cualquier otro análisis confirmatorio (cuantitativo). Dentro de este análisis exploratorio gráfico se recomienda utilizar la gráfica de series en tiempo, para observar claramente las tendencias, la irreversibilidad, y la intermitencia de los datos (Castro y Carvajal, 2010: 17).

El análisis de la gráfica en series de tiempo consiste en graficar en un sistema de coordenadas cartesianas la información hidrológica histórica, en el eje de las abscisas representa el tiempo y en el eje de las ordenadas los valores de las precipitaciones que

pueden estar a escala diaria, mensual, anual, etc. El análisis es de manera rápida y directa porque se identifica de manera visual los periodos donde la información es dudosa, que pueden reflejar “picos” muy altos o valores muy bajos lo que representaría como saltos y/o tendencias los cuales se debe antes debe comprobarse si realmente son fenómenos que han ocurrido o han sido productos de errores sistemáticos (Villón, 2016: 310).

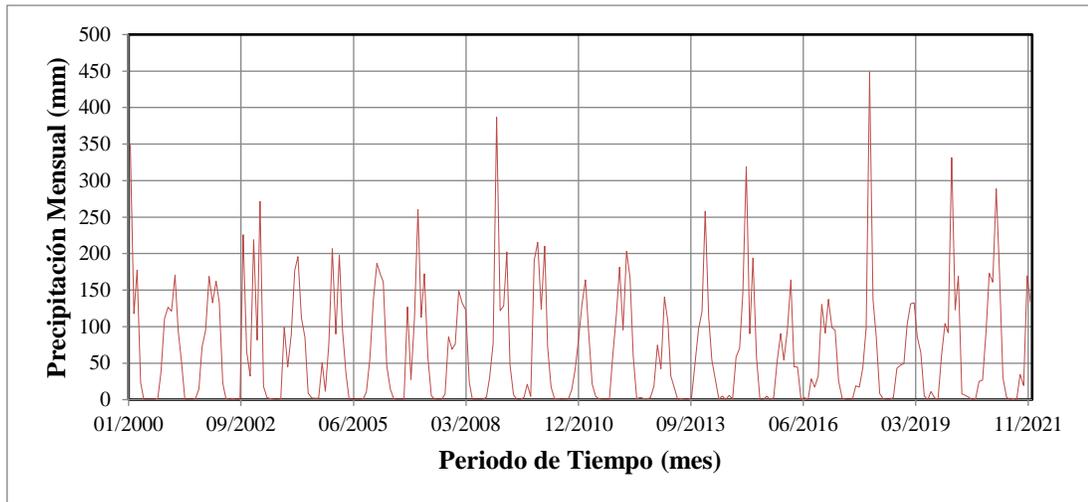


Figura 2.15: Análisis visual – gráfico.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.8.2. Análisis Doble Masa

Es un método utilizado también para verificar la homogeneidad de los datos de precipitación en una estación pluviométrica cuando se quiere verificar si hubo alguna anomalía (quebres) durante algún periodo, tal como el cambio de la estación, cambio de las condiciones del aparato registrador, construcciones en el área circundante (Monsalve, 1999: 84).

El diagrama de doble masa se obtiene graficando en el eje de las abscisas los valores acumulados de precipitación de la estación base y en el eje de las ordenadas los valores acumulados de precipitación de la estación a controlar.

La estación base es considerada como la estación confiable porque presenta el menor número de quebres en una gráfica donde se plotean en el eje de las abscisas los valores acumulados de los promedios de los datos de precipitación de las estaciones pluviométricas y en el eje de las ordenadas los valores acumulados de precipitación de cada estación pluviométrica respectivamente (Villón, 2016: 313).

Mediante el análisis de la curva de doble masa se identifican los “quebres” que se presentan, por lo que se obtiene los periodos dudosos y confiables de cada estación para poder ajustar los valores (Chereque, 2003: 26).

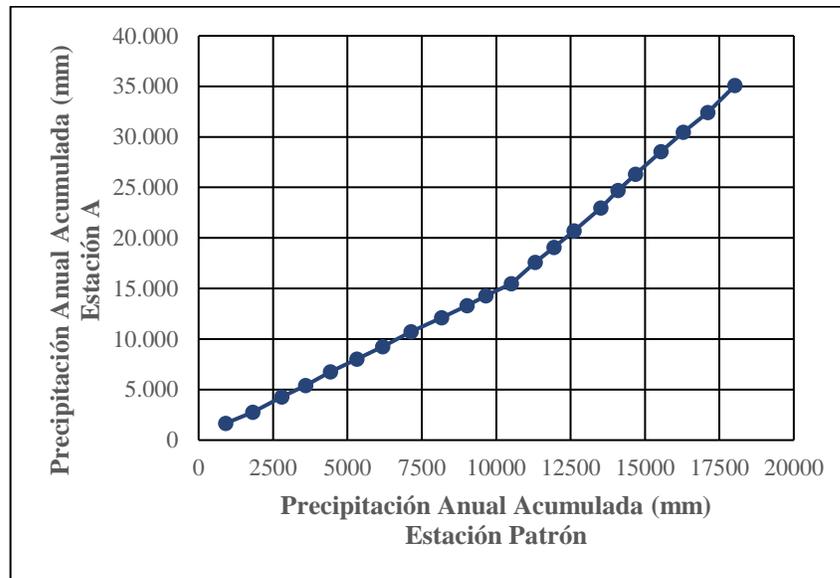


Figura 2.16: Análisis de Doble Masa Estación Patrón vs Estación A.
Fuente: Elaboración Propia.

2.2.8.3. Análisis estadístico

Posterior a la aplicación del análisis gráfico y doble masa conviene realizar un análisis más riguroso, partiendo de las técnicas estadísticas, con el fin de detectar si la serie no presenta saltos, tendencias y es homogénea los cuales son supuestos necesarios para el análisis o empleo de los datos observados en estudios hidrológicos, teniendo certeza de que la información es confiable (Villón, 2016: 315).

El análisis estadístico o también conocido como análisis confirmatorio está basado en diversas funciones de distribución para poder describir su comportamiento estadístico, aunque la mayoría de los modelos suponen una distribución normal de la variable (Castro y Carvajal, 2010: 18).

Esto implica realizar una prueba estadística para aceptar o rechazar una hipótesis nula en función a una probabilidad de ocurrencia. Si dicha probabilidad es pequeña, entonces los datos son inconsistentes y no homogéneos, si es grande entonces se confirma que la serie de datos es homogénea.

Aunque para realizar el análisis confirmatorio, se dispone de diversas pruebas estadísticas tanto paramétricas como no paramétricas. Para utilizar una u otra depende de la cantidad

y calidad de la información disponible, así como del cumplimiento del supuesto de normalidad en la distribución de los datos.

Las pruebas paramétricas en su mayoría suponen que los datos se asemejan a una distribución normal, lo que hace que sean sensibles a la cantidad de datos, las asimetrías y la presencia de datos atípicos. Por otro lado, las pruebas no paramétricas no requieren suposiciones de normalidad o sobre ninguna otra distribución conocida. Además, en la mayoría de los casos, los resultados estadísticos proceden a partir del proceso de ordenación y recuento de los datos (Castro y Carvajal, 2010: 18).

Entre las pruebas paramétricas utilizadas para el análisis cuantitativo para comprobar la homogeneidad de los datos se tiene: regresión lineal, Desviación Acumulada, Worsley Likelihood y Student's t. Y las pruebas no paramétricas utilizadas son: Mann – Kendall, Spearman's Rho, Cusum, Rank sum.

2.2.8.4. Software Hydraces

El Hydraces es un paquete informático perteneciente al IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo), desarrollado por el Ingeniero Hidrólogo Philippe Vauchel.

Es un software completo, homogéneo y fácil de usar, permitiendo poder importar y almacenar diversos tipos de datos hidrológicos en una base de datos en formato Microsoft Access, así también como análisis básicos que un hidrólogo pueda requerir. Su uso es gratuito y se encuentra disponible en el idioma Francés, inglés y español.

En la mayoría de los procesamientos que realiza este software, presenta los resultados, creando archivos Excel (a veces en formato Word para tablas de anuario). Así también permite obtener tablas de datos y gráficos elaborados que pueden ser personalizados para la presentación en informes.

Entre los usos que ampliamente tiene el software en la hidrología, se utiliza para hacer control de calidad de la información al momento de realizar análisis o usar datos observados de variables hidrológicas y climáticas. El software proporciona gráficos de series de tiempo que pueden estar a escala diaria, mensual o anual, haciendo un análisis gráficos - visual, con el fin de comprobar saltos y/o tendencias durante todo el periodo de medición.

También se puede aplicar otros métodos de cálculo como el MVR (Método de Vector Regional), que está orientado a tres tareas definidas: la crítica de datos, la homogeneización y la extensión – competición de datos de precipitación (Vergara, 2015: 2).

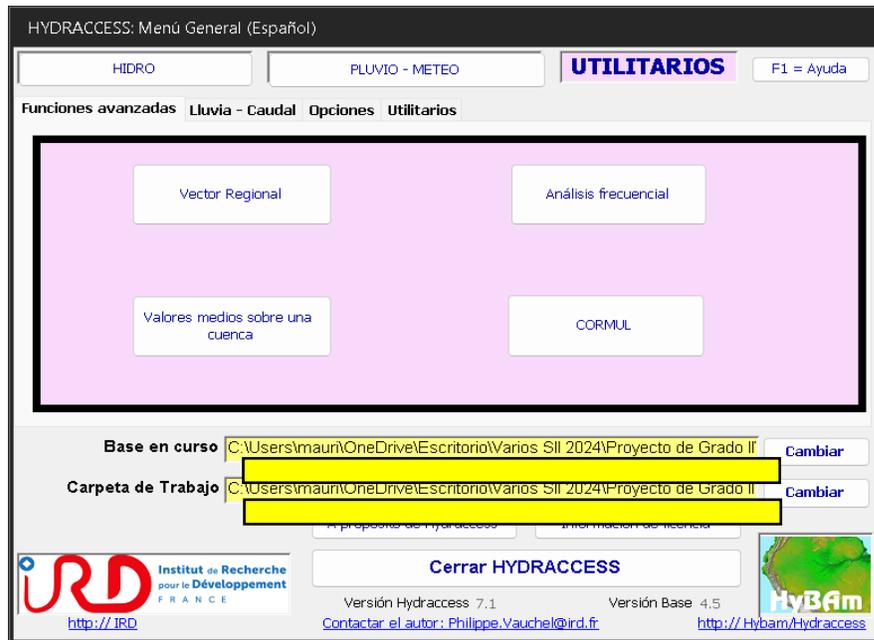


Figura 2.17: Menú general del Software Hydraccess.
Fuente: Elaboración propia

2.2.8.5. Software Trend

El Trend es un software creado para evaluar e identificar saltos y/o tendencias mediante pruebas estadísticas de los cambios y aleatoriedad en series de tiempos hidrológicas. Este software cuenta con 12 pruebas estadísticas que fue basado en la presentación de un taller mediante un trabajo que fue realizado por expertos de la OMM y UNESCO sobre la tendencia, detección de cambio en series de tiempo hidrológicos (Vergara, 2015: 4).

Las 12 pruebas estadísticas con las que cuenta el software Trend son las siguientes:

- Pruebas de Tendencias
 1. Prueba de Mann-Kendall (No Paramétrica)
 2. Spearman´s Rho (No Paramétrica)
 3. Regresión lineal (Paramétrica)
 - Pruebas de quiebres de Medias/Medianas
 4. Cusum (No Paramétrica)

5. Desviación acumulativa (Paramétrica)
6. Relación de probabilidad de Worsley (Paramétrica)
 - Pruebas de diferencias de Medias/Medias
7. Rank-sum (No Paramétrica)
8. T de Student (Paramétrica)
 - Pruebas de Aleatoriedad
9. Cruce de mediana (No paramétrica)
10. Puntos de inflexión (No paramétrica)
11. Diferencia de filas (No paramétrica)
12. Autocorrección (Paramétrica)

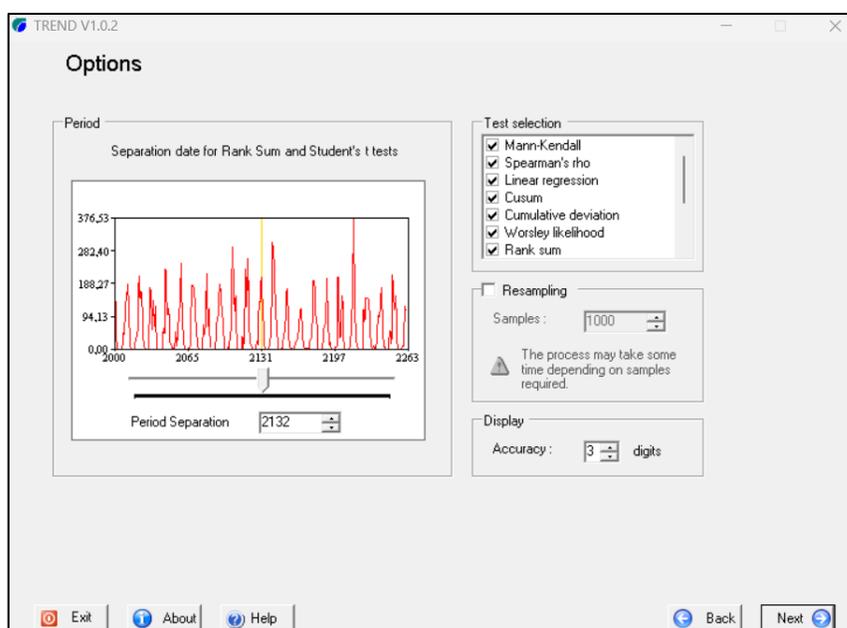


Figura 2.18: Interfaz Software Trend.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.9. Análisis estadístico de la magnitud de las precipitaciones

Los productos satelitales realizan las mediciones de manera indirecta (siendo la radiación la principal cantidad observada), para la aplicación de sus datos estimados es primordial validar y cuantificar su calidad de medición respecto a las mediciones realizadas en la superficie que cumplen la función principal para poder realizarlo (OMM, 2017: 933).

Para evaluar el desempeño de las mediciones del producto satelital en cuanto a la magnitud de precipitaciones, se emplea fundamentalmente el error medio (EM), error medio

absoluto, error medio absoluto relativo (EMAR), eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE), Sesgo (Bias) y el coeficiente de correlación de Pearson (r) (Jiménez, 2023: 66).

Asimismo, se tendrá en cuenta los siguientes términos: P_t es el valor de la precipitación de la estación en tierra en mm, \bar{P}_t el promedio de los valores de precipitación de la estación en tierra en mm, P_{sat} es el valor de la estimación de la precipitación del satélite en mm, \bar{P}_{sat} el promedio de los valores de las precipitaciones de las estimaciones del satélite en mm y N el número de pares de datos.

2.2.9.1. Error Medio (EM)

Mide el error promedio de la estimación del satélite con respecto a la estación. El valor perfecto es 0.

$$EM = \frac{1}{N} * \sum (P_{sat} - P_t)$$

2.2.9.2. Error Medio Absoluto (EMA)

Mide el error promedio de las diferencias absolutas de la estimación del satélite con respecto a la estación. El valor perfecto es 0.

$$EMA = \frac{1}{N} * \sum |P_{sat} - P_t|$$

2.2.9.3. Error Medio Absoluto Relativo (EMAR)

Mide el error promedio de la estimación del satélite con respecto a la estación (en fracción). El valor perfecto es de 0.

Su fórmula es la siguiente:

$$EMAR = \frac{1}{N} * \sum \frac{|P_{sat} - P_t|}{\bar{P}_t}$$

2.2.9.4. Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE)

Mide el ajuste de las estimaciones con respecto a la media de los valores observados (estaciones). Si el valor es negativo, significa que el valor medio observado es mejor predictor que las estimaciones satelitales, si es igual a 0, quiere decir que el valor medio observado es tan bueno como las estimaciones satelitales y si es 1 quiere decir que las estimaciones satelitales tienen una coincidencia perfecta con los valores observados por las estaciones.

Su fórmula es la siguiente:

$$Eff = 1 - \frac{(\sum(P_{sat} - P_t)^2)}{(\sum(P_t - \bar{P}_t)^2)}$$

2.2.9.5. Sesgo (BIAS)

Mide la correspondencia entre el valor medio de las estimaciones satelitales y de las estaciones. El valor perfecto es de 1.

Su fórmula es la siguiente:

$$Bias = \frac{\sum P_{sat}}{\sum P_t}$$

2.2.9.6. Coeficiente de Correlación de Pearson (r)

El coeficiente de correlación se encarga de medir el grado de asociación dos variables linealmente relacionadas (Villón, 2016: 269). Sus valores varían de - 1 a 1. Si el valor de $r = 0$ significa que no existe correlación lineal. Si $r = - 1$ o 1 , entonces existe una correlación positiva o negativa perfecta.

Su fórmula es la siguiente:

$$r = \frac{N * \sum P_{sat} P_t - \sum P_{sat} \sum P_t}{\sqrt{(N \sum P_{sat}^2 - (\sum P_{sat})^2)(N \sum P_t^2 - (\sum P_t)^2)}}$$

2.2.10. Análisis estadístico de la detección de días de precipitación.

Para evaluar el desempeño de las mediciones del producto satelital en cuanto a la detección de días de precipitaciones, se emplea fundamentalmente la Probabilidad de detección (POD), Relación de falsa alarma (FAR), Puntaje de amenaza equitativo (ETS), Discriminador de Hansen y Kuipers (HSS), Puntaje de habilidad de Heidke (HK) y Frecuencia de Bias (FB) (Jiménez, 2023: 66).

Asimismo, se tendrá en cuenta los siguientes términos: A representa los aciertos (el satélite detecta precipitación y la estación en tierra también), B representa la falsa alarma (el satélite detecta precipitación, pero la estación en tierra no). C representa las pérdidas (el satélite no detecta la precipitación, pero la estación en tierra sí) y D representa no eventos (El satélite no detecta la precipitación y la estación en tierra tampoco).

2.2.10.1. Probabilidad de Detección (POD).

Es la proporción de eventos medidos por la estación que fueron estimados por el satélite.

El valor perfecto es de 1 (Jiménez, 2023: 69).

Su fórmula es la siguiente:

$$POD = \frac{A}{(A + C)}$$

2.2.10.2. Relación de Falsa Alarma (FAR).

Es la proporción de eventos estimados por el satélite, que no fueron medidos por la estación. El valor perfecto es de 0.

Su fórmula es la siguiente:

$$FAR = \frac{B}{(A + B)}$$

2.2.10.3. Puntaje de Amenaza Equitativo (ETS).

Proporción de eventos medidos por la estación y que fueron estimados por el satélite correctamente (ajustados por aciertos relacionados con probabilidad aleatoria). El valor perfecto es de 1.

Su fórmula es la siguiente:

$$ETS = \frac{A - A_r}{(A + B + C - A_r)}$$
$$A_r = \frac{((A + C)(A + B))}{N}$$

2.2.10.4. Discriminador de Hansen y Kuipers (HSS).

Mide la proporción de aciertos del satélite (después de eliminar los aciertos asociados a la probabilidad aleatoria). El valor perfecto es de 1.

Su fórmula es la siguiente:

$$HSS = \frac{(2 * (AD - BC))}{((A + C)(C + D) + (A + B)(B + D))}$$

2.2.10.5. Puntaje de Habilidad de Heidke (HK).

Mide que tan bien el satélite estima los eventos y no eventos de precipitación. El valor perfecto es de 1.

Su fórmula es la siguiente:

$$HK = \frac{A}{(A + C)} - \frac{B}{(B + D)}$$

2.2.10.6. Frecuencia de Bias (FB).

Relación entre la frecuencia de eventos estimados por el satélite y los observados por la estación. El valor perfecto es de 1.

Su fórmula es la siguiente:

$$FB = \frac{A + B}{(A + C)}$$

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico es la explicación de los mecanismos utilizados para el análisis de la problemática de la investigación. El resultado de la aplicación, sistemática y lógica, de los conceptos y fundamentos expuestos en el marco teórico. Es importante comprender que la metodología de la investigación es progresiva, por lo tanto, no es posible realizar el marco metodológico sin las fundamentaciones teóricas que se van a justificar el estudio del tema elegido (Bautista, 2009: 25).

3.1. Enfoque de la investigación

La presente investigación se ha realizado desde el enfoque cuantitativo porque este estudio se basa en verificar una hipótesis mediante mediciones numéricas de series de datos hidrológicos (precipitaciones diarias) para ser analizados estadísticamente.

3.2. Tipo de la Investigación

Los tipos de investigación están de acuerdo al enfoque que se tenga, para investigaciones cuantitativas, los tipos de investigación pueden ser: exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo, cada una con características diferentes según al estudio que se realice (Pairumani, 2021: 107).

En el presente trabajo el tipo de investigación es correlacional, porque se realizará una comparación estadística de dos fuentes de medición de precipitación diaria, que son las estimaciones que realiza el producto satelital y las estaciones del SENAMHI, con la finalidad de conocer la relación o grado de asociación entre ambas mediciones.

3.3. Diseño de la investigación

El diseño de una investigación se define como el plan o estrategia que se desarrolla para obtener información que se necesita en una investigación y así responder al planteamiento de la misma (Hernández et al., 2014: 128).

En el presente trabajo el diseño de la investigación es no experimental, ya que se llevará a cabo sin la manipulación intencionada de las variables. En este tipo de estudio, se observarán los fenómenos en su entorno natural, específicamente las precipitaciones diarias, para su posterior análisis.

A su vez para este diseño de investigación no experimental este clasificado como transeccional o transversal correlacional, debido a que se recopilará datos de precipitaciones diarias para un determinado periodo de estudio específico y se describirá la correlación entre lo que estima el producto satelital CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) y las mediciones de lluvia realizadas en estaciones meteorológicas en tierra del SENAMHI.

Asimismo, este diseño no experimental, busca proporcionar información valiosa sobre que eficiencia tienen de las mediciones satelitales en las estimaciones de precipitaciones diarias respecto a las mediciones en tierra.

3.4. Método de Investigación

El método de la investigación se define como el camino a través del cual se alcanza un fin, es decir es un procedimiento adecuado para obtener conocimientos sobre un tema en específico.

En el presente trabajo el método de investigación es hipotético – deductivo debido a que se parte de una hipótesis que se admitirá o rechazará según el resultado que se obtenga del análisis - síntesis.

3.5. Población y tipo de muestreo

La población, también denominada universo, se refiere al conjunto, ya sea finito o infinito, de elementos que comparten características comunes y sobre los cuales se busca obtener información en el contexto de una investigación. En este sentido, la población se determina a partir del problema planteado y los objetivos del estudio (Bautista, 2009: 35). La población de estudio de la investigación estará conformada por la totalidad de información de registro de precipitaciones diarias proporcionadas por el SENAMHI (estaciones en tierra) y descargadas de la plataforma Google Earth Engine (producto satelital CHIRPS) para el área de estudio que es la cuenca del río Tolomosa. Para las estaciones del SENAMHI los datos fueron proporcionados a partir del año 1981 debido a que la información del producto satelital cuenta con información desde ese año.

La muestra se define como el subgrupo de la población o universo en el cual se seleccionan los datos que deben ser representativos de está (Hernández et al., 2014: 173).

Para la recolección de la muestra en la investigación se utilizará el método no probabilístico tipo desicional, puesto a que no todas las estaciones poseen registros de

precipitaciones diarias completas por presentar datos faltantes desde el año 1981, por lo cual la muestra será para el periodo donde la mayor cantidad de estaciones coincide en tener un registro completo de precipitaciones, el cual es desde el año 2000 al 2021, siendo este periodo el tamaño de la muestra que será recolectada.

Por lo tanto la muestra será la información recolectada para ambas fuentes (estaciones del SENMAHI y el producto satelital CHIRPS) para el periodo 2000 – 2021, disponiendo con un número de datos de 56098, respectivamente de cada fuente.

3.6. Técnicas de la investigación

La técnica de investigación se define como el procedimiento o forma particular de adquirir datos o información que permitirá comprobar el grado de validez de la hipótesis planteada (Pairumani, 2021: 115).

Para recolectar los datos de precipitación diaria del producto satelital CHIRPS solo se necesitó contar con conexión a internet para la descarga de los datos de la plataforma Google Earth Engine, mientras que, para la información de los datos de precipitación diaria de las estaciones en tierra del SENAMHI, se utilizó un modelo de carta para solicitar los datos y sean proporcionados por los encargados.

3.7. Instrumentos de la investigación

La información de datos de precipitación diaria proporcionada por los encargados del SENAMHI fue adjuntada en formato digital donde la información se encuentra almacenada en planillas del software Excel para cada estación meteorológica solicitada.

3.8. Técnica de procesamiento de datos

La técnica que se utilizó es la estadística descriptiva, que consiste en un conjunto de procedimientos que tienen por objeto presentar masas de datos por medio de tablas, gráficos y/o medidas de resumen.

3.9. Herramienta de procesamiento de datos

Las herramientas utilizadas para el procesamiento de los datos que se utilizó para el presente trabajo fueron los programas Microsoft Office Excel, Arcgis V. 10.5.

3.10. Descripción del desarrollo de la investigación

Para la presente investigación se presenta el siguiente flujograma desde el inicio hasta los resultados.



CAPÍTULO IV

APLICACIÓN PRÁCTICA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Descripción de la zona de estudio

4.1.1. Descripción general

La cuenca del Río Tolomosa se describe como una región constituida en parte por el flanco oriental de la serranía de Sama también por colinas y tierras bajas. Además, de ubicarse el proyecto múltiple de San Jacinto. La altura topográfica varía desde los 4650 m.s.n.m. y 1870 m.s.n.m.

El clima en la zona es templado semiárido, con unas temperaturas medias anuales en el orden de 18° C en la parte baja de la cuenca y 13°C en la parte media de la serranía. Alcanzándose en la parte baja, en verano temperaturas máximas de 39°C y mínimas de hasta -8° C.

La precipitación media anual varía desde los 600 mm en la parte baja del Norte, hasta los 1300 mm en el Sur – Oeste.

4.1.2. Ubicación geográfica

La cuenca del río Tolomosa es un afluente del Río Guadalquivir, el que, al unirse al Río Camacho, forman el Río Tarija, que es afluente del Río Bermejo.

La cuenca del río Tolomosa está ubicada en la parte Sur – Oeste del valle central de Tarija. Sus coordenadas geográficas extremas son: 21°32' y 21°48' de latitud sur y 64°43' y 65°00' de longitud Oeste.

Toda el área de la cuenca se encuentra dentro de la jurisdicción de la provincia Cercado del departamento de Tarija. Los límites Norte, Oeste y Sur son coincidentes con los límites provinciales.

La cuenca desde la naciente del río Sola hasta la confluencia con el Río Guadalquivir tiene un área aproximadamente de 467 km².

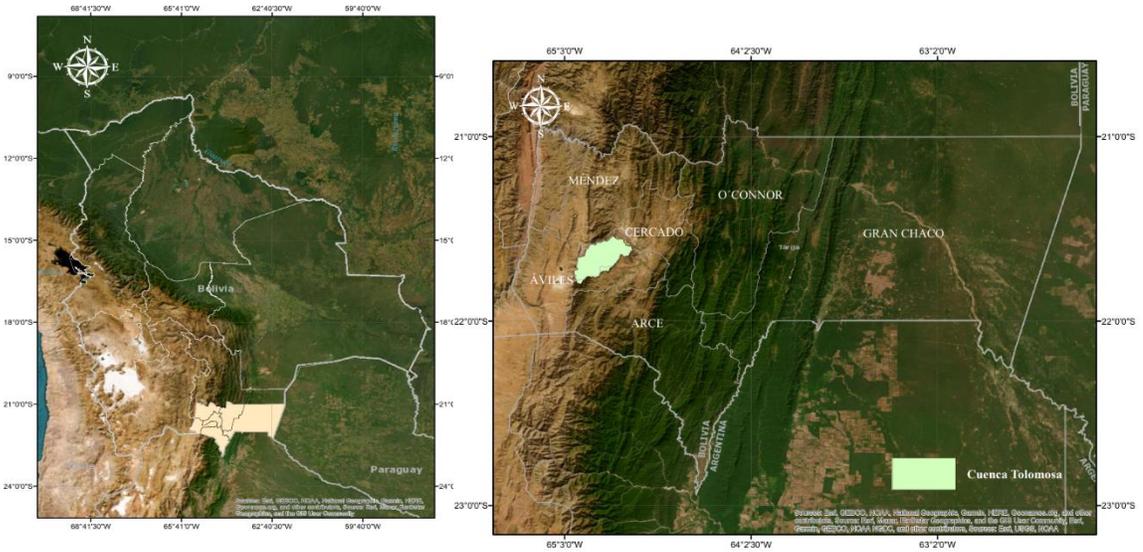


Figura 4.1: Ubicación geográfica de la cuenca del Río Tolomosa.
Fuente: Elaboración propia en Arcgis con imagen satelital extraído del Google Earth.

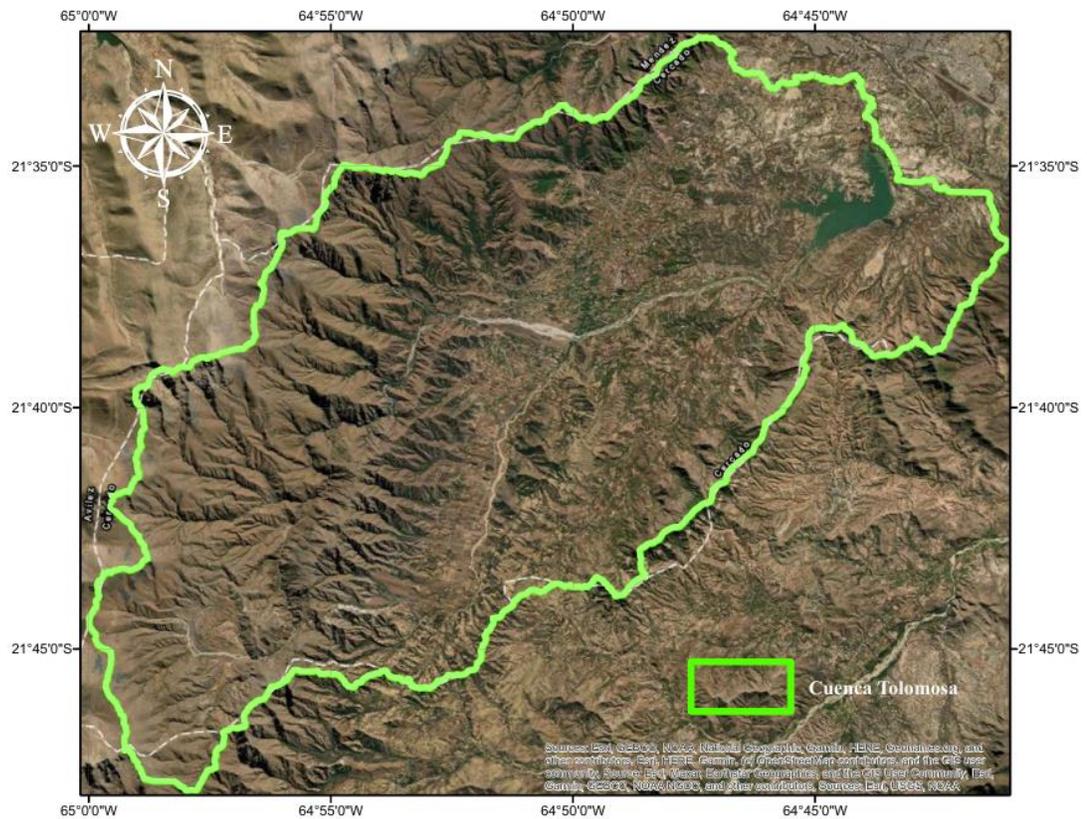


Figura 4.2: Mapa de la cuenca Río Tolomosa.
Fuente: Elaboración propia en Arcgis con imagen satelital extraído del Google Earth.

4.2. Recopilación y análisis de la información de precipitación

4.2.1. Registro Histórico de precipitación de las estaciones en tierra del SENAMHI

La información del registro histórico de los datos de precipitación diaria provenientes de la medición en las estaciones meteorológicas en tierra fue proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para trece estaciones meteorológicas ubicadas en el departamento de Tarija distribuidas entre cuatro provincias, debido a que la cuenca del Río Tolomosa se encuentra en un lugar estratégico donde sus límites fronterizos entre provincias están muy próximos entre sí.

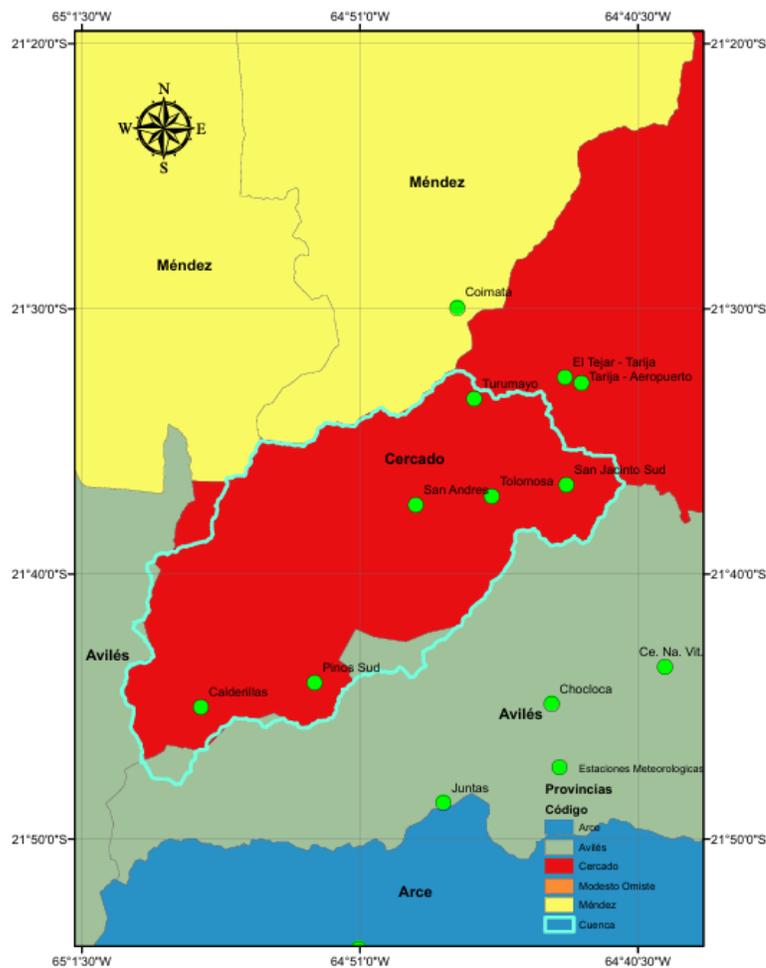


Figura 4.3: Ubicación de las Estaciones Meteorológicas en tierra del SENAMHI

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 4.1 se presenta la información acerca de las estaciones meteorológicas disponibles cercanas y dentro del área de estudio:

Tabla 4.1. Estaciones Meteorológicas disponibles del SENAMHI

Estación	Departamento	Provincia	Latitud “Sur”	Longitud “Oeste”	Altitud m.s.n.m.	Periodo de Medición de Precipitación	
Calderillas	Tarija	Cercado	21,75°	64,95°	2800	1/6/1975	30/7/2003
Cañas	Tarija	Arce	21,90°	64,85°	2078	1/4/1977	31/12/2023
Ce.Na. Vit.	Tarija	Avilés	21,72°	64,65°	1730	1/11/1991	31/9/2020
Chocloca	Tarija	Avilés	21,74°	64,72°	1795	1/4/1975	30/9/2010
Coimata	Tarija	Méndez	21,49°	64,78°	2027	1/1/1980	31/12/2023
El Tejar - Tarija	Tarija	Cercado	21,54°	64,72°	1859	1/1/1970	31/12/2023
Juntas	Tarija	Avilés	21,81°	64,79°	1882	1/4/1975	31/12/2023
Pinos Sud	Tarija	Cercado	21,73°	64,87°	2118	1/2/1972	31/12/2023
Tarija - Aeropuerto	Tarija	Cercado	21,54°	64,71°	1849	1/1/1960	31/12/2023
Tolomosa	Tarija	Cercado	21,61°	64,76°	1900	1/1/1978	31/5/1993
Turumayo	Tarija	Cercado	21,55°	64,77°	1978	1/1/1999	31/12/2023
San Andrés	Tarija	Cercado	21,62°	64,81°	1987	1/7/1975	31/12/2023
San Jacinto Sud	Tarija	Cercado	21,61°	64,72°	1820	1/6/1975	31/12/2021

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.4, se puede observar los registros históricos de precipitación de cada una de las estaciones meteorológicas, donde se puede apreciar que existen estaciones que no tienen continuidad en sus registros históricos teniendo así datos faltantes e incluso algunas estaciones se encuentran inactivas por muchos años, por lo tanto, se seleccionó el periodo 2000 – 2021 porque existe un mayor número de estaciones que coinciden en tener un registro histórico de precipitación completa las cuales son: Aeropuerto – Tarija, Cañas, Coimata, Pinos Sud, San Jacinto Sud, San Andrés y Turumayo.

Las estaciones restantes fueron descartadas por presentar datos faltantes y no se realizó su relleno de datos faltantes porque la cantidad de datos es considerable motivo por el cual podría generar una mayor incertidumbre en la evaluación con los datos satelitales.

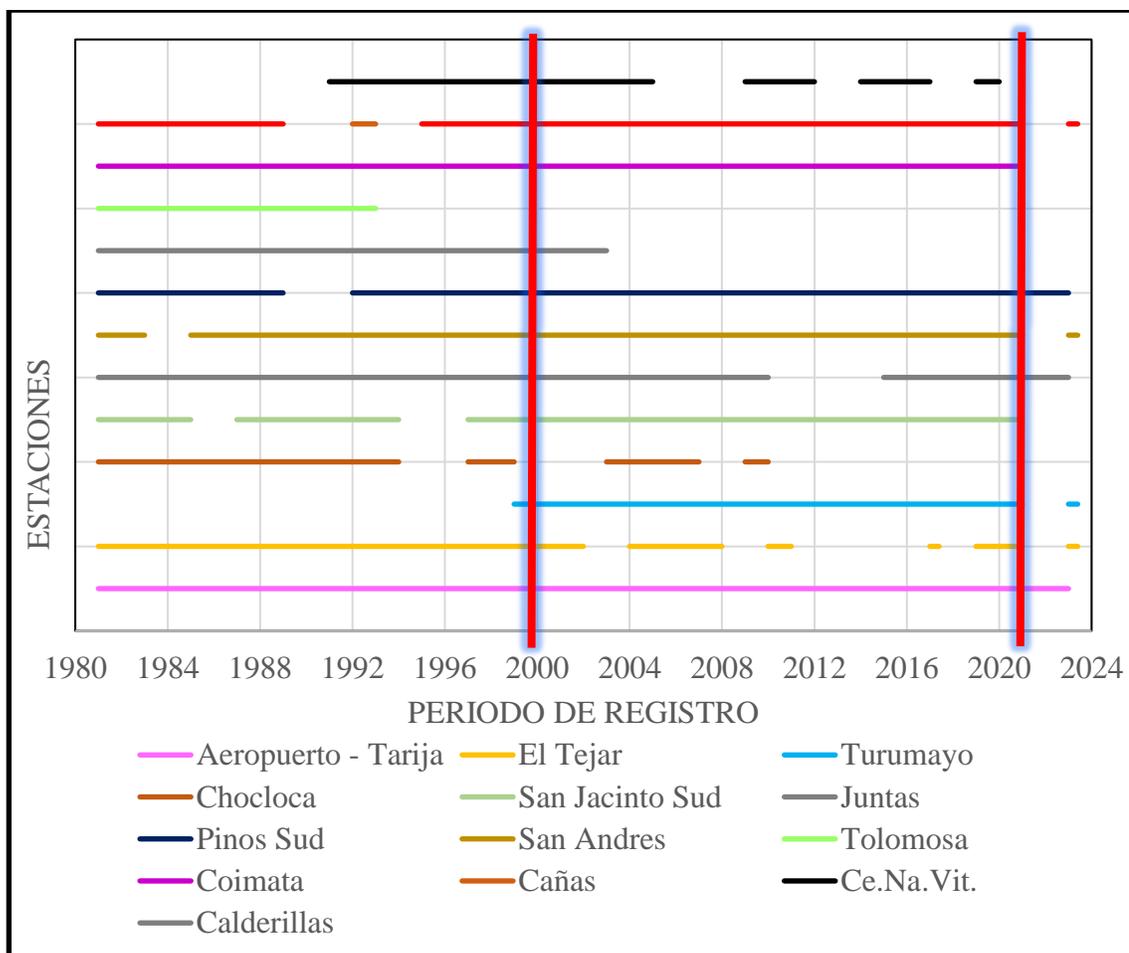


Figura 4.4: Registro Histórico de Precipitación de las Estaciones Meteorológicas Disponibles del SENAMHI
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 4.2 se presentan las estaciones con datos completos de precipitación a nivel diario para el periodo 2000 – 2021:

Tabla 4.2: Estaciones Meteorológicas Sin Datos Faltantes entre 2000 – 2021.

Estación	Departamento	Provincia	Latitud "Sur"	Longitud "Oeste"	Altitud m.s.n.m.	Periodo de Medición de Precipitación	
Cañas	Tarija	Arce	21,90°	64,85°	2078	1/4/1977	31/12/2023
Coimata	Tarija	Méndez	21,49°	64,78°	2027	1/1/1980	31/12/2023
Pinos Sud	Tarija	Cercado	21,73°	64,87°	2118	1/2/1972	31/12/2023
Tarija - Aeropuerto	Tarija	Cercado	21,54°	64,71°	1849	1/1/1960	31/12/2023
Turumayo	Tarija	Cercado	21,55°	64,77°	1978	1/1/1999	31/12/2023
San Andrés	Tarija	Cercado	21,62°	64,81°	1987	1/7/1975	31/12/2023
San Jacinto Sud	Tarija	Cercado	21,61°	64,72°	1820	1/6/1975	31/12/2021

Fuente: Elaboración Propia

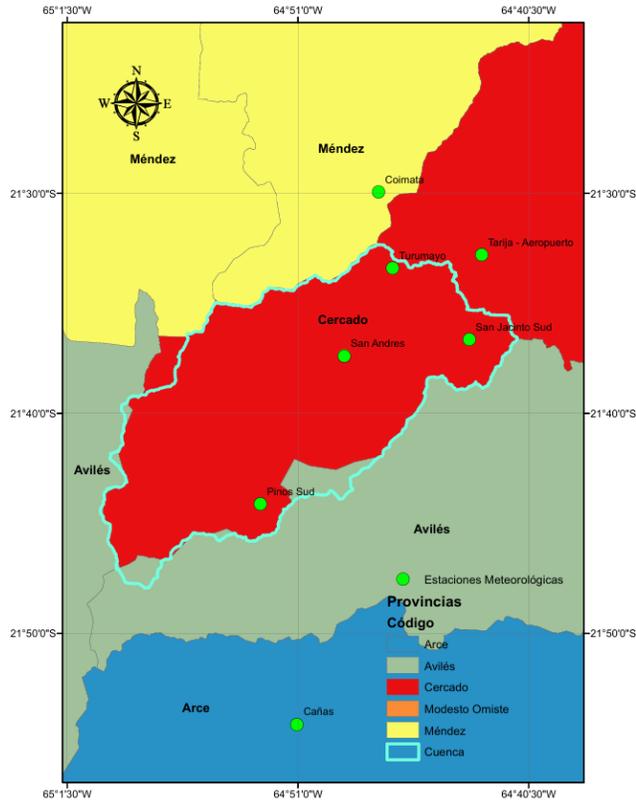


Figura 4.5: Mapa de ubicación Estaciones Meteorológicas con Datos Completos entre el periodo 2000 – 2021
Fuente: Elaboración Propia

Para el proceso del control de la calidad de la información, se recurrió a realizar un análisis de consistencia de los datos de precipitación, motivo por el cual permite saber que tan confiable es la información disponible con la que se cuenta al momento de utilizarla debido a que no se descarta la posibilidad de que haya podido ocurrir un error sistemático o falla humana al momento de registrar los datos durante su medición. Por lo que en el presente trabajo se hizo un análisis de consistencia mediante un proceso Visual Gráfico, Curva de Doble Masa y Estadísticos para detectar si existen algún salto y/o tendencias en los datos de precipitación.

- **Análisis Visual Gráfico**

Mediante el apoyo del software Hydracces se pudo hacer un análisis visual gráfico de la distribución de las precipitaciones mensuales a través del tiempo para el periodo seleccionado 2000 – 2021, este gráfico es analizado de manera independiente para cada estación meteorológica y observar durante todo el periodo si la información pluviométrica presenta “picos” muy altos o valores muy bajos siendo estos saltos y/o tendencias.

En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestra la distribución de precipitación mensual de las estaciones Aeropuerto – Tarija y Coimata que fue realizado por el programa Hydracces, el mismo que será realizado para las demás estaciones meteorológicas (ver Anexo 2).

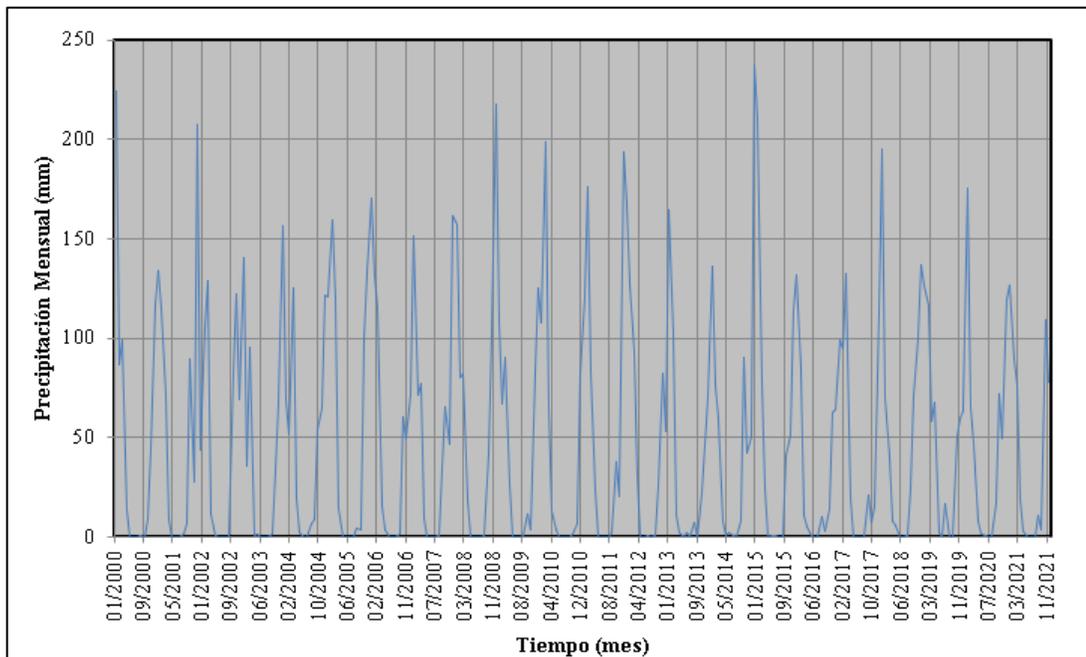


Figura 4.6: Procesamiento Hydracces Análisis de Consistencia Visual Gráfico para la Estación Aeropuerto – Tarija
Fuente: Elaboración Propia

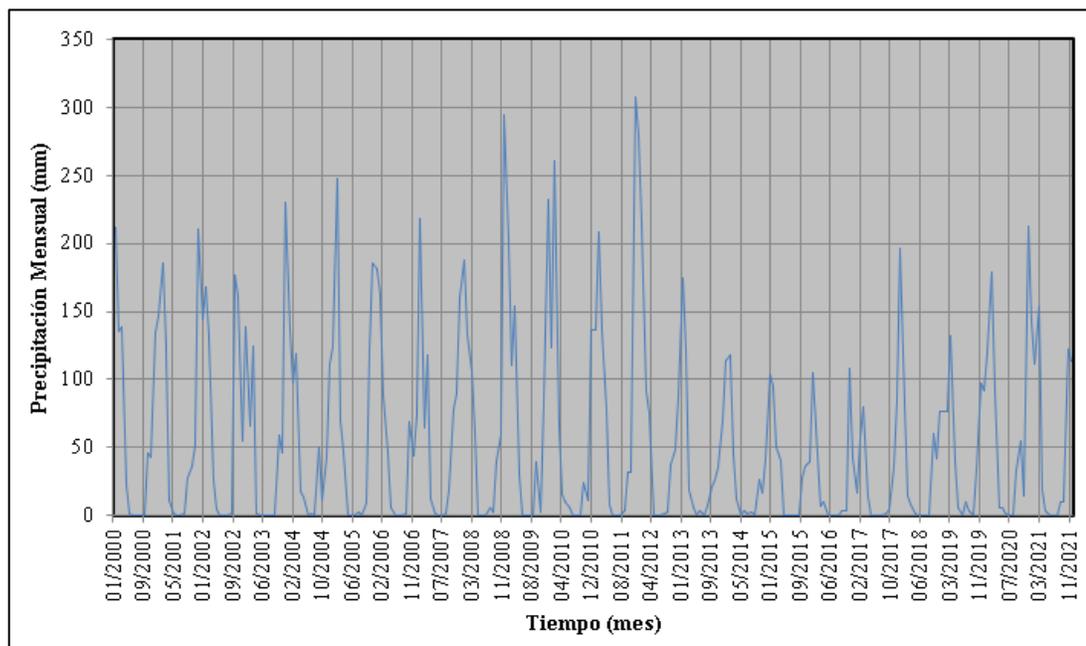


Figura 4.7: Procesamiento Hydracces Análisis de Consistencia Visual Gráfico para la Estación Coimata
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.6, se puede observar que la distribución de precipitación mensual para el periodo 2000 – 2021 en la estación Aeropuerto – Tarija no se verifica cambios significativos en el comportamiento de la precipitación y que los valores mensuales mantienen una distribución promedio, por lo tanto, no se refleja que haya presencia de saltos o tendencias.

En la Figura 4.7 para la estación Coimata se puede apreciar que a partir del año 2014 existe un cambio en el patrón en la distribución de precipitaciones mensuales.

Haciendo una investigación acerca de esta estación, mediante consulta directa a los analistas hidrólogos del Senamhi Tarija, indicaron que físicamente no ha existido un cambio de posición de la estación, descartándose como primer punto de partida de que la variabilidad se haya debido a un posible cambio de condiciones de la estación. Aunque en el mismo documento se indica que el operador encargado de la medición ha hecho un cambio en la probeta del pluviómetro con diferentes dimensiones al que requería durante 3 años, razón por lo que los datos en ese periodo no son homogéneos, confirmándose que se trataría de un error sistemático del equipo.

- **Análisis de Doble Masa**

La curva de doble masa es utilizada también para tener mayor certeza en el análisis de la información, identificando así los quiebres en los diagramas, siendo esto causados por fenómenos naturales o errores sistemáticos, lo que permite determinar los periodos dudosos y confiables.

Para graficar la curva de doble masa se debe elegir una estación patrón o también conocida como estación base, y será aquella que presente menos quiebres en una gráfica también de doble masa realizada, donde en el eje de las abscisas estará los valores acumulados de los promedios de los datos de precipitación de todas las estaciones y en el eje de las ordenadas el acumulado de los valores de precipitación de cada estación respectivamente (Villón, 2016).

En la Figura 4.8, se graficó la curva de doble masa para determinar la estación base que será aquella con menos quiebres y tenga una mejor correlación, este paso se hizo a nivel anual para identificar de mejor manera los quiebres.

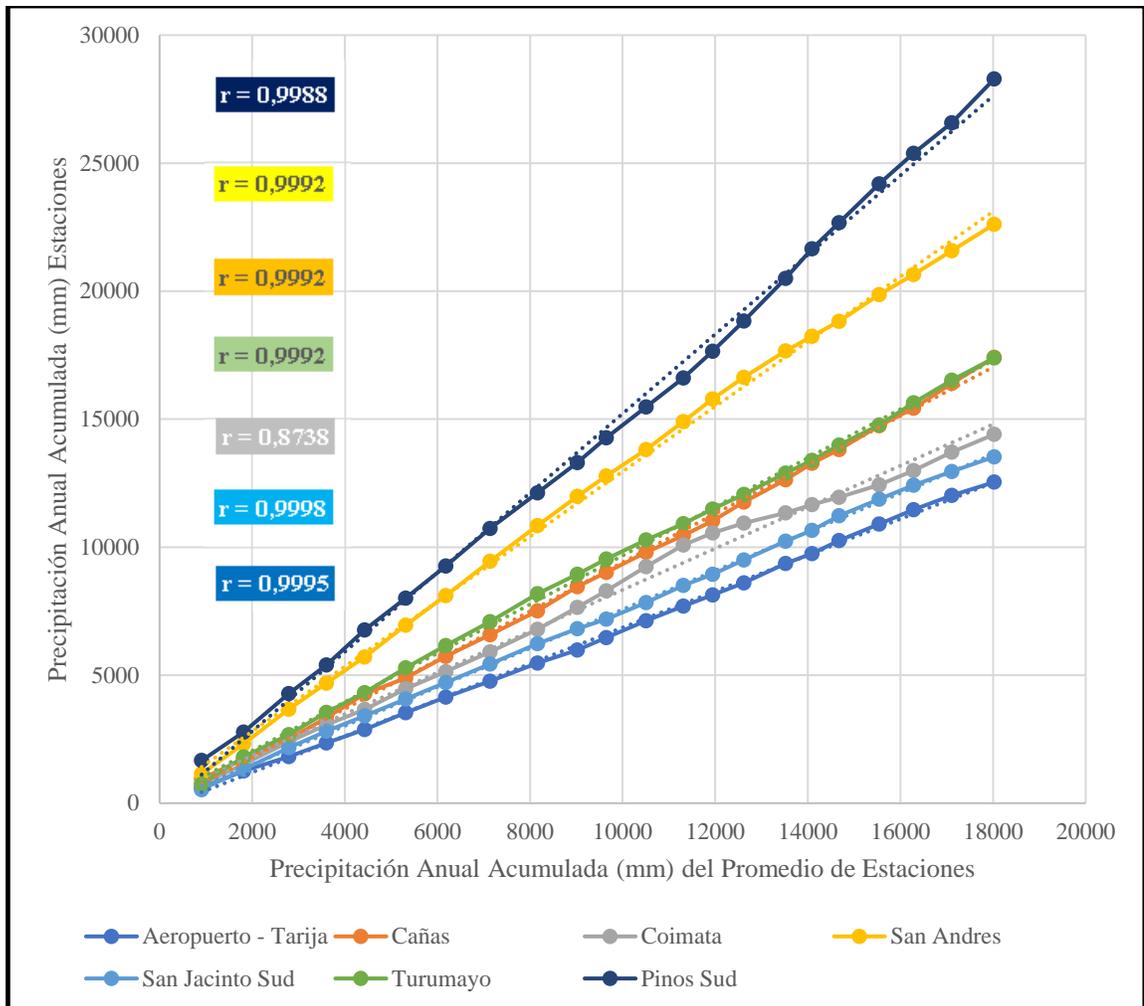


Figura 4.8: Análisis de doble masa para determinar la estación base

Fuente: Elaboración Propia

De la Figura 4.8, se puede observar que la estación con menos quiebres y con una alta correlación es la estación San Jacinto Sud, por lo que se escoge esta estación como la estación base para poder construir los diagramas de doble masa respecto a las otras estaciones.

En las Figuras 4.9 y 4.10 se graficaron las curvas de doble masa para las estaciones Aeropuerto – Tarija y Coimata.

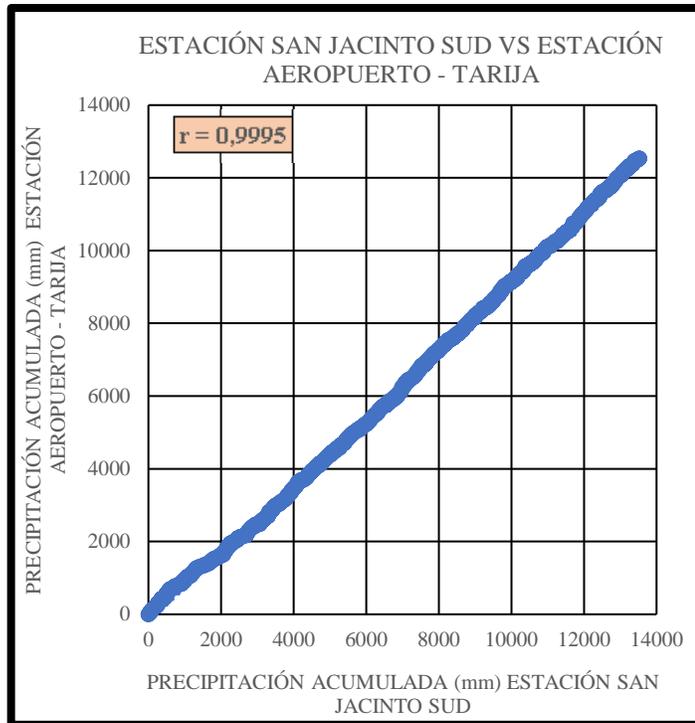


Figura 4.9: Análisis de Doble Masa Estación San Jacinto Sud vs Estación Aeropuerto – Tarija
Fuente: Elaboración Propia

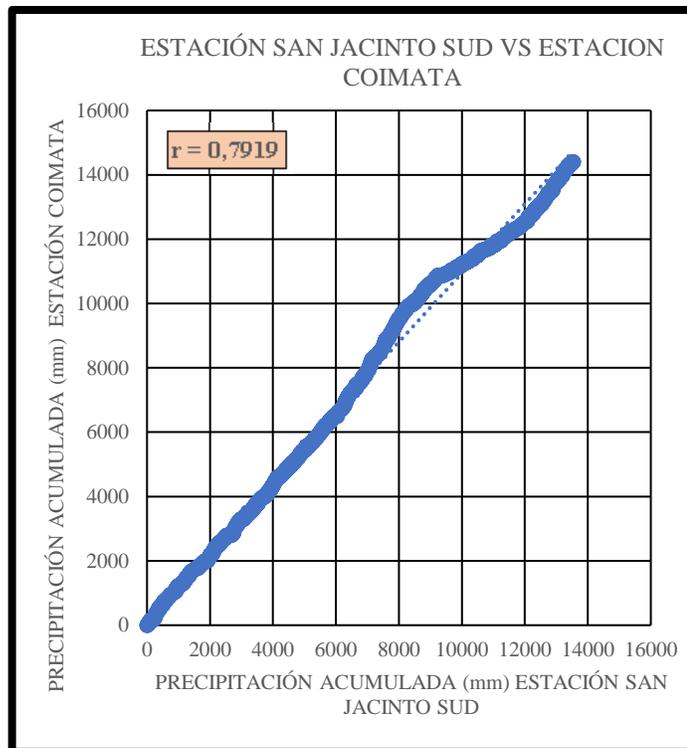


Figura 4.10: Análisis de Doble Masa Estación San Jacinto Sud vs Estación Coimata
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.9, se puede observar que la estación Aeropuerto – Tarija es consistente respecto a los datos de la estación base, por lo que no se aprecia quiebres significativos durante todo el periodo de medición.

Mientras que en la Figura 4.10, la estación Coimata refleja un quiebre bastante significativo, anteriormente en el análisis gráfico visual se identificó esta inconsistencia por lo que mediante la curva de masa doble se observa con mayor precisión donde se presenta el quiebre. Por lo que se realizará su respectiva corrección de los datos aplicando un factor de corrección al periodo más dudoso y no homogéneo (2014 – 2017), aplicando el criterio de la curva de doble masa.

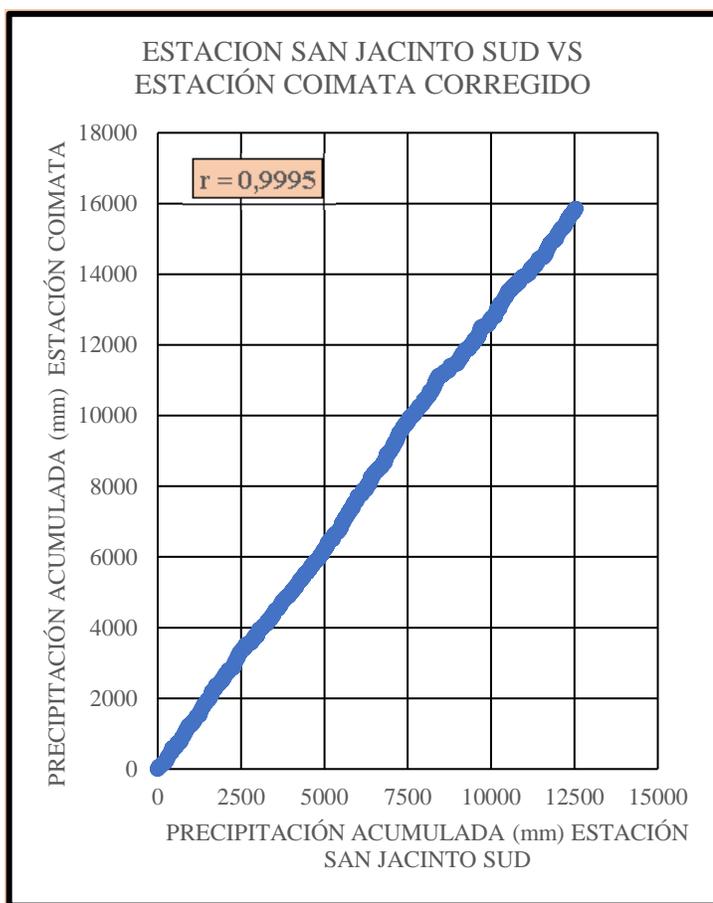


Figura 4.11: Corrección de los datos de la Estación Coimata mediante la curva de doble masa para los años (2014-2017)

Fuente: Elaboración Propia

Factor de Corrección = 1,37

Este procedimiento se realizará de la misma manera para todas las estaciones, verificando así también e identificando los periodos dudosos y no homogéneos para ser corregidos (ver Anexo 3). Como último análisis de consistencia se realizará métodos estadísticos mediante el software Trend con la información corregida mediante la curva de doble masa para verificar con mayor exactitud que todas las estaciones sean consistentes para poder utilizar posteriormente la información en la comparación estadísticas con los datos del producto satelital.

Análisis Estadístico

Mediante el uso del software Trend, se realizará el análisis de consistencia aplicando métodos estadísticos, este software contiene 12 pruebas estadísticas los cuales serán utilizado solo 8 que servirán para identificar saltos y/o tendencias. Para cargar la información en el software se debe crear un formato de tabla como la que se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Datos ordenados de precipitación mensual para el periodo 2000 – 2021 de la Estación Aeropuerto – Tarija para cargar al software Trend.

Ord.	P_{mes} (mm)						
1	224,4	71	99,2	141	1,9	211	0
2	86,6	72	132,8	142	38,1	212	0
3	99	73	170	143	20,4	213	21,4
4	14	74	131,9	144	193,3	214	7
5	0,1	75	115,4	145	168,4	215	15,6
6	0	76	16,1	146	127,4	216	112,9
7	0	77	3,5	147	93,5	217	194,9
8	0,7	78	0	148	30,7	218	69,6
9	0	79	0	149	0,1	219	40,6
10	8,5	80	0	150	0	220	7,9
11	43,7	81	1,4	151	1	221	5,8
12	116,4	82	60,2	152	0	222	0
13	134,1	83	49,7	153	0,5	223	0,1
14	115,1	84	71,3	154	25,2	224	0,9
15	72,2	85	151,5	155	82,1	225	23,9
16	8,7	86	71,5	156	52,8	226	70,5
17	0	87	76,9	157	164,5	227	99,6
18	0,1	88	9,5	158	102,5	228	137
19	0	89	0	159	10,9	229	126,8

20	1,2	90	0	160	2,1	230	116,6
21	6,4	91	0	161	0,2	231	58,3
22	89,5	92	0,7	162	2,3	232	68
23	27,7	93	34,4	163	0	233	2,5
24	207,7	94	65,6	164	7,2	234	0
25	43,5	95	46,9	165	0	235	16,5
26	104,6	96	161,5	166	21,6	236	0,1
27	128,6	97	157,3	167	46	237	0
28	11,7	98	80,4	168	69,7	238	50,3
29	0,4	99	82,1	169	136,4	239	59,5
30	0	100	19	170	76,7	240	63,5
31	0	101	0	171	59,4	241	175,5
32	0,3	102	0	172	7,8	242	65,7
33	0	103	0	173	0,4	243	47,6
34	82,4	104	0,3	174	2,1	244	8,4
35	122,3	105	0,7	175	1	245	1,3
36	68,9	106	41,3	176	0	246	0,5
37	140,4	107	101,3	177	8	247	0
38	35,9	108	218	178	90	248	0
39	95,2	109	107,6	179	42	249	16,8
40	0,6	110	67,2	180	50,1	250	72,4
41	1,6	111	90,6	181	237	251	49,8
42	0	112	27,2	182	211,2	252	119,3
43	0	113	0,2	183	78,8	253	126,5
44	0	114	0	184	24,5	254	89,8
45	1,5	115	0	185	0	255	76,2
46	33	116	0,5	186	0,9	256	18,6
47	66,7	117	11,9	187	1	257	3,2
48	156,7	118	3,6	188	0	258	0
49	69	119	82,4	189	0	259	0,3
50	52	120	125,1	190	40,9	260	0
51	125,4	121	107,4	191	50,8	261	10,8
52	19,5	122	198,9	192	113,9	262	3,6
53	1,9	123	65,9	193	131,5	263	109,2
54	0	124	13,2	194	85,4	264	78,1
55	0	125	3,9	195	10,9		
56	6,4	126	0	196	5,1		

57	8,6	127	0	197	1
58	54,1	128	0,1	198	0
59	64,9	129	0	199	0
60	121,4	130	1,4	200	10,4
61	120,6	131	6,5	201	2,9
62	159,3	132	81,8	202	13,6
63	120	133	119,9	203	62,8
64	14,8	134	176,4	204	63,8
65	0	135	83,5	205	98,7
66	0	136	24,3	206	94,4
67	0,2	137	0	207	132,6
68	0,3	138	0	208	19,7
69	4	139	0	209	0
70	3,8	140	0	210	0

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.12 se presenta la ventana que despliega el software Trend cuando es cargada la información en un archivo Excel en formato CSV delimitado por comas.

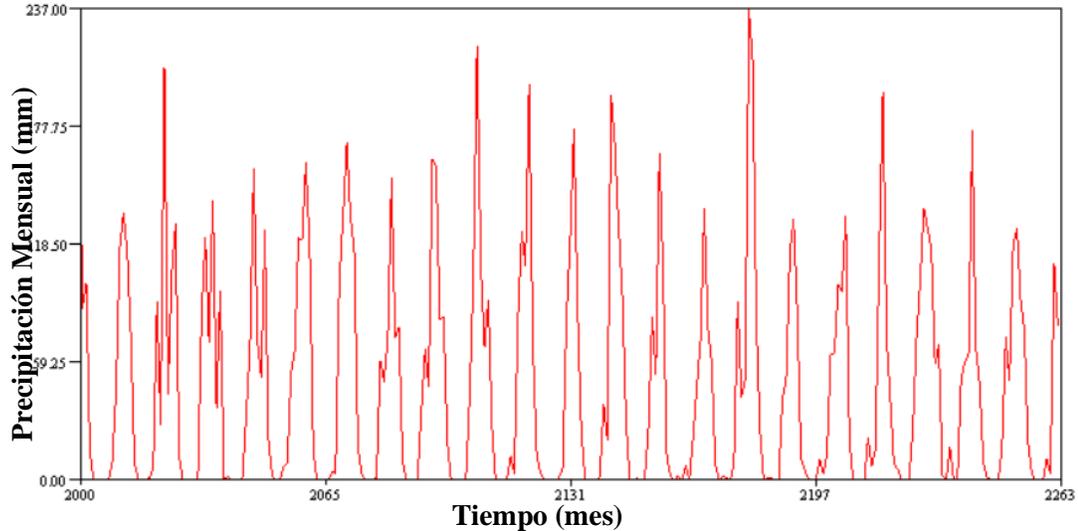


Figura 4.12: Análisis de Consistencia Estación Aeropuerto–Tarija mediante el Software Trend.

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 4.13, el software Trend presenta los 12 estadísticos para hacer el análisis de consistencia, y solo se seleccionó 8 estadísticos, los cuales son: Mann – Kendall, Spearman’s rho, Linear regression, Cusum, Cumulative deviation, Worsley likelihood,

Rank sum y Student's t. Además, para los test de Rank sum y Student's t indica de que periodo a que periodo se analizará.

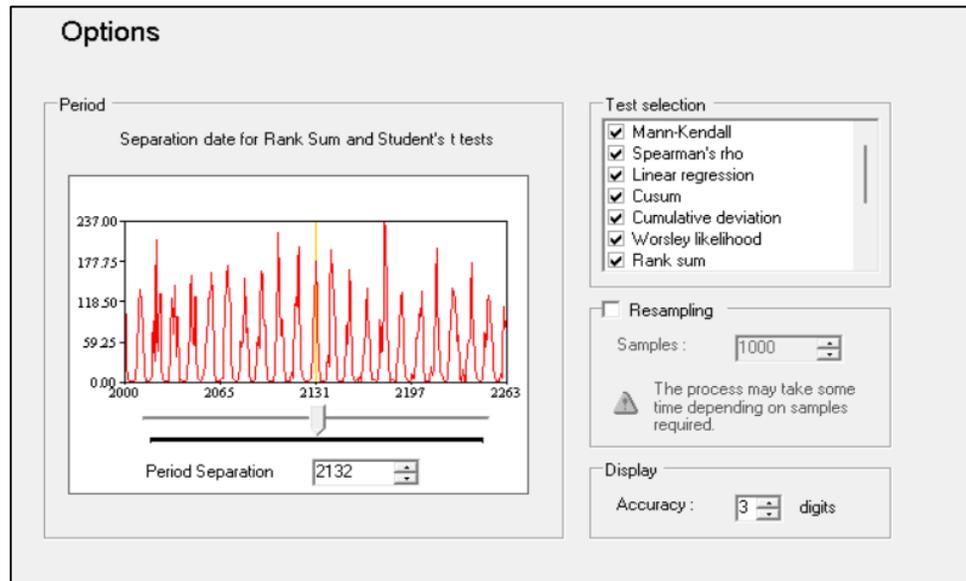


Figura 4.13: Estadísticos seleccionados en el Software Trend.
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 4.4, se presenta los resultados procesados por el software Trend de la estación Aeropuerto – Tarija, para los estadísticos Mann – Kendall, Spearman's Rho, Linear regression, Cusum, cumulative deviation y Worsley likelihood el análisis se hizo para todo el periodo mientras para Rank sum y Student's t se realizó para tres periodos distintos debido a que sus métodos pueden ser analizados de esa manera para un control más riguroso.

Tabla 4.4: Resultados de análisis de consistencia en el software Trend de la estación Aeropuerto – Tarija para el periodo 2000 – 2021.

Estación: Aeropuerto - Tarija									
(Tabla Estadística)									
Test Estadístico	z- statistic	a=0.1	a=0.05	a=0.01	Resultado	Tipo de Prueba	Prueba	Observación	
Mann-Kendall	0,028	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico	TENDENCIAS	No hay Tendencia	
Spearman's Rho	0,636	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico		No hay Tendencia	
Linear regression	-0,653	1,656	1,977	2,61	NS	Paramétrico		No hay Tendencia	
Cusum	6	19,823	22,097	26,484	NS	No Paramétrico	SALTOS	No hay Salto	
Cumulative deviation	0,572	1,179	1,303	1,565	NS	Paramétrico		No hay Salto	
Worsley likelihood	3,147	2,868	3,155	3,79	NS	Paramétrico		No hay Salto	
Fecha de Análisis Para Rank sum y Student's t: Enero 2000 a Junio 2005									
Rank sum	-0,238	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico		No hay Salto	
Student's t	0,504	1,656	1,977	2,61	NS	Paramétrico	No hay Salto		

Fecha de Análisis Para Rank sum y Student's t: Junio 2000 a Diciembre 2010							
Rank sum	-0,734	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico	No hay Salto
Student's t	0,344	1,656	1,977	2,61	NS	Paramétrico	No hay Salto
Fecha de Análisis Para Rank sum y Student's t: Diciembre 2000 a Junio 2016							
Rank sum	0,472	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico	No hay Salto
Student's t	0,595	1,656	1,977	2,61	NS	Paramétrico	No hay Salto
Fecha de Análisis Para Rank sum y Student's t: Junio 2000 a Diciembre 2021							
Rank sum	1,371	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico	No hay Salto
Student's t	-1,149	1,656	1,977	2,61	NS	Paramétrico	No hay Salto

Fuente: Elaboración Propia

Con los resultados presentados en la Tabla 4.4 indica que los valores calculados “a” no son mayores a los valores teóricos de “a” de cada distribución para un nivel de significancia de 0,05; por lo tanto, para la estación Aeropuerto – Tarija se concluye que en el análisis de consistencia no existen ni se presentan saltos o tendencias en sus registros históricos para el periodo 2000 – 2021.

Este proceso es realizado de la misma manera para todas las estaciones (ver Anexo 4).

La Tabla 4.5 muestra un resumen de los resultados de análisis de consistencia de todas las estaciones.

Tabla 4.5: Resultados del Análisis de Consistencia en el Software TREND.

Núm.	Estación	Tendencia	Saltos	Resultados
1	Aeropuerto - Tarija	No Hay Tendencia	No Hay Saltos	Es Consistente
2	Cañas	No Hay Tendencia	No Hay Saltos	Es Consistente
3	Coimata	No Hay Tendencia	No Hay Saltos	Es Consistente
4	Pinos Sud	No Hay Tendencia	No Hay Saltos	Es Consistente
5	San Andrés	No Hay Tendencia	No Hay Saltos	Es Consistente
6	San Jacinto Sud	No Hay Tendencia	No Hay Saltos	Es Consistente
7	Turumayo	No Hay Tendencia	No Hay Saltos	Es Consistente

Fuente Elaboración Propia.

En la Tabla 4.5 se puede observar como resultado final del análisis de consistencia que todas las estaciones son consistentes, y que ninguna estación demuestra presentar saltos y/o tendencias durante todo el periodo 2000 – 2021. La estación Coimata que era la estación que tenía inconsistencia luego de realizar su corrección y verificación mediante métodos estadísticos se concluye que se logró homogeneizar los datos, por lo tanto, es consistente para su uso de la información.

4.2.2. Registro Histórico de Precipitación del Producto Satelital CHIRPS.

La precipitación del producto satelital CHIRPS fue descargada mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE) disponible de forma gratuita en el internet para el periodo seleccionado 2000 – 2021. En la Tabla 4.6 se muestra más a detalle acerca de las características del producto utilizado:

Tabla 4.6: Características del Producto Satelital CHIRPS

Producto Satelital	Nombre Completo	Resolución Espacial	Cobertura Temporal	Resolución Temporal
CHIRPS	Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations	0,05°	1981 - Presente	Diaria

Fuente: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY

La información diaria del producto satelital CHIRPS corresponde al acumulado de precipitación desde las 00:00 a las 24:00 en hora UTC - 0 (Universal Time Coordinated); mientras que en Bolivia tiene un UTC – 4, es decir que la hora boliviana se encuentra cuatro horas desfasadas respecto al UTC – 0.

Además, las estaciones del SENMAHI toman como día pluviométrico desde la 08:00 am de un día hasta las 08:00 am del otro día. Por tanto, en base a esto, el producto satelital CHIRPS mide la precipitación acumulada para un día con cuatro horas adelantadas respecto a la hora del día pluviómetro en Bolivia.

En la Figura 4.14, se muestra el código de JavaScript para la descarga de los datos en la plataforma GEE.

```
var chirps = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY')
    .filter(ee.Filter.date('2015-05-01', '2016-05-03'));
var precipitation = chirps.select('precipitation');
var paleta = {
  min: 1,
  max: 1400,
  palette: ['001137', '0aab1e', 'e7eb05', 'ff4a2d', 'e90000'],
};
Map.addLayer(precipitation, paleta, 'Precipitation');
var Estación = /* color: #d63000 */ee.Geometry.Point([-64.999902, -21.500036]);
Map.addLayer(Estación);
```

Figura 4.14: Código JavaScript para la descarga de datos en GEE.

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la Figura 4.14, la primera variable es la que se encargan de poder solicitar al servidor el producto satelital CHIRPS indicando el intervalo de tiempo para el que se descargara los datos, en la segunda variable se pide específicamente que se proporcione los datos de precipitación del producto satelital CHIRPS, en la tercera variable se pide que se muestre a través de una paleta de colores la grilla de precipitación cuasi global y la última variable especifica la ubicación del punto de interés (estación meteorológica) del cual se extraerán los datos satelitales para dicho periodo de estudio.

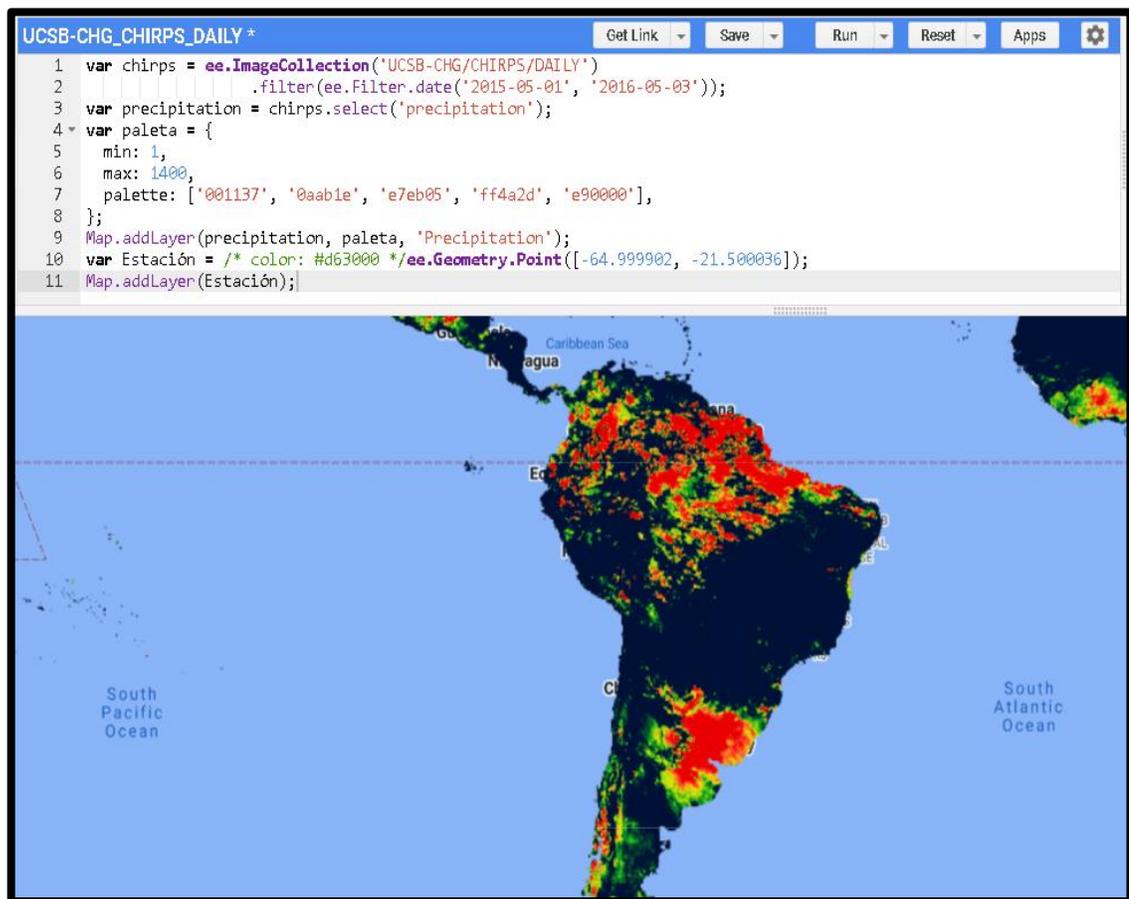


Figura 4.15: Precipitación Satelital CHIRPS en GEE.
Fuente: Elaboración Propia

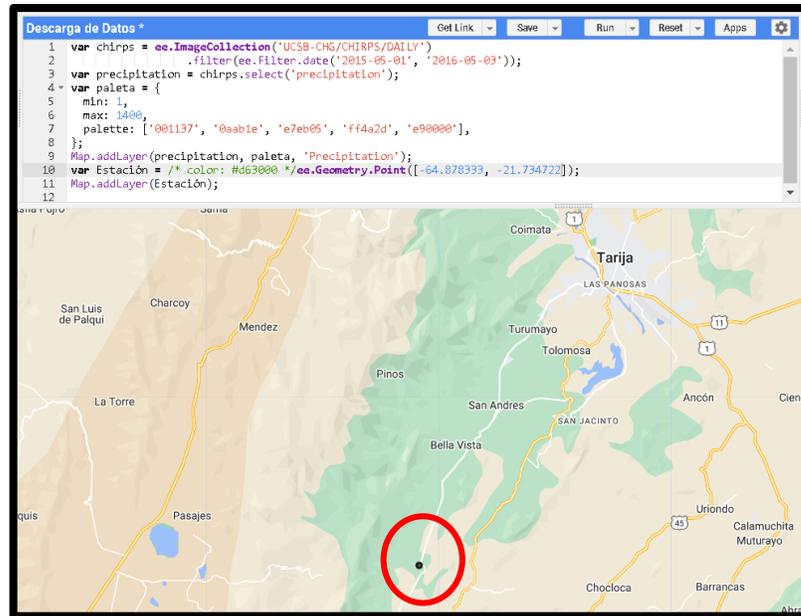


Figura 4.16: Ubicación de la Estación Pinos Sud en GEE para la Descarga de Datos
Fuente: Elaboración Propia

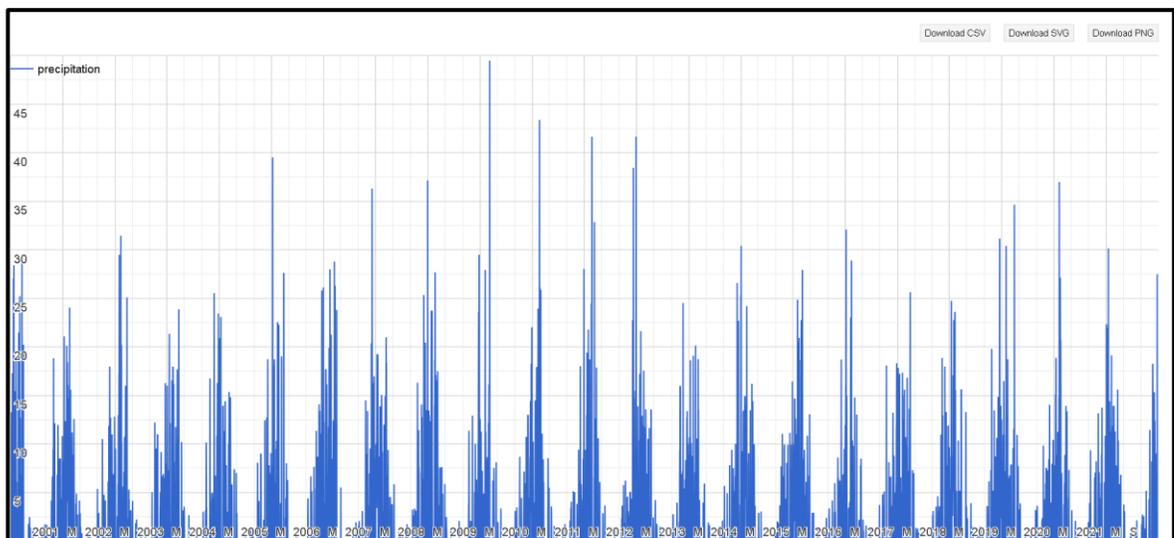


Figura 4.17: Registro Histórico de Precipitación Diaria Satelital CHIRPS Estación Pinos Sud en GEE
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.17, se puede observar que el registro histórico de precipitación satelital para la estación Pinos Sud, tiene como opción de descarga en un formato de archivo Excel obteniendo así los datos diarios para todo el periodo en estudio, de la misma manera se realiza el mismo procedimiento para las demás estaciones meteorológicas.

En la Figura 4.18, se muestra la grilla de precipitación diaria del producto satelital CHIRPS, para la zona de estudio descargada de la misma plataforma en formato NetCDF,

donde se puede apreciar que cada cuadrícula tiene una escala espacial de $0,05^\circ$ y que cada estación se encuentra de manera independiente en una. Para la extracción de datos que se realiza de manera indirecta en el GEE es de forma punto – pixel, es decir se ubica la estación dentro de la grilla de precipitación y se extrae toda la información para todo el periodo en específico mediante el código de JavaScript. Es importante mencionar que el producto satelital CHIRPS mide la precipitación de forma constante en toda el área de la cuadrícula independientemente de donde se ubique el punto, los datos siempre serán los mismos, debido a que una de las características principales del producto satelital es medir la precipitación por áreas de resolución espacial de $0,05^\circ$.

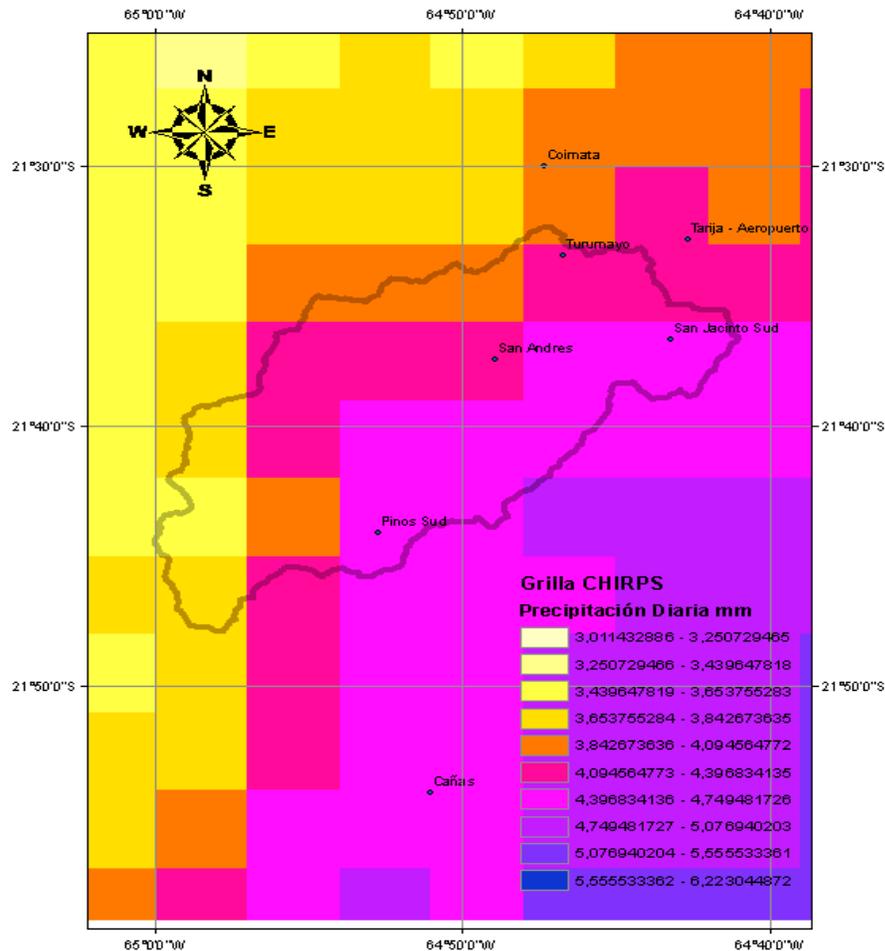


Figura 4.18: Malla de Precipitación Satelital CHIRPS en Arcgis.
Fuente: Elaboración Propia.

En las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21 se graficaron las precipitaciones medias mensuales de las estaciones tierra y el producto satelital CHIRPS para el periodo 2000 – 2021 como una

manera visual de observar si el producto satelital estima las precipitaciones siguiendo el mismo comportamiento de distribución de la lluvia de las estaciones en tierra.

También se realizaron curvas de masa simple entre las estaciones observadas y el producto Satelital CHIRPS correspondiente a dicho periodo en estudio como una forma de evaluar la consistencia de los datos del producto satelital.

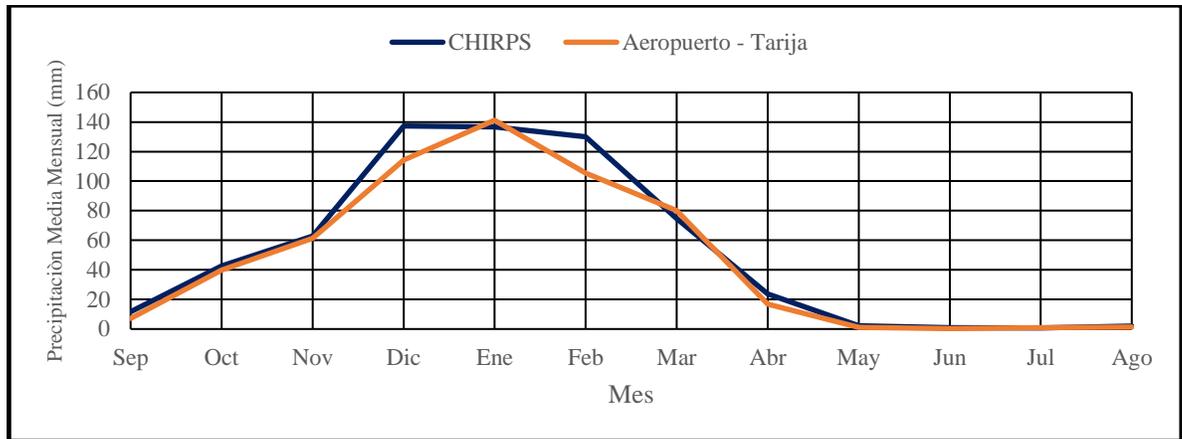


Figura 4.19: Distribución de la precipitación media mensual de la Estación Aeropuerto - Tarija y el producto satelital CHIRPS para el periodo 2000 – 2021.

Fuente: Elaboración Propia.

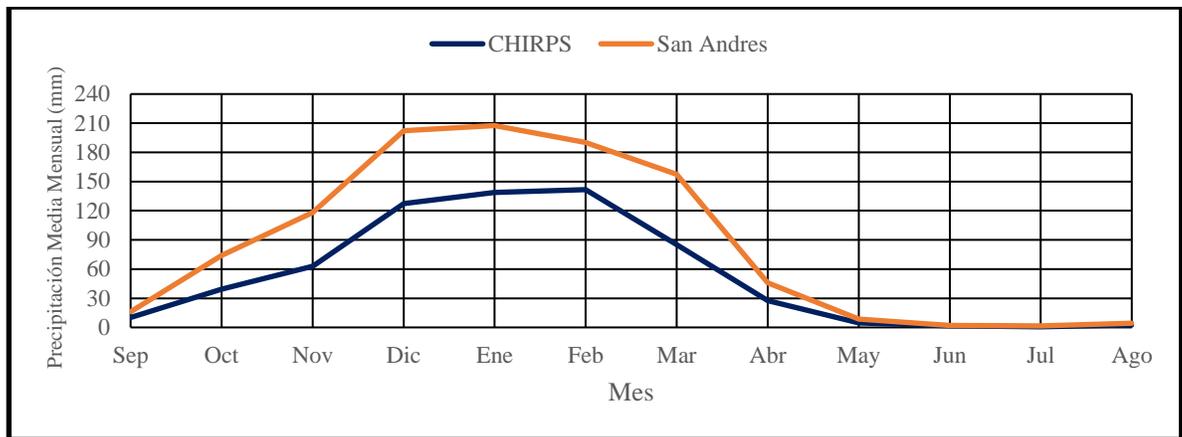


Figura 4.20: Distribución de la precipitación media mensual de la Estación San Andrés y el producto satelital CHIRPS para el periodo 2000 – 2021.

Fuente: Elaboración Propia.

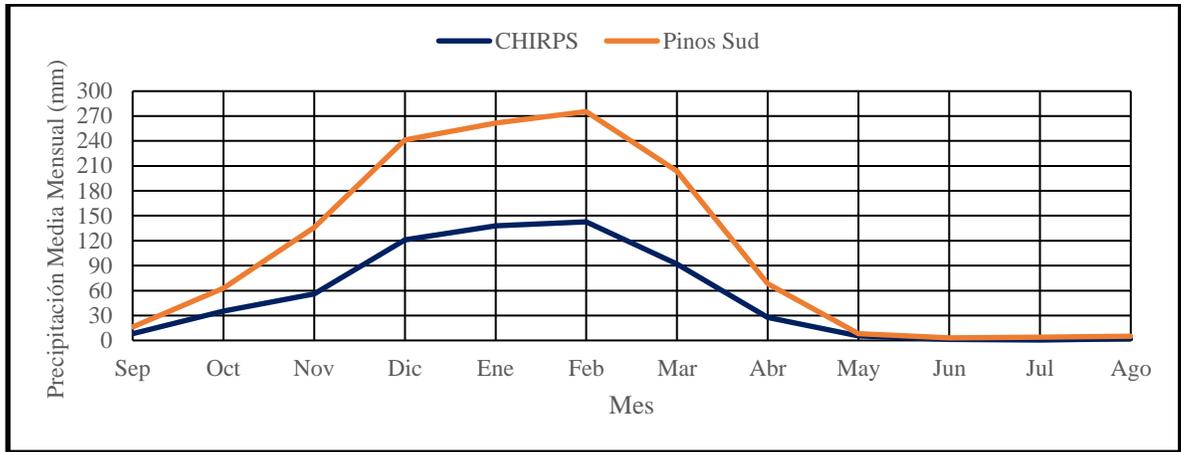
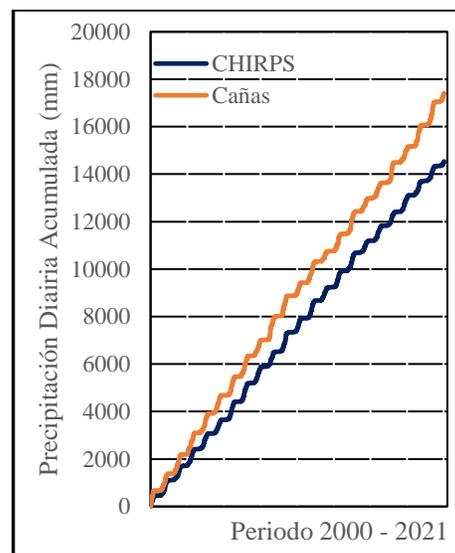
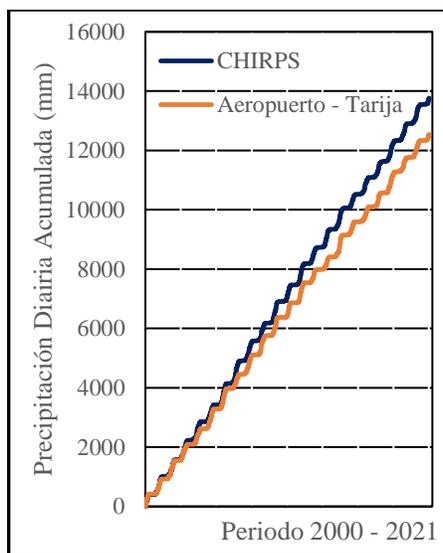


Figura 4.21: Distribución de la precipitación media mensual de la Pinos Sud y el producto satelital CHIRPS para el periodo 2000 – 2021.
Fuente: Elaboración Propia

En las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21 el comportamiento de la distribución de las precipitaciones medias mensuales entre las mediciones en tierra y las mediciones del producto satelital CHIRPS para las estaciones Aeropuerto – Tarija, San Andrés y Pinos Sud siguen un patrón de distribución mensual muy semejante, aunque en magnitud la estación Pinos Sud y la estación San Andrés es donde el producto satelital más subestima a comparación también de las demás estaciones, esta variabilidad de la precipitación puede deberse a muchos factores como: la topografía (montañas, cordilleras cercanas a la estación), el tipo de precipitación en la zona, etc.



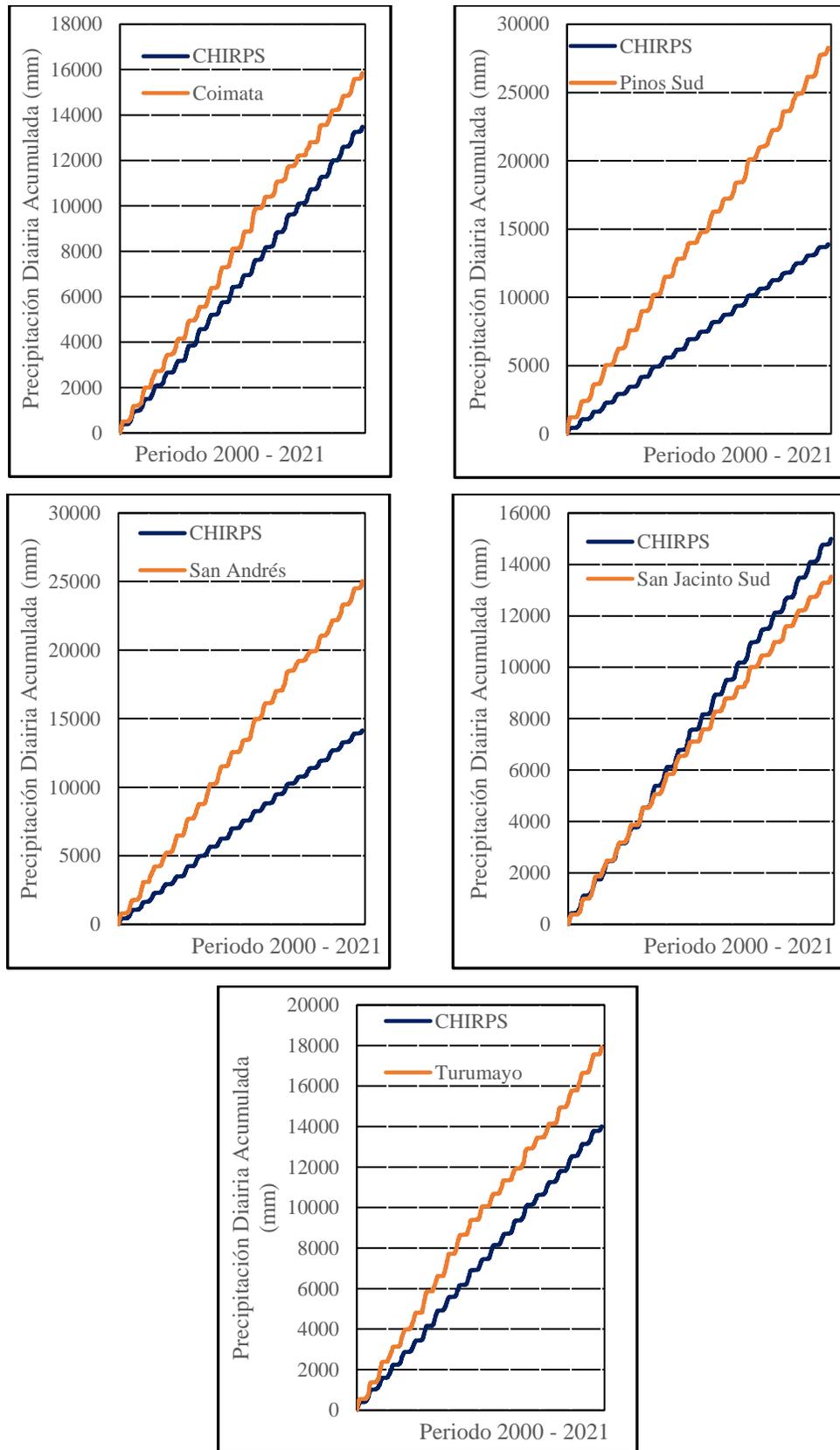


Figura 4.22: Curvas de masa simple entre estaciones tierra y el producto satelital CHIRPS.
Fuente: Elaboración Propia

4.3. Comparación estadística de la información satelital y las estaciones en tierra.

4.3.1. Comparación estadística de la información satelital (magnitud de las precipitaciones).

Se desarrollo la evaluación del desempeño por pares de la cantidad de precipitación estimada por el satélite CHIRPS con respecto a las estaciones en tierra del SENAMHI. La estimación de los parámetros estadísticos fue realizada por punto a pixel, es decir que cada estación en tierra del SENAMHI se comparó con su respectiva celda asociada al producto satelital según su ubicación, tal como se puede como se puede ver en la Figura 4.18.

En la Tabla 4.7, se presenta los resultados de los parámetros estadísticos de la comparación entre las estaciones tierra (estaciones sin datos faltantes) y el producto satelital CHIRPS en la estimación de la magnitud de las precipitaciones diarias para el periodo 2000 – 2021.

Tabla 4.7: Resultados del producto satelital CHIRPS en la estimación de la magnitud de las precipitaciones diarias para cada una de las estaciones tierra entre 2000 y 2021.

Estación	Altura (m.s.n.m.)	EM	EMA	EMAR	NSE	BIAS
San Jacinto Sud	1820	0,18	2,39	2,17	-0,47	1,11
Aeropuerto - Tarija	1849	0,16	2,18	1,96	-0,44	1,10
Turumayo	1978	-0,49	2,78	1,52	-0,22	0,78
San Andrés	1987	-1,18	3,27	1,24	-0,05	0,60
Coimata	2027	-0,31	2,54	1,55	-0,13	0,84
Cañas	2078	-0,36	2,62	1,62	-0,40	0,83
Pinos Sud	2118	-1,81	3,69	1,17	-0,08	0,49

Fuente: Elaboración Propia

Los valores del Error Medio (EM) en la Tabla 4.7 para cada una de las estaciones en tierra indican si los datos de precipitación del producto satelital están subestimando o sobreestimando en promedio. Si los valores son positivos, significa que, durante todo el periodo de estudio de análisis, ha habido una mayor sobreestimación de los datos del producto satelital en comparación con los datos de las estaciones en tierra. Por otro lado, valores negativos indican una mayor subestimación.

Por lo tanto, en la estación Aeropuerto – Tarija, con un valor de EM de 0,16 mm, se observa que, en promedio, las estimaciones de precipitación del producto satelital han sobreestimado más a los datos de la estación. En cambio, en la estación Pinos Sud, el EM es de –1,81 mm, lo que sugiere que, en promedio, las estimaciones del satélite han subestimado más las precipitaciones en comparación con los datos medidos por la estación.

Además, por el tamaño del error para la estación Pinos Sud indica que la diferencia es considerable, y esta causa puede estar relacionado a la topografía ya que es la estación con una mayor altitud y tiene el mayor error medio (EM).

Los valores de Error Medio Absoluto (EMA), por otro lado, mide el promedio de las diferencias absolutas entre las estimaciones del producto satelital y los datos de las estaciones en tierra, este no considera la dirección del error (subestimación o sobreestimación). Entonces los resultados de EMA representan en promedio si la diferencia entre ambas mediciones es grande, desde el punto de vista absoluto.

En la estación Aeropuerto – Tarija con un valor de EMA de 2,18 mm, indica que la diferencia entre las estimaciones del producto satelital y los datos de la propia estación están variando considerablemente, los valores tienden a desviarse en gran mayoría.

En la estación Pinos Sud con un valor de EMA de 3,69 mm, también indica y con mayor magnitud que los datos tienen mucha discrepancia y que según la dirección de su error medio, los datos de precipitación del producto satelital están subestimando mucho respecto a los datos de la propia estación.

Los resultados del Error Medio Absoluto Relativo (EMAR), también está indicando que al igual que EMA la diferencia entre ambas mediciones, tienen variabilidad.

Los valores del coeficiente de Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE) reflejan un bajo ajuste entre las estimaciones de precipitación del satélite y las mediciones en tierra en todas las estaciones analizadas, con resultados inferiores a cero. Esto indica que las estimaciones del producto satelital no logran capturar adecuadamente la variabilidad de las precipitaciones.

Los resultados del BIAS, que mide la correspondencia entre la cantidad de precipitación medida en todo el periodo de estudio, es decir la acumulación de lluvia, revelan que las mayorías de las estaciones presentan valores inferiores a 1. Esto indica que hay una tendencia predominante a la subestimación de las precipitaciones en comparación de las mediciones en tierra. Además, se observa que, a mayor altitud, los valores de BIAS tienden a ser más bajos, lo que sugiere que las estimaciones satelitales son menos precisas y subestiman más en regiones de mayor elevación.

En las Figuras 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27 se puede observar el análisis mensual multianual de los mismos estadísticos en el mismo periodo (2000 y 2021), para observar el desempeño mensual de la estimación de precipitaciones diarias.

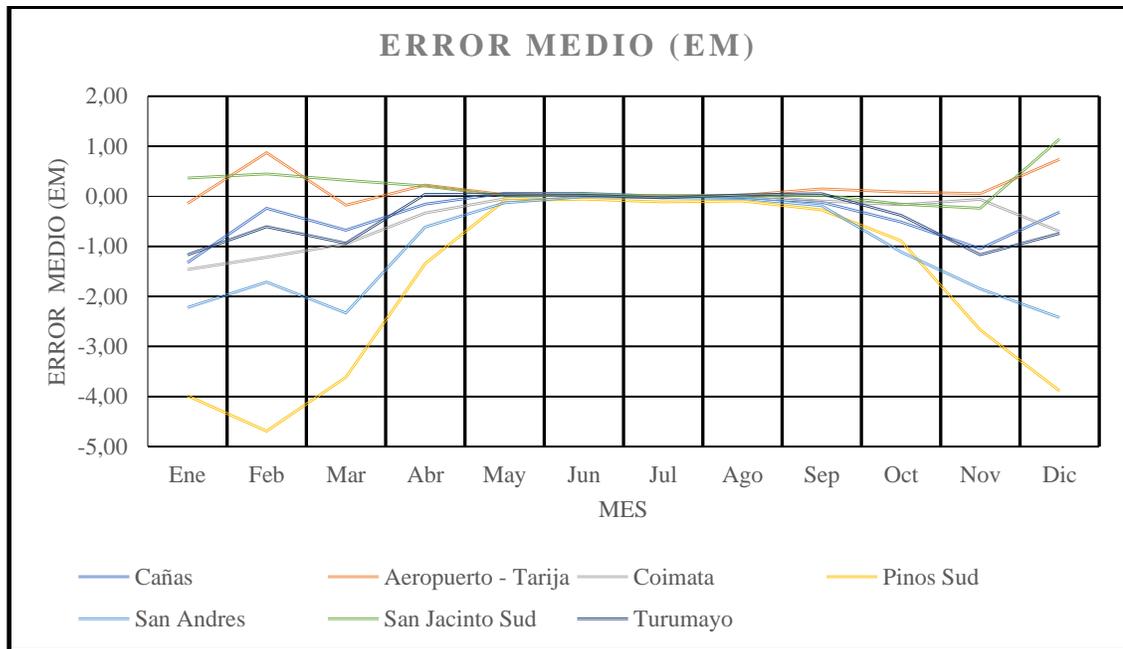


Figura 4.23: Resultados de EM mensual multianual de la estimación de precipitaciones diarias entre producto Satelital y las Estaciones tierra entre 2000 y 2021.
Fuente: Elaboración Propia.

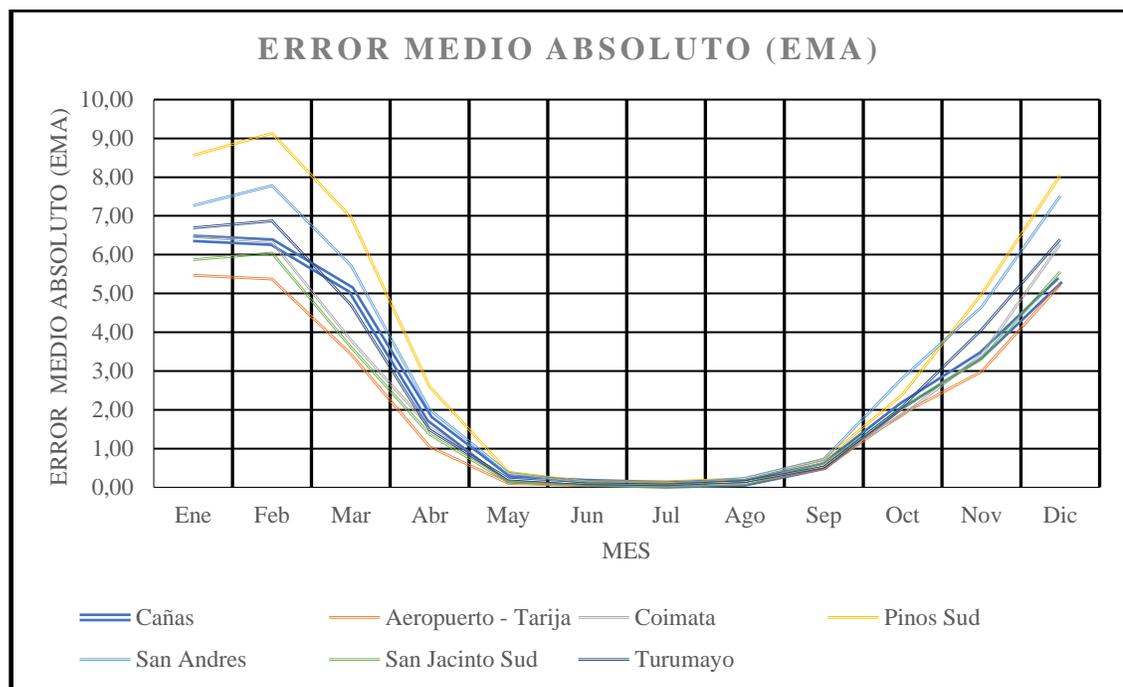


Figura 4.24: Resultados de EMA mensual multianual de la estimación de precipitaciones diarias entre producto Satelital y las Estaciones tierra entre 2000 y 2021.
Fuente: Elaboración Propia.

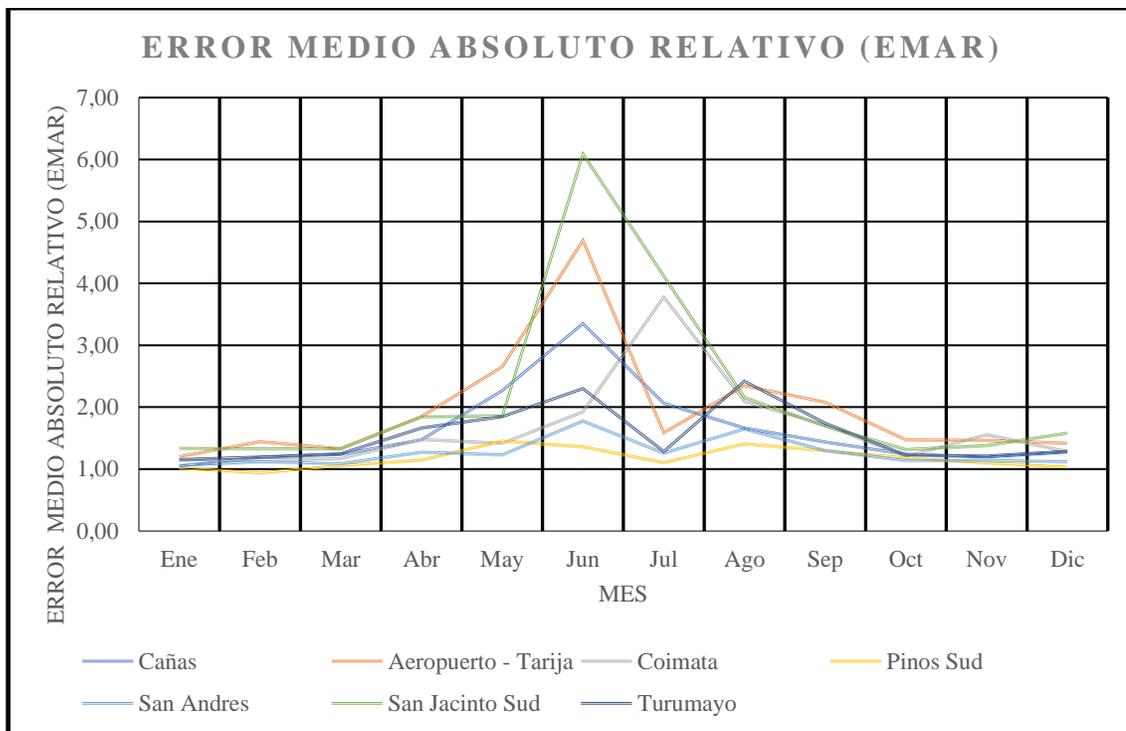


Figura 4.25: Resultados de EMAR mensual multianual de la estimación de precipitaciones diarias entre producto Satelital y las Estaciones tierra entre 2000 y 2021.
Fuente: Elaboración Propia.

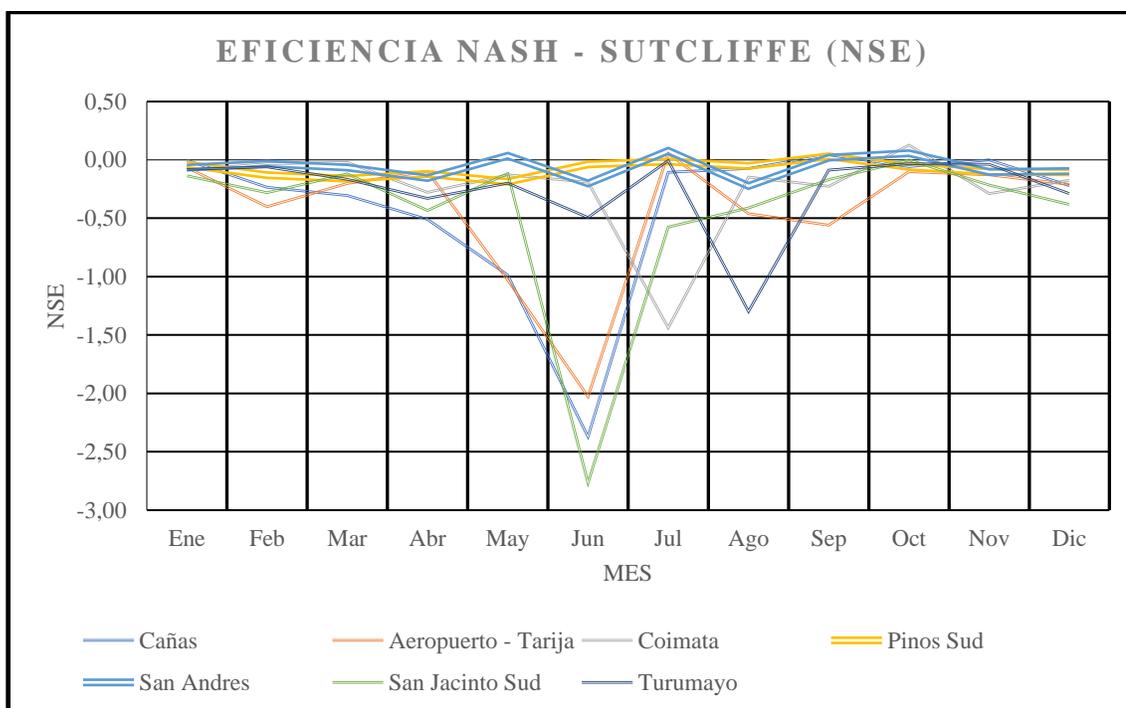


Figura 4.26: Resultados de NSE mensual multianual de la estimación de precipitaciones diarias entre producto Satelital y las Estaciones tierra entre 2000 y 2021.
Fuente: Elaboración Propia.

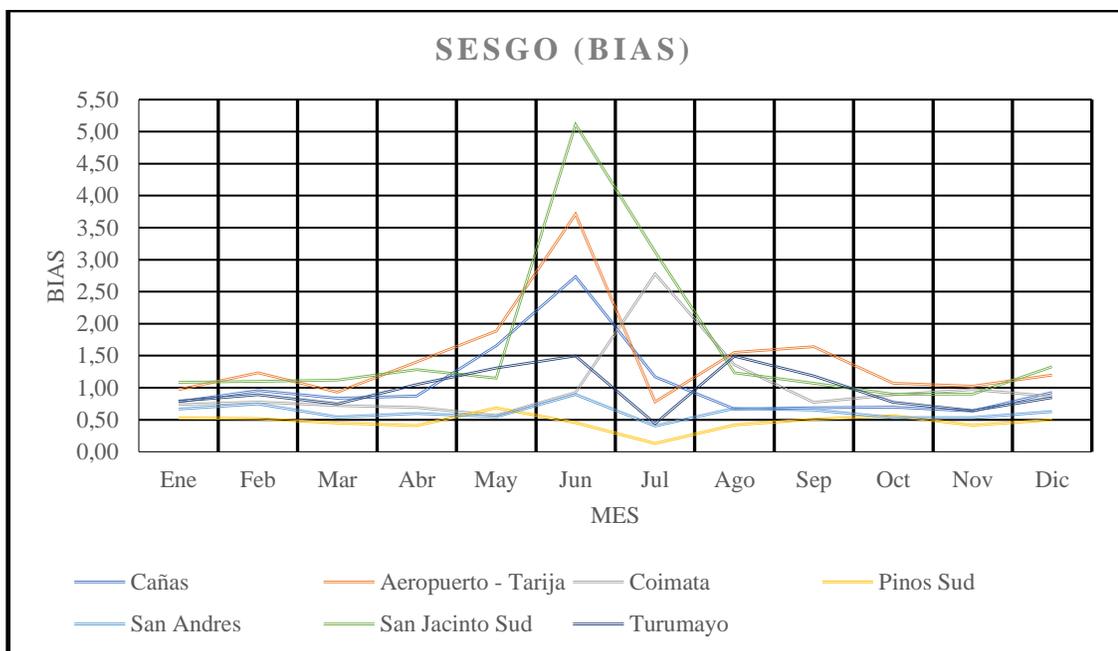


Figura 4.27: Resultados de Bias mensual multianual de la estimación de precipitaciones diarias entre producto Satelital y las Estaciones tierra entre 2000 y 2021.
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la Figura 4.23, se puede observar la distribución del Error Medio (EM) para todos los meses del año durante el periodo 2000 – 2021 son variables, aunque en la mayoría de las estaciones se tienen valores negativos lo cual indica que el satélite tiende más a subestimar en promedio las precipitaciones.

En la Figura 4.25, con el EMAR se puede apreciar de mejor manera durante que meses el error es bastante grande y en que estaciones está sucediendo. La estación San Jacinto Sud es la estación que sobreestima en varios días la precipitación durante los meses secos como también en la estación Aeropuerto – Tarija es por eso que los valores de EMAR son más grandes, mientras que en las demás estaciones durante esos meses la precipitación está siendo subestimada por el producto satelital.

En la Figura 4.24, los valores de Error Medio Absoluto (EMA) en promedio se puede observar que términos absolutos está demostrando que la variabilidad entre las estimaciones del satélite y las estaciones en tierra no está teniendo buen ajuste.

En la Figura 4.26, los resultados del coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe durante todo el año tienen valores por debajo de 0; también es un indicador de que las estimaciones de CHIRPS tanto en los meses húmedos y meses secos tienen bajo ajuste respecto a las mediciones de las estaciones en tierra. Este parámetro estadístico también indica que la

estación San Jacinto Sud está teniendo una pobre estimación en los meses secos, donde el producto satelital está no está captando bien las precipitaciones y que está sobreestimando al igual que las otras estaciones que también tienden a subestimar y/o sobreestimar.

En la Figura 4.27, se puede observar que los valores de Bias tienden a subestimar más en los meses húmedos y en los meses secos tienden a sobreestimar más.

En la Tabla 4.8, se mostrará con más detalle el porcentaje de variación en promedio de los datos de precipitación del producto satelital y las estaciones tierra durante los meses del año para el periodo 2000 - 2021.

Tabla 4.8: Porcentaje de Variación promedio de las precipitaciones diarias entre el producto satelital y las Estaciones tierra entre 2000-2021.

Mes	ESTACIONES						
	San Jacinto Sud	Aeropuerto - Tarija	Turumayo	San Andrés	Coimata	Cañas	Pinos Sud
Ene	Sobreestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima
	14,13%	19,23%	24,09%	35,76%	20,99%	21,62%	47,21%
Feb	Sobreestima	Sobreestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima
	19,90%	23,39%	14,47%	28,73%	14,11%	24,53%	48,17%
Mar	Sobreestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima
	11,82%	6,82%	27,93%	48,04%	28,45%	16,45%	54,96%
Abr	Sobreestima	Sobreestima	Sobreestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima
	28,30%	40,07%	20,99%	42,75%	11,42%	12,78%	59,14%
May	Sobreestima	Sobreestima	Sobreestima	Subestima	Subestima	Sobreestima	Subestima
	14,77%	48,69%	27,24%	48,08%	39,29%	65,61%	31,55%
Jun	Sobreestima	Sobreestima	Sobreestima	Subestima	Sobreestima	Sobreestima	Subestima
	41,16%	47,25%	42,37%	15,98%	21,03%	73,51%	54,66%
Jul	Sobreestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Sobreestima	Subestima
	42,04%	52,04%	59,29%	63,03%	36,61%	16,81%	87,04%
Ago	Sobreestima	Sobreestima	Sobreestima	Subestima	Sobreestima	Subestima	Subestima
	23,37%	55,23%	42,23%	37,53%	65,98%	33,32%	57,91%
Sep	Sobreestima	Sobreestima	Sobreestima	Subestima	Sobreestima	Subestima	Subestima
	6,99%	64,35%	12,81%	38,96%	18,16%	31,17%	49,19%
Oct	Subestima	Sobreestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima
	10,14%	16,91%	25,64%	48,95%	11,10%	30,12%	43,74%
Nov	Subestima	Sobreestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima
	19,90%	12,49%	38,56%	49,19%	18,73%	36,36%	58,76%
Dic	Sobreestima	Sobreestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima	Subestima
	32,63%	20,06%	18,42%	39,52%	19,96%	17,49%	49,93%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la Tabla 4.8, muestran claramente en su mayoría los porcentajes de variación están elevados entre las estimaciones del producto satelital y las mediciones de las estaciones terrestres a lo largo del año.

Por ejemplo, en estaciones con menor altitud como las estaciones San Jacinto Sud y Aeropuerto – Tarija muestran una clara tendencia a sobreestimar las precipitaciones durante todo el año. Los porcentajes de variación alcanzan grandes cifras especialmente en los meses menos lluviosos.

Por otro lado, las demás estaciones con mayor altitud, como Turumayo, Coimata, San Andrés, Pinos Sud y Cañas, muestran una tendencia más inclinada a la subestimación de las precipitaciones. Esta discrepancia es especialmente notable en la estación Pinos Sud, donde el producto satelital subestima las precipitaciones en promedio de aproximadamente 50% durante todo el año. Esta subestimación puede ser crítica, dado a que la estación Pinos Sud se encuentra a una altitud mayor en comparación con las otras estaciones, lo que podría influir en una adecuada estimación por el producto satelital.

En las Figuras 4.28, 4.29 y 4.30 se representa gráficamente las mediciones para un año de los datos de precipitación diaria entre el producto satelital y los datos de la estación Pinos Sud.

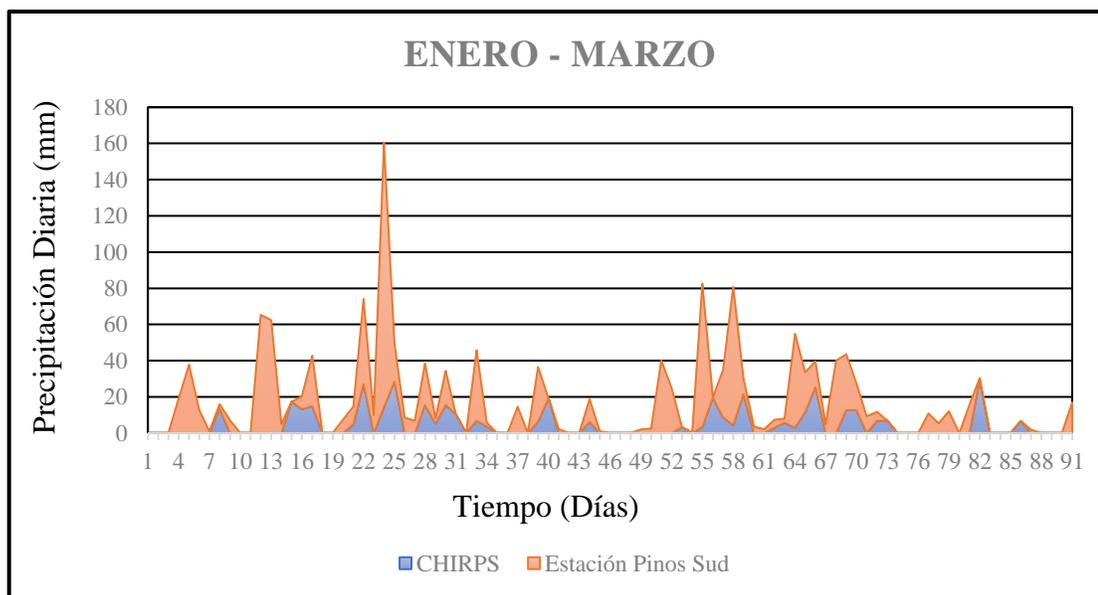


Figura 4.28: Datos de precipitación diaria del producto satelital y la estación Pinos Sud para los meses de enero a marzo.

Fuente: Elaboración propia

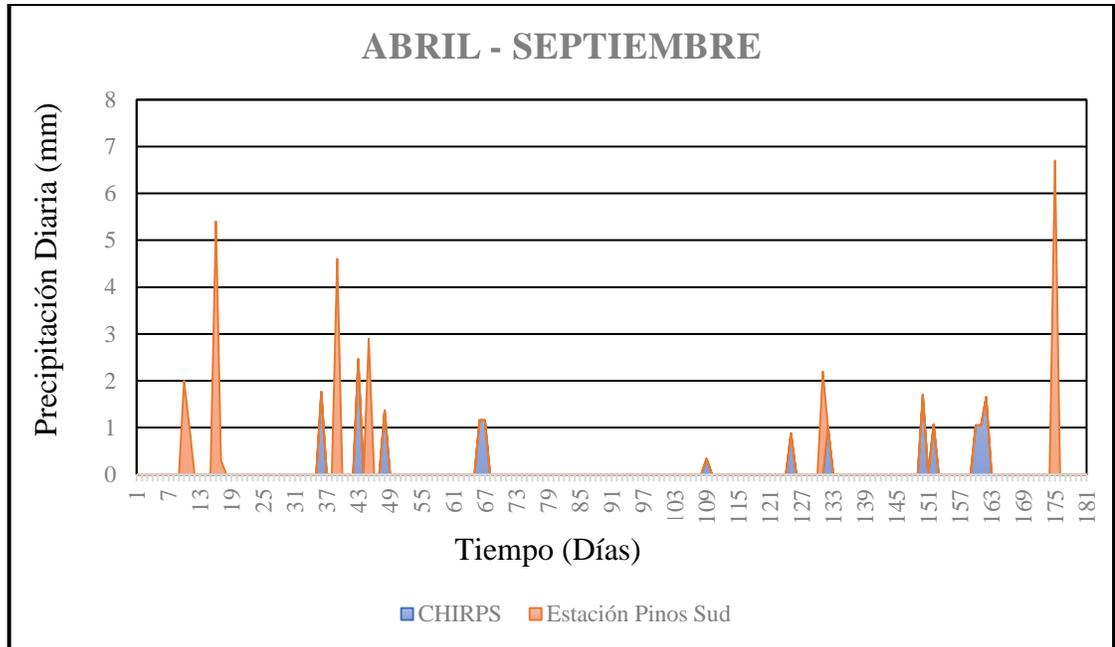


Figura 4.29: Datos de precipitación diaria del producto satelital y la estación Pinos Sud para los meses de abril a septiembre.

Fuente: Elaboración propia

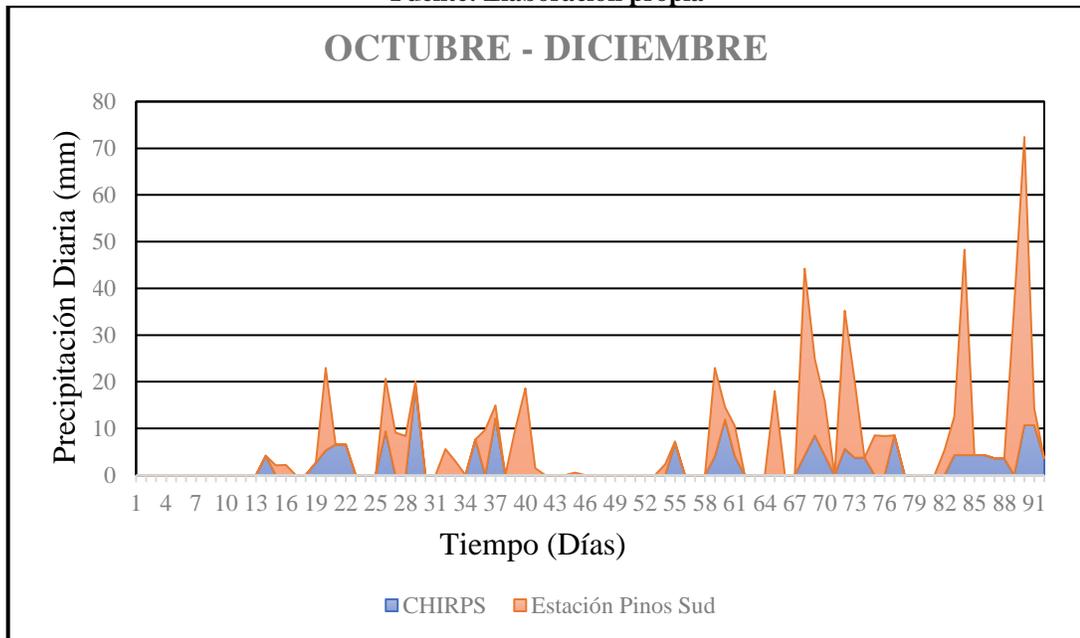


Figura 4.30: Datos de precipitación diaria del producto satelital y la estación Pinos Sud para los meses de octubre a diciembre.

Fuente: Elaboración propia

Además de los anteriores estadísticos también se calculó el coeficiente de correlación que es el estadístico que permitirá medir el grado de asociación de las dos variables que son las precipitaciones estimadas por el satélite y las mediciones de las estaciones en tierra.

Este procedimiento se realizó para cada una de las estaciones utilizadas (estaciones sin datos faltantes), los resultados se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Resultados de los Coeficientes de Correlación entre las precipitaciones diarias del producto satelital y las mediciones de las estaciones en tierra periodo 2000 y 2021

Estación	r
Cañas	0,333
Aeropuerto - Tarija	0,348
Coimata	0,323
Pinos Sud	0,312
San Andrés	0,334
San Jacinto Sud	0,319
Turumayo	0,334

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la Tabla 4.10, los resultados de la Tabla 4.9 se puede interpretar que todas las mediciones de las estaciones en tierra tienen una mala correlación con las mediciones estimadas por el producto satelital, siendo la estación Aeropuerto – Tarija con el valor más alto de $r = 0,348$. Esto indica que la correlación a nivel diario de las precipitaciones aún sigue siendo muy malas y muy variables respecto a las estimaciones del satélite para poder utilizarlas como una fuente alternativa de información para la aplicación en estudios hidrológicos que requieran información a nivel diario.

Tabla 4.10: Valores de coeficiente de Pearson

Correlación Pearson (r)		
Intervalo de Correlación		Ajuste
DE	A	
0	0,2	No hay Correlación
0,2	0,3	Muy Mala
0,3	0,6	Mala
0,6	0,8	Regular
0,8	0,9	Buena
0,9	0,99	Excelente
0,99	1	Perfecta

Fuente: Calle, 2016.

En las Figura 4.31, se puede observar el análisis mensual multianual de los coeficientes de correlación en el mismo periodo (2000 y 2021), para observar el desempeño mensual de la estimación de precipitaciones diarias.

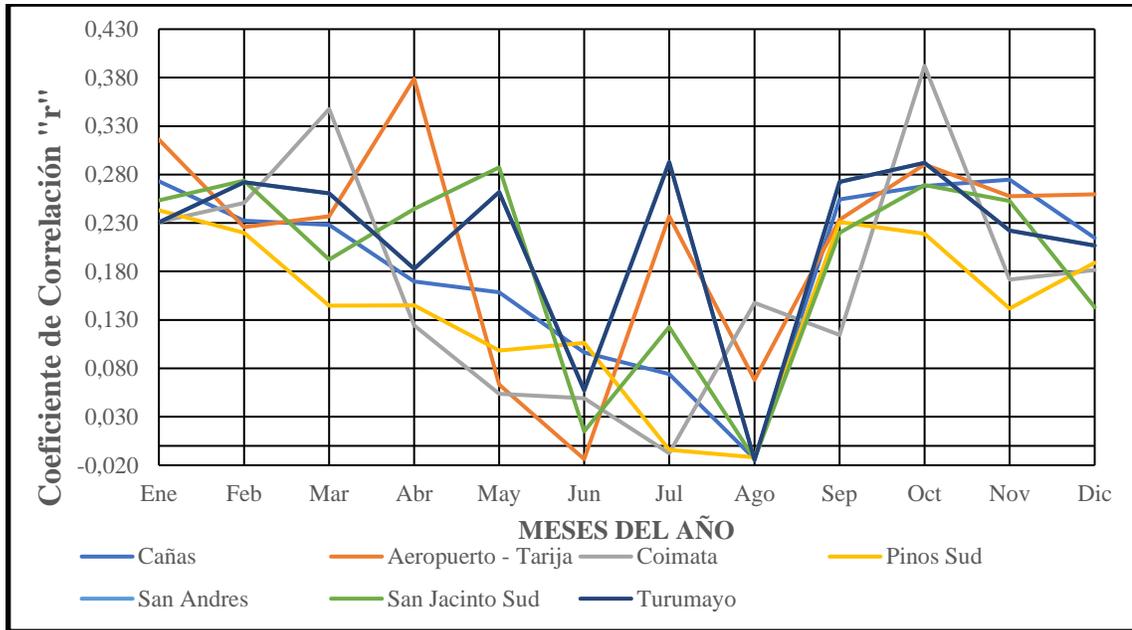


Figura 4.31: Resultados de “r” mensual multianual de la estimación de precipitaciones diarias entre producto Satelital y las Estaciones tierra entre 2000 y 2021.
Fuente: Elaboración Propia

La comparación estadística de la información satelital en cuanto a la magnitud de precipitaciones ha demostrado valores de estadísticos malos para cada estación evaluada, por lo que las estimaciones del satélite a nivel diario aún siguen teniendo errores en comparación de los datos observados en tierra. La importancia de utilizar varios estadísticos es que ayuda a complementar en la evaluación de las series de precipitación.

4.3.2. Comparación estadística de la información satelital (detección de los eventos de precipitación).

Para clasificar los días en que hubo lluvia y en los que no hubo es necesario definir el valor del umbral de lluvia, según la OMM (2010) para cantidades diarias recomienda que el umbral de lluvia sea de 0,2 mm y en la medida posible de 0,1 mm.

Los equipos pluviométricos del SENAMHI establecen como registro de un evento de lluvia cuando supera un valor es de 0,1 mm, debido a la precisión de los aparatos de medida que tienen, por tal motivo que ese será el valor límite con el que se evaluará el desempeño del producto satelital para detectar los eventos de lluvia diaria.

En la Tabla 4.11, se presentan los resultados del desempeño del producto satelital para detectar los eventos diarios de lluvia entre los años 2000 y 2021. Estos resultados fueron obtenidos al comparar los productos satelitales con las siete estaciones de la Figura 4.5.

Tabla 4.11: Resultados del desempeño de los productos satelitales en la detección de eventos diarios de precipitación para el periodo entre 2000 y 2021

Estación	POD	FAR	ETS	HK	HSS	FB
Cañas	0,44	0,51	0,29	0,29	0,30	0,91
Aeropuerto - Tarija	0,48	0,52	0,30	0,33	0,33	1,00
Coimata	0,48	0,63	0,25	0,32	0,28	1,29
Pinos Sud	0,41	0,46	0,29	0,27	0,29	0,76
San Andrés	0,42	0,51	0,28	0,27	0,28	0,85
San Jacinto Sud	0,45	0,55	0,28	0,29	0,29	1,00
Turumayo	0,42	0,51	0,28	0,27	0,28	0,85

Fuente: Elaboración Propia

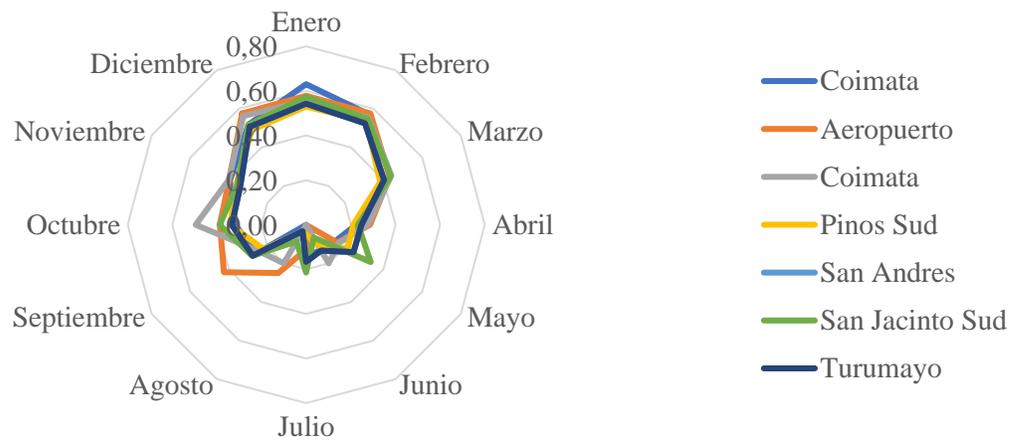
En la Tabla 4.11, los valores de Probabilidad de detección (POD) no están presentando valores tan buenos, lo que significa que en cada estación no está acertando bien la cantidad de días donde hay lluvia.

Para los valores de Relación de Falsa Alarma (FAR) se podría decir que al menos 50% de los datos en cada estación, son valores falsos lo que quiere decir que hay muchos días donde el satélite registra precipitaciones cuando realmente no ocurre en tierra.

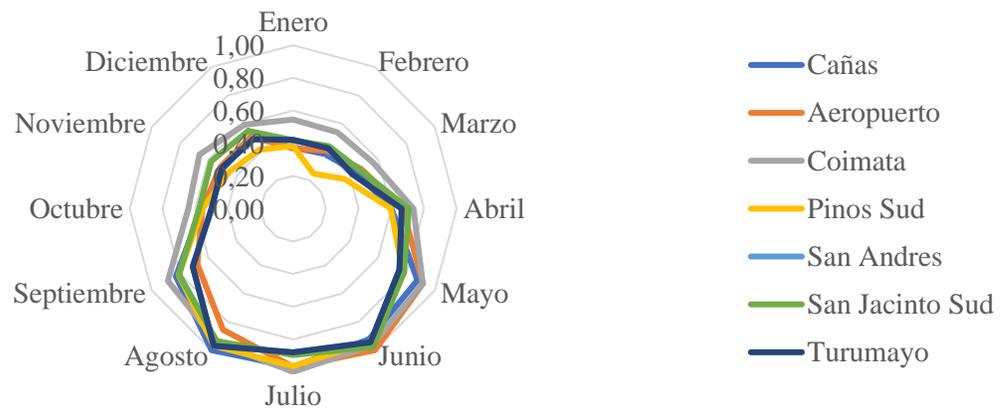
Los valores de Puntuación de Amenaza Equitativo (ETS), discriminador de Hansen y Kuipers (HK) y Habilidad de Puntaje de Heidke (HSS) tienen valores muy bajos, asimismo esto indica también que el producto tiene una baja cantidad de aciertos (días con lluvia y de no lluvia), por lo que el satélite está proporcionando muchos valores falsos (eventos que detectó el satélite, pero no midió la estación en tierra).

En la Figura 4.32, se muestra las estadísticas de validación categórica (POD, FAR, ETS, HK, HSS y FB) de los productos satelitales en comparación con el conjunto de datos de validación independiente para cada mes durante todo el periodo de estudio.

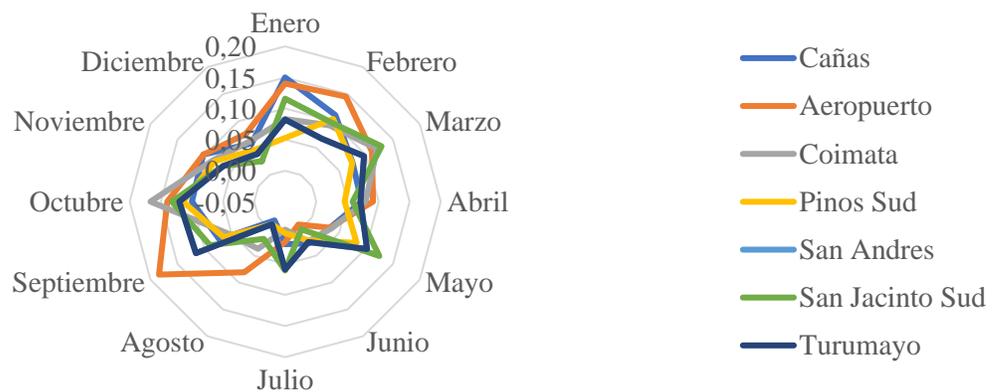
Probabilidad de Detección (POD)



Relación de Falsa Alarma (FAR)



Puntaje de Amenaza Equitativo (ETS)



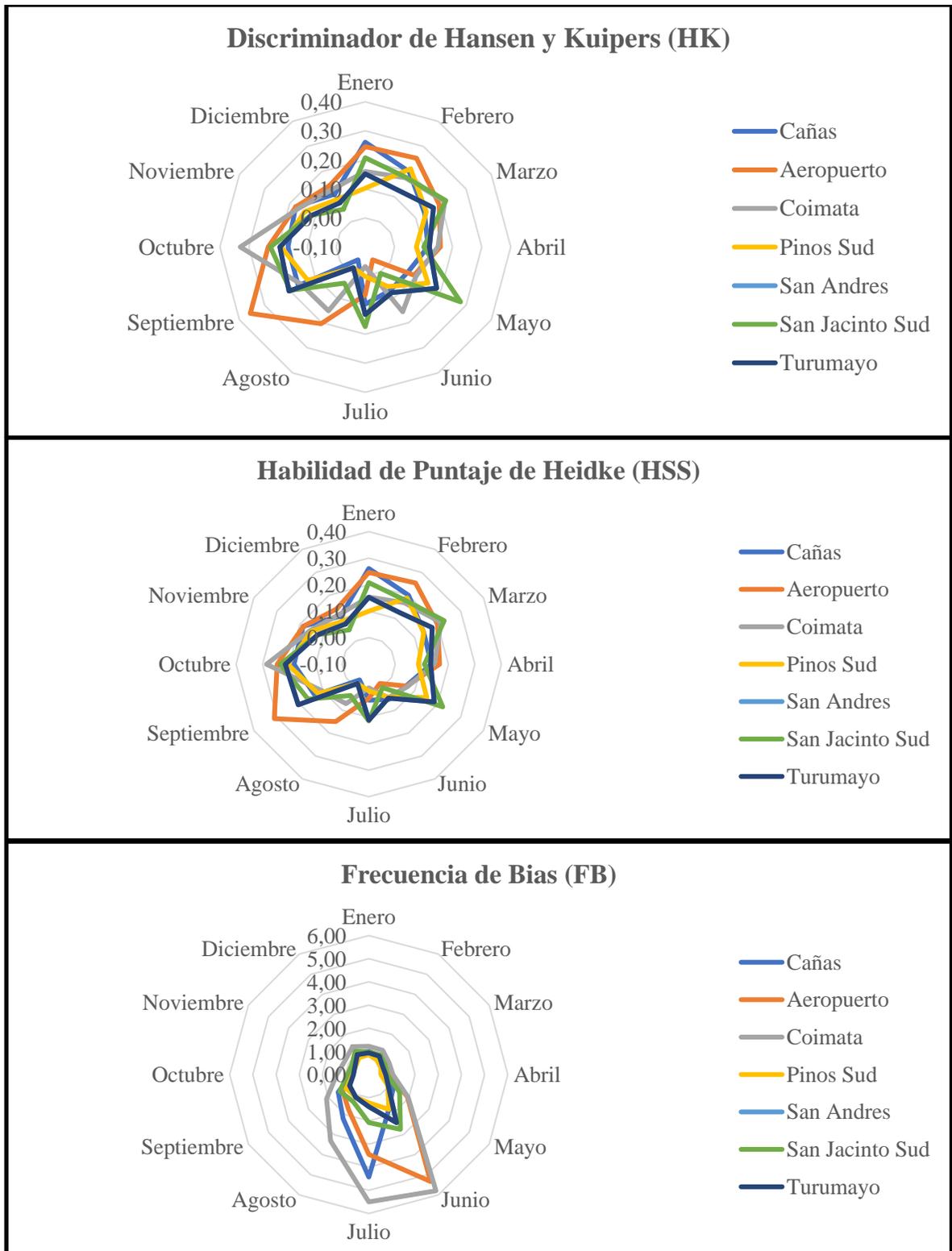


Figura 4.32: Estadísticas de validación categórica (POD, FAR, ETS, HK, HSS y FB) de los productos satelitales en comparación con el conjunto de datos de validación independiente para cada mes.

Fuente: Elaboración propia.

El desempeño de POD, FAR, ETS, HK, HSS y FB para todos los meses a nivel diario en el periodo 2000 y 2021 presentan valores semejantes en todas las estaciones en tierra es decir que en cada estación la capacidad de detección del producto satelital tiene un desempeño similar y que no presenta variaciones.

Aunque los resultados están demostrando que las estimaciones de precipitación del producto satelital están registrando una gran cantidad de valores falsos durante todo el periodo de estudio 2000 – 2021, por lo que el satélite tampoco está detectando bien cuando se presente las precipitaciones en tierra.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El análisis de la comparación estadística en cuanto a magnitud de precipitaciones entre el producto satelital y las mediciones en tierra, de manera general, el producto satelital CHIRPS siendo uno de los productos con una de las resoluciones más finas en escala espacial de $0,05^\circ$, no está estimando bien las precipitaciones para las estaciones en tierra pertenecientes a la cuenca del río Tolomosa del departamento de Tarija. El producto satelital está sobreestimando más en promedio en las estaciones Aeropuerto – Tarija y San Jacinto Sud, mientras que en las estaciones Turumayo, Coimata, Cañas, Pinos Sud y San Andrés en promedio está subestimando. Esta sobreestimación y subestimación puede deberse a dos factores importantes que son el tipo de lluvia que se genere en la zona y la topografía.
- Los porcentajes de variación de los datos de precipitación diaria en promedio, entre el producto satelital y las estaciones tierra ha demostrado un comportamiento muy variable, en estaciones con menor altitud, como, por ejemplo, la estación San Jacinto Sud, el producto satelital está sobreestimando hasta un 40% en los meses secos mientras que en los meses húmedos llega a sobreestimar hasta un 30% aproximadamente. Por otra parte, en las estaciones con mayor altitud, como, por ejemplo, la estación Pinos Sud, durante todo el año tanto en los meses secos y lluviosos la tendencia es más a subestimar, con un porcentaje de variación de aproximadamente un 50 %.
- En Tarija las precipitaciones que se presentan con mayor frecuencia son las de tipo orográfica y muy poco del tipo convectivo, y la distribución espacial de la precipitación no abarca grandes áreas, es decir en una zona puede estar lloviendo y en otras zonas no, por lo que probablemente por la resolución espacial del satélite no está captando bien y está afectando a poder estimar las precipitaciones con mayor precisión.
- La ubicación de las estaciones también es un factor importante, porque mientras más altitud tenga mayor también es la cantidad de agua que recibirá, pero el satélite

no diferencia esto, y en lo que se basa es medir la temperatura de las nubes y también las condiciones atmosféricas, y mediante sus sensores y ondas electromagnéticas procesan la información captada, las ondas electromagnéticas penetran a las nubes y en base a su algoritmo con el cual está programado, identifica si la temperatura está por debajo del valor estándar, y registra si ha existido lluvia o no. A veces también cuando las nubes tienen un espesor bastante grande, estas ondas electromagnéticas solo captan la temperatura por encima de la nube lo que también no le permite estimar con mayor precisión.

- Los estadísticos como EMA y EMAR en términos absolutos indican también que la variación de la precipitación, en el periodo seco (abril-septiembre) el producto satelital está sobreestimando en aquellas estaciones que tienen menor altitud y subestimando mucho en las estaciones que tienen mayor altitud.
- El coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe también indica un bajo rendimiento en las estimaciones del satélite, porque sus valores en todas las estaciones son menores a cero.
- En Bias o Sesgo en el periodo húmedo (octubre-marzo) indica que, en estaciones con menor altitud, la cantidad de lluvia que registra el satélite CHIRPS con las estaciones en tierra tiende a sobreestimar, mientras que en estaciones con mayor altitud la tendencia es más a subestimar, y en el periodo seco (abril-septiembre) sucede lo contrario.
- Los coeficientes de correlación de Pearson también indican que el grado de asociación entre las dos mediciones tiene una mala correlación a nivel diario porque no se está ajustando a una tendencia lineal, los puntos están muy dispersos y alejados de formar una línea recta, asimismo, presentando valores de “r” muy pequeños en todas las estaciones, como por ejemplo, el coeficiente de correlación más alto es de la estación Aeropuerto – Tarija con un valor de 0,348, lo que se refleja que la variabilidad entre ambas mediciones es considerable.
- En cuanto a comparación estadística en detección de días de lluvia los valores de POD no han arrojado resultados tan buenos en todas las estaciones, lo que indica que el satélite no está detectando bien los aciertos (días de precipitación), y esto se ve relacionado con el FAR donde ha dado resultados, que podría interpretarse de

manera general que aproximadamente el 50% de las estimaciones del producto satelital son valores falsos (precipitaciones que ha registrado el satélite, pero no han ocurrido en tierra).

- En los valores de ETS, HK, HSS y FB que también son estadísticos que indican que el producto tiene una baja cantidad en aciertos (días con lluvia y de no lluvia) por lo que, en cuanto a detección, el producto satelital tampoco está estimando muy bien.
- El producto satelital CHIRPS basándose en los estadísticos en cuanto a magnitud y detección de días de precipitación aún no es posible utilizar como una fuente alternativa de información que pueda utilizarse de manera directa para completar datos de lluvia diaria en las estaciones meteorológicas, que ha sido el objetivo general de este estudio, ya que no está estimando bien las mediciones, y que existe variabilidad, llegando a subestimar y sobreestimar en cada estación respectivamente. La importancia de realizar siempre una comparación estadística y validar la información de un producto satelital es uno de los pasos fundamentales antes de utilizarlos, por el mismo motivo en las estaciones meteorológicas de la cuenca del Rio Tolomosa en el Departamento de Tarija, se descarta completamente utilizar esta fuente alternativa de información a nivel diario.

5.2. Recomendaciones

- Realizar una comparación estadística en cuanto magnitud y detección a nivel diario con otros productos satelitales y comparar con los resultados del producto satelital CHIRPS verificando si existe un mejor desempeño, con el fin de buscar más alternativas de información.
- Utilizar varios estadísticos de comparación en cuanto a magnitud y detección de días de lluvia, que ayuda a realizar un análisis más profundo para conocer la variabilidad entre ambas fuentes de medición.
- Llevar a cabo este tipo de análisis en otras regiones del departamento de Tarija, con diferentes condiciones climáticas y condiciones topográficas al lugar de estudio, con el fin de ver si las estimaciones del producto satelital mejora su desempeño.