

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En las regiones de los valles, las precipitaciones constituyen el principal factor condicionante de la productividad agrícola. La observación se realiza mediante pluviómetros, los cuales proveen una información puntual del fenómeno meteorológico. Por otra parte es ampliamente reconocida la variabilidad espacial de las precipitaciones, especialmente aquellas provenientes de procesos convectivos durante la época estival. Por lo tanto, los datos obtenidos de los pluviómetros sólo representan el área circundante y próxima a la estación meteorológica.

La precipitación es una variable climática de gran importancia y siempre se requiere de una buena disponibilidad de datos de precipitación, que sean confiables y de calidad, esta información es básica en los estudios hidrológicos, los cuales son la base de las predicciones climáticas, en la agricultura, en gestión de riesgos y otros campos, que al final permiten tomar decisiones confiables. El entendimiento de su comportamiento temporal y espacial es de suma interés, especialmente en los estudios de riesgos climáticos, donde la disponibilidad de información de alta resolución y de buena calidad es esencial.

Sin embargo, las series de datos de lluvia en la mayoría de los casos son incompletos, y las razones pueden ser el mal funcionamiento de los pluviómetros o falta de medición que interrumpe la consistencia y continuidad de los registros históricos medidos.

Por otro lado, la percepción remota ha ido evolucionando considerablemente en cuanto a la obtención de información pluviométrica, constituyéndose en una gran alternativa de obtención de datos de precipitación.

La estimación regional de las precipitaciones a partir de información satelital ofrece la ventaja de una adecuada cobertura regional, a la vez que permite capturar la variabilidad espacial de las precipitaciones, en particular durante el verano.(Scofield, 1987:87)

En la actualidad se encuentran a libre disposición los productos de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), la cual ha estado proporcionando mediciones de precipitación sobre los vastos océanos y continentes dispersos en las zonas tropicales y subtropicales desde noviembre de 1997. Numerosos estudios han sido desarrollados a partir de los productos

TRMM; los cuales evidencian que en zonas de topografía muy accidentada las precipitaciones estimadas están asociadas a un significativo sesgo y errores aleatorios (Nikolopoulos et al., 2012:24)

También se tiene al producto PERSIANN-CCS, que provee estimaciones de precipitación con resolución espacial de $0,04^\circ$ entre los 60°N y los 60°S .

Los productos satelitales mencionados, ofrecen datos de precipitación con distintas resoluciones espaciales y temporales.



Figura 1. Desarrollo de una tormenta - fotografiada por satélite
Fuente: Sánchez, M. (2019)

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Antecedentes Internacionales

(Brizuela et al., 2015:22) en el trabajo “Comparación de datos de precipitación estimada por TRMM con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos, Argentina” comparó datos de la precipitación estimada por el satélite TRMM, comparándolas en 6 estaciones meteorológicas. Para cada estación se realizó un análisis de correlación considerando datos diarios de precipitación acumulada en periodos de ocho días y mensuales. Los resultados muestran que con una confianza del 95% no hay diferencias significativas de varianza para cinco estaciones y que no hay diferencias que sean significativas de medias de lluvia en ninguna de las estaciones que fueron estudiadas.

(Javan y Azizzadeh, 2017:165) en su trabajo de investigación “Evaluation of the TRMM-3B43 V7 rainfall products on a monthly scale in the Northwest of Iran” evaluó los datos de los productos de lluvia del satélite TRMM 3B43 con respecto a datos de pluviométricos de 21 estaciones a una escala temporal mensual en el noroeste de Irán, donde concluyo que los coeficientes de correlación son significativos para todos los meses y se encuentran entre 0,69 y 0,93, con un promedio de alrededor de 0,81. Lo cual indica que existe una buena correlación entre las dos bases de datos, aunque el TRMM sobreestima la lluvia mensual en todo el área donde realizaron su estudio.

En Chile, (Cruz-Roa et al., 2018:109) en su trabajo "Estimación de datos faltantes de lluvia mensual a través de la asimilación de información satelital y pluviométrica en una cuenca andina tropical" tuvo como objetivo comparar los datos faltantes de lluvia a paso mensual y evaluar los errores de estimación en cuatro escenarios desde un 10% a un 40% de datos faltantes. Para su estudio ha considerado la red de estaciones pluviométricas de la cuenca hidrográfica del río Coello durante el periodo de 1998 al 2005. Los métodos evaluados fueron; el método de la relación normal que calcula la precipitación del mes j en una estación determinada a través del promedio ponderado de las precipitaciones mensuales observadas en el mes j de las estaciones que integran el grupo hidrológico homogéneo. También el método geo-estadístico Krigeado Ordinario (OK) que estima un valor puntual no conocido utilizando algunos valores vecinos conocidos, asociado con una o varias variables auxiliares y así complementar los datos faltantes.

Se realizó la evaluación por medio de cuatro índices de ajuste y se verificó la correlación. Los estadísticos fueron; Raíz cuadrada del error cuadrático medio, Error medio absoluto, Error de sesgo promedio y Coeficiente de correlación de Pearson. Que fueron calculados entre los valores observados y estimados en los cuatro escenarios de datos faltantes. La investigación concluye que los datos se ajustan de mejor manera a lluvias a escala mensual.

(Laura et al., 2015:224) En su trabajo de investigación “Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú” realizado en la cuenca Ramis, ubicado al norte de la región hidrográfica del Titicaca al lado peruano, tuvo como objetivo la validación de las precipitaciones estimadas por el satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis. La validación de precipitaciones estimadas por el satélite, se realizó haciendo una comparación con los datos tierra, para el periodo enero de 1998 a diciembre 2013, los cuales fueron evaluados mediante los indicadores estadísticos como es el de sesgo porcentual, coeficiente de determinación y eficiencia de Nash-Sutcliffe. Los resultados obtenidos de esta investigación indican que la lluvia estimada por satélite es fiable y se puedan utilizar como alternativa en zonas de escasa información, dado que el coeficiente de determinación en la validación de precipitaciones es igual a 0,86 con un sesgo porcentual de +21,7% es aceptable con eficiencias de Nash-Sutcliffe igual 0,75 en la validación. De lo cual se concluyó que el producto de estimación satelital es válido en la cuenca del río Ramis.

1.2.2 Antecedentes Nacionales

En Bolivia (Ureña et al., 2018:35) En su trabajo de investigación “EVALUACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA EN LA CUENCA KATARI BASADO EN TECNOLOGÍA SATELITAL Y PRODUCTOS DERIVADOS” Los productos fueron; GSMaP, CHIRPS y GMET, cada uno con una resolución espacial y temporal diferente. Su área de estudio fue la cuenca Katari, ubicada al noreste de la ciudad del Alto a una altura de 3.800 a 5.200 m.s.n.m. El periodo temporal seleccionado fue del año 2000 al 2016 y para ello realizó un análisis comparativo y divido en sub cuencas, donde se emplearon dos niveles comparativos: una comparación entre productos de precipitación base (GSMaP, CHIRPS y SENAMHI) y una comparación que hizo entre “GS-Katari”, un producto combinado por el método de ajuste iterativo entre GSMaP y SENAMHI y “GMET”, un producto combinado

a través de métodos estocásticos entre SENAMHI y CHIRPS. En su trabajo se demostró inicialmente que, tanto GSMaP como CHIRPS presentaron una sobrestimación de las intensidades estimadas con respecto a los datos de tierra, sin embargo, presentaron una excepción al acercarse al Lago Titicaca. El producto GS-Katari ajustado presenta intensidades de precipitación que tienden a la subestimación con rangos menores al 10% del valor medido en tierra. También se analizaron los datos de precipitación entre GMET y el producto combinado y se comprobó que GMET presenta una sobrestimación con respecto a SENAMHI, pero en el área cercana al Lago Titicaca, se observó que GMET presenta una subestimación similar a CHIRPS y GSMaP con respecto a las intensidades de SENAMHI.

(MMAyA y VRHR, 2016) En el trabajo “Balance Hídrico Superficial de Bolivia” perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente y Agua, se utilizó imágenes satelitales de precipitación para completar datos faltantes de ciertas regiones del país donde se tenía una deficiente cobertura de la red pluviométrica, para ello utilizaron el producto satelital TRMM 3B42. Para obtener un mejor ajuste de los datos estimados se realizó diversas pruebas de correlación. En el mencionado trabajo se analizó que la mejor forma de ajustar los datos estimados por satélite fue correlacionar las medias de precipitación estimada y observada en pluviómetros, lo cual por medio de ecuaciones de regresión lineal se corrigió la base de datos del producto satelital.

1.3 Situación Actual

La escasa información que existe en los registros pluviométricos para muchas zonas del valle central de Tarija, cada vez se vuelve más complejo el poder realizar un estudio hidrológico y un desafío más para el ingeniero y la rama hidrológica, ya que al no contar con una información enriquecida completa de la pluviometría, se corre el riesgo de tener trabajos hidrológicos cada vez con más incertidumbre. Es por ello que en este documento de investigación se pretende ayudar a resolver este gran problema, haciendo uso y empleo de herramientas más sofisticadas de obtención de información como es el caso de los productos de precipitación en base satelital, ya que estos productos cubren grandes extensiones y sin excepción de zonas inaccesibles para el hombre, por lo cual se pretende obtener información de estos productos para la zona del valle central de Tarija. Al momento existe una gran cantidad de satélites meteorológicos que monitorean las 24hr el globo terráqueo, cada uno

con una característica espacial y temporal diferente. El producto satelital a estudiar en este trabajo de investigación será PERSIANN-CCS cuya resolución temporal es mensual y una resolución espacial de 4,453 km por lado de pixel.

1.4 Límites del Proyecto

Cabe mencionar que en el departamento de Tarija se cuenta con tres pisos ecológicos, los cuales son; la zona del chaco, la zona del altiplano y la zona de los valles. Cada una de estas, con una características climáticas muy diferentes (lluvia, viento, temperatura, presión, etc.) por lo cual, este trabajo se enfoca única y exclusivamente a la zona de los valles, más específicamente al valle central del departamento de Tarija, para así de esta manera no volverlo un proyecto demasiado no sea amplio y complicado de resolver por las diferentes características de precipitaciones en las distintas zonas. Es por ello que se decidió dividirlo en estas 3 zonas y trabajar con la zona del valle central de Tarija.

Por otro lado, se limita este proyecto se limita a encontrar factores de corrección cien por ciento certeros para toda la zona de estudio, a excepción de los núcleos de comparación donde se ajusta la precipitación media mensual del producto satélite al registro del pluviómetro, esto con el fin de obtener el valor corregido al cien por ciento únicamente para estos puntos, ya que se tiene un valor verídico medido del pluviómetro, pero en áreas circundantes próximos, este factor de corrección tendrá una aproximación inferior al 100% debido a que se está trabajando con una variable aleatoria (precipitación) que puede tomar cualquier valor con cualquier probabilidad y en cualquier punto donde no se tenga un pluviómetro que comparar.

1.5 Alcance del Proyecto

La aplicación del producto de precipitación en base satelital PERSIANN-CCS en el valle central de Tarija, está orientado a realizar una evaluación de las lluvias medias mensuales estimadas por el producto satelital mencionado, con el fin de que esta información corregida sirva como complementariedad a los datos de registros pluviométricos del SENAMHI para el periodo de registro desde enero de 2004 a diciembre del 2019.

En este proyecto se realizará un análisis de la información actual de los registros pluviométricos que se tiene en las estaciones, la consistencia de la información, la cantidad

de años de registro de cada estación, el análisis de calidad de los datos mediante procesadores de información estadística como son Hydraccess y TREND. Análisis de la información obtenida del producto satelital, corrección estadística de dicha información, evaluación mediante evaluadores estadísticos definidos y mapas temáticos de precipitación media mensual para el periodo 2004-2019, para todo el valle central del departamento de Tarija.

El producto PERSIANN-CCS, estima la precipitación en diferentes escalas temporales que van desde; 1 hr, 3 hrs, 6 hrs, diario, mensual y anual. Es decir, es un producto que cada hora actualiza su base de datos, y estas a su vez se van acumulando en series de Tiempo mas largas. Entonces, se pueden obtener diferentes grillas de precipitación para diferentes tiempos. En este trabajo se opto por hacer el análisis a las grillas de precipitación que estan a una escala temporal mensual ya que en estudios anteriores, se muestran que las estimaciones de precipitacion del producto satelital a escalas de tiempo mas cortas tienen mayor complejidad de análisis y tratamiento de la información, mostrandose resultados desfavorables con las metodologías aplicadas. El producto PERSIANN-CCS por lo general, en nuestro medio sobreestima la precipitación, entonces si el valor de precipitacion mensual acumulado es alto, a nivel diario por lo general, los valores son aún más exagerados. Es por ello que diversos autores afirman que las regiones con mayores coeficientes de correlación son generalmente aquellos con fuertes gradientes de precipitación estacional (temporada «húmedo» y «seco»), además (Laura et al., 2015:224) indican que los datos del producto de precipitación son especialmente útiles cuando se trabajan a escalas de tiempo más largas (a partir de 16 días a mensual y anual). Es por ello que bajo estas investigaciones de los trabajos que hacen diversos autores, se decidió trabajar para la zona del valle central de Tarija con series de datos de precipitación a escala temporal mensual.

1.6 Hipótesis

Es posible corregir los datos de precipitación mensual, en función a los datos medidos en tierra, utilizando factores de corrección (F_c) que permiten el ajuste de dicha información, para su aplicabilidad en estudios hidrológicos dentro del valle central de Tarija.

1.7 Área de Estudio

1.7.1 Zona del Valle Central del Dpto. de Tarija.

La distribución del territorio del área de estudio abarca los municipios de Padcaya, San Lorenzo, Cercado y Uriondo.

El valle central de Tarija se describe como una región de serranías y colinas que rodean los valles de los ríos Guadalquivir, Tolomosa, Santa Ana y Camacho. El valle se encuentra a una altura entre 1.750 y 2.100 msnm. Muestra un clima templado semiárido, con temperatura media mensual, entre 15 y 23 °C, la precipitación media anual.

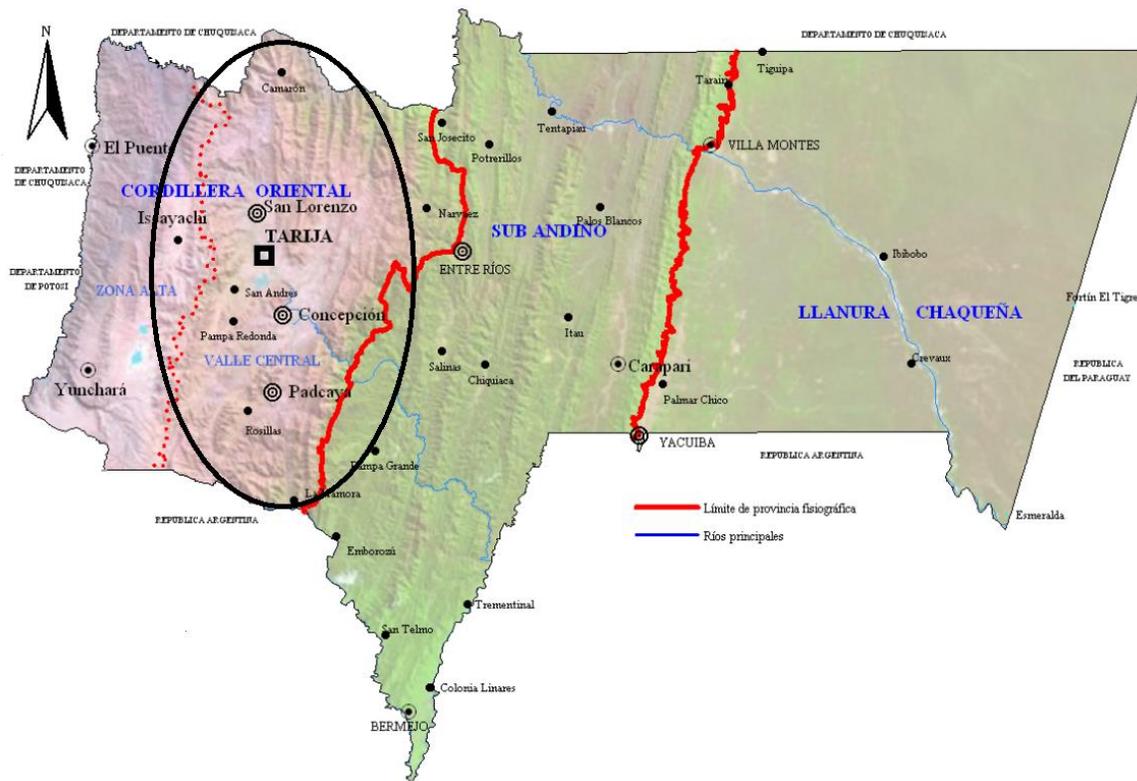


Figura 2. Área de estudio - Valle central de Tarija

Fuente: Plan Departamental de Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático 2014-2018,(2014)

1.8 PROBLEMÁTICA

La precipitación tiene un rol fundamental dentro del ciclo hidrológico, y como en diferentes actividades humanas, dependen de su correcta medición. La gran variabilidad espacial y temporal de esta variable, sumado a las limitaciones de la red pluviométrica, representan un gran desafío permanente en su medición. Mientras que en algunas regiones del mundo se ofrecen buenos conjuntos de datos de redes pluviométricas, gran cantidad de regiones tienen cobertura inadecuada en estos registros. Esta problemática, motiva a muchos la utilización de estimaciones de precipitación por satélite y la necesidad de conocer la calidad de este tipo de productos.

Los tres instrumentos principales que se utilizan para medir la precipitación son los medidores, los radares y los satélites. Las observaciones pluviométricas terrestres son la única fuente de medición directa y puntual de la precipitación, y son necesarias para calibrar y validar las mediciones indirectas que estiman la precipitación por radares y satélites meteorológicos, ya que se ha visto que la lluvia estimada a partir de estos productos no se ajusta adecuadamente con la lluvia medida por las estaciones por lo que proviene un ajuste a estos datos. De este modo, las estaciones pluviométricas sobre la superficie terrestre son consideradas universalmente como la fuente de referencia de las estimaciones de precipitación.

En hechos anteriores, se puede mostrar que en nuestro país se ha visto la necesidad de usar productos de precipitación en base satelital. Tal es el caso del “Balance Hídrico Superficial de Bolivia” elaborado en el año 2012, a través de la Consultora española Informes y Proyectos, S.A. (INYPSA) que por solicitud del Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR), dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) de Bolivia y con financiamiento de la Unión Europea, se elaboró dicho estudio, en el cual se aprecia que se presentaron ciertos inconvenientes en la obtención de información de precipitación proporcionada por el SENAMHI para muchas regiones del territorio Boliviano.

Para poder alcanzar los objetivos, y como es de conocer que la principal variable que interviene en el Balance Hídrico es la precipitación, se ha visto la necesidad de hacer uso de las imágenes de precipitación del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), debido a la escasa información pluviométrica que se tiene para ciertas regiones del país.

Además, de que en la actualidad ya no funcionan gran cantidad de estaciones que han sido cerradas, que han dejado de operar y registrar información hidro-meteorológica.

Sin duda que la limitada red de estaciones meteorológicas en lo extenso del país trae como consecuencia la escasa información registrada de variables climáticas, siendo uno de los grandes desafíos que se enfrentan a la hora de realizar cualquier tipo de proyecto y sobre todo cuando se trata de gestionar los recursos hídricos de cuencas hidrográficas. Por lo tanto, para la estimación de la pluviometría de una región amplia, el uso de imágenes de satélite cobra especial interés para los estudios de meteorología, climatología e hidrología.

Ante esta situación que se afronta en muchas regiones del territorio boliviano, en el departamento de Tarija también se ve la necesidad e importancia de implementar el uso de este tipo de tecnología en base satelital para obtener una base de datos de precipitación para el valle central más enriquecida, de la que nos puede ofrecer el SENAMHI, aunque esta institución cuenta con una red de estaciones a las cuales monitorea permanentemente, muchas de ellas en la actualidad han sido cerradas y no registran ningún tipo de dato climático, tal es el caso de las estaciones; San Lorenzo, Sella Méndez, San Mateo, Tarija Cancha, Pampa Redonda, Rincón de la Victoria, Monte sud, Obrajes, Gamoneda, Equis Norte, Calderillas, La Angostura, San Pedro, Padcaya, Corana, etc. Como así una gran cantidad de estaciones más, que han dejado de funcionar por razones logísticas, operativas y/o económicas. Es por ello que radica la importancia de investigar a nuevas tecnologías que nos permitan ser de gran ayuda a la hora de elaborar algún tipo de estudio de tipo hidrológico.

Finalmente, la precipitación estimada por satélite y radar son una alternativa viable a la falta de pluviómetros. Sin embargo, los datos de radar cubren áreas limitadas y en el valle central de Tarija no existe una red de radares. Por otro lado, las estimaciones de satélite tienen una cobertura más amplia y cubren lugares inaccesibles, altos y regiones remotas, donde los datos pluviométricos del SENAMHI son limitados o inexistentes.

1.8.1 Planteamiento del problema

En este trabajo de investigación se pretende resolver la siguiente pregunta:

¿Se puede emplear el producto de precipitación PERSIANN-CCS para estudios hidrológicos en el Valle Central de Tarija?

1.9 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

1.9.1 Justificación Académica

Con el presente proyecto, se pretende aplicar los conocimientos en hidrología y recursos hídricos, además de los conocimientos adquiridos mediante los cursos brindados por el Centro de Investigación en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA) de la Dirección General de Planificación, Ministerio de Medio Ambiente y Agua (DGP/MMAyA) para la evaluación de la precipitación distribuida, basado en tecnología satelital y productos derivados. Además, con este proyecto se pretende aportar una nueva metodología para la corrección de datos de precipitación en base satelital, como así también, esta base de datos corregida sirva como ayuda y complementariedad a los datos de precipitación observados en los pluviómetros, para ser aplicado en futuros proyectos de investigación en diferentes zonas dentro del valle central de Tarija.

1.9.2 Justificación Técnica y Social

Dentro el departamento de Tarija, los registros que se tienen de precipitación es escasa y en gran parte del territorio se presentan zonas donde la información es prácticamente nula, siendo muy puntuales las estaciones que registran esta variable. Así mismo, dentro de nuestro medio no se tiene una red pluviométrica que cubra con gran representación toda la zona del valle central de Tarija, si bien existía una red de pluviómetros más enriquecida que permitía el muestreo de esta variable, gran cantidad de ellos han dejado de operar, situación que obliga a los profesionales y personas interesadas en hidrología y recursos hídricos a buscar nuevas alternativas de solución ante este problema, de la escasez de información de precipitación o utilizar la poca información que se pueda tener. Es por ello que este trabajo va completamente dirigido a la colaboración con datos de procedencia satelital y emplearse como una base de datos auxiliar que vaya a complementar los registros pluviométricos que ofrece el SENAMHI. Con la intención de enriquecer los datos de precipitación que se observan y miden en tierra.

1.9.3 Justificación Institucional

Por medio de este trabajo se pretende llegar a ser una contribución a la investigación con respecto al uso de nuevas metodologías, procedimientos y tecnologías para estudios hidrológicos y el manejo de cuencas hidrográficas de gran importancia.

La universidad autónoma Juan Misael Saracho, siendo fiel a su visión de ser “Una institución pública y autónoma, reconocida por su contribución al desarrollo sostenible del país que interactúa con sectores socio-productivos e instituciones educativas de la región y el exterior, despliega una elevada calidad académica en la formación competente e integral de los estudiantes, para su inserción exitosa a la actividad productiva y al mercado laboral y profesional.”

1.10 OBJETIVOS

1.10.1 Objetivo General

- Comparar el producto de estimaciones de precipitación en base satelital PERSIANN-CCS a nivel mensual, con los datos tierra, para corroborar su relación y su posible aplicabilidad en el valle central de Tarija, con el fin de enriquecer los datos de precipitación para zonas de escasa o nula información.

1.10.2 Objetivos Específicos

- Analizar la información del producto satelital mediante el coeficiente de correlación (R^2) y coeficiente de determinación (r), para la interpretación de los resultados de análisis a nivel mensual.
- Determinar el factor de corrección (F_c) que se utilizará para ajustar la precipitación estimada por el producto satelital dentro de la zona del valle central de Tarija.
- Elaborar mapas de distribución de precipitación media mensual para el periodo de análisis 2004-2019, con los datos del producto satelital corregido y los datos tierra, aplicado a la zona del valle central del departamento de Tarija.
- Controlar la precipitación media mensual corregida del producto satelital PERSIANN-CCS con los datos tierra, en 60 puntos de control distribuidos aleatoriamente en la zona de estudio, para verificar la aproximación del producto a la información pluviométrica.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Ciclo del agua

Se puede definir de manera general, que el ciclo del agua es un proceso natural donde éste elemento sustancial para la vida, se encuentra moviéndose permanentemente en la superficie terrestre y en la atmosfera y que va cambiando a sus diferentes estados (líquido, vapor y hielo). El ciclo que hace el agua es fundamental, ya que la vida que hay en la tierra depende de él, de un ciclo hidrológico que ha venido desarrollándose desde los inicios de la existencia de la tierra.

El agua es una necesidad de vital importancia ya que sin ella la tierra fuese un lugar inhóspito e inhabitable, pero así también se convierte un riesgo natural que afecta directa e indirectamente a los seres humanos especialmente, y esas son las principales razones por las cuales el conocer bien el comportamiento del ciclo hidrológico, así como los impactos que este tiene, se vuelve muy importante en diferentes ámbitos y aspectos.



Figura 3. Ciclo del Agua.

Fuente: El Ciclo del Agua, The Water Cycle, Spanish., (2018)

2.1.1 Formación de las lluvias

La formación de las lluvias principalmente parte por el movimiento dinámico de las masas de aire, propagando la saturación del aire húmedo. A medida en que el vapor del agua va ascendiendo, este se va enfriando, entonces el agua se condensa y pasa de un estado de vapor a un estado líquido, formando la niebla, las nubes o los cristales de hielo. Para que se lleve a cabo este tipo de formaciones, se requiere por lo general la presencia de núcleos de condensación, alrededor de los cuales las moléculas del agua se pueden unir y formar una más grande.

Las condiciones que originan la caída de la precipitación son; el ascenso de aire y su enfriamiento, condensación del vapor del agua y formación de las nubes, fuerte concentración de humedad y crecimiento de gotas de agua. Mientras que las partículas que constituyen las nubes tienden a asentarse debido a su peso por su mayor tamaño, los elementos promedio pesan tan poco que sólo necesitan un leve movimiento del aire hacia arriba para poder soportar estos pequeños cristales de hielo o moléculas de agua.

Generalmente hay gotas de agua que caen de las nubes con cierta velocidad, que al ser tan pequeña, no llegan a la superficie de la tierra porque muchas veces éstas vuelven a evaporarse antes de alcanzarla y ascienden de nuevo en forma de vapor. Al aumentar el vapor, o si la velocidad de caída supera los 3 m/s, las gotas de agua van a incrementar su peso, provocando lo que se conoce como lluvia, entonces cuando el peso de las gotas se hace mayor, aumenta la velocidad de caída con lo que la lluvia se intensifica y puede transformarse en una tormenta.

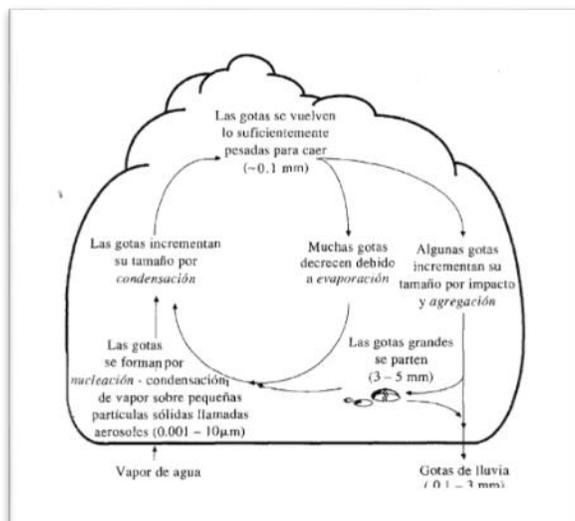


Figura 4. Formación de la precipitación.
Fuente: Chow, V. T., (1994)

2.1.1.1 Tipos de Nubes

Las nubes, no son más que el producto que origina la condensación que se produce en la atmósfera, debido al vapor de agua. Las nubes pueden ser de diferentes tipos, esto lo definirá la altura de base en la que se encuentran y también su apariencia. Entre los tipos de nubes que hay, se tienen las siguientes:

- Nubes del tipo Cirrus.
- Nubes del tipo Cúmulos.
- Nubes del tipo Estratos.
- Nubes del tipo Nimbos.



Figura 5 (a): Nubes Cirrus



Figura 5 (b): Nubes tipo Cúmulos



Figura 5 (c): Nubes del tipo Estratos



Figura 5 (d): Nubes tipo Nimbos

Figura 5. Tipos de nubes.

Fuente: Nubes: Origen y clasificación., (2020)

2.2 Formas de Precipitación

En nuestro medio, la precipitación se puede categorizar de dos maneras principalmente; la precipitación líquida, en la cual encontramos a la lluvia, la llovizna y chubascos. Y la precipitación sólida que vienen a ser el granizo y la nieve.

2.2.1 Lluvia.

Es la precipitación que cae al suelo en estado líquido y está formada de gotas grandes (igual o mayor a 0,5 mm de diámetro) que se precipitan uniformemente a una velocidad superior a los 2 metros/segundo. Los nimboestratos y los estratocúmulos son las nubes que producen la lluvia.

2.2.2 Llovizna

Procede de las nubes de tipo estratos. La forman numerosas gotas de muy pequeño tamaño (menor a 0,5 mm de diámetro) que caen de manera pausada y dispersa.

2.2.3 Chubasco

Se la conoce también como chaparrón, es el agua que precipita en su estado líquido, está formado de gotas muy grandes, inicia y termina bruscamente y cambia su intensidad en el transcurso que se da la precipitación.

2.2.4 Granizo

Se forma cuando las gotas de agua sobreenfriadas circulan en una zona de corrientes ascendentes en el interior de un cumulonimbus. El granizo cae de la nube como precipitación sólida en forma de terrones de hielo duro, redondeados o irregulares. Es tal vez la forma más destructiva de precipitación.

2.2.5 Nieve

Es una agrupación de cristales de hielo en estrellas hexagonales y ramificadas; a veces se mezclan con cristales simples, estos conjuntos forman los copos de nieve. Su caída es lenta y se produce cuando la nube (nimboestrato o estratocúmulo) tiene una temperatura inferior a 0°C.

2.3 Tipos de lluvia

En la naturaleza se conocen tres tipos de lluvia; la Ciclónica, la Orográfica y la Convectiva.

2.3.1 Lluvias Ciclónicas

También llamadas frontales. Se originan cuando entran en contacto dos masas de aire con distintas temperatura. El aire frío, que pesa más, se desplaza hasta quedar por debajo del aire caliente, que se eleva y al hacerlo, se enfría y da lugar a precipitaciones. Estas lluvias se dan en las zonas templadas del planeta.

2.3.2 Lluvias Convectivas

Tienen lugar cuando el aire que se encuentra sobre la superficie terrestre se calienta mucho, se hace más ligero y asciende en la atmosfera. En su ascenso se enfría y provoca precipitaciones.

2.3.3 Lluvias Orográficas

Se produce cuando el aire choca contra la ladera de una montaña y se ve obligado a ascender; al ascender se enfría y se originan precipitaciones. Este tipo de lluvias se producen en regiones montañosas.

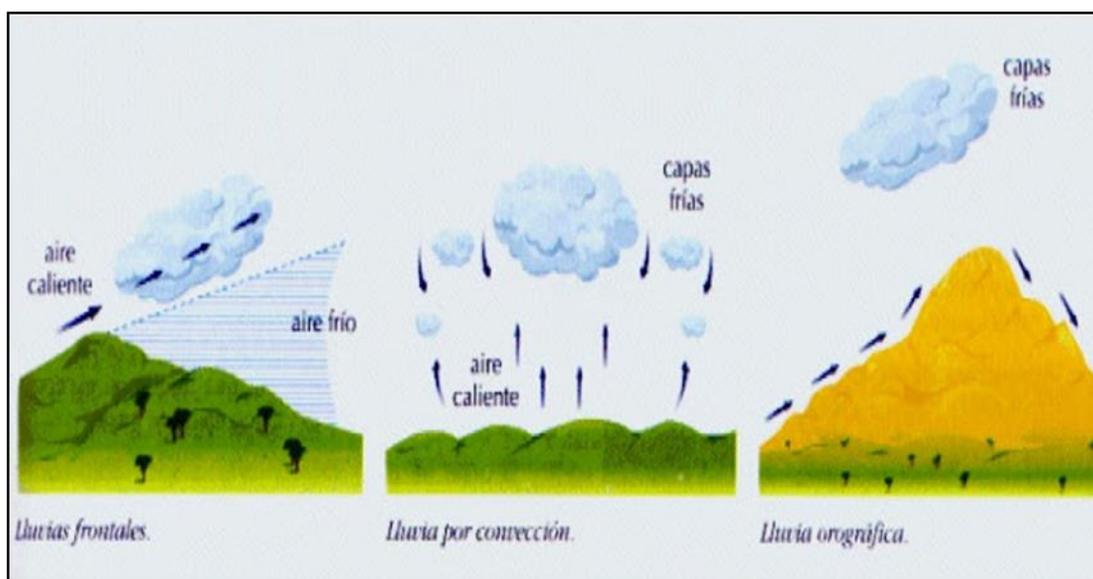


Figura 6. Tipos de lluvia
Fuente: Peinado Anselmo, (2018)

2.4 Medición y observación de la precipitación

La unidad que predomina para medir y registrar las precipitaciones son el milímetro (mm), que es una medida que equivale a una milésima parte del metro. La precipitación que está

medida en (mm), también puede ser expresada en litro por metro cuadrado $\left(\frac{1}{m^2}\right)$. El milímetro será la unidad usada en todas las fases de este proyecto de investigación.

Para efectuar la medición de la precipitación las estaciones pluviométricas se cuentan con pluviómetros o en su defecto un pluviógrafo.

La precipitación es una de las variables más importantes dentro del ciclo hidrológico, por lo que surge la necesidad de contar con instrumentos y dispositivos que permitan obtener los valores que puede tomar esta variable. Algunos de ellos son los siguientes:

- Pluviómetros
- Pluviógrafos
- Radares
- Satélites

2.4.1 Pluviómetros

Los pluviómetros son instrumentos que están formados por un recipiente graduado el cual tiene encima un embudo o boca de captación con la función de captar el agua de lluvia. En ocasiones encima de la boca de captación se pone una malla con el propósito de evitar que objetos extraños como hojas o basura caigan dentro del pluviómetro. Es importante señalar también que dependiendo del país donde se localice el pluviómetro serán las dimensiones de los diámetros del cilindro graduado y la boca de captación (Breña, 2015:105)

Un pluviómetro, entonces recoge una muestra de precipitación y en cuanto mayor es el tamaño de la muestra, en este caso la superficie de colecta, mayor es la precisión de la estimación, pero también puede ser menor la practicidad, es decir el uso para muestras muy pequeñas de lluvia.

El área de colecta que tienen los pluviómetros de la red pluviométrica nacional (avalados por la OMM) es de 200 cm², es de forma circular y tiene el borde biselado. Como el pluviómetro se mide una sola vez al día, entonces es necesario prever de algún mecanismo para minimizar la evaporación del agua colectada. La medición de la precipitación se realiza midiendo el

agua almacenada en el recipiente con una probeta especialmente graduada para ese fin. Esta probeta especial es un accesorio que viene ya con el pluviómetro.

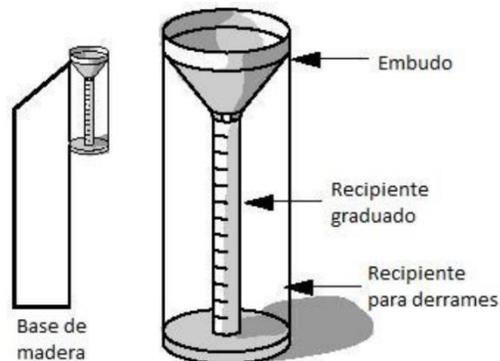


Figura 7. Pluviómetro

Fuente: Pluviómetros y pluviógrafos, (2019)

2.4.2 Pluviógrafos

Los pluviógrafos son instrumentos muy parecidos a los pluviómetros sólo que tienen algunas diferencias que permiten medir la precipitación de manera continua y no cada 24 horas. Estos tienen la ventaja de que cuentan con un mecanismo, el cual varía de pluviógrafo a pluviógrafo, que va haciendo un registro continuo de la cantidad de lluvia que cae en el lugar donde se encuentra, lo que permite saber no sólo cuánto llovió hasta el momento en que se toma la lectura, sino también la distribución temporal de la lluvia (Breña, 2015:105)

Un pluviógrafo proporciona información acerca del inicio, duración e intensidad de la lluvia. Existen distintos tipos de pluviógrafo, siendo el más corriente el de sifón. En el sifón el agua recogida pasa a un depósito con una boya. El movimiento ascendente de la boya al llenarse es transmitido a una pluma que va dejando el registro en una banda. La pendiente de la gráfica en su subida indica la intensidad de la lluvia. Entonces, el registro que la pluma del pluviógrafo va trazando corresponde a la cantidad de precipitación registrada por el instrumento, a este registro se le conoce como pluviograma y simplemente es una gráfica que refleja el comportamiento de la lluvia en función del tiempo de duración de la misma.

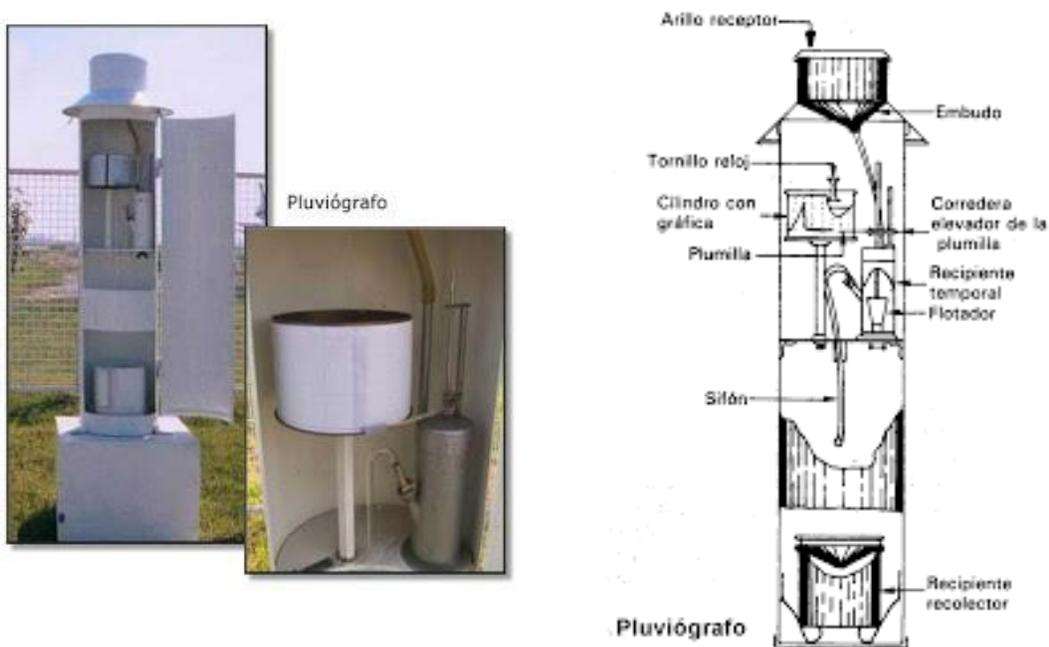


Figura 8. Pluviógrafo

Fuente: Pluviómetros y pluviógrafos, (2019)

2.4.3 Radares

Los radares son instrumentos de monitoreo atmosférico de gran alcance que permiten la evaluación de intensidades de lluvia con una alta resolución (alrededor de 60 km), tanto en el tiempo como en el espacio (Moshinsky, 1995:303)

En meteorología un radar meteorológico es usado para localizar precipitaciones, calcular sus trayectorias y estimar el tipo y naturaleza como; lluvia, nieve, granizo, etc.

El principio de funcionamiento de un radar es como se muestra a continuación:

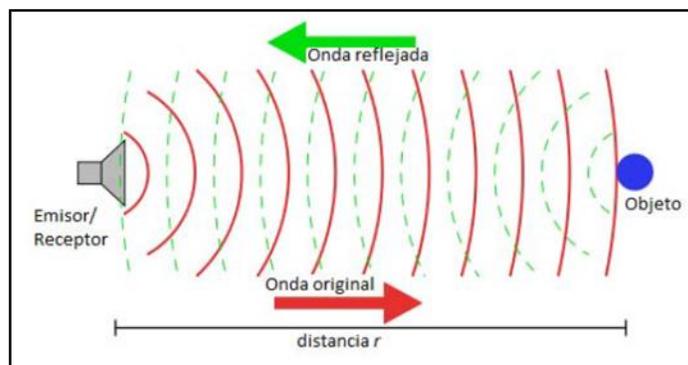


Figura 9. Radar meteorológico

Fuente: Teledetección y Radares Meteorológicos, (2015)

2.4.4 Satélites

Los satélites meteorológicos son una herramienta que se emplea para la observación del clima y la atmósfera, así como todos aquellos fenómenos relacionados a ella, este tipo de satélites proporcionan información actualizada de manera permanente acerca de las condiciones climatológicas a nivel regional y global. (Ravelo y Santa, 2000:52) Los satélites se caracterizan por brindar información bajo ciertas resoluciones espaciales (tamaños de pixel) y resoluciones temporales diferentes.

Una manera de estimar la precipitación es a través de los satélites meteorológicos. Este tipo de herramientas (productos satelitales), han surgido recientemente y en comparación con los pluviómetros, pluviógrafos y radares, estas son de gran utilidad ya que cubren grandes extensiones en la superficie terrestre, que no pueden ser cubiertos por los métodos de medición clásicos.(Asurza Véliz et al., 2018:24) De ahí que cobran bastante importancia los satélites meteorológicos dentro del área de la climatología e hidrología.



Figura 10. Satélite Meteorológico.

Fuente: Sánchez, M. (2019)

2.5 Información Hidrometeorológica

La hidrometeorología estudia el comportamiento y la acción de factores atmosféricos. La observación, interpretación y análisis de suficientes datos hidrológicos y meteorológicos es de primordial importancia aun para proyectos simples que se hacen en la ingeniería civil, o para otros más importantes y complejos como por ejemplo en los casos de sistemas de riego, navegación o producción de energía, etc.

2.6 Teoría De Errores

Por mucho cuidado que se tenga al efectuar las mediciones y por muy sensible si precisos que sean los instrumentos utilizados, es prácticamente imposible evitar los errores considerando a estos como la variación entre los valores medidos y el valor real o verdadero, el cual generalmente es desconocido.

2.6.1 Clasificación de errores

Teniendo en cuenta su origen los podemos definir en:

- ✚ Errores graves o faltas
- ✚ Errores sistemáticos
 - Error de paralaje
 - Error de cero
 - Error de escala
 - Error debido al método
- ✚ Errores accidentales o aleatorios

2.6.2 El proceso de medición

Medir es comparar la unidad patrón de medida con la magnitud física hacer medida. En las operaciones de medición se cometen varios errores que provienen de diferentes fuentes, por lo tanto, en física es muy importante poder acotar el error cometido, y siempre que se da la medida de algo preciso, se debe indicar el error cometido en dicha medición.

2.6.3 Mediciones directas

Se obtiene como resultado de la aplicación directa del instrumento de medición se lleva a cabo en forma manual y visual. Por ejemplo; longitud, masa, tiempo. En las mediciones directas el error cometido se debe a la utilización del proceso de la medición, para lo cual se aplica las fórmulas estadísticas, a partir de las cuales se puede determinar el valor verdadero de una serie de mediciones.

El valor más probable de un conjunto de mediciones directas, es el valor medio o media aritmética del conjunto de mediciones. Esto es:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

El error de cada medición o la desviación es:

$$S_1 = X_i - \bar{X} \quad (2)$$

El error medio cuadrático es:

$$m = \sqrt{\frac{\sum S_i^2}{n}} \quad (3)$$

El error medio cuadrático **m** es el error cuyo cuadrado es igual a la suma de todos los cuadrados de los errores dividida por el número de observaciones.

La relación entre el error medio cuadrático **m** y **k**, precisión del método es:

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} * \frac{1}{m} \quad (4)$$

El error del valor medio **E** o el error del promedio es:

$$E = \frac{m}{\sqrt{n-1}} \quad (5)$$

Introduciendo la expresión (3) en (5), se tiene:

$$E_a = \sqrt{\frac{\sum S_i^2}{n(n-1)}} \quad (6)$$

El resultado final de la medición de la cantidad *X* se expresa de la forma siguiente:

$$X = \bar{X} \pm E \quad (7)$$

En las mediciones directas también se suele calcular el “error relativo” y el “error porcentual” que se definen por las siguientes expresiones:

$$e_r = \frac{E}{\bar{X}} \quad ; \quad e_p = e_r * 100 = \frac{E}{\bar{X}} * 100 \quad (8)$$

2.6.4 Mediciones indirectas

Las mediciones indirectas, se obtienen a partir de las relaciones funcionales o fórmulas conocidas a partir de resultados de otras mediciones, en estas mediciones se efectúan operaciones matemáticas, como multiplicación, división, suma o resta. Ejemplo. Determinación del volumen, área, densidad, energía cinética, etc. Cuando se trata de una medición indirecta, el error aumenta (se propaga) debido a que el resultado depende de varias variables que tienen sus propios errores al ser medidas. En estos casos el error de la medición se calcula por la suma de los errores cometidos por cada una de las variables, según el peso que tengan dentro de la fórmula para obtener la medida indirecta.

Si queremos determinar el error de la medición de la variable X que depende de las variables $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$.

$$X = f(v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) \quad (9)$$

Para encontrar la variación de X , debemos derivar la función con respecto a cada una de las variables independientes.

$$E_X = \frac{\partial f}{\partial v_1} \Delta v_1 + \frac{\partial f}{\partial v_2} \Delta v_2 + \frac{\partial f}{\partial v_3} \Delta v_3 + \dots + \frac{\partial f}{\partial v_n} \Delta v_n \quad (10)$$

$$E_X = \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{\partial f}{\partial v_i} \Delta v_i \right| \right) \quad (11)$$

Donde

E_X = Error de la variable X .

Δv_i = Error cometido en la medición de la variable i .

$\frac{\partial f}{\partial v_i}$ = Derivada parcial de la función con respecto a la variable i .

2.6.5 Propagación de los errores

Cuando el valor que se quiere medir no se puede hacer en forma directa es decir que depende de los valores tomados en forma independiente de otras magnitudes. El error cometido en la medición de una magnitud derivada, depende de los respectivos errores de las magnitudes de las cuales se deduce, es decir cómo se propagan los errores.

2.6.6 El uso de los decimales

En la práctica se presentan cálculos en los que intervienen factores con distinta precisión para lo que dan algunas reglas de ajuste en el cálculo numérico:

- a) en las sumas y restas de diferentes medidas, la precisión del resultado está determinado por el sumando de menor precisión. Por ejemplo efectuar las siguiente suma:

$$S = 240,6 + 24,75 - 3,678 + 0,96 = 262,632$$

Según lo dicho anteriormente la suma se debe recordar a: $S=262,6$

- b) En el caso de productos y cocientes, la precisión del resultado le corresponde al de menor precisión. Por lo tanto el número de cifras significativas del producto de varias cantidades, debe ser el mismo que el número de cifras significativas el factor de menor precisión. Por ejemplo se ha medido un paralelepípedo cuyos lado son:

$$a = 12,62 \text{ cm} ; b = 3,4 \text{ cm} ; c = 40,25 \text{ cm}$$

El volumen será:

$$V = a * b * c = 12,62 * 3,4 * 40,25 = 1727,047 \text{ cm}^3$$

El número de decimales del resultado (volumen) depende del error accidental del instrumento menos preciso usado en la obtención de dicha propiedad física.

2.6.7 Redondeo

Es usual redondear las cifras tanto de los datos como de las constantes e intervienen en las fórmulas y los resultados se rigen por las siguientes reglas.

- Se eliminan los dígitos cuando ellos valen menos de la mitad de la unidad del último orden de los que se conservan.
- Si valen más de la mitad, se aumenta en una unidad al último dígito que se conserva.
- Si el dígito eliminar vale exactamente la mitad, se deja la última cifra con su valor si ella es par y se aumenta en una unidad si es impar.

2.7 Calibración y validación de datos

La calibración de un equipo de medida siempre implica realizar un estudio de forma que se puede asociar a cada valor aportado por el instrumento una incertidumbre de medida. Es decir, la calibración permite a partir de una indicación del instrumento, conocer el intervalo en el que con una probabilidad dada se encuentra el valor de aquello que estamos midiendo. Por lo tanto, cuando se realiza una calibración, siempre se debe obtener un valor no negativo que caracterice la distribución de los valores de aquello que se mide.

Así pues, no debemos confundir la calibración con los ajustes que realiza el propio aparato, pero tampoco con las verificaciones que se realizan durante su uso. Por ejemplo, cuando nosotros pesamos una masa patrón antes de utilizar una balanza, estamos verificando su idoneidad, pero no la estamos calibrando. (Xu et al., 2017) La verificación de un instrumento implica el aporte de una evidencia de que funciona de forma adecuada. Por este motivo, tampoco sería adecuado considerar que se está verificando un equipo cuando se realiza una calibración.

Otro término que no siempre está claro a la hora de gestionar nuestros métodos y procesos de trabajo es el de validación. Este concepto se define como la verificación de que los requisitos especificados son adecuados para su uso previsto. Es decir, la validación implica un estudio de nuestro método de trabajo para demostrar que es el más adecuado. Si empleamos métodos normalizados (por ejemplo normas publicadas por organismos reconocidos) no sería necesario realizar una validación completa, pero sí es conveniente estudiar algunas características metrologías para garantizar que el método se está empleando de forma adecuada (Gupta et al., 1999), Es lo que se conoce como validación secundaria.

2.7.1 Datos del SENAMHI

2.7.1.1 Registros de precipitación

Los datos registrados de precipitación de las estaciones meteorológicas que están controladas y monitoreadas por el SENAMHI, se encuentran disponibles para cualquier usuario en su página web: <http://senamhi.gob.bo/>

La serie de registros de datos mensuales constan de diferentes periodos de observación independientemente para cada pluviómetro. Sin embargo, el presente estudio de

investigación se extiende a considerar desde el año 2004 hasta el año 2019 por la concordancia con las imágenes de precipitación disponibles del producto PERSIANN-CCS.

La ubicación de los pluviómetros base en estudio, se encuentra distribuidos en el valle central de Tarija, tal como se muestran en la figura 11.

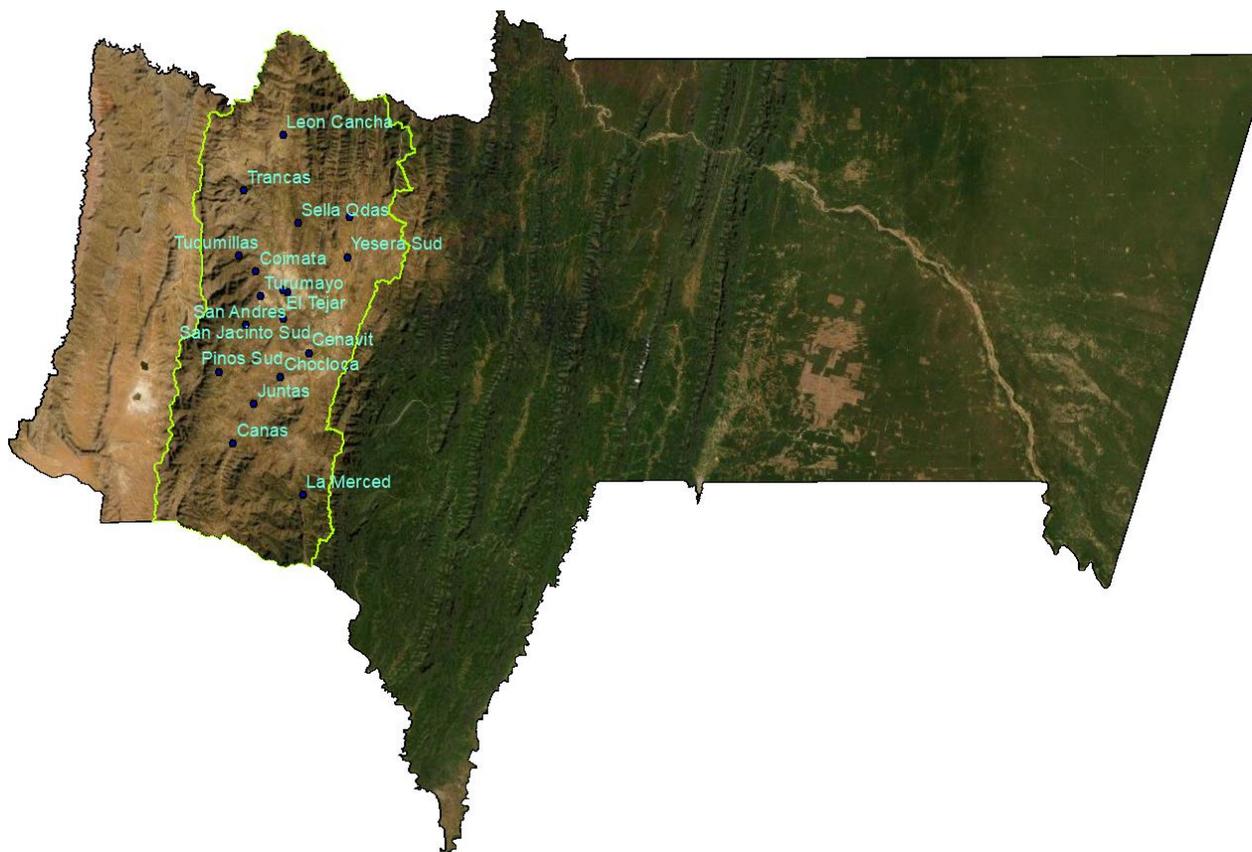


Figura 11. Estaciones seleccionadas para la zona del valle central del dpto. de Tarija.

Fuente: Elaboración Propia.

Para el presente estudio se escogieron 17 estaciones pluviométricas con las consideraciones siguientes; que se encuentren dentro de zona de estudio (valle central de Tarija) y que cuenten con el periodo de registro establecido anteriormente, este último para evaluar los productos de precipitación satelital coincidentes con el periodo de registro del producto de precipitación en base satelital.

Las estaciones seleccionadas se muestran a continuación, en la siguiente tabla:

TABLA 1. Estaciones pluviométricas

N°	ESTACION	TIPO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (m.s.n.m.)
1	Aeropuerto	Climatológica	21° 32' 48"	64° 42' 39"	1.849
2	Cañas	Climatológica	21° 54' 08"	64° 51' 03"	2.078
3	Cenavit	Climatológica	21° 41' 31"	64° 39' 29"	1.730
4	Chocloca	Climatológica	21° 44' 53"	64° 43' 46"	1.795
5	Coimata	Climatológica	21° 29' 57"	64° 47' 20"	2.027
6	El Tejar	Climatológica	21° 32' 35"	64° 43' 16"	1.859
7	La Merced	Climatológica	22° 01' 29"	64° 40' 36"	1.509
8	San Andrés	Climatológica	21° 37' 24"	64° 48' 54"	1.987
9	San Jacinto Sud	Climatológica	21° 36' 37"	64° 43' 12"	1.820
10	Sella Qdas	Climatológica	21° 23' 11"	64° 40' 52"	2.145
11	Trancas	Climatológica	21° 18' 29"	64° 48' 57"	2.198
12	Tucumillas	Climatológica	21° 27' 40"	64° 49' 52"	2.557
13	Turumayo	Climatológica	21° 33' 24"	64° 46' 42"	1.978
14	Yesera Norte	Climatológica	21° 22' 20"	64° 33' 03"	2.277
15	Yesera Sud	Climatológica	21° 28' 02"	64° 33' 30"	2.092
16	León Cancha	Pluviométrica	21° 10' 42"	64° 42' 55"	2.729
17	Pinos Sud	Pluviométrica	21° 44' 0"	64° 53' 0"	2.100

Fuente: Elaboración propia.

2.7.1.2 Precipitación media mensual

La precipitación media mensual se define como el promedio aritmético de un registro o grupo de datos de precipitación en un mismo mes.

Actualmente la creciente necesidad de un conocimiento de la hidrología en áreas como el manejo de recursos hídricos, evaluación del potencial de aprovechamiento hídrico, la producción agropecuaria, entre otras ha motivado al estudio de la distribución espacial de las lluvias, para lo cual la precipitación media mensual (PMM) es una variable fundamental y muy utilizada.

2.8 Productos PERSIANN

Durante las últimas 2 décadas, el conjunto de productos de precipitación PERSIANN se ha desarrollado en el Centro de Hidrometeorología y Percepción Remota (CHRS) de la Universidad de California, Irvine, en colaboración con la NASA, la NOAA y el programa de la UNESCO para la Red mundial de información sobre el agua y el desarrollo para las tierras áridas. (Coy Murcia, 2017) La familia PERSIANN incluye tres productos de estimación de

precipitaciones basados en satélites, a saber, PERSIANN, PERSIANN-CCS y PERSIANN-CDR. Los productos son accesibles.

Los algoritmos PERSIANN “Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks”, estima la lluvia a partir de información de textura de nube de imágenes infrarrojas de onda larga obtenidas de imágenes de múltiples satélites geosincrónicos (GOES-8, GOES-10, GMS-5, MeteoSat-6, y MeteoSat-7) proveídos por el CPC-NOAA que se actualizan usando estimaciones de lluvia de alta calidad de sensores de microondas pasivos de satélites TRMM, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, DMSP-F13, DMSP-F14, DMSP-F15. (Gómez y Guzman, 2015)

Recientemente, el CHRS-UCI desarrollaron una nueva versión del PERSIANN, el PERSIANN-CCS “PERSIANN - Cloud Classification System”, que introduce la categorización de las nubes en base a la altura en el tope de la nube, geometría y textura, estimada a partir de imágenes de satélite para obtener intensidades de lluvia de diferentes nubes y resolución espacial de 0,04° (Castro y Pérez, 2011)

2.8.1 Estimación de la precipitación PERSIANN-CCS

El producto PERSIANN-CCS tiene un conjunto de datos de alta resolución desde el 2002 hasta la fecha actual. Este algoritmo clasifica la nube en función de la altura y sus propiedades geométricas a partir de imágenes satelitales. (Hong et al., 2007) Los valores de lluvia en los pixeles de cada segmento de la nube son asignados en función de una curva específica que describe la relación tasa de lluvia y temperatura de brillo de la nube.

El algoritmo PERSIANN –CCS extrae información a tres temperaturas diferentes las cuales son; 220°, 235°, y 253° kelvin, para obtener así de esta manera obtener intensidades de lluvia de diferentes tipos de nubes, de acuerdo a la clasificación de las mismas, lo que ayuda en la detección de nubes cirros, cúmulos, nimbos, entre otras y distinguir diferentes sistemas convectivos de la precipitación, ver Figura 12.

A continuación se presenta la categorización que realiza el algoritmo interno del producto de precipitación bajo diferentes parámetros y características:

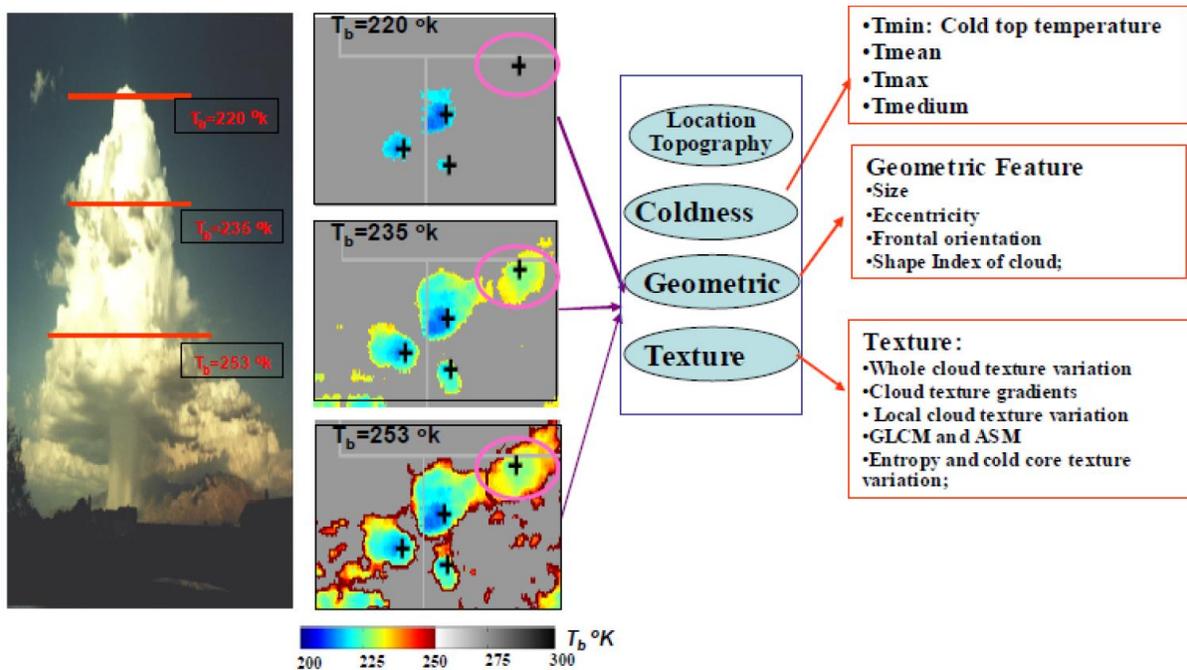


Figura 12. Sistema de categorización de nubes con el producto PERSIANN-CCS

Fuente: Kuo-lin et al., (2010)

El algoritmo consta de cuatro pasos importantes:

Primero paso, la imagen de la nube infrarroja se segmenta en función de diferentes umbrales de temperatura utilizando un enfoque de umbral de temperatura incremental (ITT). Luego, se extraen las características como temperatura, geometría, y textura se extraen de las imágenes segmentadas en un intento de distinguir entre diferentes tipos de nubes y asignar el parche de nubes 1 de 400 clasificaciones. En el tercer paso, el algoritmo de agrupación se utiliza para clasificar las características extraídas de la nube en categorías distintas. Cuarto paso, para cada grupo de características resultante del paso anterior, se desarrolla una relación entre la temperatura de brillo y la tasa de lluvia utilizando la comparación de histogramas y la función exponencial no lineal (Hong et al., 2007:59).

En la siguiente figura, se presenta la clasificación que realiza el algoritmo interno del producto de precipitación PERSIANN-CCS:

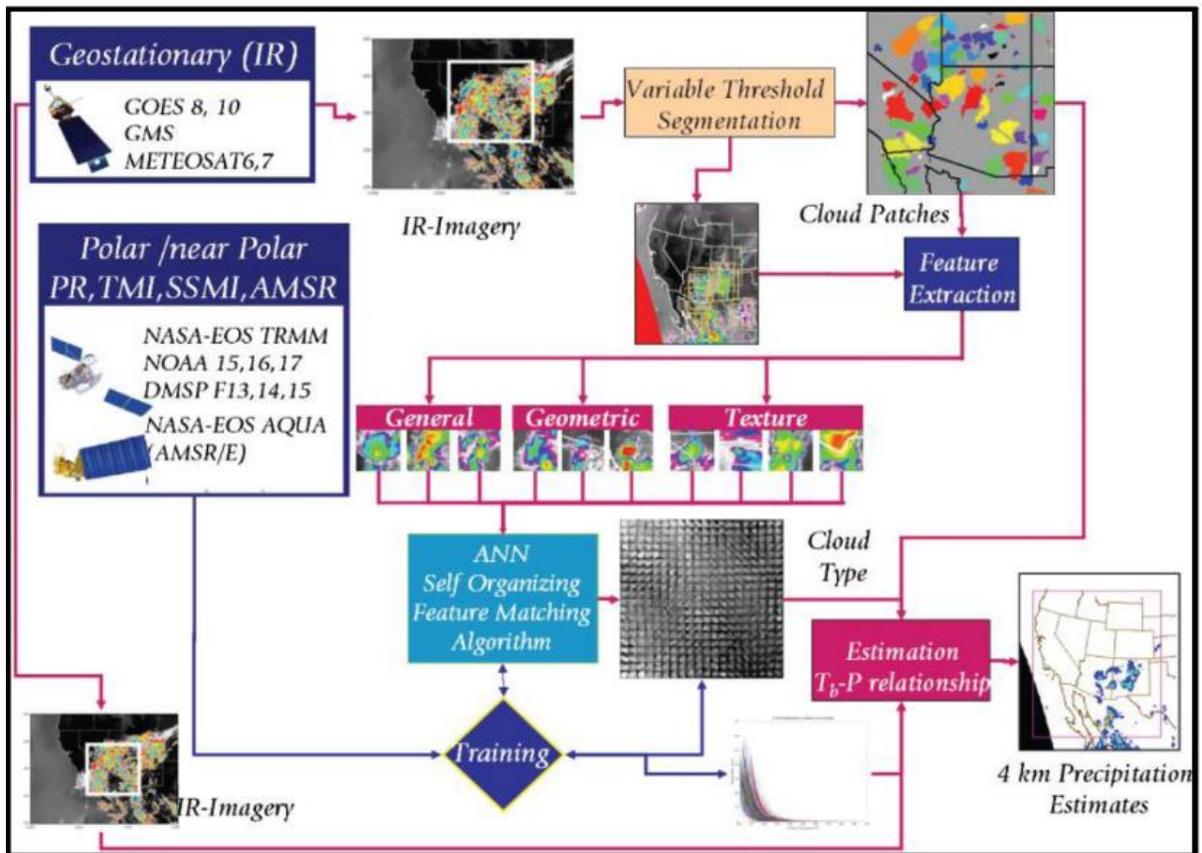


Figura 13. Clasificación y estimación de lluvia del algoritmo PERSIANN-CCS

Fuente: Hong et al., (2007)

2.8.2 Resolución espacial

La resolución espacial del producto es de 0,04° (aprox. 4 km de lado de pixel). Dicha resolución para éste proyecto será modificada a 1,0 km

2.8.3 Resolución Temporal

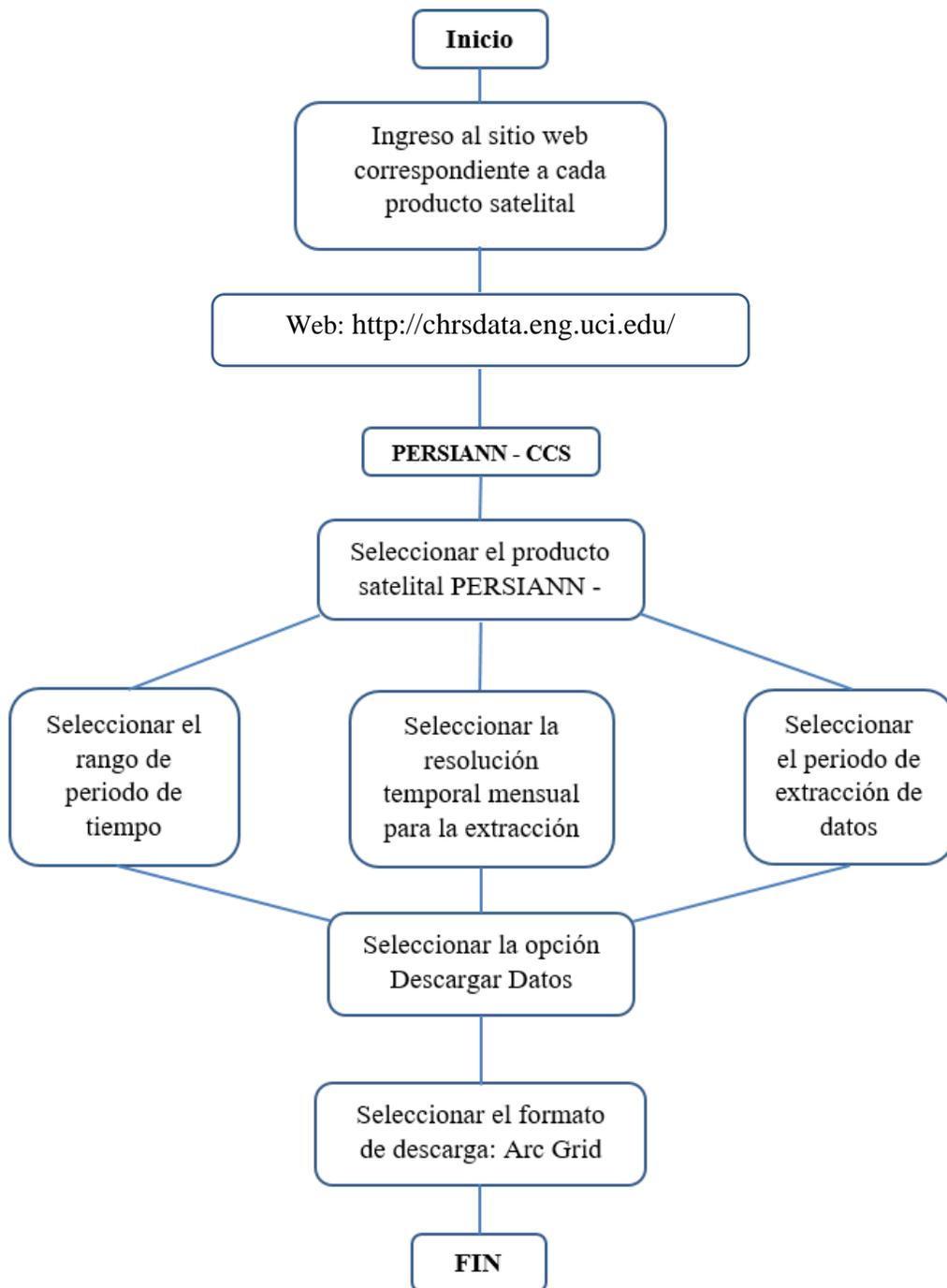
El producto PERSIANN-CCS tiene una resolución temporal horaria, diaria y mensual. En este proyecto se utilizará únicamente la resolución del producto – temporal/mensual.

2.9 Extracción de los datos del producto satelital

Los datos de precipitación de los productos satelitales se extraerán del siguiente enlace:

Web: <http://chrsdata.eng.uci.edu/>

Mapa conceptual del proceso de extracción de la información satelital.



2.10 Análisis Estadístico a Productos de Precipitación Satelital

2.10.1 Coeficiente de determinación (R^2)

Para verificar que un modelo se ajusta a otro, se trabaja con el coeficiente de determinación, que describe la proporción de la varianza en los datos observados que puede ser explicada por el modelo. El R^2 fue clasificado bajo los criterios de muy bueno $>0,95$, bueno de $0,85 - 0,95$, satisfactorio de $0,65 - 0,85$ e insatisfactorio $<0,65$ (Andersen et al., 2001:8)

En el caso de un predictor perfecto R^2 es 1

$$R^2 = 1 - \frac{(n - 1)}{n} * \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

Donde:

R^2 : Coeficiente de determinación.

N: Numero de observaciones.

x_i : Valor Observado

\hat{x}_i : Valor estimado por el producto

\bar{x} : Promedio de los datos observados.

2.10.2 Coeficiente de Correlación $r = \sqrt{R^2}$

Se utiliza para determinar la relación o grado de correlación entre datos observados y datos estimados. Corresponde a la raíz cuadrada del coeficiente de determinación y es una medida del grado de asociación entre dos variables, si son completamente independientes el coeficiente de correlación toma valor cero (Barria, 2010:32)

Entonces, se puede definir que el coeficiente de correlación (r), es un término utilizado en estadística, que tiene como función principal predecir el resultado de hipótesis. Es elemental en cualquier estudio con fundamentos científicos y sus aplicaciones pueden tener un amplio rango y en diferentes áreas. (Rivas, 2015:14) El resultado puede variar entre 0 a 1, esto significa que mientras más cerca esté del uno estará más ajustada a la variable que intenta

probar, mientras en el caso contrario, es decir, cuanto más se acerca a 0 menos fiable serán las muestras comparadas ya que estará menos ajustado el modelo.

También se puede decir de otra manera que mediante el cálculo del coeficiente de correlación se puede observar y analizar el comportamiento de una variable “x” respecto una variable “y”, en este caso se comprueba la veracidad de los datos del satélite TRMM y PERSIANN CCS respecto al comportamiento de los datos de las estaciones, Siendo la PMM, variable de estudio para las estaciones y los satélites. (Asurza et al., 2018:26)

Según (Barria, 2010:32) El coeficiente de correlación (r) fue clasificado bajo varios criterios, los cuales se muestran a continuación:

r = 0,2 a r = 0,3 coeficiente de correlación muy bajo.

r = 0,4 a r = 0,5 coeficiente de correlación bajo.

r = 0,6 a r = 0,7 coeficiente de correlación alto.

r = 0,8 a r = 1,0 coeficiente de correlación muy alto

El coeficiente de correlación se lo obtiene mediante la siguiente formula:

$$r = \sqrt{R^2} \quad (13)$$

Donde:

R^2 = coeficiente de determinación.

r = coeficiente de correlación.

2.11 Análisis de consistencia a los datos de precipitación

Dentro de la ciencia de la hidrología, cualquier hidrólogo, especialista o investigador que sea, que este haciendo un estudio o proyecto con base a datos meteorológicos, debe buscar en primera instancia la información pertinente a la zona que considere de estudio y sobre todo debe hacerse la siguiente pregunta: ¿Es confiable la información disponible obtenida?

(Villón Béjar M., 2002:307-308), en su libro “Hidrología estadística” menciona que la respuesta a esa pregunta, se obtiene realizando un análisis de consistencia de la información disponible, mediante criterios físicos y métodos estadísticos que permitan identificar, evaluar

y eliminar los posibles errores sistemáticos que han podido ocurrir, sean por causas naturales u ocasionada por la intervención de la mano del hombre.

Entonces, ante esta incertidumbre sobre la fiabilidad de los registros, existen en la actualidad diferentes maneras de realizar la evaluación a la serie de datos analizada, desde métodos simples y sencillos hasta los más avanzados con el uso de herramientas informáticas.

En este proyecto se realizara evaluación de consistencia con diferentes métodos seleccionados a priori, los más eficaces y más utilizados en la actualidad. Los que se desglosan a continuación.

2.11.1 Análisis gráfico - visual

En las coordenadas cartesianas se grafica la información hidrológica histórica, ubicándose en las ordenadas, los valores de la serie y en las abscisas el tiempo.

Un ejemplo de una serie acumulada promedio mensuales se muestra en la siguiente figura:

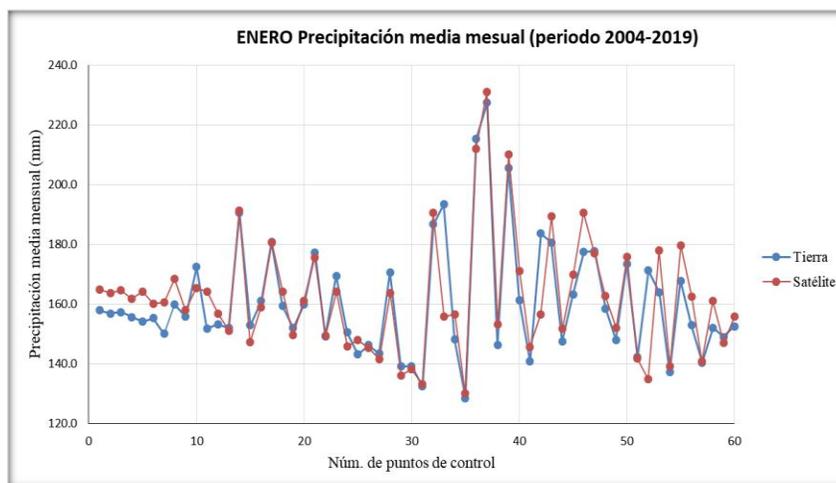


Figura 14. Análisis gráfico-visual

Fuente: Elaboración Propia.

Este gráfico sirve para analizar la consistencia de la información hidrológica en la forma visual, e indicar el período o periodos en los cuales la información no tiene confiabilidad o es dudosa, lo cual se puede reflejarse como picos muy altos o valores muy bajos, saltos y/o tendencias, lo mismo que deberán comprobarse, si son fenómenos naturales que efectivamente han ocurrido, o si son producto de errores sistemáticos.(Véliz y Alexander, 2017:44)

Para conocer las causas de las posibles anomalías, se puede analizar de diversas formas. Como por ejemplo:

- Cuando se tienen estaciones vecinas, se comparan los gráficos de las series históricas y se observa cuál período varía notoriamente uno con respecto a lo otro.
- Cuando se tiene una sola estación, está se divide en varios periodos y se comparan con la información obtenida en campo.
- Cuando se tienen datos de precipitación y escorrentía, se comparan los diagramas, los cuales deben ser similares en todo su comportamiento.

Para poder interpretar estas comparaciones que se hace, se efectúa conjuntamente con el análisis de la curva doble masa.

2.11.2 Análisis estadístico

Este análisis se lo realiza generalmente después de obtener los gráficos construidos para el análisis visual y el análisis de la curva doble masa, los periodos de posible corrección y los periodos de datos que se mantendrán con sus valores originales por ser una muestra de datos representativo, se procede realizar al análisis estadístico de saltos, tanto en la media como la desviación estándar.

2.11.2.1 Análisis de saltos

2.11.2.1.1 Consistencia de la media

Calculo de la media y de la desviación estándar para las submuestras, según:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \quad ; \quad s_1(x) = \left[\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} x_j \quad ; \quad s_2(x) = \left[\frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Donde:

x_i = Valores de la serie del periodo 1

X_j = Valores de la serie del periodo 2

\bar{x}_1, \bar{x}_2 = Media de los periodos 1 y 2 respectivamente.

$S_1(x), S_2(x)$ = Desviación estándar de los periodos 1 y 2 respectivamente.

n = Tamaño de la muestra.

n_1, n_2 = Tamaño de las submuestras.

$n = n_1 + n_2$

Cálculo de t calculado (t_c) según:

$$t_c = \frac{(x_1 - x_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_{\bar{d}}} \quad (16)$$

Por lo tanto queda que:

$$t_c = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{\bar{d}}} \quad (17)$$

Además se tiene que:

$$S_{\bar{d}} = S_p \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$S_p = \left[\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right] \quad (19)$$

Donde:

$S_{\bar{d}}$ = Desviación de las diferencias de los promedios.

S_p = Desviación estándar ponderada.

Calculo de t tabular t_t :

El valor crítico de t se obtiene de la tabla t de Student. Con una probabilidad del 95%, o con un nivel de significación del 5% $\alpha = 0.05$ y con grados de libertad; $v = n_1 + n_2 - 2$

Comparación del t_c con el t_t :

- Si: $|t_c| \leq t_t$ (95%) entonces, $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$ (Estadísticamente iguales). En este caso no se debe hacer ningún proceso de corrección.
- Si: $|t_c| > t_t$ (95%) entonces, $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ (Estadísticamente no son iguales). En este caso, se debe corregir la información.

2.11.2.1.2 Consistencia de la desviación estándar

Calculo de la varianza para ambos periodos:

$$S_1^2(x) = \left(\frac{1}{n_1 - 1}\right) \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \quad (20)$$

$$S_2^2(x) = \left(\frac{1}{n_2 - 1}\right) \sum_{i=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \quad (21)$$

Calculo de **F** calculado (F_c), según:

$$F_c = \frac{S_1^2(x)}{S_2^2(x)}, \quad \text{si } S_1^2(x) > S_2^2(x) \quad (22)$$

$$F_c = \frac{S_2^2(x)}{S_1^2(x)}, \quad \text{si } S_2^2(x) > S_1^2(x) \quad (23)$$

Calculo de F tabular (valor critico de F o F_t), se obtiene mediante tablas, para una probabilidad del 95%, es decir, con un nivel de significación del 5% $\alpha = 0,05$ y grados de libertad:

$$G. L. N = n_1 - 1 \quad \text{si: } S_1^2(x) > S_2^2(x) \quad (24)$$

$$G. L. D = n_2 - 1$$

$$G. L. N = n_2 - 1 \quad \text{si: } S_2^2(x) > S_1^2(x) \quad (25)$$

$$G. L. D = n_1 - 1$$

Donde:

G.L.N = grados de libertad del numerador.

G.L.D = grados de libertad del denominador.

Comparación del F_c con el F_t :

- Si: $F_c \leq F_t$ (95%) entonces, $S_1(x) = S_2(x)$ (Estadísticamente iguales). En este caso no se debe hacer ningún proceso de corrección.
- Si: $F_c > F_t$ (95%) entonces, $S_1(x) \neq S_2(x)$ (Estadísticamente no son iguales). En este caso, se debe corregir la información.

2.11.2.1.3 Corrección de los datos

$$X'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_1}{S_1(x)} * S_2(x) + \bar{x}_2 \quad (26)$$

$$X'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_2}{S_2(x)} * S_1(x) + \bar{x}_1 \quad (27)$$

Donde:

$X'_{(t)}$ = Valor corregido de saltos.

x_t = Valor a ser corregido.

2.11.3 Software Hydraccess

El software HYDRACCESS fue desarrollado por el Ing. Philippe Vauchel del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) a fin de ayudar al hidrólogo a hacer el tratamiento de los registros hidrometeorológicos. El programa se basa sobre los paquetes Access y Excel. Éste programa, además, de manejar una base de datos, ofrece muchos tratamientos básicos como el Vector regional, Corr/vector que permiten hacer los análisis, la crítica y el tratamiento de la información.

Para la hidrología, el programa permite; Almacenar características de estaciones (ubicación, cuenca, río, administrador, informe histórico, inventario de datos disponibles, etc.), Calcular datos diarios, mensuales y anuales a partir de datos instantáneos (con el método de trapecios),

calcular el vector regional con el que se podrán rellenar datos de series mensuales como lo será en esta investigación y otros tratamientos más.

2.11.3.1 Método del Vector regional

El vector regional es una de las aplicaciones que tiene el Hydraccess, consiste en un modelo simple orientado al análisis de la información pluviométrica de una región o cuenca y a la síntesis de esa información. Este método fue desarrollado por el IRD (Instituto de investigación para el desarrollo) en los años 70 con el objetivo de homogenizar los datos pluviométricos.

Se elaboraron dos métodos para el cálculo del Vector Regional; uno por G. Hiez Y. y Brunet Moret.

El desarrollo del método de G. Hiez está basado en el cálculo de la moda de los datos, mientras que el de Brunet Moret está basado en el promedio de los datos, eliminando los valores demasiado alejados del promedio. Cada método estima una media extendida para cada estación sobre el período de trabajo y calcula los índices anuales de cada estación en una determinada cuenca o área de estudio.

El método clásico de crítica de datos anuales o mensuales consiste en efectuar análisis de dobles masas entre los valores de las estaciones tomadas dos a dos, para detectar eventuales heterogeneidades, y luego completar datos faltantes por correlación con los datos de la estación y de sus vecinas.

El método del vector regional consiste en elaborar, a partir de la información disponible, una especie de estación ficticia que sea representativa de toda la zona de estudio. Para cada punto o estación se calcula un promedio extendido sobre todo el período de estudio, y para cada año, se calcula un índice. A esta serie de índices anuales se le llama Vector Regional, ya que toma en cuenta la información de una cuenca o área de estudio que se supone es climáticamente homogénea en toda la región.

Después de haber elaborado el vector regional, el análisis de la información es de gran manera facilitada, entonces se podrá hacer lo siguiente:

- Evaluar la calidad de los datos de una estación por curvas de dobles acumuladas con los índices del vector regional.
- Analizar gráficamente y correlacionar los datos de una estación con los índices del vector regional.
- Evaluar los datos faltantes de una estación multiplicando el índice de un año del vector regional por el promedio extendido de la estación sobre el período de estudio.

Para calcular el vector se realizó las siguientes consideraciones:

- Para el cálculo del vector regional debemos tener como mínimo 3 estaciones por año, y 3 años como mínimo por estación, por lo tanto debemos verificar esta condición y de ser necesario calcularemos los datos faltantes con los registros de las estaciones más confiables y con registros más largos.
- La hipótesis principal de este método es el principio de “pseudo-proporcionalidad”, por lo cual los datos deben tener el mismo comportamiento (cantidad y variación temporal), es decir deben tener una tendencia climática regional masomenos uniforme.
- La pseudo-proporcionalidad de una zona es medida por el valor del coeficiente de correlación media entre las estaciones y el vector correspondiente (en caso de estricta proporcionalidad este valor es igual a 1). Este coeficiente en el Hydraccess aparece como “Correl. /Vector”.

2.11.3.1.1 Método de Brunet Moret

Brunet-Moret (1979), consideró que una zona climatológica puede estar representada por un vector cuya esperanza matemática es igual a 1, entonces la ecuación $A = B + E$ se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{x_{ij}}{x_{mj}} = Z_1 + e_{ij} \quad (28)$$

Donde:

x_{ij} : Es el total anual de la estación j para el año i

x_{mj} : Es la media de las x_{ij}

Z_1 : Es el componente del vector del año i

e_{ij} : Es la fluctuación aleatoria del año i de la estación j . la esperanza matemática de e_i es igual a 0

La matriz A (n, m) se compone de las precipitaciones de m estaciones durante n años, es en la mayoría de los casos incompleta con el fin de determinar cada X_{mj} y Z_1 el algoritmo de cálculo consiste en minimizar la siguiente ecuación:

2.11.4 Software TREND

El software TREND está diseñado para facilitar las pruebas estadísticas de tendencias, cambio y aleatoriedad en datos hidrológicos y otras series de tiempo. TREND tiene 12 pruebas estadísticas, basadas en el taller de expertos de la OMM/UNESCO sobre detección de tendencias / cambios.

TREND tiene 12 pruebas estadísticas, basadas en el taller de expertos de la OMM/UNESCO.

1. Mann-Kendall (prueba no paramétrica de tendencia)
2. Rho de Spearman (Prueba no paramétrica de tendencia)
3. Regresión lineal (Prueba paramétrica de tendencia)
4. Distribución CUSUM libre (prueba no paramétrica para salto de salto en la media)
5. Desviación acumulativa (prueba paramétrica para salto de paso en la media)
6. Relación de probabilidad de Worsley (prueba paramétrica para salto de salto en la media)
7. Rank-Sum (prueba no paramétrica para la diferencia en la mediana de dos periodos de saltos)
8. T de Student (prueba no paramétrica para la diferencia en la mediana de dos periodos de datos)
9. Cruce medio (prueba no paramétrica de aleatoriedad)
10. Puntos de inflexión (prueba no paramétrica de aleatoriedad)
11. Diferencia de rango (prueba no paramétrica para la aleatoriedad)
12. Autocorrección (prueba paramétrica para aleatoriedad)

2.12 Uniformidad espacial a los pixel de precipitación (aprox. 1 km)

El producto de precipitación en base satelital PERSIANN-CCS, tiene una resolución espacial de 0.04° lo que es equivalente a 4,453 x 4,453 km por lado de pixel, esta grilla de precipitación se encuentra en coordenadas geográficas WGS84 (en grados) lo cual es necesario llevar a coordenadas métricas (WGS84utmZ20S) ya que este trabajando esta en coordenadas UTM que tiene como unidad patrón el metro. Entonces, las proyecciones en las distintas proyecciones mencionadas, se vuelve más complejo a la hora de ubicar el pixel con la estación, por lo cual el tener una grilla de precipitación con un pixelado con un número entero, y en las mismas coordenadas que se realiza el trabajo (UTM), es lo que se requiere para continuar con este estudio, es por ello que se decidió transformar las coordenadas uniformizando la grilla de precipitación a coordenadas métricas y de este modo convirtiendo el pixel original de grados a metros, lo cual en dicho proceso se vio la opción de seguir utilizando el pixel distanciados a 4.453 metros, o trabajar distanciados a un número entero, que en este caso fueron a 1.000 metros, cabe mencionar que este proceso no afecta negativamente en cuanto a los datos de precipitación que se tienen, sino mas bien conseguimos uniformizar la grilla y transformar a coordenadas UTM y a su vez trabajamos con un pixelado mucho mas fino.

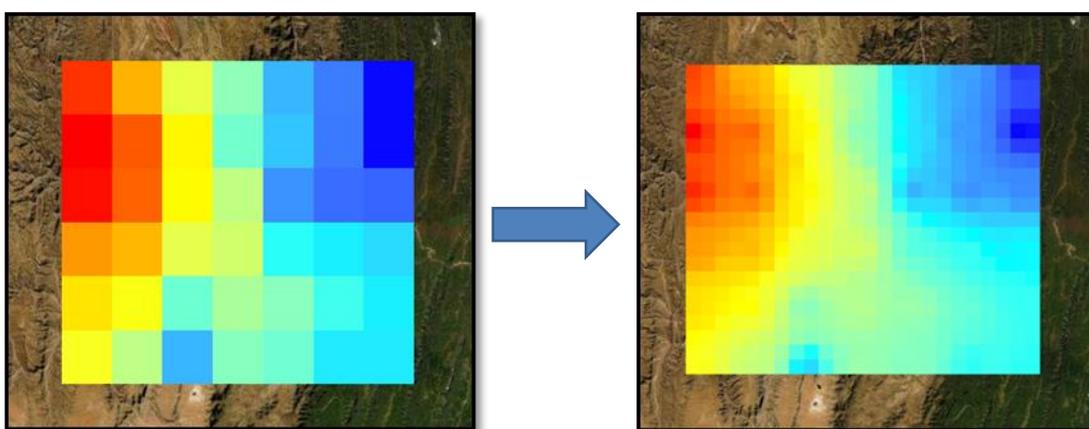


Figura 15. Resolución espacial mejorada de 4,453 km a 1,0km.

Fuente: Elaboración Propia

Cabe aclarar que se redujo la resolución del pixel de 4,453 km a 1,0 km para trabajar con una mayor cantidad de puntos de información, con la cual los puntos cubren de mejor manera el área de estudio. No se redujo a una resolución espacial menor a 1,0 km por criterio del autor de este trabajo de investigación, ya que el pixel a estar interpolado a una distancia más pequeña, no se encuentra diferencia significativa en los valores de precipitación, ya que la precipitación que cae en áreas circundantes pequeñas es casi la misma, por lo cual, solo varía el último decimal del valor interpolado, por lo cual no es conveniente realizar este trabajo, además, que la cantidad de información a tratar se vuelve demasiado amplia, haciendo un trabajo demasiado tedioso y complicado de procesar. Entonces, para mejorar el proceso de validación y ajuste de los datos satelitales con los datos tierra, es que se redujo el tamaño de pixel a 0,01° (aprox. 1,0 km). Para este trabajo se utilizó la herramienta de interpolación IDW incorporada en el software ArcGis.

2.12.1 Métodos de Interpolación

Existen diversos métodos para la interpolación de datos. Los cuales permiten determinar el valor de un punto intermedio en función a otros puntos conocidos a su alrededor. Uno de estos métodos para datos hidrológicos, con el cual se realizó el presente trabajo de investigación, se describe a continuación.

2.12.1.1 Inverso de la distancia al cuadrado IDW

IDW es un método avanzado de la técnica del vecino más próximo que utiliza la distancia de los puntos con datos hacia el punto desconocido, asignando un peso a los diferentes puntos con datos. Este método asume que cada punto posee una influencia local que disminuye con la distancia; de esta manera, el método pondera con mayor fuerza a los puntos con datos cercanos al punto de valor desconocido y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia (Tveito y Schöner, 2002:18)

Por lo general en la literatura se describe este método como uno de los más confiables y versátiles cuando se trata de información meteorológica, ya que como es nuestro caso, la precipitación, al ser una variable aleatoria esta puede tomar cualquier valor con cualquier probabilidad en cualquier punto de la superficie, la precipitación no es homogénea, por lo que este método aplica bien este concepto.

2.12.2 Interpolación de los datos de precipitación con el software ArcGis

Para la uniformidad espacial del pixel de cada imagen satelital de precipitación, para los mencionados productos en estudio, se hará la interpolación con el método de IDW a través el software Arcgis, con el fin de obtener mayor precisión en el proceso. Es por ello que para realizar el cambio de escala espacial del producto, este método es uno de los más fiables ya que para la interpolación de un punto, toma en cuenta la estación más cercana y valora con mayor peso hacia este punto cercano desconocido, en cuanto a los puntos que se encuentran más alejados del valor conocido, toman valores con menor fuerza por el hecho de que se encuentran muy distantes a la estación o punto conocido, pero a su vez, este, busca la estación más próxima, para interpolar su valor dejándose influenciar con mayor o menor intensidad según a distancia.

El software realiza la interpolación mediante la distancia inversa ponderada, determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. (Ver Figura 16)

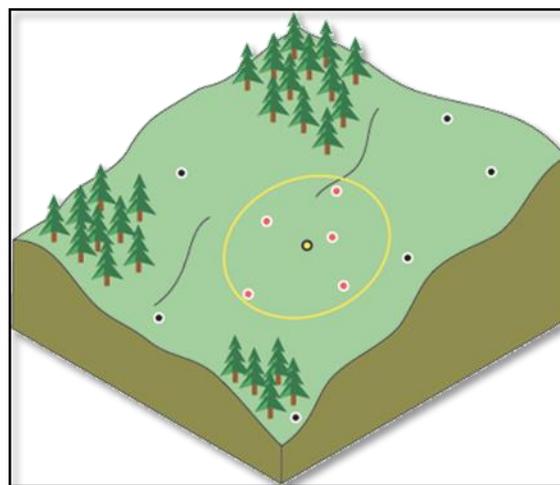


Figura 16. Método de interpolación IDW.

Fuente: Comparar métodos de interpolación—ArcGIS Pro, (2016)

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

La Investigación es Propositiva, porque se está explicando un fenómeno a detalle y mediante un modelo se pretende explicarlo. El trabajo de esta investigación utiliza un conjunto de técnicas y procedimientos con la finalidad de diagnosticar y resolver problemas fundamentales. Tiene por objeto el fomentar y propiciar la investigación científica como elemento para la formación integral de los profesionales. La investigación propositiva se caracteriza por generar conocimiento.

El enfoque de este trabajo, es cuantitativo, porque se está trabajando con series de datos hidrológicos, numéricos para ser procesados estadísticamente.

3.2 Recolección de la información

En la primera etapa del proyecto, se basará en la recolección de información perteneciente a la zona de los valles del departamento de Tarija, los datos serán; de precipitación acumulada mensual del periodo de registro de las estaciones administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. También los datos de precipitación acumulada mensual del producto satelital.

Los datos de precipitación del producto PERSIANN-CCS se obtienen del servidor web “Center for Hydrometeorology and Remote Sensing” (CHRS). Dicha fuente de información se encuentran a libre acceso para la comunidad científica o cualquier otro usuario interesado.

Las estaciones pluviométricas que servirán como datos de referencia, se escogerán en base a los siguientes aspectos; estaciones que se encierran dentro de la zona de los valles del departamento de Tarija, estaciones con series de registro mayor a 5 años que puedan usarse en la comparación para el análisis de validación de la información y que cuenten con el periodo de tiempo fijado a partir del año 2004 en adelante, para la comparación con los datos del producto satelital.

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Análisis de datos de precipitación de estaciones

La evaluación y corrección de los datos obtenidos por el SENAMHI, se efectuará a través de distintos procesos estadísticos, que permitan brindar la confiabilidad en las muestras que estamos usando como referencia ante las muestras de precipitación estimadas por el producto satelital. En esta etapa, se deberá realizar el análisis de consistencia a las muestras registradas en cada estación empleada, a través de distintos procesos estadísticos, con el fin de tener una mayor certeza y confiabilidad para su posterior uso y aplicación.

Se evaluará estas muestras de información con procedimientos de corrección estadísticos, tanto para los posibles saltos que puedan presentarse en las muestras, corrección de medias y el análisis de tendencias del mismo modo en el caso de presentarse en la serie de datos seleccionado previamente.

Como bien se conoce, en la práctica, son común los casos de que las estaciones escogidas para realizar algún estudio se presentan vacíos de información en los registros históricos. Es importante mencionar que estos vacíos de información no se tomaran en cuenta no habrá relleno de datos, para no generar un incremento en el margen de error cuando se efectúe la correlación con los datos pluviométricos y del producto de satelital. (Cabe aclarar, que por lo general en los registros históricos de precipitación satelital no presentan datos faltantes). Para la tarea de visualizar la información de manera gráfica, se trabajará con la herramienta de análisis estadístico “Hydraccess” para las estaciones distribuidas en toda la zona de los valles del departamento de Tarija, donde se hará un análisis al comportamiento de las mismas.

Después de haber realizado el tratamiento de la información correspondiente y haber eliminado los meses que no cumplan con la información correspondiente requerida, se procederá a realizar como última prueba; la verificación del resultado de estos datos, es decir, si son confiables o no lo son, si son homogéneos, si presentan independencia y si son consistentes. El análisis se lo evaluará mediante el software TREND. Esta herramienta trabaja con 12 test de prueba estadística, nos permitirá evaluar información de variables hidrológicas aleatorias de series temporales.

3.3.2 Evaluación y corrección del producto satelital

Se procederá con el análisis y evaluación del ajuste de la información de precipitación estimada por el producto satelital PERSIANN-CCS con base a los datos de precipitación de las estaciones pluviométricas.

En esta etapa se centra el objetivo principal de este estudio. Aquí definiremos la validación de la información según el ajuste que se tenga con cada registro de precipitación del producto satelital escogido para este análisis, para la zona específica del valle central del departamento de Tarija.

Esta serie de datos de precipitación estimada por los satélites, serán extraídos del pixel correspondiente al emplazamiento de la estación de referencia. La extracción de información será de manera independiente, de acuerdo al producto, debido a la resolución de pixel de cada uno de ellos.

Para esta investigación, se uniformizará la resolución espacial de pixel de $0,04^\circ$ (aprox. 4 km) para PERSIANN-CCS a 1,0 km por lado, como producto final.

Se evaluará la serie histórica de datos de los productos satelitales, tal como se obtienen del sitio web, de acuerdo a parámetros estadísticos y evaluación gráfica de la serie de datos, conjuntamente con los datos de los pluviómetros para cada pixel referenciado a cada estación. Los parámetros estadísticos de comparación son; el coeficiente de correlación (R^2) y coeficiente de determinación (r), los cuales tienen valores referenciales que ya fueron definidos según ciertos criterios, por diversos autores. Estos parámetros nos permitirán entender desde un punto de vista estadístico si los datos de lluvia estimados por satélite son aceptables o no presentan correlación con los datos tierra. En todos los casos se trabajará con los datos de los pluviómetros corregidos previamente, que son la base de referencia fundamental.

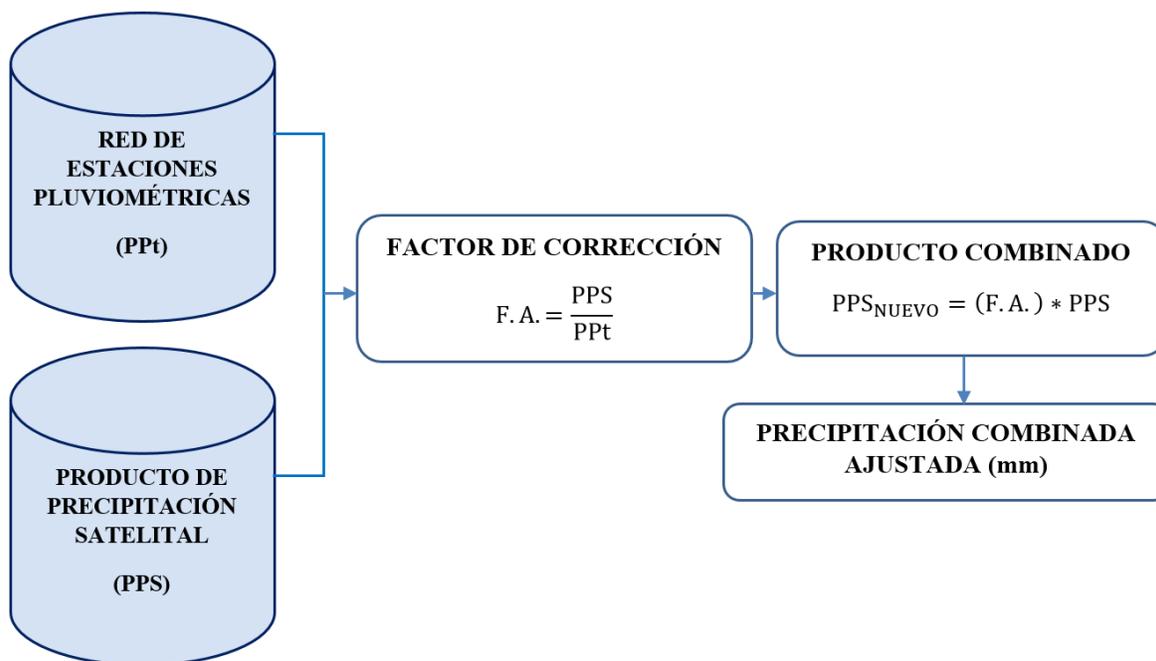
El de corrección (F_c). Este factor puede ser mayor a 1 (que indica subestimación) o menor a 1 (que indica sobreestimación), para aplicar al valor estimado, el cual nos permitirá ajustar los datos del producto satelital en función a los datos observados en los pluviómetros.

3.3.3 Obtención del factor de corrección (F.C.) en puntos de comparación terrestre

Este paso es uno de los más importantes dentro del análisis de comparación, ya que si el factor de corrección no es muy bueno, es decir no se ajustan o aproximan al 100%, los valores interpolados para los puntos de toda la grilla del producto satelital, serán inferiores a una proximidad del cien por ciento. Esto conlleva a que se tenga mucha más incertidumbre en los datos del producto corregido, es por ello que en este apartado se optó por que los valores de F.c. de las 17 estaciones, sean ajustados al 100% respecto a los datos observados, ya que estos son los únicos verídicos y reales, y que en función de estos se hará una interpolación a los F.c. para los demás puntos que cubren toda el área de estudio dentro del valle central.

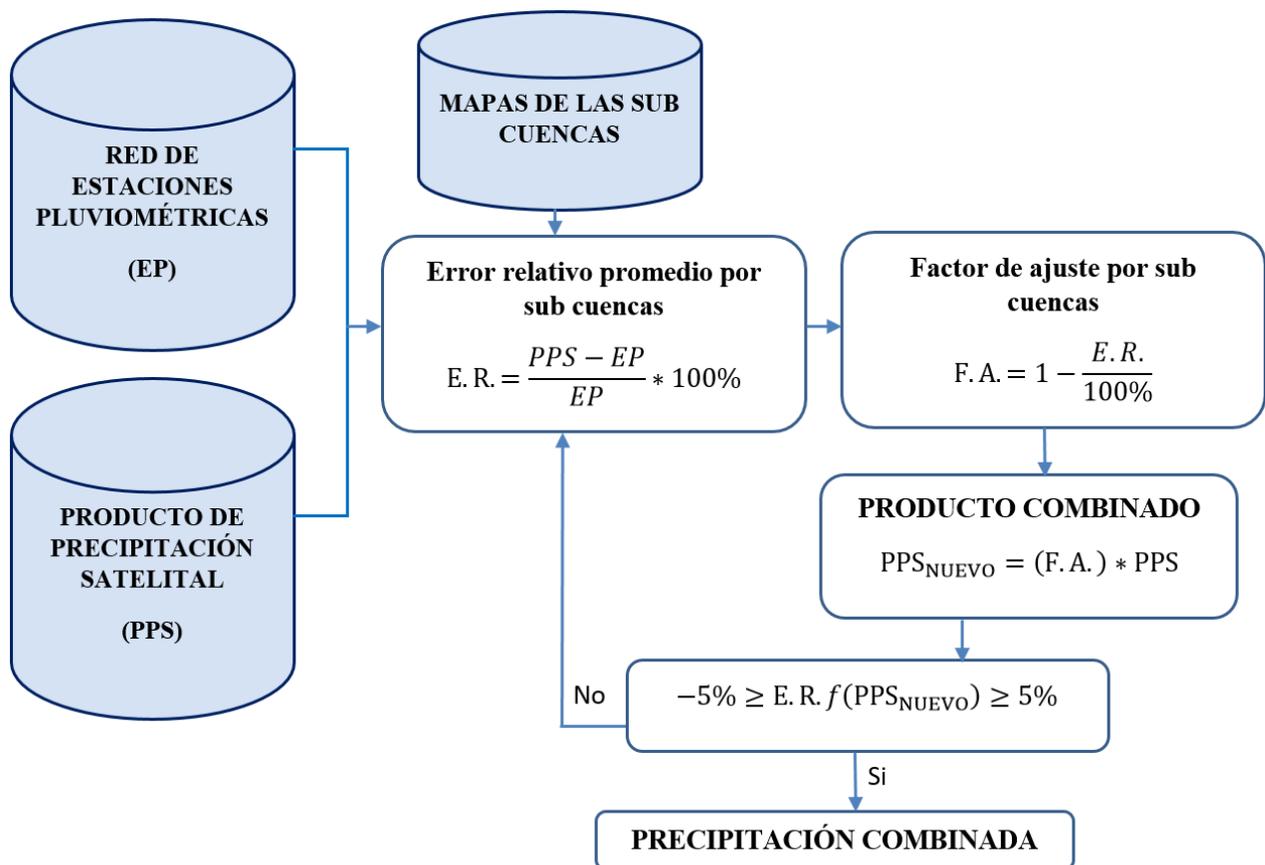
Se aplicara el método descrito a continuación. Combinando ambas precipitaciones, estimadas y observadas a fin de ajustar y corregir la precipitación con resolución temporal mensual y resolución espacial de 1,0 km. Por lado de pixel.

Proceso metodológico para la obtención del factor de ajuste o corrección del producto de precipitación satelital en función a las estaciones pluviométricas.-



3.3.4 Otros métodos de obtención del Factor de Corrección

De acuerdo a las publicaciones del CIICA centro de investigaciones en ingeniería civil y medioambiente, más específicamente en la publicación de “Evaluación de la precipitación estima desde satélites en Bolivia”, se tiene una metodología de ajuste a la precipitación del producto satelital en función a subcuentas, es decir, el F.C. promedio que se encuentra, es único para toda una sub cuenca, esto de acuerdo a la delimitación según la metodología Pfafstetter en su nivel 5. Por lo tanto los factores de ajuste son encontrados en función a una iteración según la metodología mostrada a continuación:



Como se ha podido observar, el ajuste de la precipitación por sub cuencas tiene un ciclo iterativo, donde el error de la precipitación ajustada tiene que cumplir cierta condición de aceptación, para luego extrapolar la precipitación ya corregida a toda la cuenca de estudio. Entonces, si bien es un método bueno porque el error entra en un margen del 5% para el punto de control. No se emplea el mencionado método en este proyecto, ya que al momento de realizar la iteración y encontrar el factor de corrección según la forma iterativa se estaría dando mayor margen de error a los puntos que se encuentran fuera de la estación

pluviométrica de medición. Es decir, un factor de corrección con una aproximación del 95% (que ya cumple el ciclo iterativo), afectaría en mayor manera a los puntos cercanos a interpolar, por lo tanto los puntos fuera de la misma estación tomarán valores inferiores al 95% de aproximación, lo cual no es conveniente desde el punto de vista estadístico. ya que si bien serian valores buenos obtener aproximaciones mayores al 80% según diversos autores que lo consideran así, en este proyecto se busca llegar a obtener un producto mucho más preciso en aproximación a los datos tierra, por esta razón se aplicó el primer método mencionado con el cual se logró cumplir el objetivo mencionado.

3.4 Operacionalización de las variables

El presente trabajo cuenta con una única variable a ser analizada, la precipitación. Ya que al ser una variable aleatoria discreta, esta puede tomar cualquier valor con cualquier probabilidad y en cualquier punto. En la realidad se ve que la precipitación no es uniforme en toda un área hidrográfica determinada. Dentro de una cuenca, la precipitación cae con diferentes intensidades en toda la extensión de la misma o inclusive, puede también no llover en ciertas zonas debido a la baja probabilidad de ocurrencia que se presente para estas.

3.5 Población y tipo de muestreo

Se utilizó un tipo de muestreo sistemático, usando información hidrometeorológica de 17 estaciones (ver tabla número 1) que corresponde a variables de precipitación total mensual administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y descargas medias mensuales del producto satelital para el periodo enero 2004 a diciembre 2019. Las precipitaciones observadas y estimadas fueron interpoladas mediante el método de interpolación hidrológica IDW sobre la región de estudio con la resolución espacial mejorada de $0,04^{\circ} \times 0,04^{\circ}$ (4 km aprox. Original) a 1,0 km por lado de pixel (ajustada final), de las series de datos obtenidas por el producto satelital.

3.6 Tamaño de la muestra

En este proyecto se utilizó un total de 17 estaciones hidrometeorológicas, comprendida cada una por una serie de datos que se muestran a continuación (ver tabla número 2) correspondientes para el periodo de análisis 2004 – 2019.

Los datos de precipitación satelital, se extrajeron en series de datos de cada mes (12 por año) correspondientes al mismo periodo elegido. Haciendo un total de 192 datos para el análisis mensual, teniendo un comprendido de 2880 datos de precipitación media mensual del producto satelital.

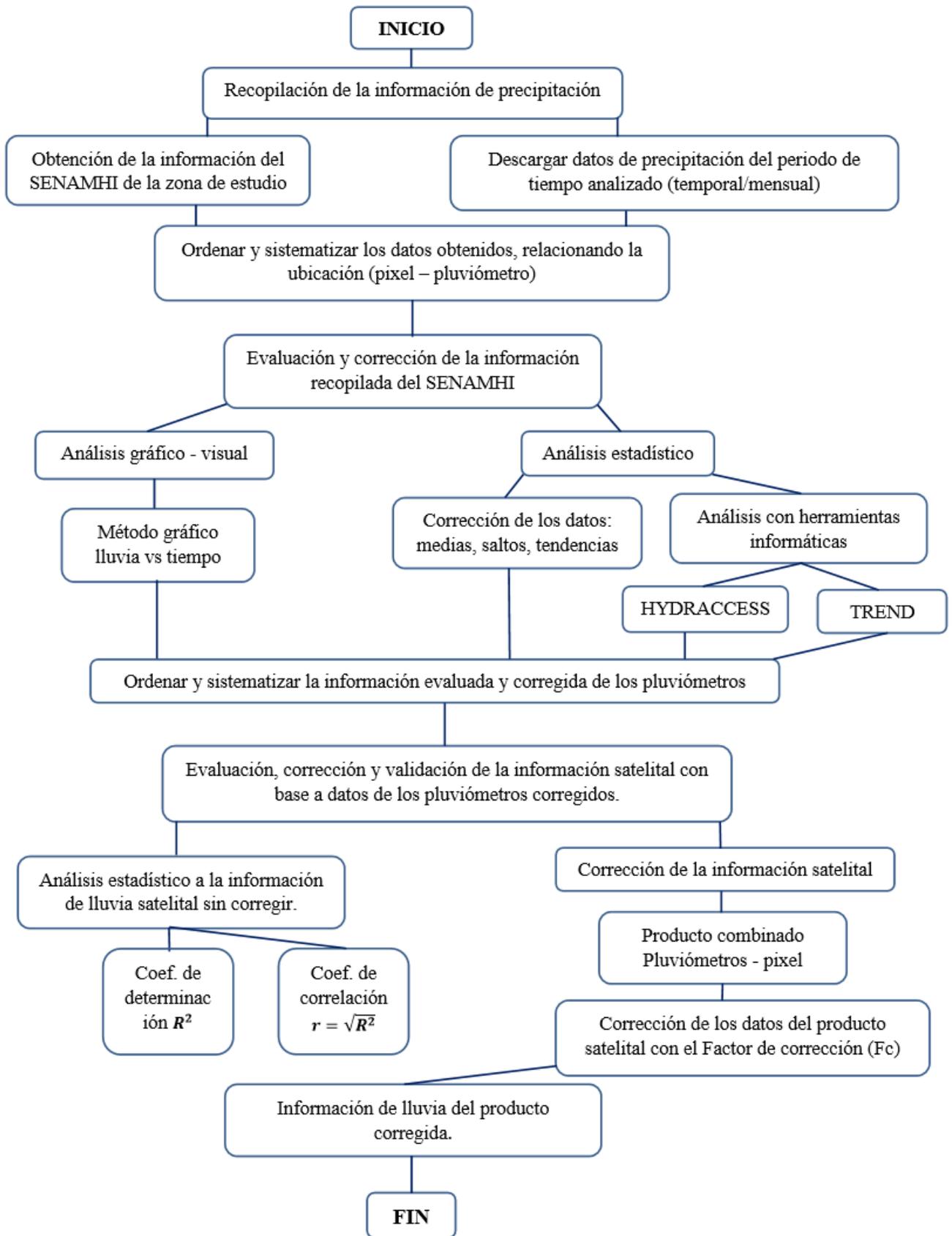
TABLA 2. Muestra de datos de precipitación media mensual (SENAMHI).

Estación	Tipo	Periodo de observación	Núm. de datos Ppt	Mes no observado
Aeropuerto	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
Cañas	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
Cenavit	Climatológica	2004 - 2019	185	Marz, Oct (2008)
				Ago - Oct (2013)
				Dic (2016)
				Feb (2018)
Chocloca	Climatológica	2004 - 2012	88	Nov, Dic (2008)
				Abr - Jun (2010)
				Jun, Jul, Sep-Dic (2011)
				Abr- Dic (2012)
Coimata	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
El Tejar	Climatológica	2004-2012 ; 2018-2019	117	Jul-Oct, Dic (2012)
				Ene-Sep (2018)
La Merced	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
San Andrés	Climatológica	2004 - 2019	190	Sep, Oct (2016)
San Jacinto Sud	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
Sella Qdas	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
Trancas	Climatológica	2004 - 2019	191	Marz (2009)
Tucumillas	Climatológica	2004 - 2019	190	Ago (2014)
				Dic (2019)
Turumayo	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
Yesera Norte	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
Yesera Sud	Climatológica	2004 - 2019	192	Ninguno
León Cancha	Pluviométrica	2004 - 2011	96	Ninguno
Pinos Sud	Pluviométrica	2004 - 2019	192	Ninguno
Total muestra de datos de precipitación =			2977	

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Método de la investigación

El proceso que seguirá en el presente trabajo de investigación, se lo muestra de manera general y de forma secuencial bajo el siguiente mapa conceptual:



4. CAPÍTULO IV: MEMORIA DE CÁLCULO

Extracción de la información de los pluviómetros (Precipitación mensual, en milímetros (mm), para el periodo de análisis 2004 - 2019).

TABLA 3. Datos de precipitación en milímetros (mm) de las estaciones de observación.

Datos de la estación Aeropuerto Tarija													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
2004	69,00	52,00	125,40	19,50	1,90	0,00	0,00	6,40	8,60	54,10	64,90	121,40	
2005	117,20	139,60	101,70	10,50	0,00	0,00	0,20	0,30	2,60	2,90	113,30	166,80	
2006	170,00	149,00	105,80	17,90	1,70	0,00	0,00	0,00	1,40	72,10	45,70	71,30	
2007	182,90	71,60	77,50	6,70	0,00	0,00	0,00	0,00	34,40	72,80	70,90	133,60	
2008	157,30	78,20	118,80	19,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,20	41,40	107,60	237,40	
2009	111,00	66,20	90,60	29,40	0,20	0,00	0,00	0,50	11,90	3,80	81,50	125,10	
2010	107,40	198,90	65,90	13,20	3,90	0,50	0,00	0,10	0,00	1,00	6,50	81,80	
2011	115,70	176,50	169,30	24,30	6,70	0,00	0,00	0,00	1,90	38,10	20,40	197,70	
2012	192,50	131,60	86,40	44,90	0,00	0,00	1,00	0,00	0,50	35,90	82,10	53,20	
2013	178,80	102,50	10,90	2,10	0,20	2,30	0,00	7,20	0,00	21,60	45,90	69,70	
2014	136,40	77,10	59,40	7,80	0,40	2,10	1,00	0,00	17,20	90,00	44,90	52,90	
2015	237,00	211,20	78,80	25,10	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	40,90	50,80	113,90	
2016	131,50	85,40	10,90	5,10	1,00	0,00	0,00	10,40	2,90	13,60	62,80	63,80	
2017	98,70	90,60	132,60	19,70	0,00	0,00	0,00	0,00	21,40	7,00	15,60	126,40	
2018	194,90	69,60	40,90	7,00	5,80	0,00	0,00	0,80	23,90	70,50	99,60	137,00	
2019	126,80	116,50	58,30	68,00	1,20	0,00	18,00	0,00	0,00	50,30	62,20	63,40	
Promedio	145,44	113,53	83,33	20,01	1,44	0,31	1,33	1,63	7,93	38,50	60,92	113,46	

Fuente: Elaboración propia.

Para el presente documento se presenta los datos de la estación Aeropuerto Tarija, en la cual se muestran los valores de precipitación media mensual para el periodo de análisis del año 2004-2019. En esta tabla tipo, se ordenan los datos que fueron medidos en los pluviómetros de cada estación, calculando el promedio de la lluvia caída en todo el mes correspondiente de cada año. Las estaciones que fueron utilizadas para este trabajo de investigación se pueden encontrar en el Anexo 1

4.1 Análisis de consistencia

Para evaluar la consistencia de los datos de las estaciones, se procedió con uso de herramientas informáticas estadísticas diseñadas para la evaluación de series de datos. De uso libre. Como también se procedió con el uso de la herramienta informática TREND, que fue diseñado para la evaluación y validación de datos hidrológicos de variables aleatorias, dicho software evalúa 12 test estadísticos diferentes, para analizar las tendencias y saltos en las series de los datos de precipitación.

4.1.1 Análisis con el Software Hydraccess

Con este Software se realizó el análisis de la distribución de datos media mensual para el periodo 2004-2019, analizando posibles datos que salen fuera de los valores medios que se presentan en una estación determinada los resultados de este análisis visual se los muestra a continuación en los siguientes gráficos evaluados por el programa para cada estación.-

Gráficos de las estaciones

Las gráficas que fueron procesadas para cada una de las estaciones utilizadas en este trabajo, se muestran en la parte de anexos, en el Anexo 2 Procesamiento Hydraccess.

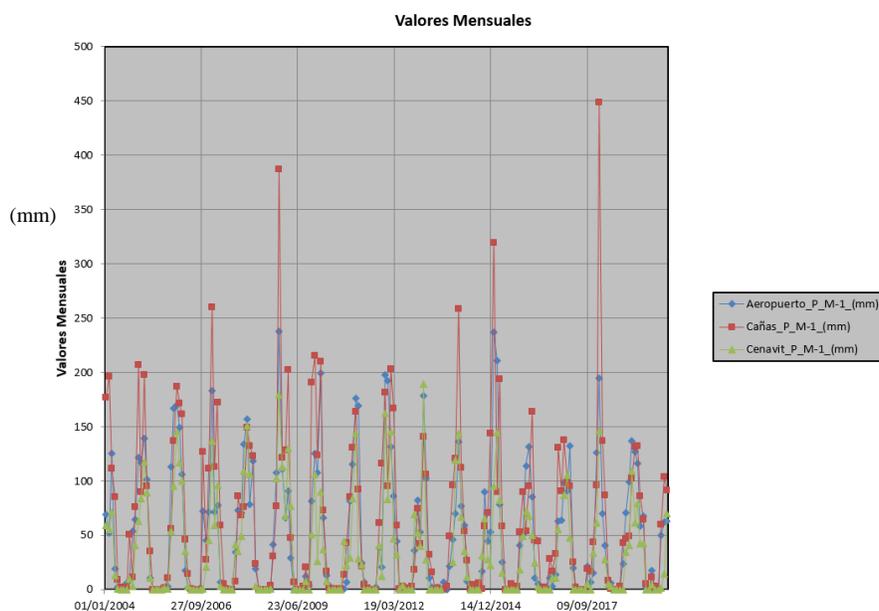


Figura 17. Procesamiento Hydraccess.

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de este proceso gráfico visual, muestra que el comportamiento de cada estación es regular, teniéndose así que las precipitaciones caídas en estos puntos siguen una media específica en la que fluctúan sus valores, encontrándose muy pocos puntos que corroborar su veracidad en la medición.

4.1.2 Análisis con el Software TREND

Con éste software, se pretende buscar la consistencia de los datos en el análisis de tendencias y saltos que pudieran presentarse en la serie de datos de cada estación, mes por mes, para el periodo de análisis 2004-2019

TABLA 4. Datos para el software TREND

Núm.	PP (mm)						
2004	69,00	2031	17,90	2058	0,00	2085	1,00
2005	52,00	2032	1,70	2059	0,30	2086	6,50
2006	125,40	2033	0,00	2060	0,20	2087	81,80
2007	19,50	2034	0,00	2061	41,40	2088	115,70
2008	1,90	2035	0,00	2062	107,60	2089	176,50
2009	0,00	2036	1,40	2063	237,40	2090	169,30
2010	0,00	2037	72,10	2064	111,00	2091	24,30
2011	6,40	2038	45,70	2065	66,20	2092	6,70
2012	8,60	2039	71,30	2066	90,60	2093	0,00
2013	54,10	2040	182,90	2067	29,40	2094	0,00
2014	64,90	2041	71,60	2068	0,20	2095	0,00
2015	121,40	2042	77,50	2069	0,00	2096	1,90
2016	117,20	2043	6,70	2070	0,00	2097	38,10
2017	139,60	2044	0,00	2071	0,50	2098	20,40
2018	101,70	2045	0,00	2072	11,90	2099	197,70
2019	10,50	2046	0,00	2073	3,80	2100	192,50
2020	0,00	2047	0,00	2074	81,50	2101	131,60
2021	0,00	2048	34,40	2075	125,10	2102	86,40
2022	0,20	2049	72,80	2076	107,40	2103	44,90
2023	0,30	2050	70,90	2077	198,90	2104	0,00
2024	2,60	2051	133,60	2078	65,90	2105	0,00
2025	2,90	2052	157,30	2079	13,20	2106	1,00
2026	113,30	2053	78,20	2080	3,90	2107	0,00
2027	166,80	2054	118,80	2081	0,50	2108	0,50
2028	170,00	2055	19,00	2082	0,00	2109	35,90
2029	149,00	2056	0,00	2083	0,10	2110	82,10
2030	105,80	2057	0,00	2084	0,00	2111	53,20
2112	178,80	2133	90,00	2154	0,00	2175	7,00
2113	102,50	2134	44,90	2155	10,40	2176	5,80
2114	10,90	2135	52,90	2156	2,90	2177	0,00
2115	2,10	2136	237,00	2157	13,60	2178	0,00
2116	0,20	2137	211,20	2158	62,80	2179	0,80
2117	2,30	2138	78,80	2159	63,80	2180	23,90
2118	0,00	2139	25,10	2160	98,70	2181	70,50
2119	7,20	2140	0,00	2161	90,60	2182	99,60
2120	0,00	2141	0,00	2162	132,60	2183	137,00
2121	21,60	2142	1,00	2163	19,70	2184	126,80
2122	45,90	2143	0,00	2164	0,00	2185	116,50
2123	69,70	2144	0,00	2165	0,00	2186	58,30
2124	136,40	2145	40,90	2166	0,00	2187	68,00
2125	77,10	2146	50,80	2167	0,00	2188	1,20
2126	59,40	2147	113,90	2168	21,40	2189	0,00
2127	7,80	2148	131,50	2169	7,00	2190	18,00
2128	0,40	2149	85,40	2170	15,60	2191	0,00
2129	2,10	2150	10,90	2171	126,40	2192	0,00
2130	1,00	2151	5,10	2172	194,90	2193	50,30
2131	0,00	2152	1,00	2173	69,60	2194	62,20
2132	17,20	2153	0,00	2174	40,90	2195	63,40

Fuente: Elaboración propia.

En la figura se muestra el ordenamiento de los datos de precipitación media mensual solo para la estación aeropuerto Tarija, de esta misma manera se ordenó los datos para las 17 estaciones en estudio.

El valor que existe en la columna “Núm.” no afecta en cuanto al análisis, ya que el programa reconoce de esa manera las series de datos para el nivel mensual.

Al cargar los datos de precipitación, el software grafica automáticamente los datos que fueron reconocidos para su análisis, tal como se muestra a continuación.

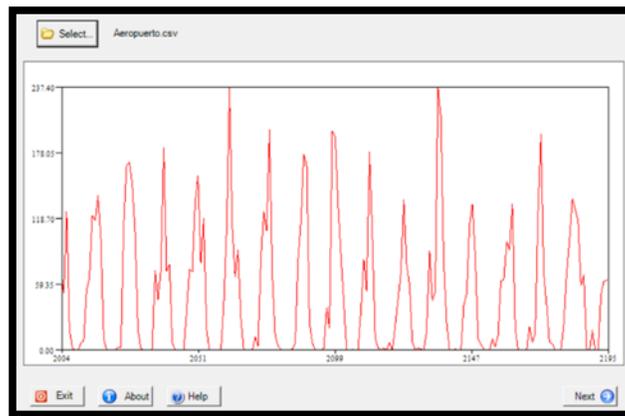


Figura 18: Procesamiento Trend
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente los datos que fueron cargados al Trend, se procesan con los estadísticos que se escojan, en este caso son los estadísticos analizados son: Mann-Kendall, Spearman's Rho, Linear regression, Cusum, Cumulative deviation, Worsley likelihood, Rank sum y Student's t

Este proceso en el programa se lo muestra a continuación:

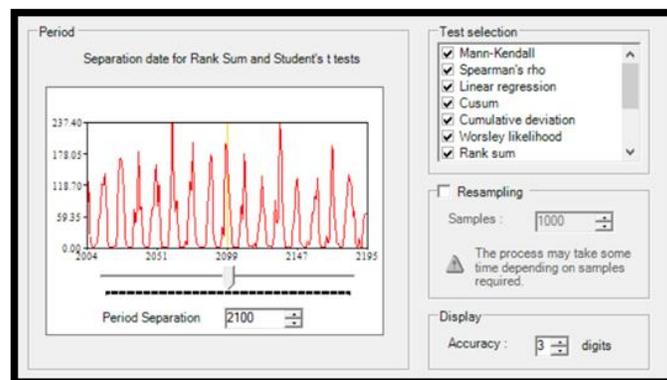


Figura 19. Proceso estadístico con TREND
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de este análisis, se trabajaron a un nivel de significancia del 5% para evaluar cada test. Este nivel de significancia se usó tanto para la estación aeropuerto como para las 17 estaciones que fueron elegidas para la zona de estudio. Dichos resultados de forma completa para todas las estaciones se muestran en el Anexo 3

Dichos resultados se muestran a continuación:

TABLA 4. Resultados de consistencia de TREND

Estación : Aeropuerto Tarija								
(Statistical table)								
Test Estadístico	z- statistic	a=0.1	a=0.05	a=0.01	Resultado	Tipo prueba	Prueba	Observación
Mann-Kendall	-0,3	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico	TENDENCIAS	No hay tendencias
Spearman's Rho	0,261	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico		No hay tendencias
Linear regression	-0,684	1,657	1,978	2,614	NS	Paramétrico		No hay tendencias
Cusum	6	16,905	18,845	22,586	NS	No Paramétrico	SALTOS	No hay Saltos
Cumulative deviation	0,657	1,175	1,297	1,558	NS	Paramétrico		No hay Saltos
Worsley likelihood	1,314	2,869	3,157	3,79	NS	Paramétrico		No hay Saltos
Rank Sum	-0,295	1,645	1,96	2,576	NS	No Paramétrico		No hay Saltos
Student's t	0,664	1,657	1,978	2,614	NS	Paramétrico		No hay Saltos

Los datos de la estación sí son consistentes para su uso

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, los estadísticos para cada test son buenos, NS lo que indica que la serie de datos analizada para la estación aeropuerto son consistentes, no hay tendencias ni saltos en los registros, lo que indica finalmente que los datos de precipitación media mensual son válidos para su posterior uso.

En el caso de que el resultado sea “S” esto significaría que hay anomalías en la serie de datos y por lo tanto no serían consistentes ni confiables para utilizarlos como estación base o de referencia en la comparación con los datos satélite.

De la misma manera se resuelve para cada una de las 17 estaciones seleccionadas, los resultados de este análisis, para cada una de ellas se presentan en la siguiente tabla a continuación:

TABLA 5. Resultados del análisis mediante el software TREND.

Núm.	Estación	Procesamiento TREND		
		Tendencias	Saltos	Resultado
1	Aeropuerto Tarija	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
2	Cañas	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
3	Cenavit	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
4	Chocloca	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
5	Coimata	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
6	El Tejar	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
7	La Merced	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
8	León Cancha	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
9	Pinos Sud	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
10	San Andrés	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
11	San Jacinto Sud	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
12	Sella Qdas.	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
13	Trancas	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
14	Tucumillas	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
15	Turumayo	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
16	Yesera Norte	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.
17	Yesera Sud	No hay tendencias	No hay Saltos	Sí, es consistente.

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados ya procesados de cada estación, se culmina esta etapa del proyecto que es la consistencia de la información pluviométrica. Por lo tanto, se puede concluir que la serie de datos de cada estación elegida para la zona del valle central de Tarija son confiables para su posterior uso en la evaluación de la información de precipitación con base satelital.

4.2 Procesamiento y sistematización de la información satelital

En primera instancia se procedió a descargar la información de precipitación de los productos satelitales, una vez obtenida toda la información del periodo elegido (2004-2019) para los doce meses de cada año, se procedió a ordenar la información para su análisis y corrección.

Software Arcgis.- con este programa, se logró mejorar la resolución espacial del producto Persiann CCS, de 4,453 km inicialmente a 1,0 km de lado por pixel corregido, este proceso fue realizado a todas las grillas de precipitación mensual (12 grillas para un año), para los años 2004 al 2019, en total fueron 180 imágenes satelitales procesadas llevadas de la resolución espacial 4,453 km a 1,0 km. El proceso mencionado se hizo mes por mes para el periodo 2004 -2019

Este proceso y los resultados de dicha corrección se muestran a continuación:

Para el mes de Enero (2004-20019)

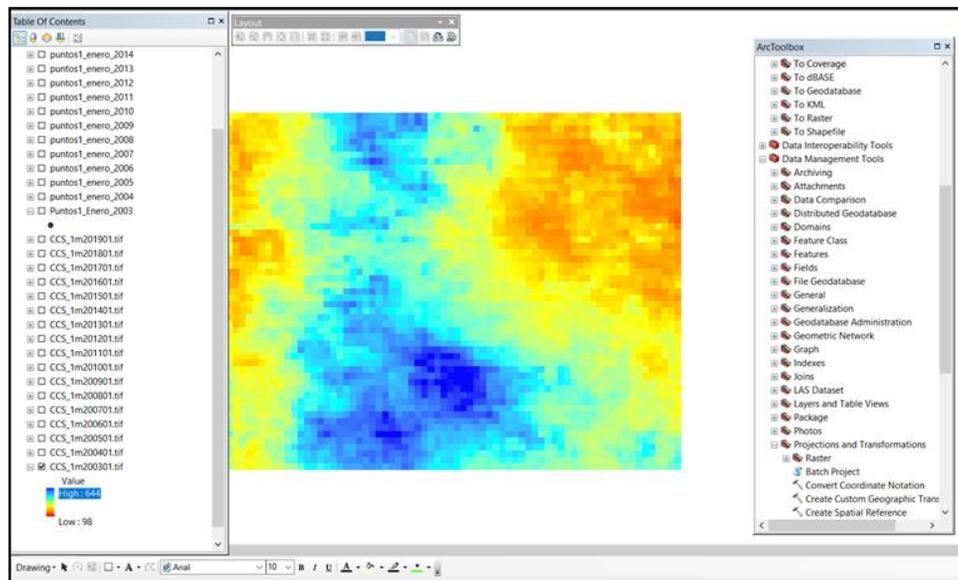


Figura 20. Importación de la imagen satelital

Fuente: Elaboración propia.

La grilla de precipitación media mensual que se muestra, es para el mes de enero de un año, se exporta al programa para que en este se hagan los procesos correspondientes para reducir el pixel original del producto.

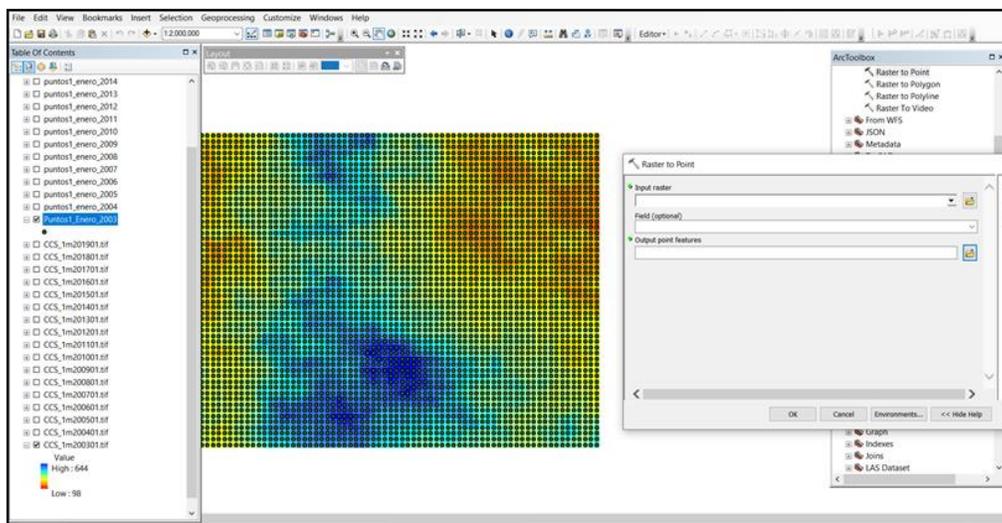


Figura 21. Procesamiento de la imagen satelital PERSIANN-CCS

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a convertir el raster en puntos para obtener la información de la grilla en tablas tabuladas y así poder procesarlas.

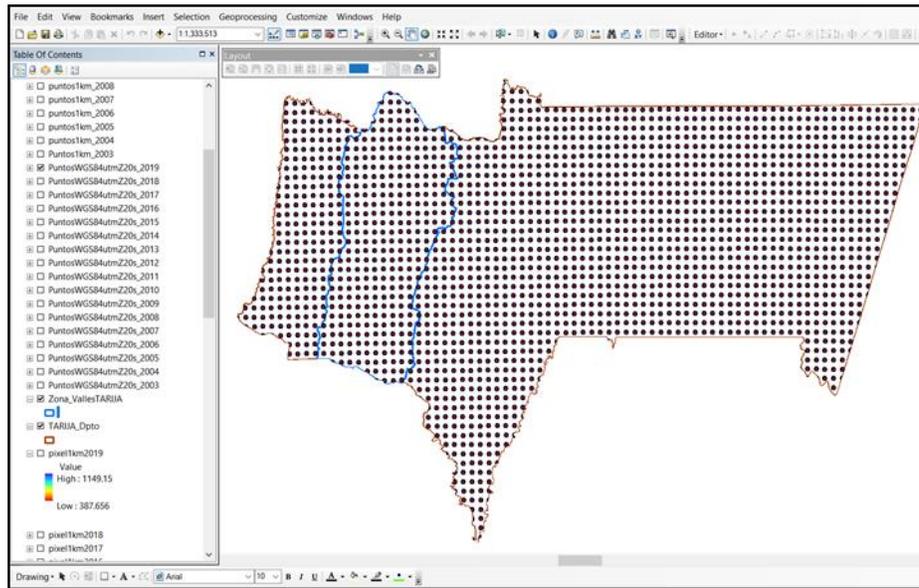


Figura 22. Recorte de la imagen satelital para la zona del valle central de Tarija

Fuente: Elaboración propia.

Una vez convertido el raster en la serie de puntos de pixel 4,453 km, se crea el mapa del departamento, y de la zona de estudio (Perímetro Azul) con estos mapas ya se puede recortar el mapa de precipitación media mensual para analizarlo de manera puntual para la zona escogida para el proyecto.

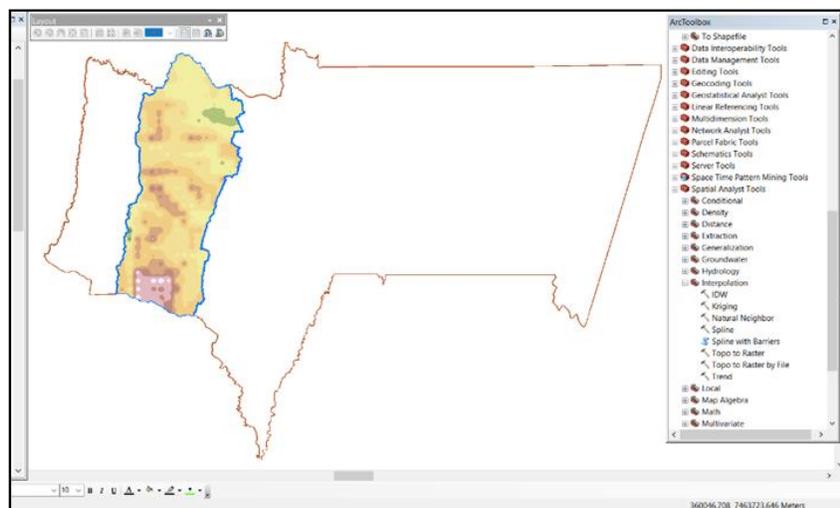


Figura 23. Interpolación de la imagen satelital a 1,0 km con IDW

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procede a la interpolación de los puntos de 4,453 km de pixel con el método DWG (inverso de la distancia al cuadrado) usado para datos hidrológicos de precipitación. Se interpola a una resolución espacial de 1,0 km de lado del pixel, para que este nuevo raster pueda ser llevado a puntos y así obtener la información de la misma en formato “CSV” para hacer reconocer por Excel para su posterior análisis estadístico.

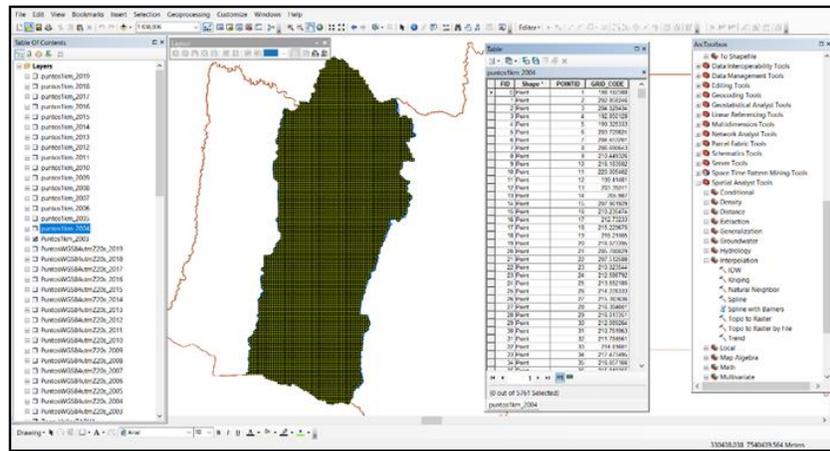


Figura 24. Puntos interpolados para la zona en estudio

Fuente: Elaboración propia

En esta figura se ve la disposición de los puntos en toda la zona del valle central del departamento de Tarija, donde también se muestra parte de la tabla de atributos en la que están los datos de precipitación media mensual para cada punto correspondiente, esta columna que muestra la precipitación esta con el nombre de “Grid Code”

Para toda la zona del valle central se encuentran en total 5.761 puntos, cada uno con un código para su ubicación y su respectivo valor de precipitación media para ese punto en específico.

En la figura que está a continuación se ve la resolución espacial de la precipitación a 1,0 km, dicha resolución, hasta este punto ya fue uniformizada para el mes de enero del año 2004 (Mes que se tomó como ejemplo de aplicación para este informe) dicho trabajo se realizó para todos los meses del año (Enero a diciembre) para el año 2004 y de la misma manera para todos los demás años; 2004 hasta 2019, mes por mes.

En total se realizaron 180 veces este mismo procedimiento con para todos los meses correspondientes al periodo elegido de análisis, con el fin de uniformizar la grilla de

En la figura 27, se ve la tabla de atributos, en la cual están los valores de las coordenadas X, Y de las estaciones en estudio, esta ubicación será necesaria para coincidir los pixel que contenga información con los pluviómetros ubicados dentro del mismo pixel.

FID	Shape *	ESTACION	TIPO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	X	y
0	Point ZM	Aeropuerto	Climatologica	-21.546667	-64.710833	1849	322831.228732	7616377.67217
1	Point ZM	Canas	Climatologica	-21.902222	-64.850833	2078	308000.569064	7576843.36999
2	Point ZM	Cenavit	Climatologica	-21.691944	-64.650056	1730	328469.418292	7600352.30114
3	Point ZM	Chocloca	Climatologica	-21.748056	-64.729444	1795	321151.844611	7594058.95256
4	Point ZM	Coimata	Climatologica	-21.499167	-64.788889	2027	314685.878964	7621546.12499
5	Point ZM	El Tejar	Climatologica	-21.543056	-64.721111	1859	321762.246423	7616765.76923
6	Point ZM	La Merced	Climatologica	-22.024722	-64.676667	1509	326945.188934	7563486.90067
7	Point ZM	San Andres	Climatologica	-21.623333	-64.815	1987	312140.420747	7607767.08135
8	Point ZM	San Jacinto Sud	Climatologica	-21.610278	-64.72	1820	321959.527069	7605324.39894
9	Point ZM	Sella Odas	Climatologica	-21.386389	-64.681111	2145	325719.235286	7634156.14066
10	Point ZM	Trancas	Climatologica	-21.308056	-64.815833	2198	311649.165949	7642673.57608
11	Point ZM	Tucumillas	Climatologica	-21.461111	-64.831111	2557	310261.594493	7625708.99426
12	Point ZM	Turumayo	Climatologica	-21.556667	-64.778333	1978	315852.139474	7615192.27045
13	Point ZM	Yesera Norte	Climatologica	-21.372222	-64.550833	2277	339212.192105	7635863.46801
14	Point ZM	Yesera Sud	Climatologica	-21.467222	-64.558333	2092	338538.954062	7625338.47181
15	Point ZM	Leon Cancha	Pluviometrica	-21.178333	-64.715278	2729	321926.030812	7667152.33783
16	Point ZM	Pinos Sud	Pluviometrica	-21.733333	-64.883333	2100	305213.762785	7595503.11299

Figura 27. Ubicación pixel estación para toda la zona del valle central de Tarija.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida la ubicación de la estación, se extrae los valores de la lluvia de la grilla de precipitación estimada por satélite, este procedimiento se hace de la siguiente manera; coincidiendo los valores X, Y de la estación, se busca esa misma ubicación en el pixel del producto de precipitación satelital que sea coincidente del punto o estación en estudio.

La grilla de precipitación contiene valores que están numerados desde el 1 al 5.671, los cuales representan, cada uno a un pixel, es decir a un valor de precipitación específico. Entonces por medio de una planilla excel se puede obtener en función a estos números, las ubicaciones exactas donde se encuentran las estaciones, por medio de las coordenadas respectivas de la estación a ser analizada.

Este procedimiento de extracción de la información de las 17 estaciones, se lo muestra a continuación. Como ejemplo, para el mes de enero del año 2004.

TABLA 6. Precipitación satelital por mes con ubicación en las estaciones.

FID	Shape *	POINTID	GRID_CODE	Total puntos = 5761	Estacion	FID	PP_Mensual (mm)	
0	Point	1	198,18			Leon cancha	753	214,25
1	Point	2	202,86			trancas	1491	257,94
2	Point	3	204,03			Yesera Norte	1884	212,99
3	Point	4	192,85			Sella Qdas	1972	248,69
4	Point	5	199,33			Tucumillas	2378	245,68
5	Point	6	203,71			Yesera Sud	2458	239,57
6	Point	7	204,45			Coimata	2591	273,90
7	Point	8	206,69			El tejlar	2844	303,07
8	Point	9	210,45			Aeropuerto	2890	302,50
9	Point	10	216,18			Turumayo	2928	344,35
10	Point	11	220,01			San Jancinto Sud	3190	333,91
11	Point	12	199,41			San Andres	3223	366,26
12	Point	13	203,39			Cenavit	3598	312,90
13	Point	14	205,99			Pinos Sud	3753	360,73
14	Point	15	207,96			Chocloca	3856	342,61
15	Point	16	210,24			Juntas	4141	397,57
16	Point	17	212,73			Cañas	4557	402,50
17	Point	18	215,23			La Merced	5166	302,73
18	Point	19	216,21					
19	Point	20	216,07					
20	Point	21	205,78					
21	Point	22	207,51					
22	Point	23	210,02					
23	Point	24	212,59					
24	Point	25	213,55					
25	Point	26	214,23					
26	Point	27	215,38					
27	Point	28	216,30					
28	Point	29	216,01					
29	Point	30	212,09					
30	Point	31	210,76					

Valores de la precipitación satelital, ubicada en la estación pluviométrica

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7, en (GRID CODE) se muestran solo 30 datos, la tabla en total contiene 5.761 datos, para evitar la gran cantidad de tablas a presentar, solo se pretendió mostrar una fracción de la misma y los valores extraídos de precipitación de dicha tabla coincidentes a la estación.

Las tablas con los valores de precipitación sin corregir, coincidentes con las 17 estaciones, para todos los meses, y para el periodo elegido, se muestran en el Anexo 4. Dichos valores serán los que se evaluarán para encontrar un factor de corrección comparando con

los datos tierra y así corregir en función a esos factores toda la precipitación de la grilla de precipitación satelital recortada para la zona del valle central de Tarija.

Posteriormente se procedió a tabular los valores de precipitación mensual en tablas, es decir, llevarlos de la base de datos de la imagen satelital a planillas excel para realizar la estadística de los mismos.

A continuación se presenta las tablas con los valores de precipitación en base satelital y los datos de precipitación de los pluviómetros, ambos coincidentes pixel estación, para el mismo periodo de registro que contiene las estaciones pluviométricas:

TABLA 7. Precipitación satelital y datos tierra en la ubicación de las estaciones.

Ubicación pixel y estación:		Aeropuerto Tarija											
		Datos de precipitación Satelital (mm)											
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembr	Octubre	Noviembr	Diciembre	
2004	302,50	146,32	216,35	30,94	2,74	3,40	119,98	92,91	3,51	40,55	76,07	310,08	
2005	159,03	232,22	167,66	100,14	14,10	8,17	0,00	1,66	24,83	21,38	187,68	466,51	
2006	280,19	315,47	235,94	45,90	21,75	0,99	39,31	14,87	45,18	156,47	193,04	450,35	
2007	412,52	246,53	471,76	98,75	93,90	154,44	75,34	87,38	93,67	385,79	115,43	126,99	
2008	748,18	227,96	72,81	3,89	15,63	7,72	0,00	13,98	2,18	127,99	108,55	270,98	
2009	257,40	141,71	288,84	6,85	17,39	13,43	120,40	29,03	19,86	23,68	423,16	543,72	
2010	362,96	637,86	75,40	12,69	37,19	61,08	2,37	32,75	2,58	15,64	53,19	53,19	
2011	246,60	392,97	105,95	61,03	75,46	16,69	28,49	15,19	5,98	81,21	119,69	212,61	
2012	527,83	393,57	234,34	82,57	2,44	15,39	48,59	1,39	42,21	178,60	157,52	738,30	
2013	141,50	318,09	210,67	1,19	83,55	13,79	48,59	88,35	6,92	71,98	179,37	352,12	
2014	473,29	306,92	25,61	84,89	25,31	54,62	11,18	2,71	40,93	201,46	95,25	396,26	
2015	507,70	503,15	222,31	121,14	19,65	29,84	167,85	30,25	40,93	79,17	86,06	263,84	
2016	180,39	734,89	11,18	120,26	15,85	52,07	5,21	6,13	19,17	57,40	83,08	362,12	
2017	359,70	383,37	324,46	45,91	106,30	10,58	3,43	0,24	51,17	47,13	65,03	238,34	
2018	651,50	156,37	89,39	23,54	2,83	54,91	46,62	41,70	128,72	47,13	164,63	457,16	
2019	683,65	113,23	218,48	57,16	59,42	19,48	39,48	2,94	35,67	136,14	278,04	238,96	
Promedio	393,43	328,16	185,70	56,05	37,09	32,29	47,30	28,84	35,22	104,48	149,11	342,60	
		Datos de la estación Aeropuerto Tarija (mm)											
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembr	Octubre	Noviembr	Diciembre	
2004	69,00	52,00	125,40	19,50	1,90	0,00	0,00	6,40	8,60	54,10	64,90	121,40	
2005	117,20	139,60	101,70	10,50	0,00	0,00	0,20	0,30	2,60	2,90	113,30	166,80	
2006	170,00	149,00	105,80	17,90	1,70	0,00	0,00	0,00	1,40	72,10	45,70	71,30	
2007	182,90	71,60	77,50	6,70	0,00	0,00	0,00	0,00	34,40	72,80	70,90	133,60	
2008	157,30	78,20	118,80	19,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,20	41,40	107,60	237,40	
2009	111,00	66,20	90,60	29,40	0,20	0,00	0,00	0,50	11,90	3,80	81,50	125,10	
2010	107,40	198,90	65,90	13,20	3,90	0,50	0,00	0,10	0,00	1,00	6,50	81,80	
2011	115,70	176,50	169,30	24,30	6,70	0,00	0,00	0,00	1,90	38,10	20,40	197,70	
2012	192,50	131,60	86,40	44,90	0,00	0,00	1,00	0,00	0,50	35,90	82,10	53,20	
2013	178,80	102,50	10,90	2,10	0,20	2,30	0,00	7,20	0,00	21,60	45,90	69,70	
2014	136,40	77,10	59,40	7,80	0,40	2,10	1,00	0,00	17,20	90,00	44,90	52,90	
2015	237,00	211,20	78,80	25,10	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	40,90	50,80	113,90	
2016	131,50	85,40	10,90	5,10	1,00	0,00	0,00	10,40	2,90	13,60	62,80	63,80	
2017	98,70	90,60	132,60	19,70	0,00	0,00	0,00	0,00	21,40	7,00	15,60	126,40	
2018	194,90	69,60	40,90	7,00	5,80	0,00	0,00	0,80	23,90	70,50	99,60	137,00	
2019	126,80	116,50	58,30	68,00	1,20	0,00	18,00	0,00	0,00	50,30	62,20	63,40	
Promedio	145,44	113,53	83,33	20,01	1,44	0,31	1,33	1,63	7,93	38,50	60,92	113,46	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8, se muestra en la parte inferior el promedio, la precipitación media mensual para la estación león cancha, mes por mes, tanto para los datos del pluviómetro, como para los datos de la grilla de precipitación satelital descargada para su análisis. El resto de las estaciones se pueden ver en el Anexo 5

De esta misma manera se muestran los resultados para las 17 estaciones que fueron escogidas para este análisis, como también los datos de precipitación del producto satelital y sus respectivos promedios con los cuales se evaluarán los factores de corrección en función a dichos promedios (tanto datos satélite como datos tierra), para los periodos correspondientes de registros de datos. Los resultados de las 16 estaciones restantes, muestran en el Anexo 7

Una vez obtenido los resultados de los valores medios para ese punto en específico (estación) con los cuales si se podrá comparar los valores de satélite con los del pluviómetro, se podrá obtener el factor de corrección para ese lugar.

4.3 Cálculo del factor de corrección y estadísticos de las estaciones.-

TABLA 8. Resultados del análisis de la precipitación satelital en función a datos tierra.

Ubicación pixel y estación: **Pinos sud**

Mes	Precipitación Media Mensual (mm)				Coef. Det. (R2)	Coef. Correlación (r)	Observación
	PPs (mm)	PP _T (mm)	F _c	PP _{Sat} ajustada			
Enero	419,73	245,67	0,59	245,67	0,023	0,152	Pésimo Sobreestima
Febrero	381,68	262,39	0,69	262,39	0,024	0,155	Pésimo Sobreestima
Marzo	184,23	189,51	1,03	189,51	0,295	0,543	Bajo Subestima
Abril	65,69	71,43	1,09	71,43	0,003	0,057	Pésimo Subestima
Mayo	33,86	9,59	0,28	9,59	0,022	0,150	Pésimo Sobreestima
Junio	29,30	2,29	0,08	2,29	0,039	0,198	Pésimo Sobreestima
Julio	28,87	3,26	0,11	3,26	0,016	0,126	Pésimo Sobreestima
Agosto	27,22	6,45	0,24	6,45	0,038	0,195	Pésimo Sobreestima
Septiembre	35,62	15,15	0,43	15,15	0,010	0,100	Pésimo Sobreestima
Octubre	91,58	60,07	0,66	60,07	0,024	0,156	Pésimo Sobreestima
Noviembre	141,48	134,49	0,95	134,49	0,199	0,446	Bajo Sobreestima
Diciembre	320,59	248,88	0,78	248,88	0,050	0,223	Muy bajo Sobreestima

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla mostrada, se presentan los valores de la precipitación media mensual para el periodo 2004-2019, tanto para la estación (PPt) como para el pixel satelital (PPS) sin corregir

ubicado en el mismo punto de la estación Pinos Sud, estos datos extraídos de los valores promedio calculados anteriormente. Para todas las estaciones ver Anexo 6

Con estos valores de lluvia satélite-tierra se puede realizar haciendo la división del valor de lluvia media mensual de la estación (tierra) entre el valor medio del producto satelital, este coeficiente se muestra de color rojo como (Fc), si este valor es menor a 1 entonces el producto satelital sobreestima la precipitación, si es mayor a la unidad, el productos satelital subestima la lluvia.

Como se puede observar en los resultados el producto PERSIANN-CCS sobreestima en todos los casos, por lo tanto, para corregir toda la grilla de precipitación satelital es necesario reducir a todos los puntos de la zona del valle central de Tarija con factores de corrección menores a 1.

La precipitación corregida para este único punto coincidente con la estación León cancha, se muestra en la columna (PPsatelital ajustada) donde lo que se hizo fue multiplicar el factor de corrección Fc con el valor inicial de la precipitación de la grilla satelital PPS.

El coeficiente de determinación, es un estadístico para evaluar cuanto se aproxima la precipitación estimada con el satélite a los datos de precipitación observada en los pluviómetros. Este coeficiente se muestra en la columna (R2).

El coeficiente de correlación nos muestra si la nube de puntos, tanto de la estación pluviométrica como los datos extraídos de la grilla es aproximada, y la variación que tiene entre ambas, este coeficiente de correlación esta evaluado con ciertos criterios definidos como se muestra a continuación

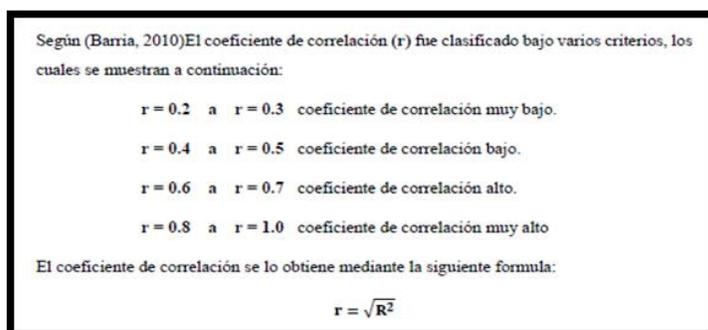


Figura 28. Coeficiente de correlación.

Fuente: Barria, 2010

Con estos criterios se evaluó para el análisis estadístico que se hizo en el presente trabajo.

El coeficiente de correlación están evaluados para los datos de precipitación en base satelital no ajustados, estos resultados se muestran en la tabla de análisis mostrada anteriormente para cada mes del año únicamente para la estación y ubicación de león cancha. De la misma manera se hace el procedimiento para el resto de las estaciones pluviométricas ubicadas en la zona del valle central de Tarija. La columna de Observación es para los datos analizados sin ajustar del producto satelital.

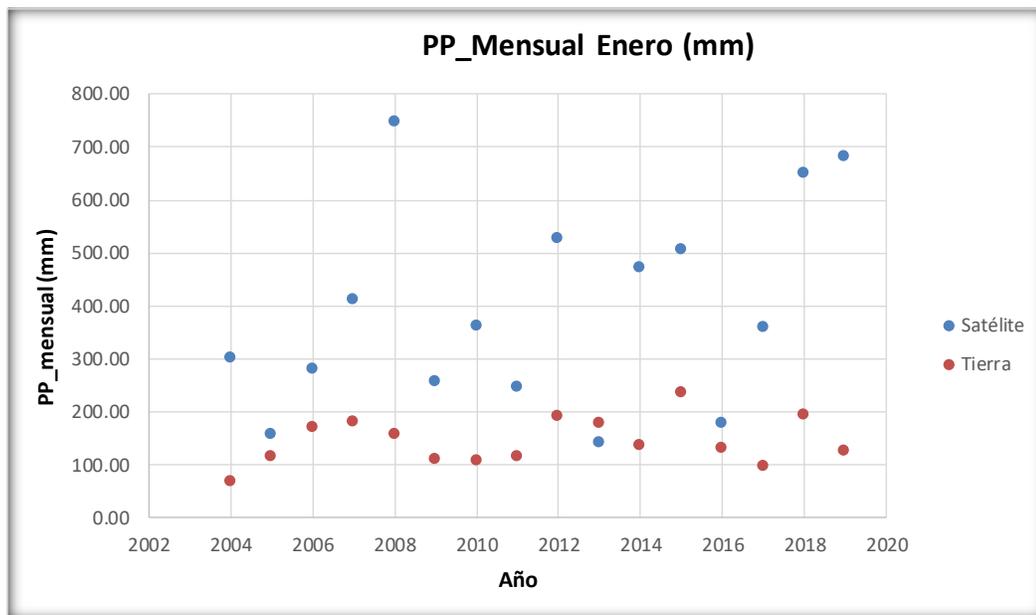
TABLA 9. Resumen de estimaciones del producto satelital sobre las estaciones

Análisis de precipitación media mensual _periodo 2004-2019			
Estación	Mes	Resultado	Observación
Aeropuerto Tarija	Ene-Dic	Sobreestima	-
Cañas	Ene-Dic	Sobreestima	-
Cenavit	Ene-Dic	Sobreestima	-
Chocloca	Ene-Dic	Sobreestima	-
Coimata	Ene-Dic	Sobreestima	-
El Tejar	Ene-Dic	Sobreestima	-
La Merced	Ene-Dic	Sobreestima	-
León Cancha	Ene-Dic	Sobreestima	-
Pinos Sud	Ene-Dic	Sobreestima	Subestima los meses de Marzo y Abril
San Andrés	Ene-Dic	Sobreestima	-
San Jacinto Sud	Ene-Dic	Sobreestima	-
Sella Qdas.	Ene-Dic	Sobreestima	-
Trancas	Ene-Dic	Sobreestima	-
Tucumillas	Ene-Dic	Sobreestima	-
Turumayo	Ene-Dic	Sobreestima	-
Yesera Norte	Ene-Dic	Sobreestima	-
Yesera Sud	Ene-Dic	Sobreestima	-

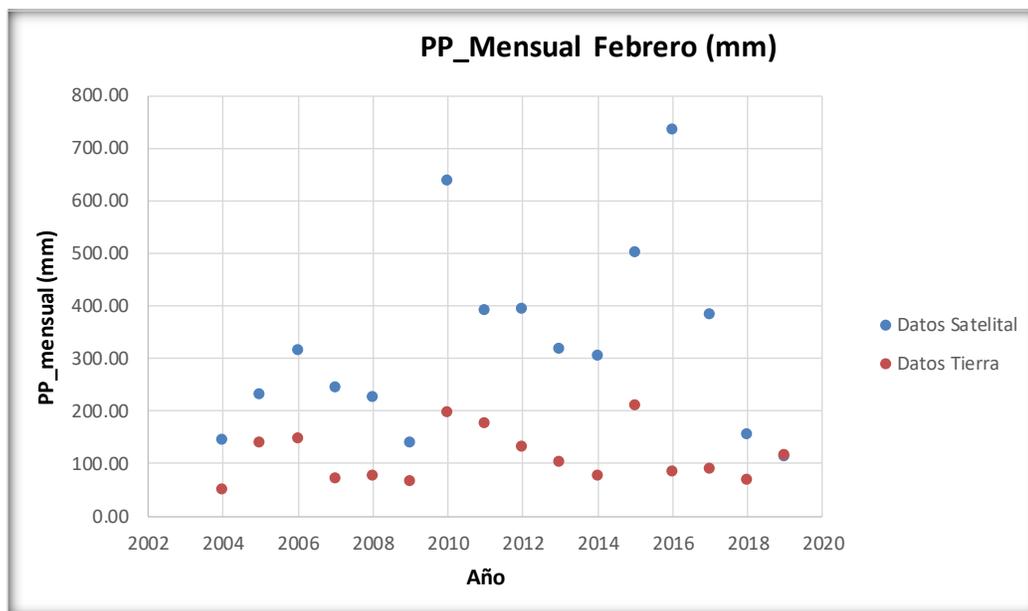
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se graficó los datos de precipitación media mensual comparando tanto los datos de lluvia estimada por satélite como los datos de pluviómetros para verificar los coeficientes de determinación y por ende, los coeficientes de correlación entre ambos datos. Estos gráficos con los respectivos coeficientes de correlación, como ejemplo para la estación Aeropuerto, se muestran a continuación:

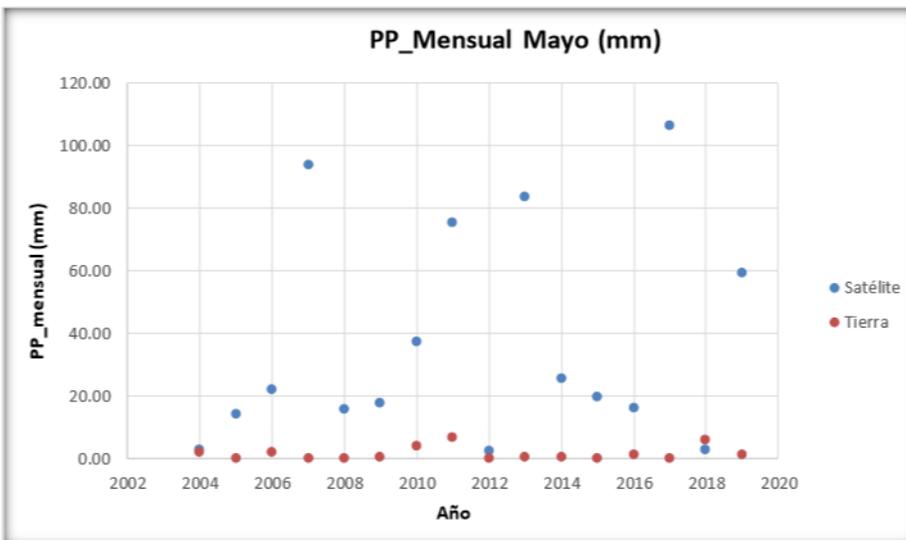
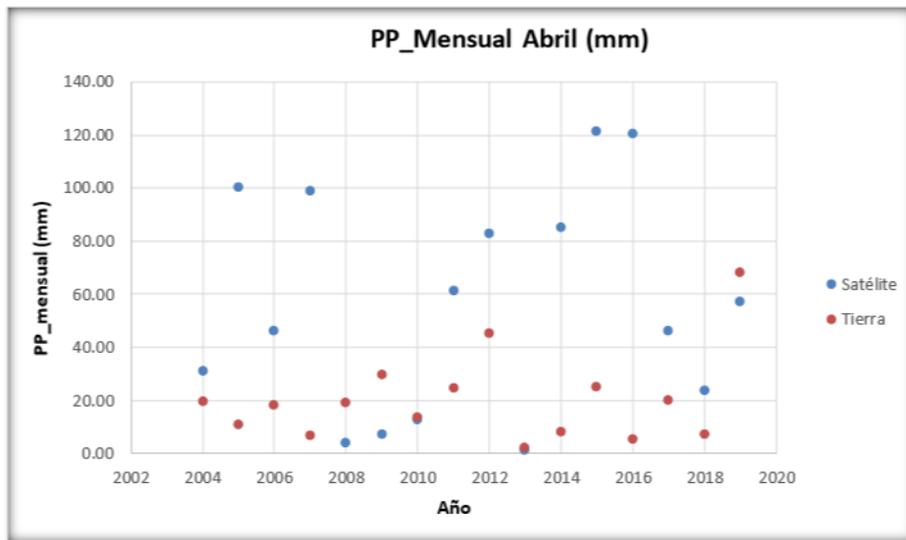
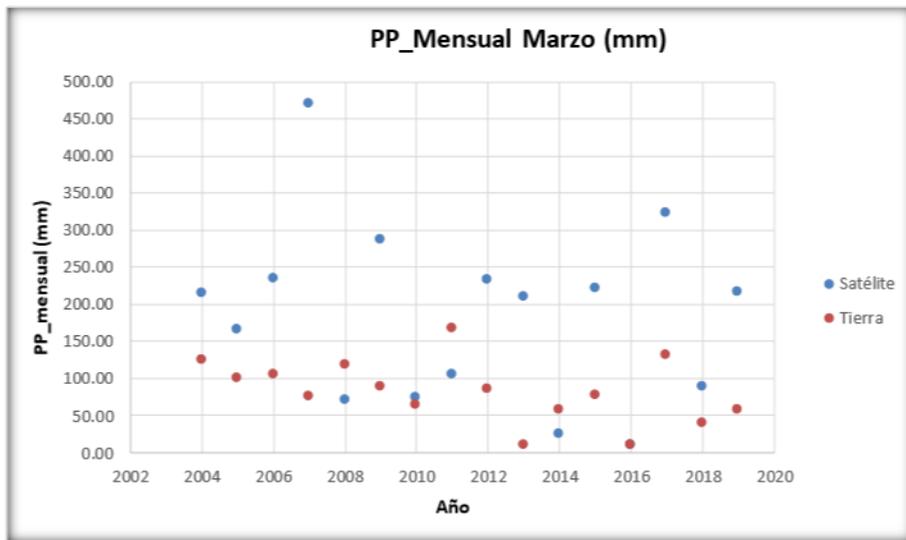
4.4 Gráficas obtenidas del coeficiente de correlación

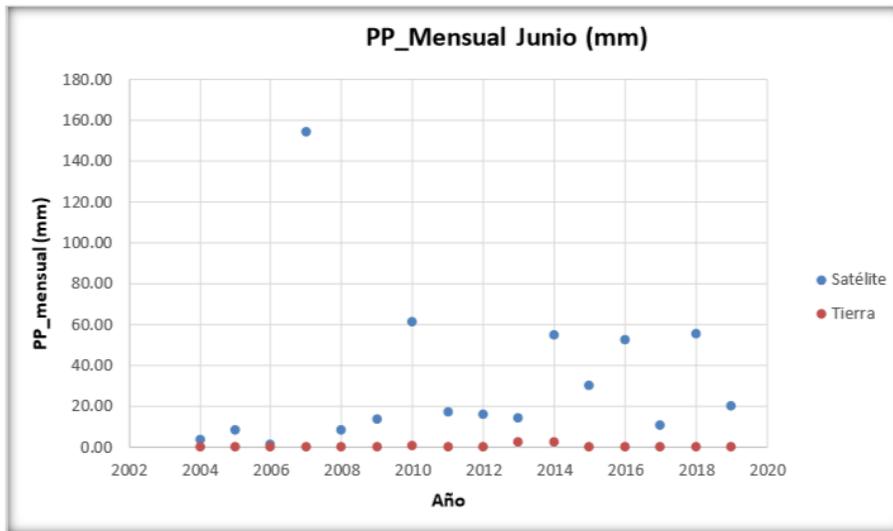


Coef. Correlación ENERO r= 0.361

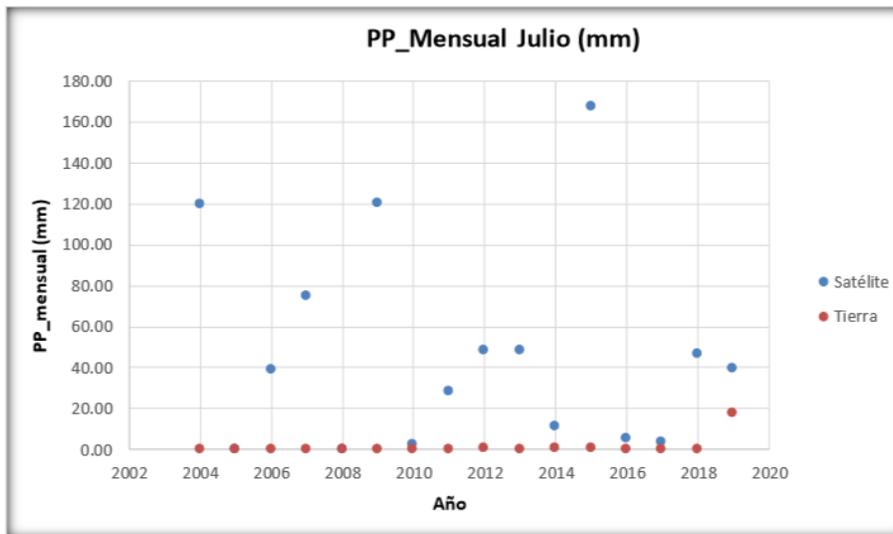


Coef. Correlación FEBRERO r= 0.514

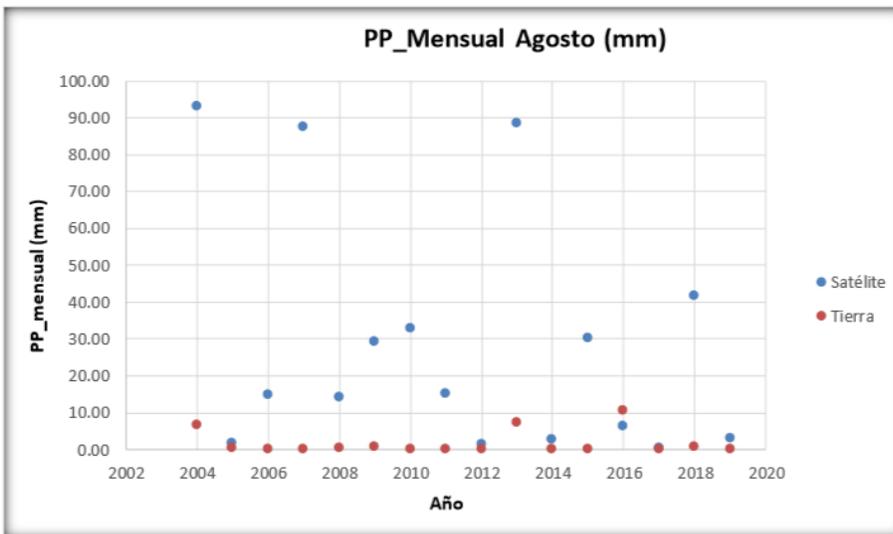




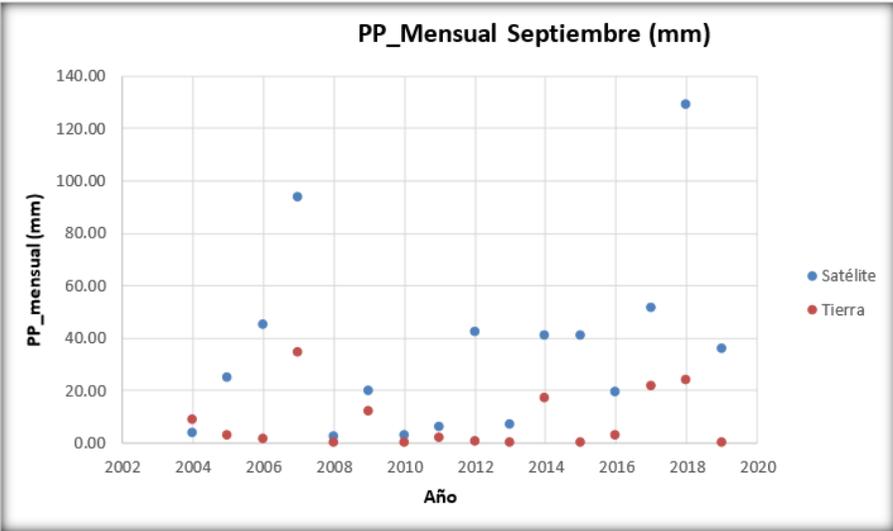
Coef. Correlación JUNIO r= 0.043



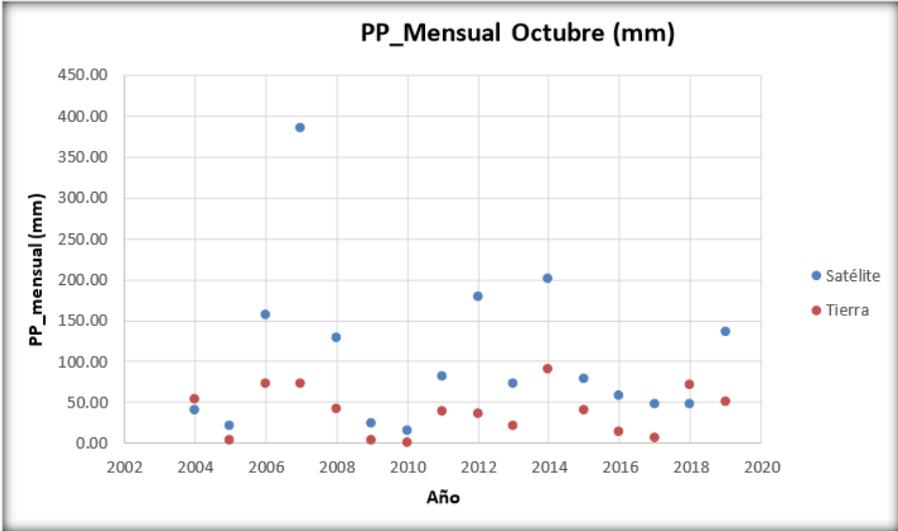
Coef. Correlación JULIO r= 0.019



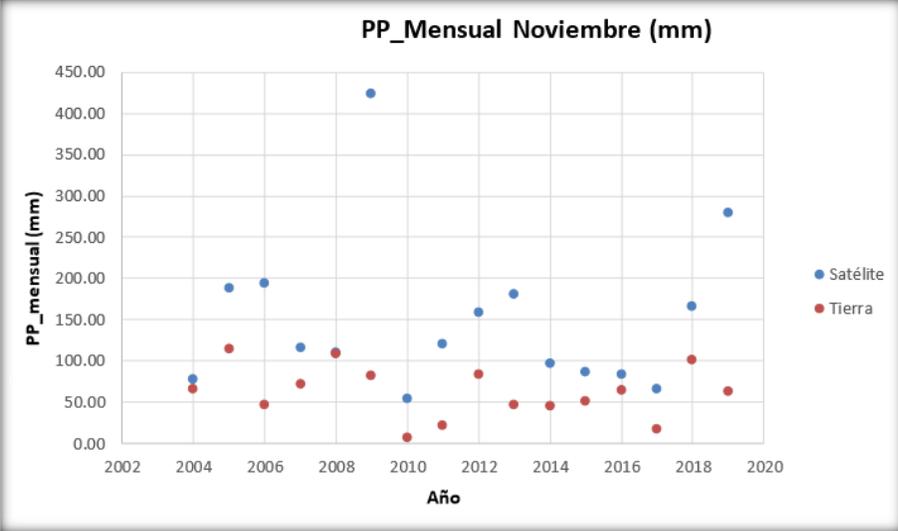
Coef. Correlación AGOSTO r= 0.375



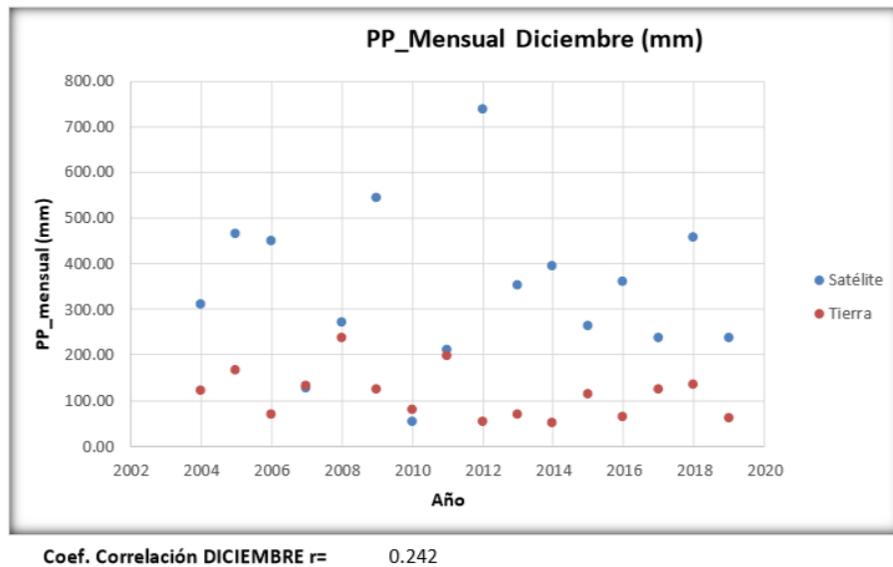
Coef. Correlación SEPTIEMBRE r= 0.734



Coef. Correlación OCTUBRE r= 0.652



Coef. Correlación NOVIEMBRE r= 0.372



De la misma manera se procede para las demás estaciones, las que se presentaron solo fueron para la estación Aeropuerto Tarija.

Después de este procedimiento, se extrajeron los valores de Fc de cada estación para cada mes en una tabla auxiliar para poder exportarlos al ArcGis y de ahí proceder con la interpolación y extrapolación de Fc para todos los demás puntos de precipitación que cuya ubicación no caen sobre ningún punto de estación pluviométrica, como la resolución espacial de la grilla pixelada es de 1,0 km por lado, en toda el área de estudio, existen 5.761 puntos o pixel que cubren dicha zona. Cabe mencionar que para encontrar el factor de corrección solo se analizaron 17 puntos en la zona del valle central de tarja, ya que solo son 17 las estaciones que contienen información dentro del periodo de análisis 2004-2019 y solo los puntos que tienen información pluviométrica (datos tierra) junto con los datos de la base satelital se pueden comparar ajustar y evaluar, para encontrar los Fc.

Como los 17 puntos están repartidos en toda la zona del valle central se procedió a extrapolar e interpolar según la ubicación del punto desconocido.

La tabla de los valores de Fc para todos los puntos (estación – pixel) se encuentran resumidas como se muestra a continuación, para importarlas al software Arcgis para su siguiente procesamiento:

4.5 Factores de corrección para todas las estaciones (Fc)

TABLA 10. Factores de corrección de las 17 estaciones analizadas.

Mes/Estación	León Cancha	Trancas	YesNorte	SellaQdas	Tucumillas	Yesera Sud	Coimata	Tejar	Aeropuerto	Turumayo	SanJc	San Andres	Cenav	Pinos	Chocloca	Cañas	Merced
Enero	0,44	0,54	0,43	0,43	0,48	0,32	0,38	0,33	0,37	0,42	0,34	0,48	0,26	0,59	0,37	0,41	0,32
Febrero	0,50	0,63	0,50	0,49	0,51	0,37	0,40	0,48	0,35	0,45	0,38	0,48	0,27	0,69	0,40	0,41	0,30
Marzo	0,54	0,61	0,53	0,50	0,63	0,35	0,46	0,47	0,45	0,52	0,40	0,73	0,28	1,03	0,49	0,62	0,37
Abril	0,61	0,62	0,58	0,53	0,64	0,25	0,55	0,61	0,36	0,48	0,40	0,82	0,28	1,09	0,77	0,71	0,34
Mayo	0,06	0,14	0,11	0,13	0,15	0,03	0,08	0,06	0,04	0,09	0,05	0,27	0,01	0,28	0,09	0,08	0,04
Junio	0,00	0,01	0,06	0,03	0,01	0,01	0,03	0,00	0,01	0,05	0,01	0,07	0,01	0,08	0,00	0,03	0,01
Julio	0,00	0,03	0,11	0,07	0,02	0,08	0,03	0,04	0,03	0,05	0,01	0,05	0,01	0,11	0,02	0,02	0,02
Agosto	0,02	0,11	0,15	0,18	0,09	0,02	0,06	0,02	0,06	0,08	0,05	0,19	0,00	0,24	0,02	0,09	0,04
Septiembre	0,33	0,32	0,18	0,21	0,21	0,10	0,26	0,24	0,23	0,20	0,29	0,36	0,18	0,43	0,55	0,25	0,14
Octubre	0,24	0,43	0,33	0,32	0,35	0,18	0,31	0,39	0,37	0,50	0,42	0,65	0,21	0,66	0,35	0,44	0,19
Noviembre	0,35	0,49	0,34	0,38	0,54	0,23	0,41	0,44	0,41	0,67	0,45	0,85	0,28	0,95	0,33	0,56	0,29
Diciembre	0,51	0,53	0,34	0,38	0,49	0,26	0,40	0,43	0,33	0,42	0,31	0,58	0,26	0,78	0,41	0,42	0,28

Fuente: Elaboración propia.

De esta tabla se extraen los valores de Fc de cada estación para cada mes por separado para las coordenadas (WGS84 UTM Z20S) correspondientes para el proceso de interpolación en el Arcgis. El ejemplo de esto se muestra a continuación (Para el mes de enero y febrero, lo mismo se realiza para los restantes meses del año, lo cual se muestra en el Anexo 7

Mes	Enero		
ESTACIÓN	Fc	X	Y
León cancha	0,44	322246,51	7656906,27
trancas	0,54	311246,51	7642906,27
Yesera Norte	0,43	339246,51	7635906,27
Sella Qdas	0,43	325246,51	7633906,27
Tucumillas	0,48	310246,51	7625906,27
Yesera Sud	0,32	338246,51	7624906,27
Coimata	0,38	314246,51	7621906,27
El tejar	0,33	322246,51	7616906,27
Aeropuerto	0,37	323246,51	7615906,27
Turumayo	0,42	316246,51	7614906,27
San Jacinto Sud	0,34	322246,51	7608906,27
San Andrés	0,48	312246,51	7607906,27
Cenavit	0,26	328246,51	7599906,27
Pinos Sud	0,59	305246,51	7595906,27
Chocloca	0,37	321246,51	7593906,27
Cañas	0,41	309246,51	7576906,27
La Merced	0,32	327246,51	7563906,27

TABLA 11. Valores Fc para Enero y Febrero

Fuente: Elaboración propia.

Mes	Febrero		
ESTACIÓN	Fc	X	Y
León cancha	0,50	322246,51	7656906,27
trancas	0,63	311246,51	7642906,27
Yesera Norte	0,50	339246,51	7635906,27
Sella Qdas	0,49	325246,51	7633906,27
Tucumillas	0,51	310246,51	7625906,27
Yesera Sud	0,37	338246,51	7624906,27
Coimata	0,40	314246,51	7621906,27
El tejar	0,48	322246,51	7616906,27
Aeropuerto	0,35	323246,51	7615906,27
Turumayo	0,45	316246,51	7614906,27
San Jacinto Sud	0,38	322246,51	7608906,27
San Andrés	0,48	312246,51	7607906,27
Cenavit	0,27	328246,51	7599906,27
Pinos Sud	0,69	305246,51	7595906,27
Chocloca	0,40	321246,51	7593906,27
Cañas	0,41	309246,51	7576906,27
La Merced	0,30	327246,51	7563906,27

4.6 Procesamiento de Fc para toda la zona del valle central de Tarija, en Arcgis

En la siguiente figura se muestra como el proceso de importación de datos de Fc (Factores de corrección ajustados) a la zona del valle central de Tarija con sus respectivas coordenadas X, Y para cada estación para el mes de Enero. De la misma manera se realiza este proceso para todos los meses del año. Como ejemplo, se colocó solo para el mes de enero.

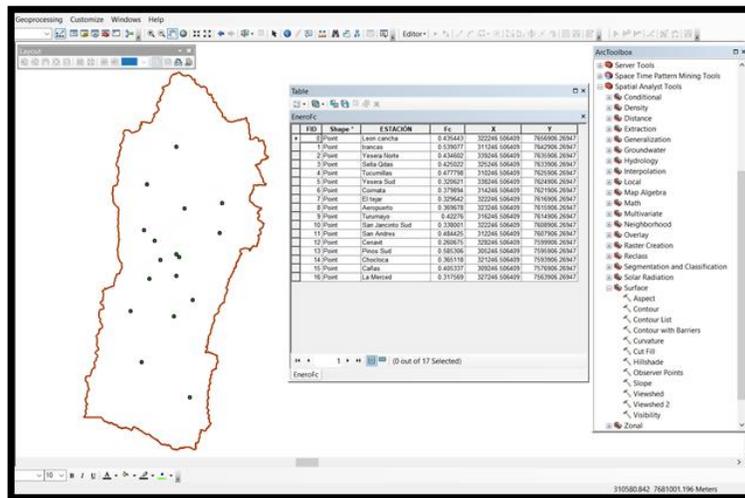


Figura 29. Importación de los Fc encontrados para las estaciones

Fuente: Elaboración propia.

En la figura que se muestra a continuación se muestra la interpolación de Fc para toda la zona del valle central de Tarija en función a los Fc corregidos para las distintas estaciones seleccionadas.

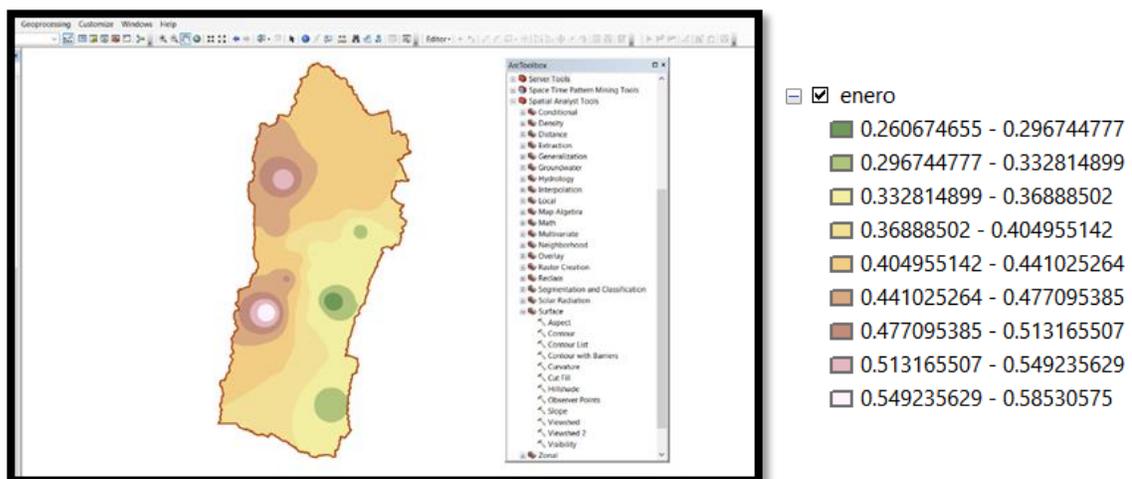


Figura 30. Proceso de interpolación de Fc.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura, se muestran los valores de Fc para toda la zona del valle central de Tarija, no solo para las 17 estaciones que se escogieron (17 puntos), sino que aquí se completa para todos los pixel de 1,0 km que cubren toda la zona de estudio del departamento. Son en total 5.761 puntos o factores de corrección.

Este proceso fue ejecutado en el programa Arcgis, con el cual se extrapolo e interpolo los datos de Fc que ya están corregidos para la zona del valle central, con las ubicaciones correspondientes del pixel que contiene información de precipitación mensual.

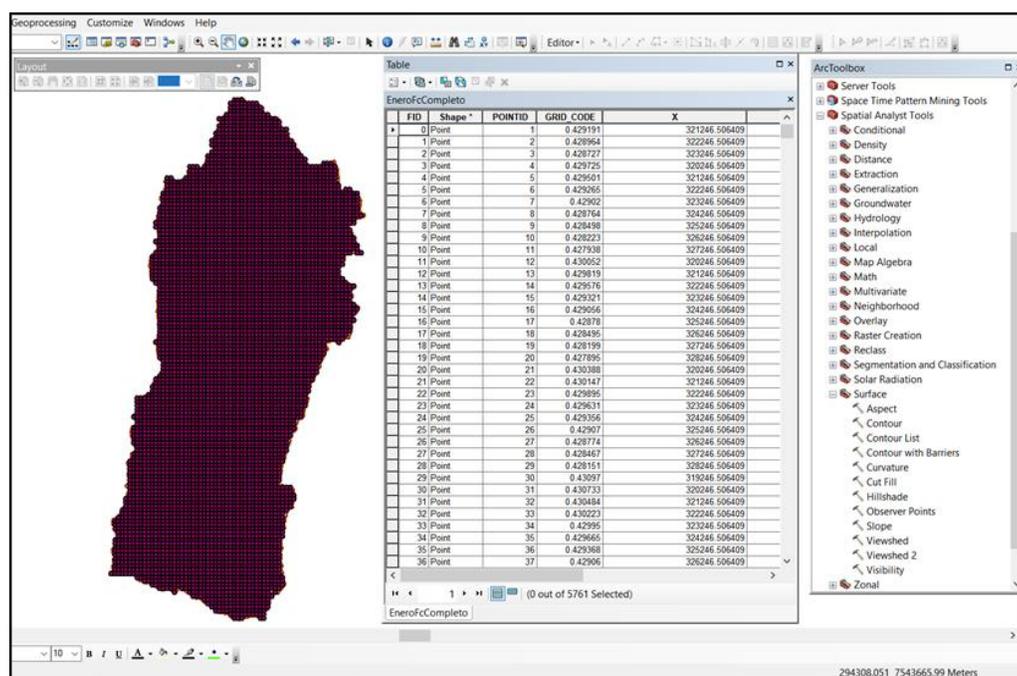


Figura 31. Mapa de factores de corrección para toda el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Los factores de corrección (Fc) se muestran en la siguiente tabla, donde también se puede observar la precipitación media mensual para el periodo 2004-2019 del producto satelital, y las coordenadas de cada centro de pixel “X” y “Y”

Cabe mencionar que cada Fc es para un pixel en específico, ubicado en la zona del valle central de Tarija, por lo tanto este factor de Fc es multiplicado por el valor de precipitación media mensual del producto satélite sin corregir, se encuentra la nueva precipitación corregida, la cual ya es el producto final del proyecto al cual se pretendía llegar.

En las tablas del Anexo 8, se muestran los valores de precipitación media mensual para cada mes, para el periodo 2004-2019, donde se extrae la media mensual de dicho periodo, para corregir la información con uso del Fc que se ha interpolado anteriormente. En el anexo, se muestra en la tabla que está al lado derecho, los valores de Fc que han sido procesados en el programa Arcgis (valores que se muestran de color Azul) con las respectivas coordenadas del pixel ubicado en la zona del valle central. En la misma tabla se muestra el valor de la precipitación media mensual que ha sido ajustada para elaborar planos de precipitación, este valor corregido se muestra de color verde.

En cuanto a la precipitación que no es corregida en función de los pluviómetros con los factores de corrección previamente obtenidos con la comparación de ambos, estos datos son corregidos en función a los factores de corrección que han sido encontrados haciendo la comparativa de los datos de precipitación del pluviómetro con los datos estimados por el producto satelital. Estos factores de corrección son interpolados entre sí con el método y de IDW para encontrar nuevos factores de corrección que caerían entre medio de estos puntos y así ubicarlos en las coordenadas de cada pixel para toda la región o zona del valle central de Tarija, una vez ubicado los factores de corrección en la ubicación del pixel que contiene información de precipitación que no es corregida, entonces se procede a realizar este ajuste de la lluvia en función a factores de corrección encontrados para las 17 estaciones distribuidas en toda la zona del valle central de Tarija.

Posterior a este proceso, se importó al programa Arcgis los datos de precipitación media mensual corregida del producto satelital PERSIANN-CCS. Este proceso se muestra en la siguiente imagen.

Los puntos importados están con las correspondientes coordenadas X, Y para todos los pixel que fueron corregidos, en total 5.761 pixel. La tabla en la imagen solo muestra una porción de esta información, 37 puntos, lo cual implica solo 37 pixel.

En este caso se pone el ejemplo de la precipitación media mensual para el mes de diciembre únicamente. Lo mismo se realiza para los restantes meses del año.

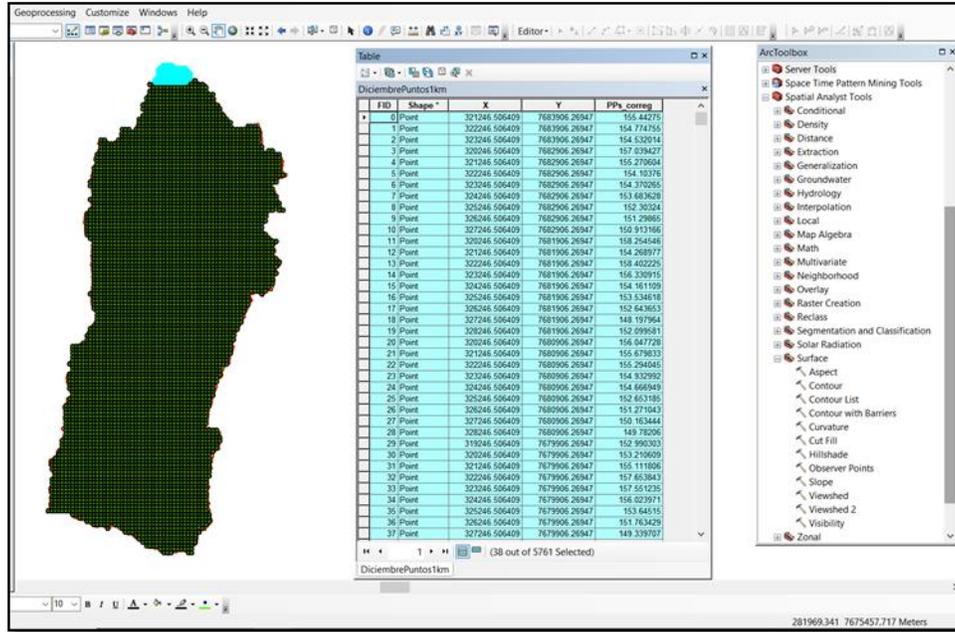


Figura 32. Valores Fc para el valle central de Tarija
Fuente: Elaboración propia.

4.7 Grilla de precipitación media mensual corregida

En la imagen siguiente, está la precipitación media mensual para el mes de enero para el periodo 2004-2019 corregida con pixel a resolución espacial de 1,0 km por lado, para toda la zona del valle central de Tarija. Dicho proceso también realizado mediante el programa Software Arcgis. De esta misma manera los planos para todos los meses del año se mostraran posteriormente.

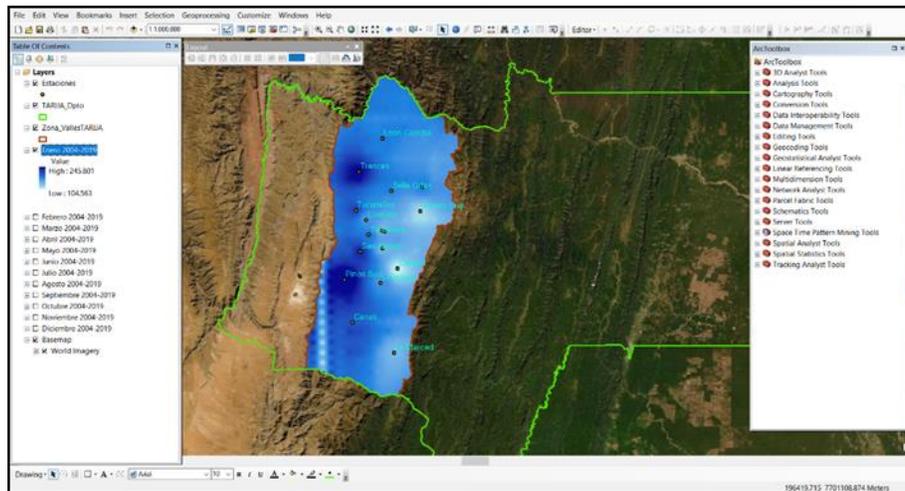


Figura 33. Grilla de precipitación media mensual corregida
Fuente: Elaboración propia.

En este punto ya la información de precipitación estimada por satélite está corregida para toda la zona del Valle central del departamento de Tarija Por lo cual sólo restar elaborar los mapas de precipitación media mensual para el período 2004 y 2019 estos mapas se presentan a continuación de enero a diciembre con una resolución espacial mejorada a un kilómetro por lado del pixel, finalmente el resultado de este proyecto se muestra a continuación

5. CAPÍTULO V: VERIFICACIÓN Y RESULTADOS DEL PRODUCTO CORREGIDO PERSIANN-CCS

5.1 Evaluación y control a la información satelital corregida

Con esta evaluación de la información satelital corregida, se pretende determinar cuánto de aproximación existe entre los datos tierra y los datos del producto satelital corregido. Es decir si el producto satelital corregido brinda un dato de precipitación igual al dato tierra en un punto cualquiera, pero que no sea exactamente en la estación pluviométrica indica que la aproximación es del 100% sin embargo, si estos datos satelitales corregidos no coinciden exactamente con el valor de los datos tierra del punto analizado, el nivel de aproximación será inferior al 100%.

Para este trabajo se evaluaron 60 puntos de control distribuidos en toda la zona de estudio y escogidos de forma aleatoria. Dichos puntos, tienen como objetivo ser analizados para determinar con qué porcentaje de aproximación se encuentran respecto a los datos pluviométricos

Los datos pluviométricos fueron interpolados para toda la zona de estudio, por mediante el método de IDW, con el único fin de colocar la serie de datos de cada estación en un formato de grilla pixelada con una resolución espacial de 1 km por lado de pixel. Y así, de esta manera poder comparar con la grilla pixelada del producto satelital corregido, que tiene igual resolución espacial (1,0 km por lado de pixel). Entonces, analizar estos 60 puntos distribuidos que servirán como evaluadores.

En la siguiente imagen se muestran los puntos escogidos dentro de la zona de estudio. Los triángulos que están de color celeste, son los 60 puntos de control distribuidos. Y los marcadores de color amarillo representan las estaciones pluviométricas dentro de la zona de estudio.

A continuación se presenta gráficamente los puntos mencionados:

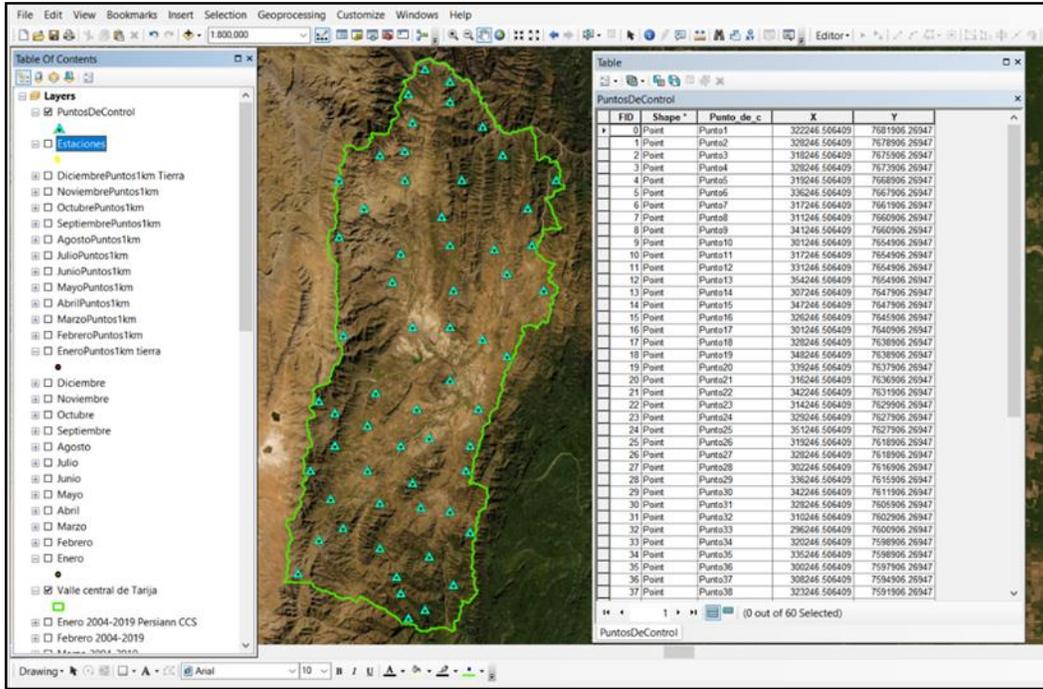


Figura 34. Puntos de control y sus coordenadas
Fuente: Elaboración propia.

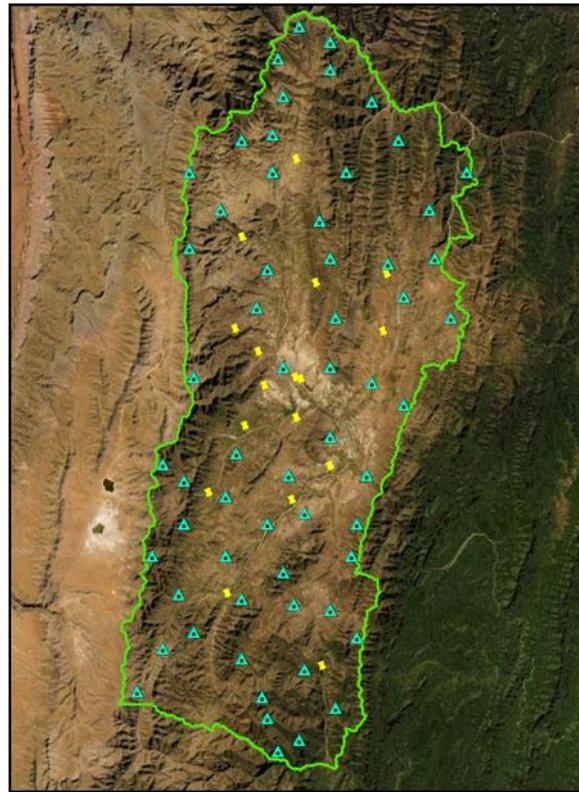


Figura 35. Puntos de control y estaciones pluviométricas
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de todo el proceso de análisis de los 60 puntos de control, el resultado mostrado para cada mes, indica el porcentaje de aproximación que tiene el producto satelital corregido con los datos tierra interpolados.

TABLA 12. Tabla de resultados de aproximación del producto PERSIANN-CCS

PORCENTAJE DE APROXIMACION ENTRE DATOS TIERRA-SATELITE PARA LOS 60 PUNTOS DE CONTROL:

Enero	96,3	%
Febrero	95,6	%
Marzo	95,2	%
Abril	90,2	%
Mayo	90,4	%
Junio	87,1	%
Julio	87,7	%
Agosto	88,5	%
Septiembre	82,7	%
Octubre	93,5	%
Noviembre	95,1	%
Diciembre	94,4	%

Promedio periodo húmedo =	95,0	%	(Octubre-Marzo)
Promedio periodo seco =	87,8	%	(Abril-Septiembre)

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el producto de precipitación satelital corregido tiene porcentajes altos. El promedio entre los meses de periodo húmedo es del 95% lo cual a simple vista nos indica que los datos si son aceptables ya que tienen un alto valor de aceptación, de igual manera el producto satelital corregido para el periodo de los meses de estiaje (seco) es alto, con una aceptación de sus valores de precipitación corregido del 87,8% (Véase el procedimiento completo de análisis y cálculos en la parte de anexos)

Posterior a este análisis de aproximación para ambos periodos (húmedo y seco) de la información satelital corregida, se procedió a hacer un análisis estadístico mediante el coeficiente de correlación (r), el cual, evaluará desde un punto de vista más estadístico como se asemejan los datos de precipitación del producto satelital ya corregido con los datos tierra (pluviómetros).

A continuación se muestran los resultados para el coeficiente de correlación:

TABLA 13. Coeficiente de correlación para los puntos de control.

Coeficiente de correlación (r) por mes, para los 60 puntos de control :

Mes	Coef. Corr. (r)	Observación
Enero	0,88	Muy Alto
Febrero	0,94	Muy Alto
Marzo	0,92	Muy Alto
Abril	0,83	Muy Alto
Mayo	0,87	Muy Alto
Junio	0,89	Muy Alto
Julio	0,95	Muy Alto
Agosto	0,92	Muy Alto
Septiembre	0,70	Alto
Octubre	0,79	Alto
Noviembre	0,88	Muy Alto
Diciembre	0,86	Muy Alto

Correlac. periodo húmedo r =	0,88	(Octubre-Marzo)
Correlac. periodo seco r =	0,86	(Abril-Septiembre)

Fuente: Elaboración propia.

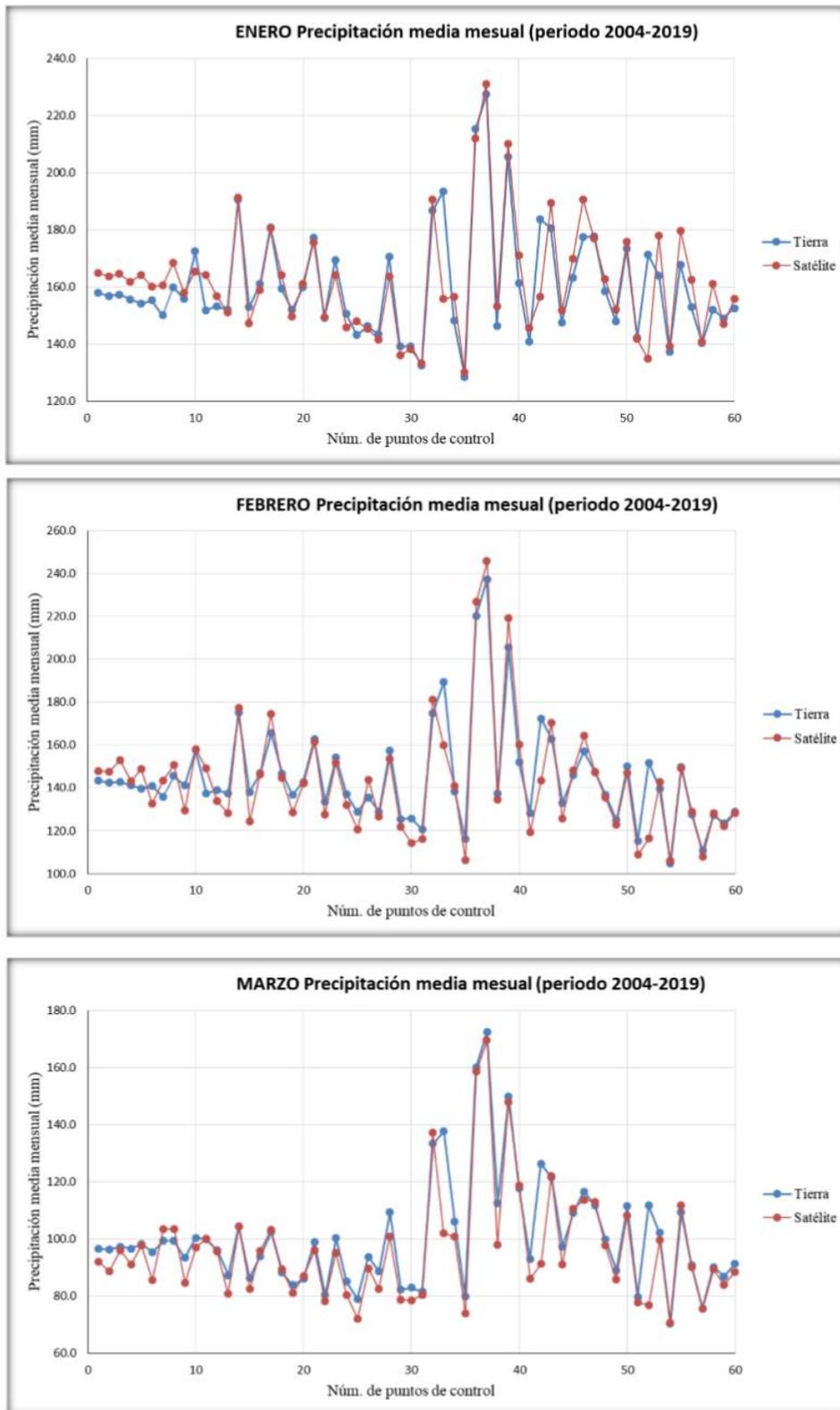
Como se observa, los resultados del coeficiente de correlación para los 60 puntos de control analizados dan como resultado un valor de 0,88 para el periodo húmedo y 0,86 para el periodo seco. Lo cual, según (Barria, 2010:32) indica que son valores muy altos, esto quiere decir estadísticamente que los valores de precipitación del producto satelital corregido respecto a los datos tierra, son muy próximos entre sí, teniendo una correlación muy alta entre datos satélite y datos tierra.

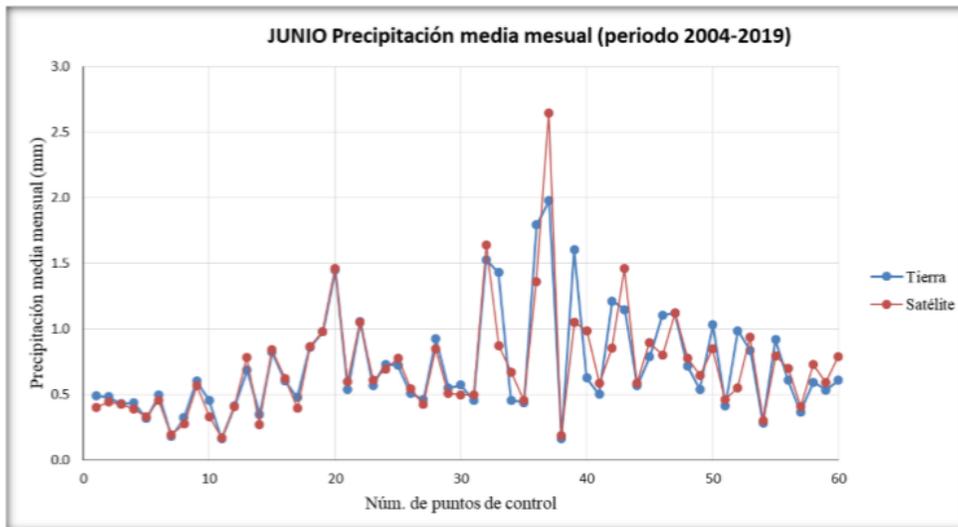
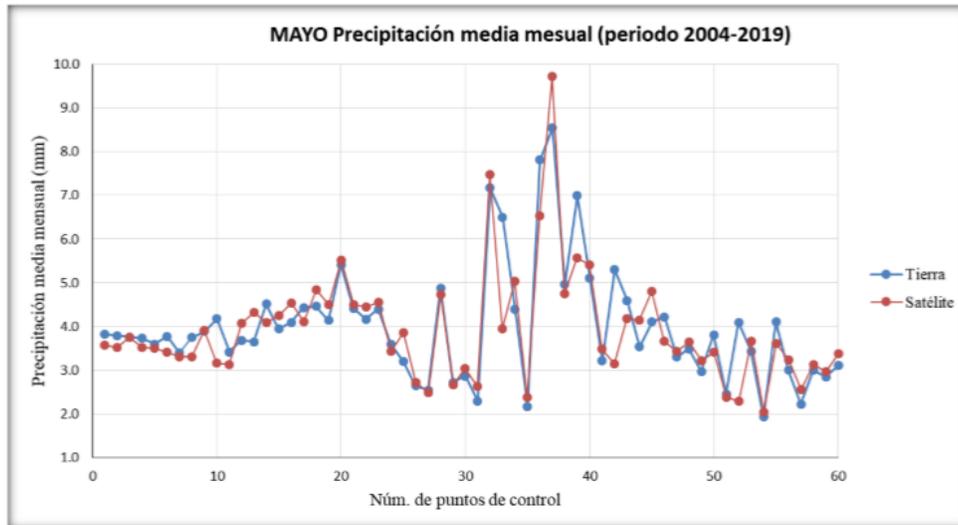
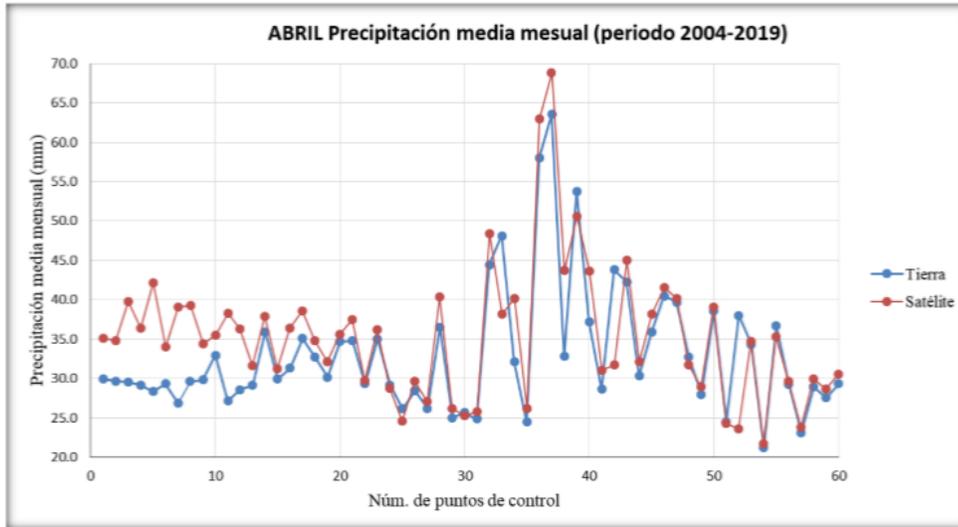
En este trabajo de evaluación a la información satelital corregida se realizó el análisis gráfico-visual de la serie de datos de los 60 puntos que fueron utilizados para determinar la correlación entre datos satélite-tierra. Dicho trabajo tiene como objeto ver como es el comportamiento de la precipitación satelital corregida respecto a los datos pluviométricos (tierra).

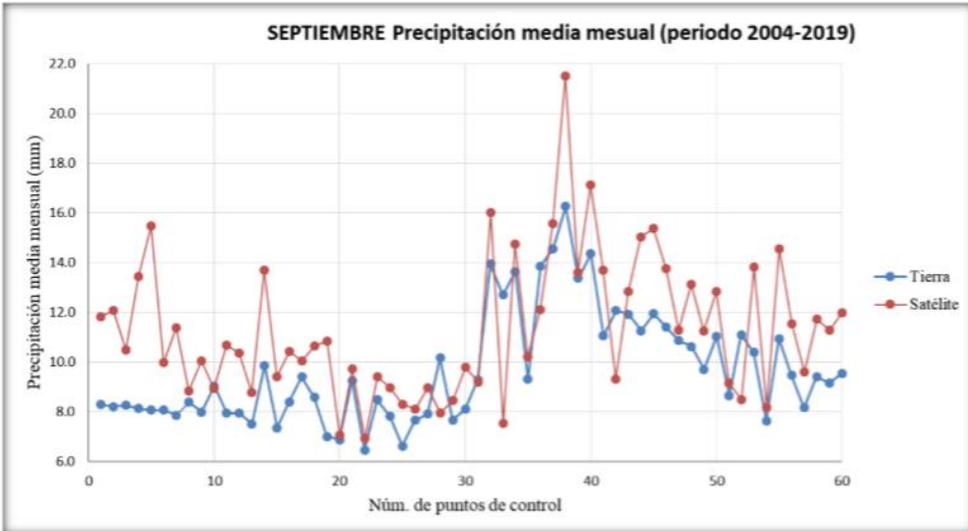
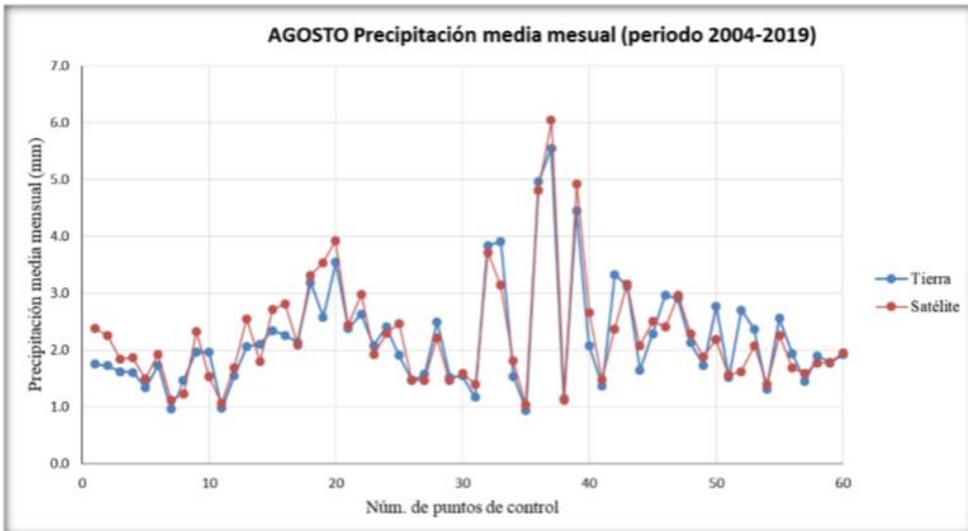
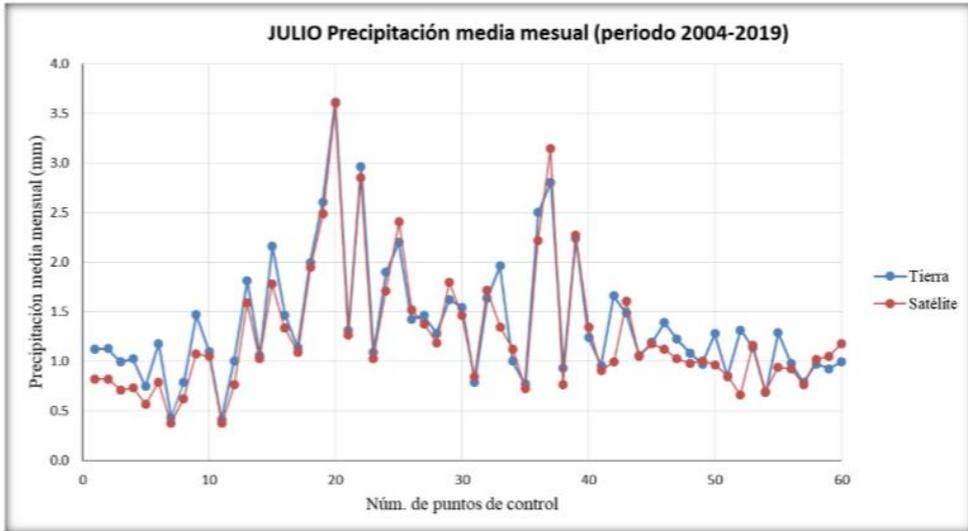
A continuación, se presentan los gráficos comparativos de precipitación media mensual para el periodo 2004-2019, para los 12 meses del año del producto corregido vs los datos tierra:

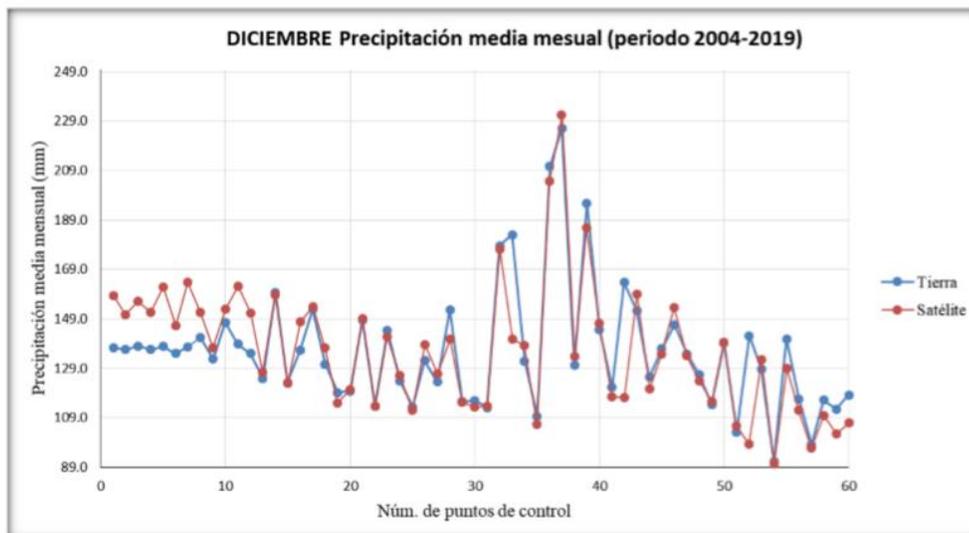
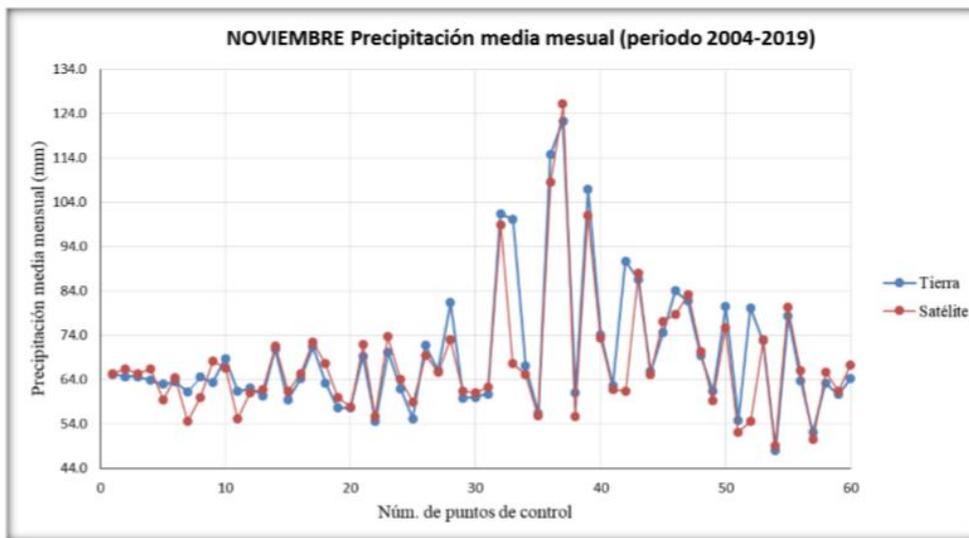
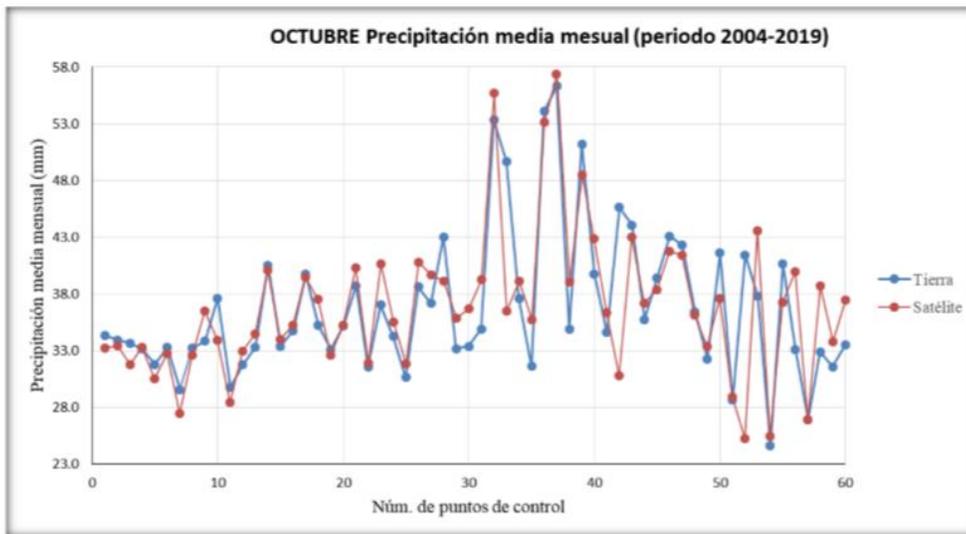
El patrón que sigue el comportamiento es casi igual (tierra-satélite), como se puede apreciar a continuación.

Figura 36. Gráficas de distribución de precipitación en los 60 puntos de control









Las 12 graficas presentadas con anterioridad muestran el comportamiento de la precipitación media mensual del producto satelital corregido (línea de color rojo) respecto a la precipitación pluviométrica (línea azul). Donde se puede ver que el comportamiento de la información del producto satelital es muy semejante a los datos tierra, en los 60 puntos de control que se tomaron, a excepción de los 9 primeros puntos y solo para los meses de enero, abril, septiembre y diciembre, que tienen un patrón de comportamiento diferente, llegando a sobreestimar la precipitación media mensual en diciembre que es el más crítico, alrededor de 20 mm de diferencia y para los demás meses en estos 9 puntos de control, sobreestima alrededor de 10mm, esto se debe a que estos puntos se encuentran sobre zonas muy montañosas y se encuentran fuera del valle central de Tarija. Lo cual correspondería un análisis de otra zona.

A continuación, se muestran los puntos de control identificados con numeración.-

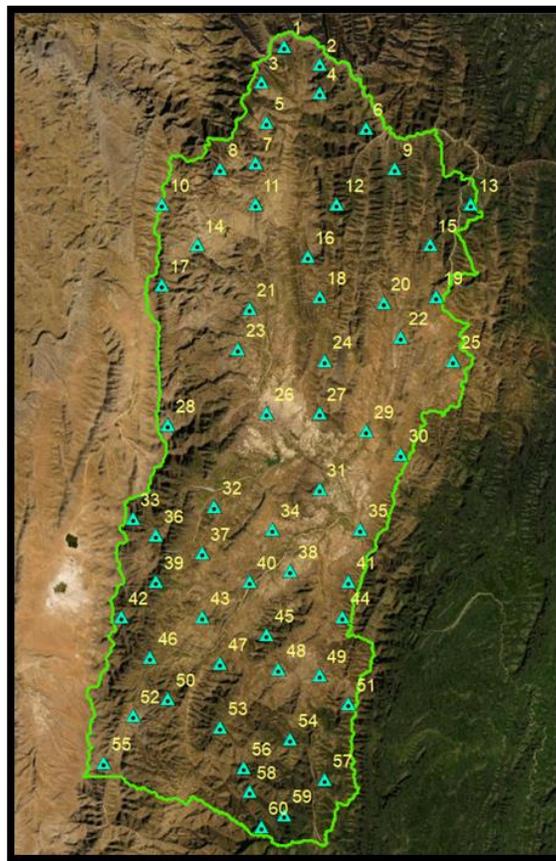
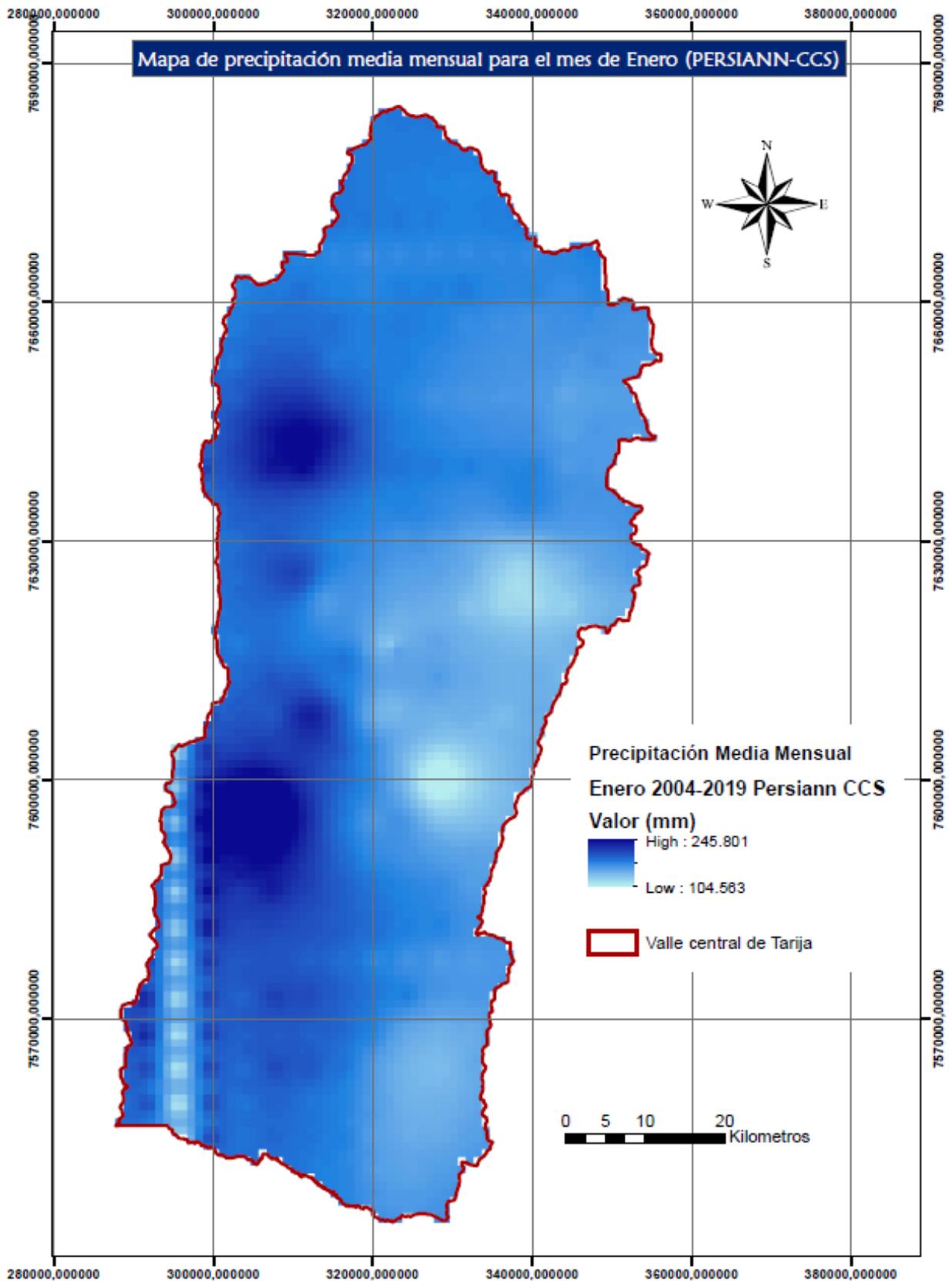
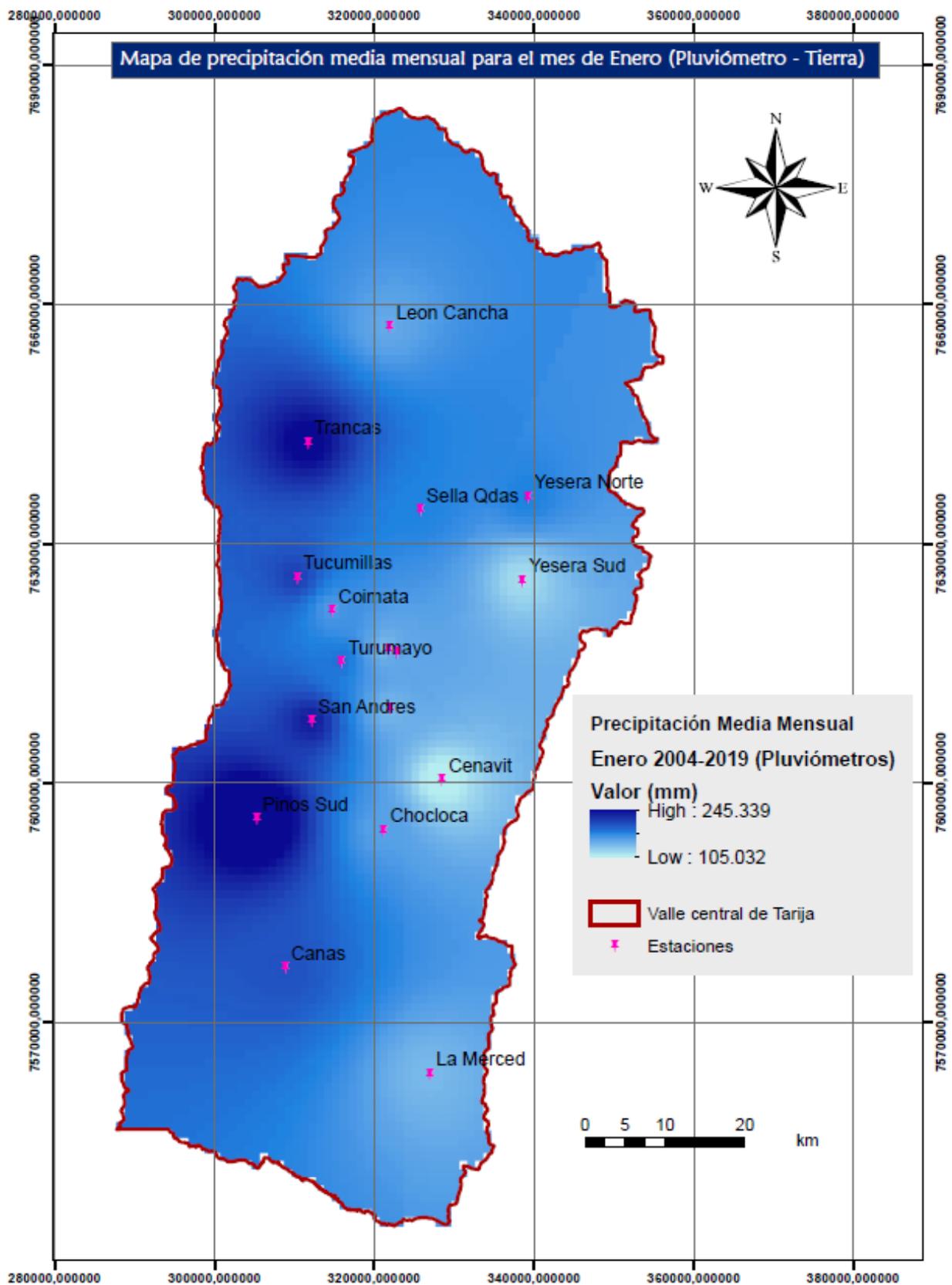


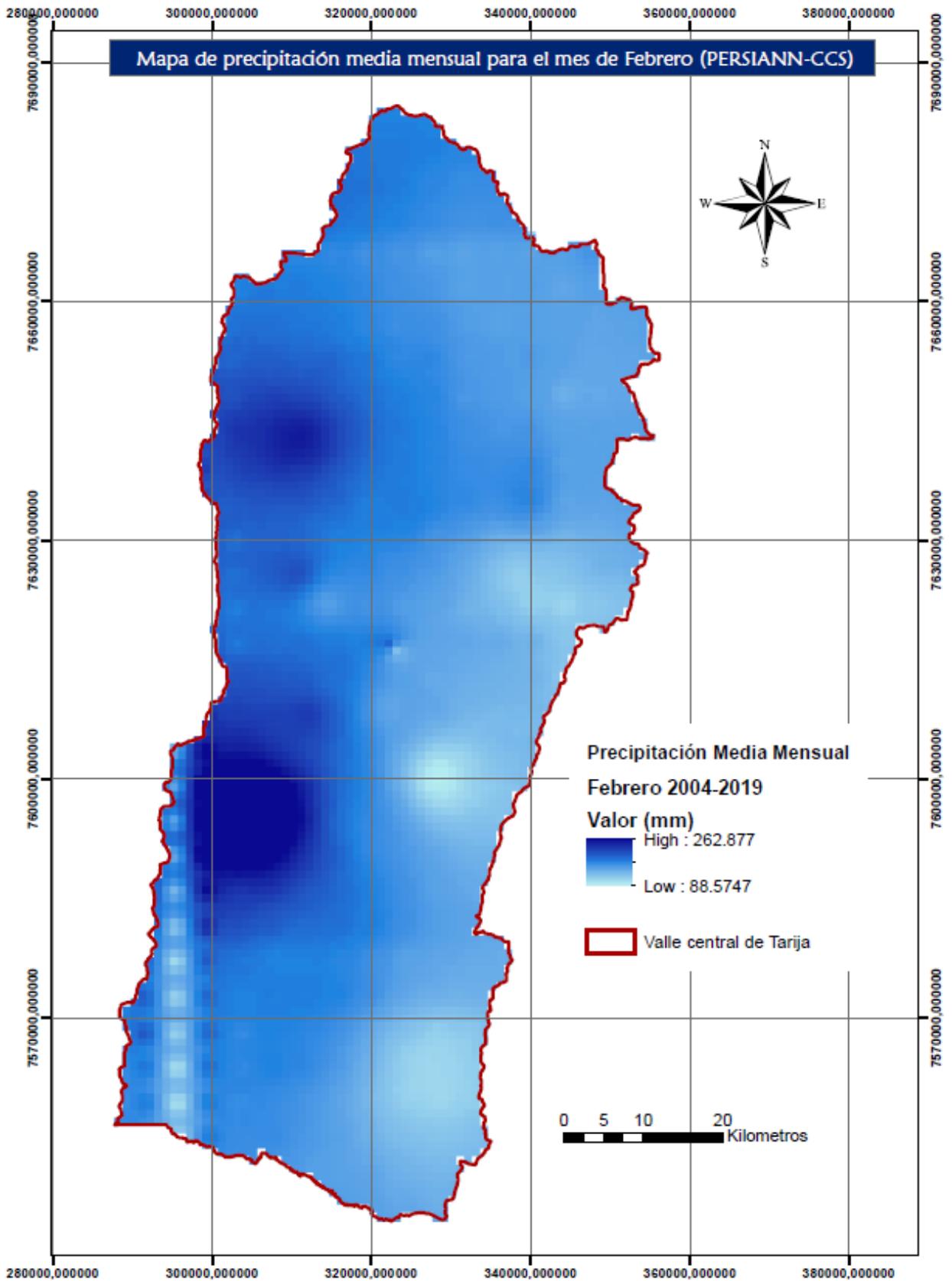
Figura 37. Puntos de control en el valle central de Tarija.

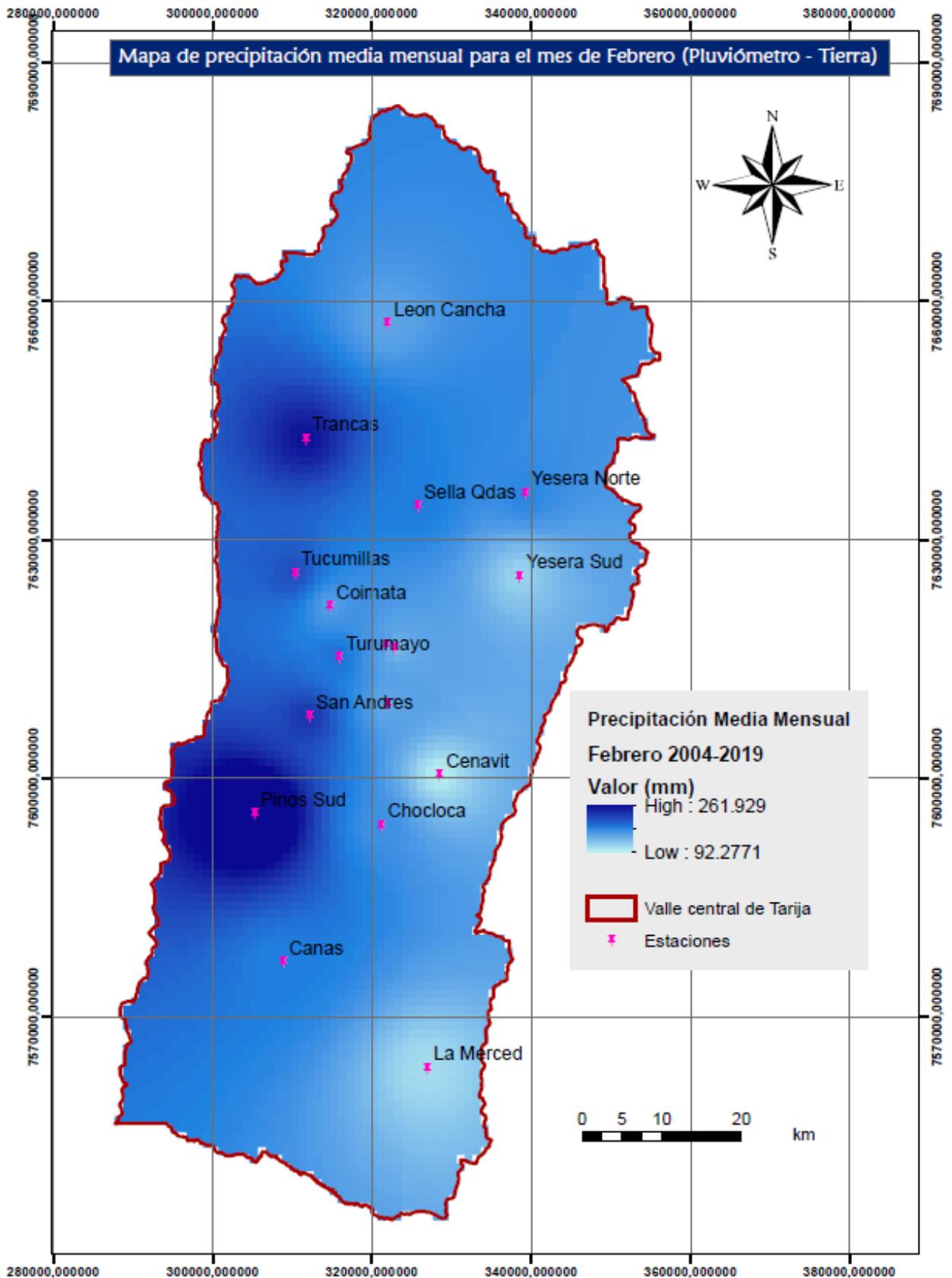
Fuente: Elaboración propia.

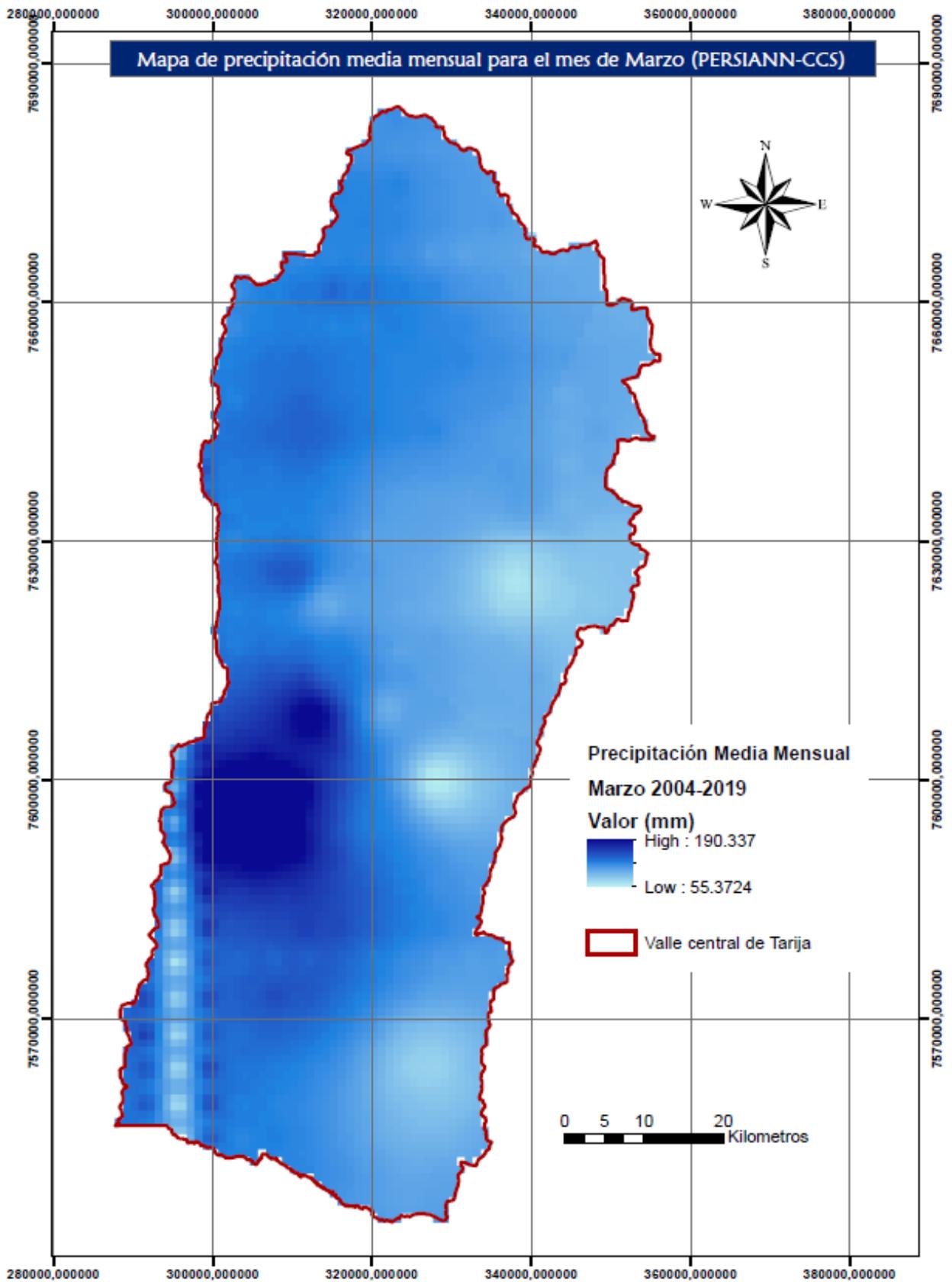
MAPAS DE PRECIPITACIÓN
DEL PRODUCTO SATELITAL
“PERSIANN-CCS” CORREGIDO,
Y MAPAS DE PRECIPITACIÓN
DE LOS PLUVIÓMETROS

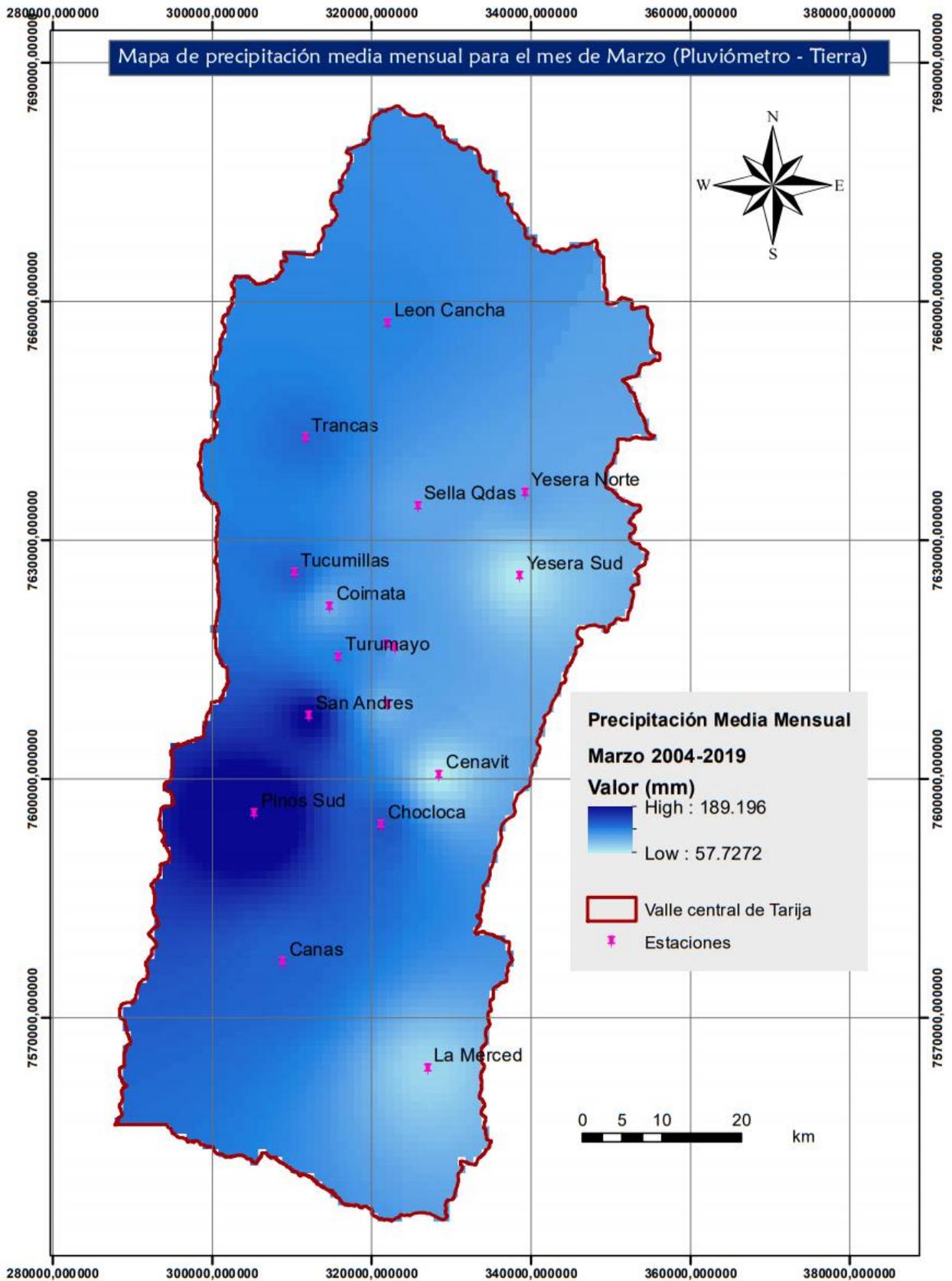


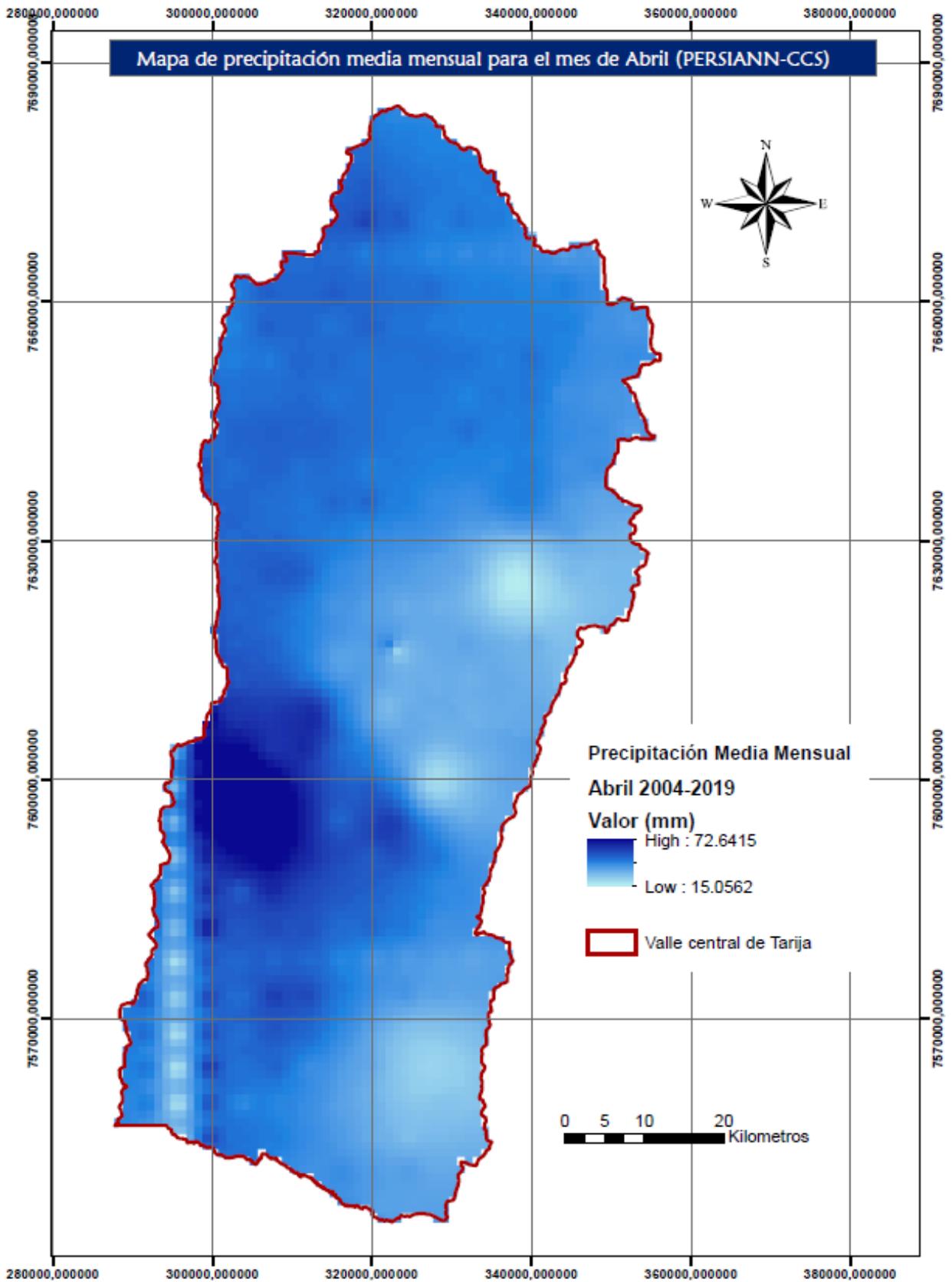


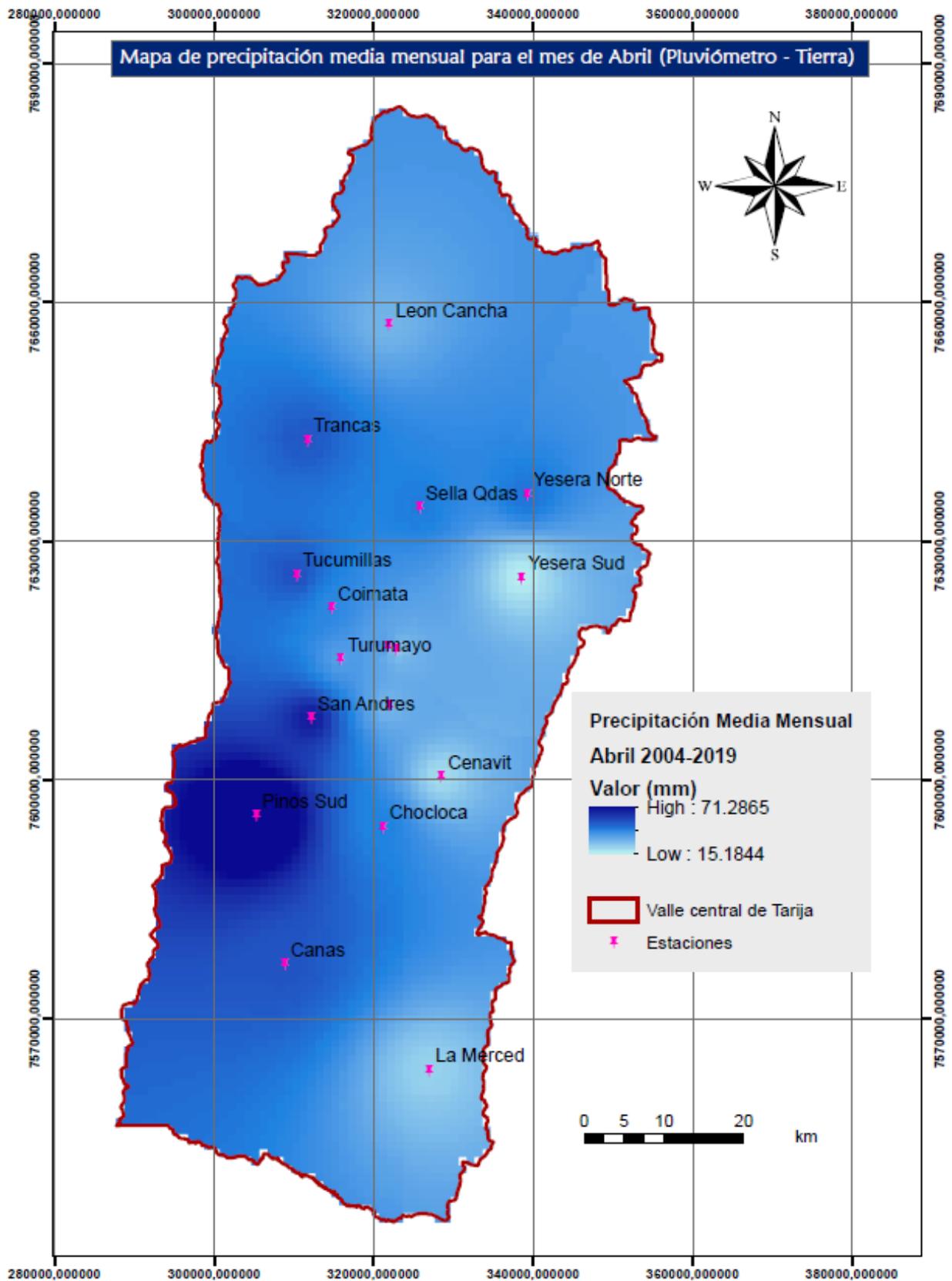


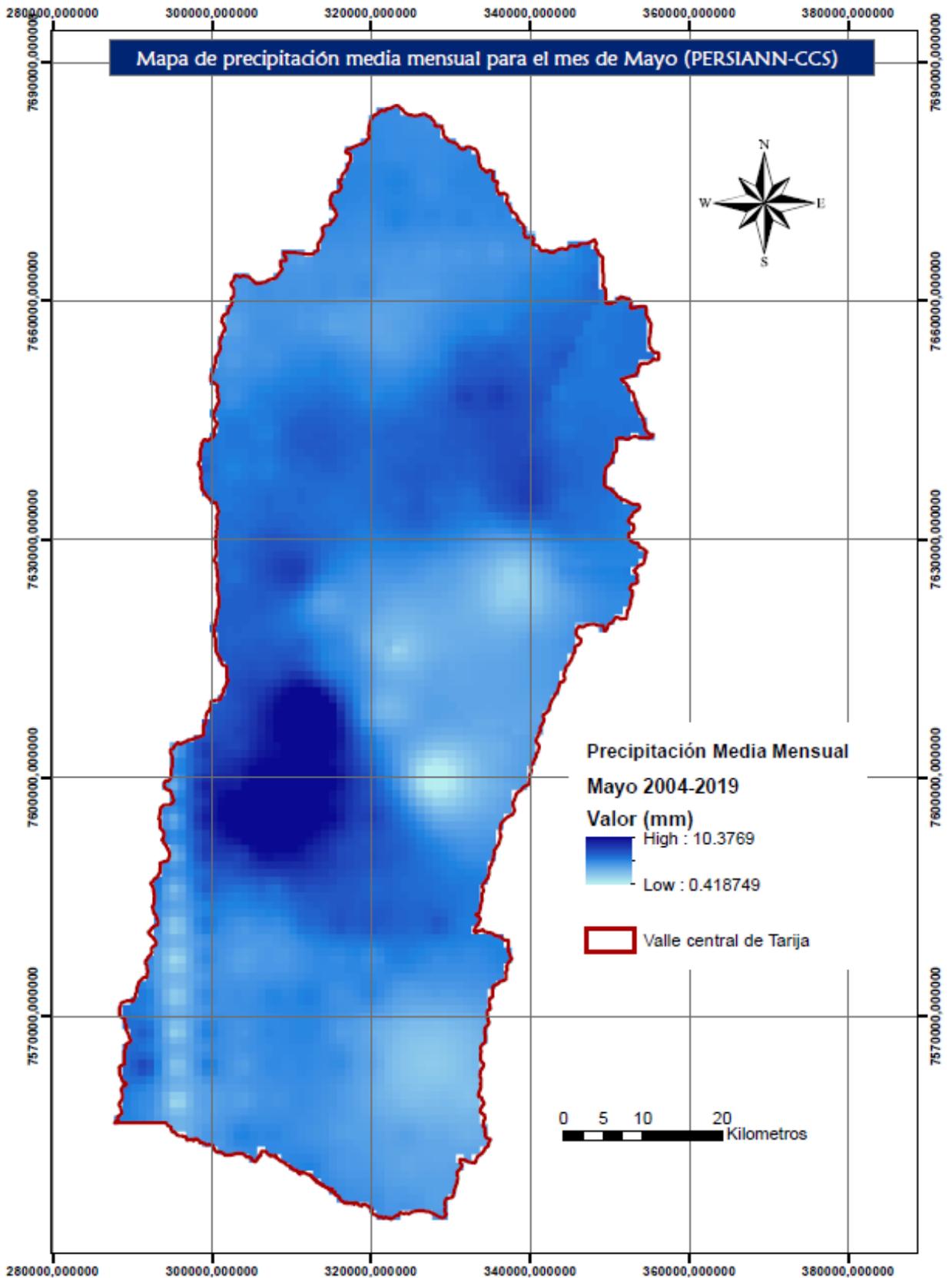


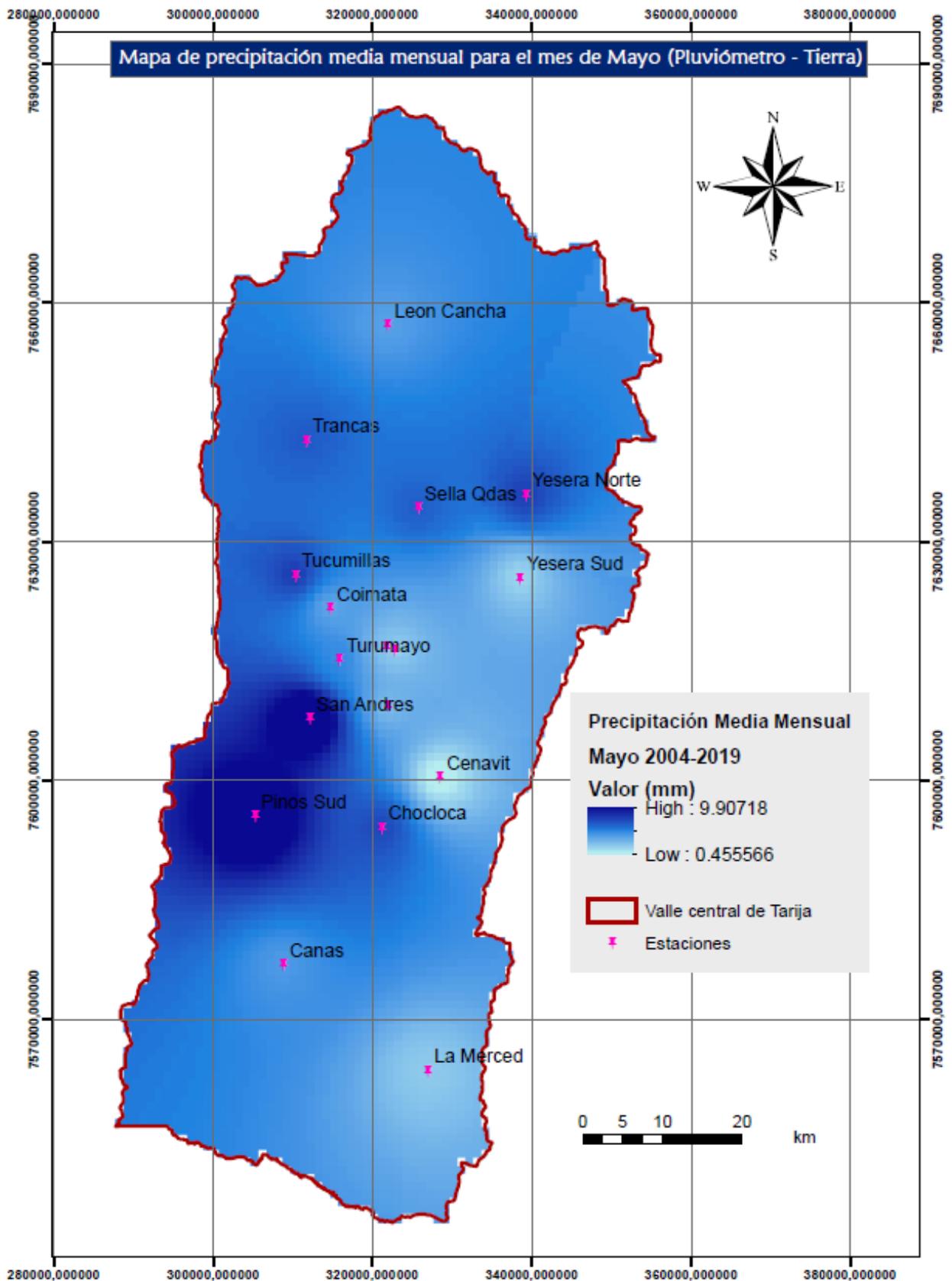


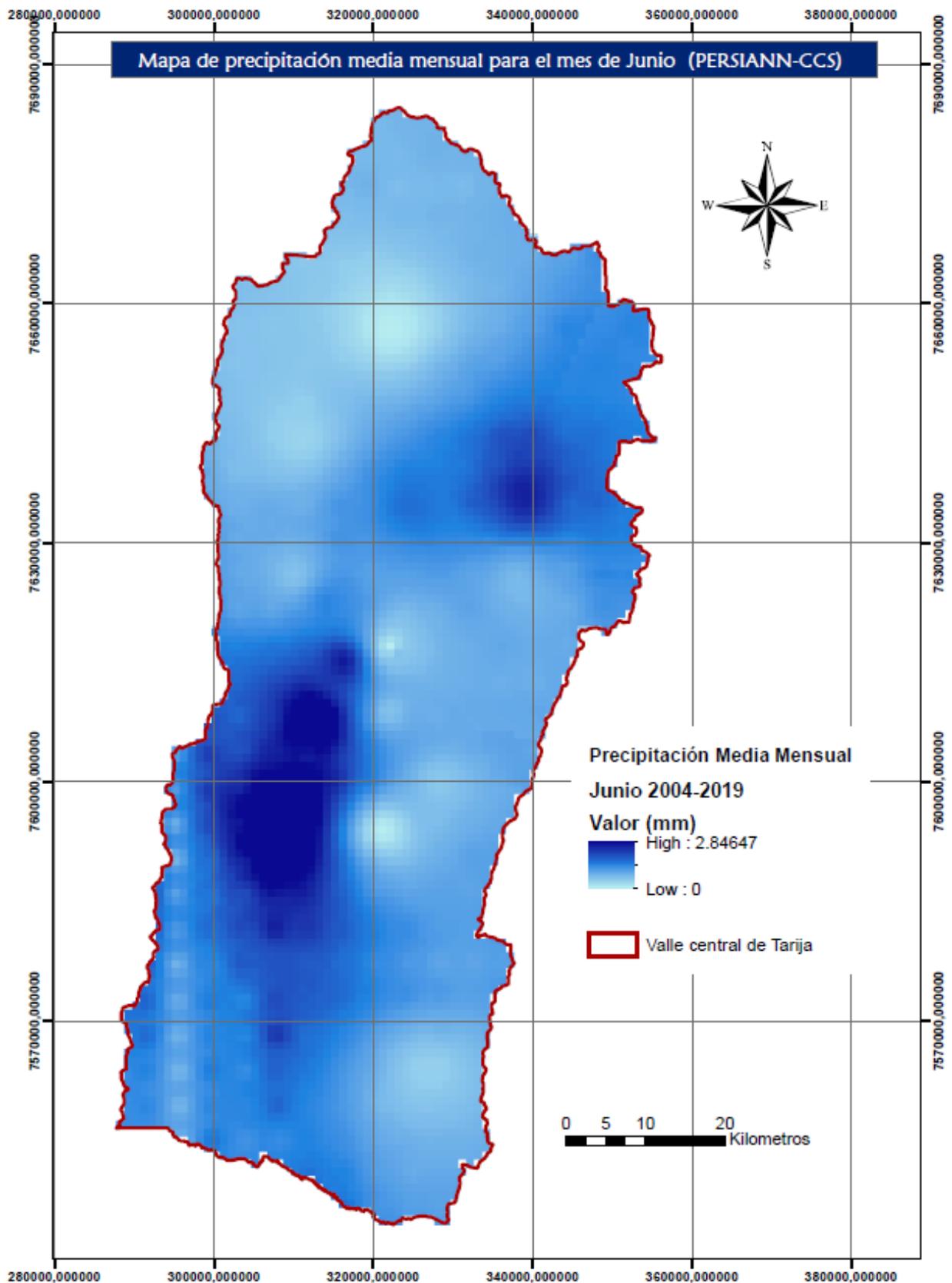


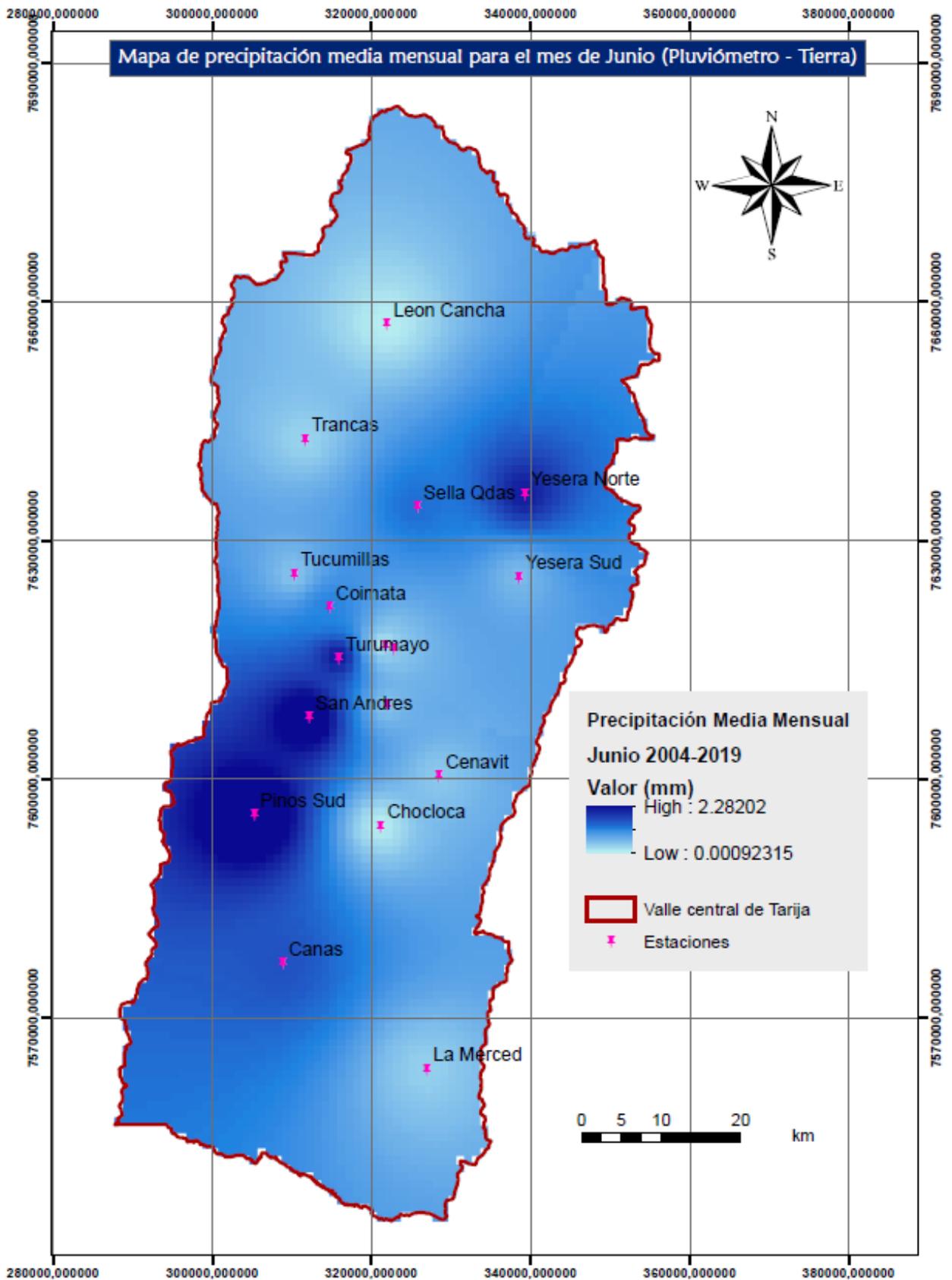


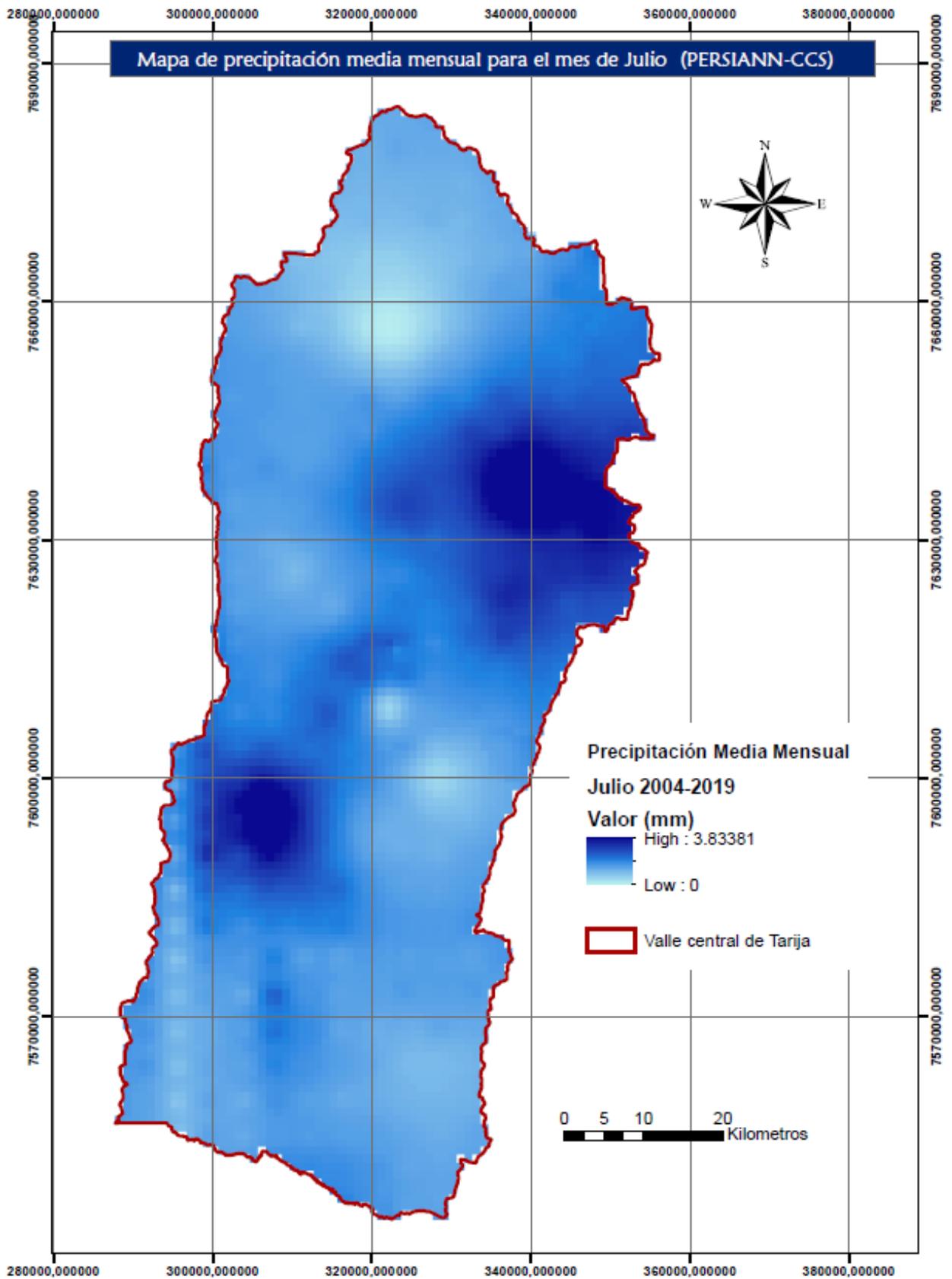


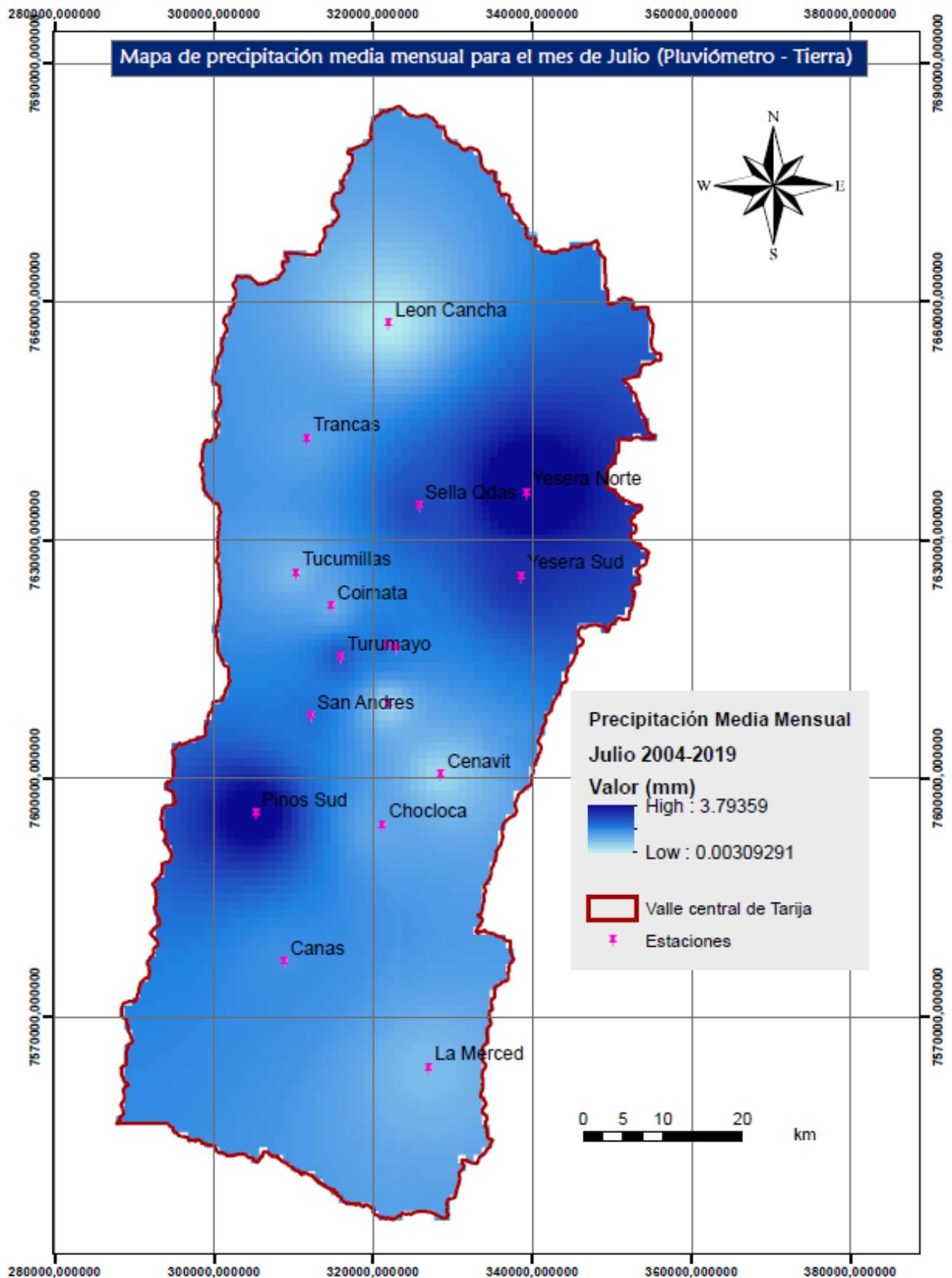


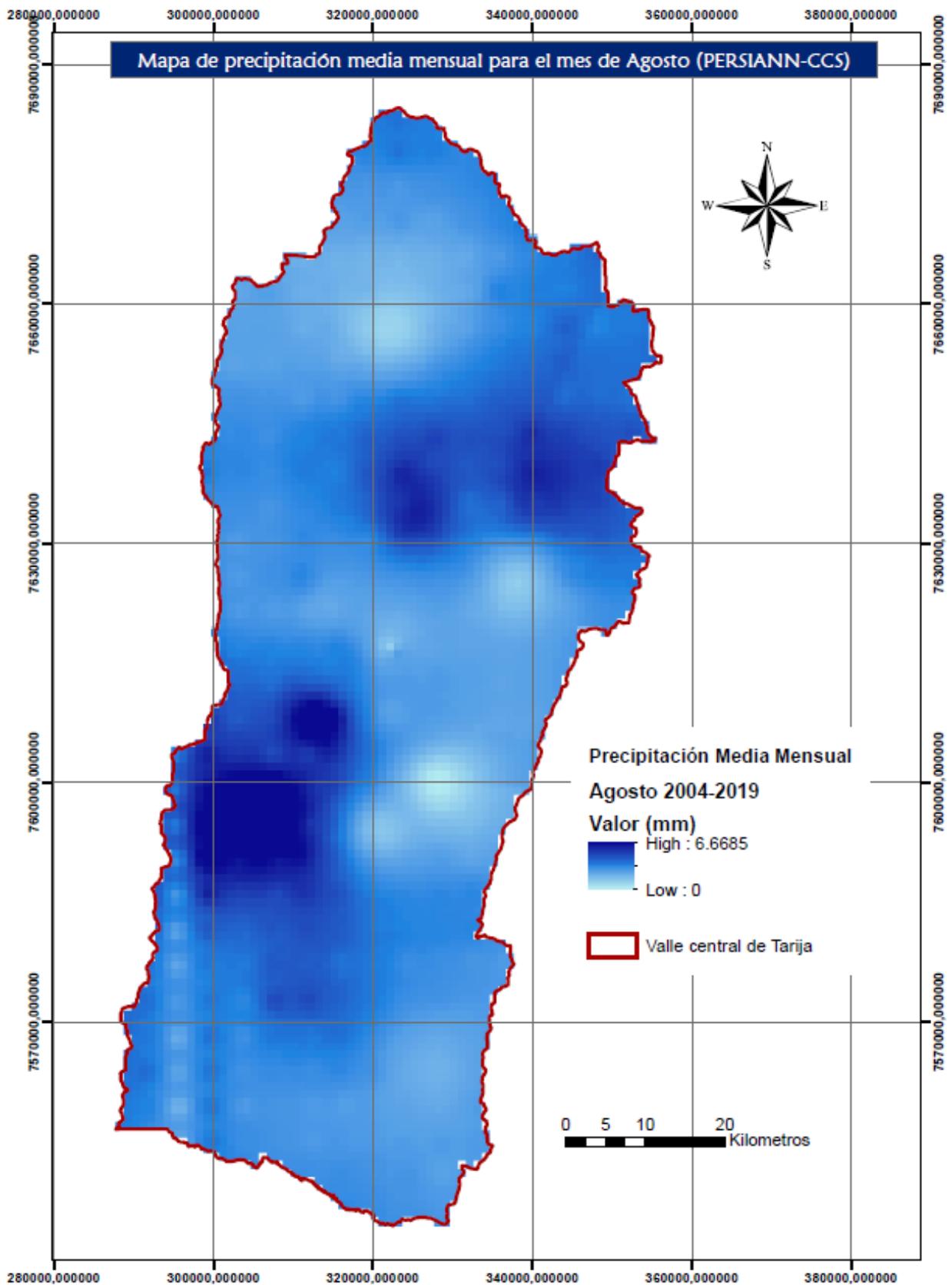


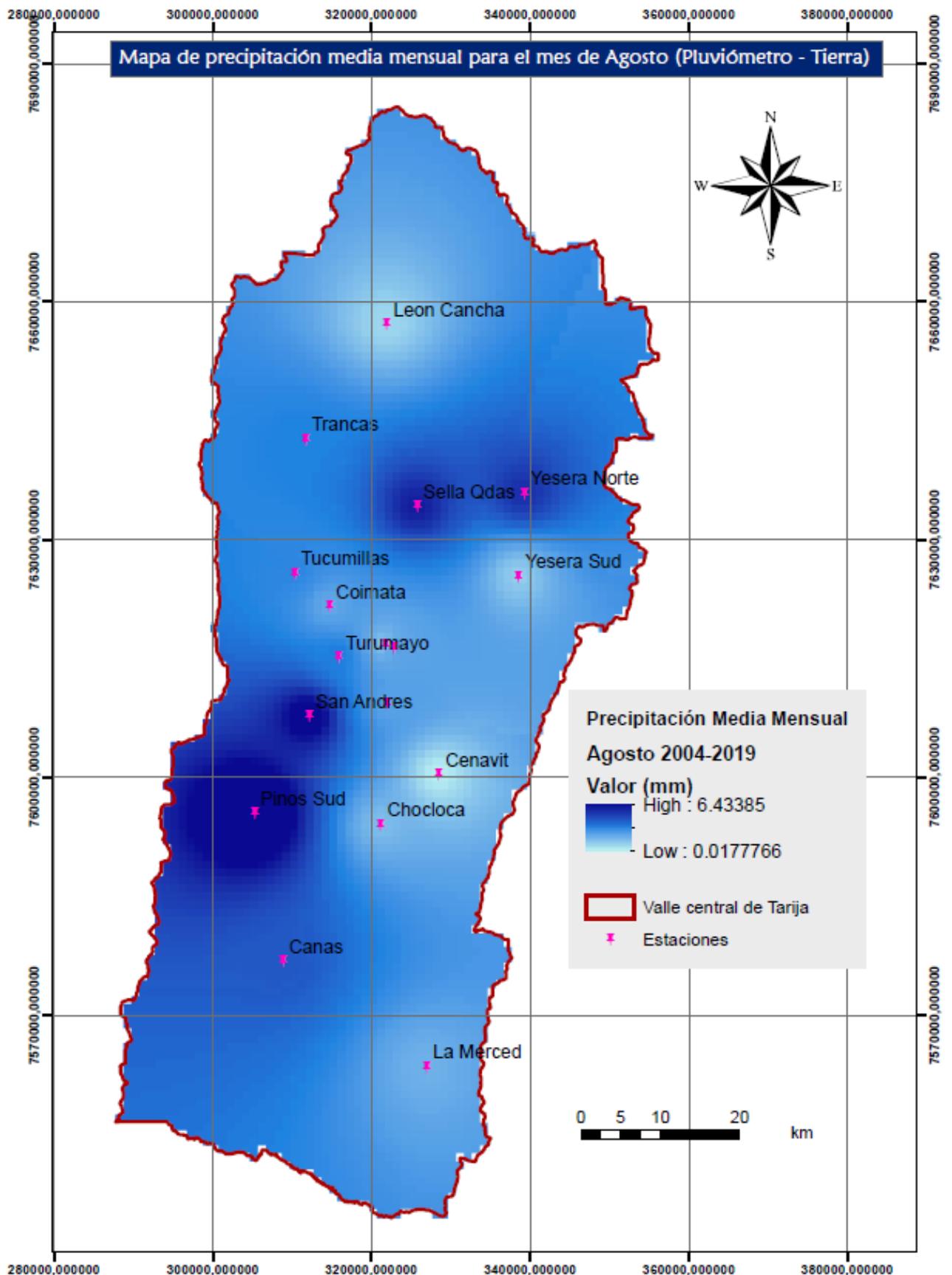


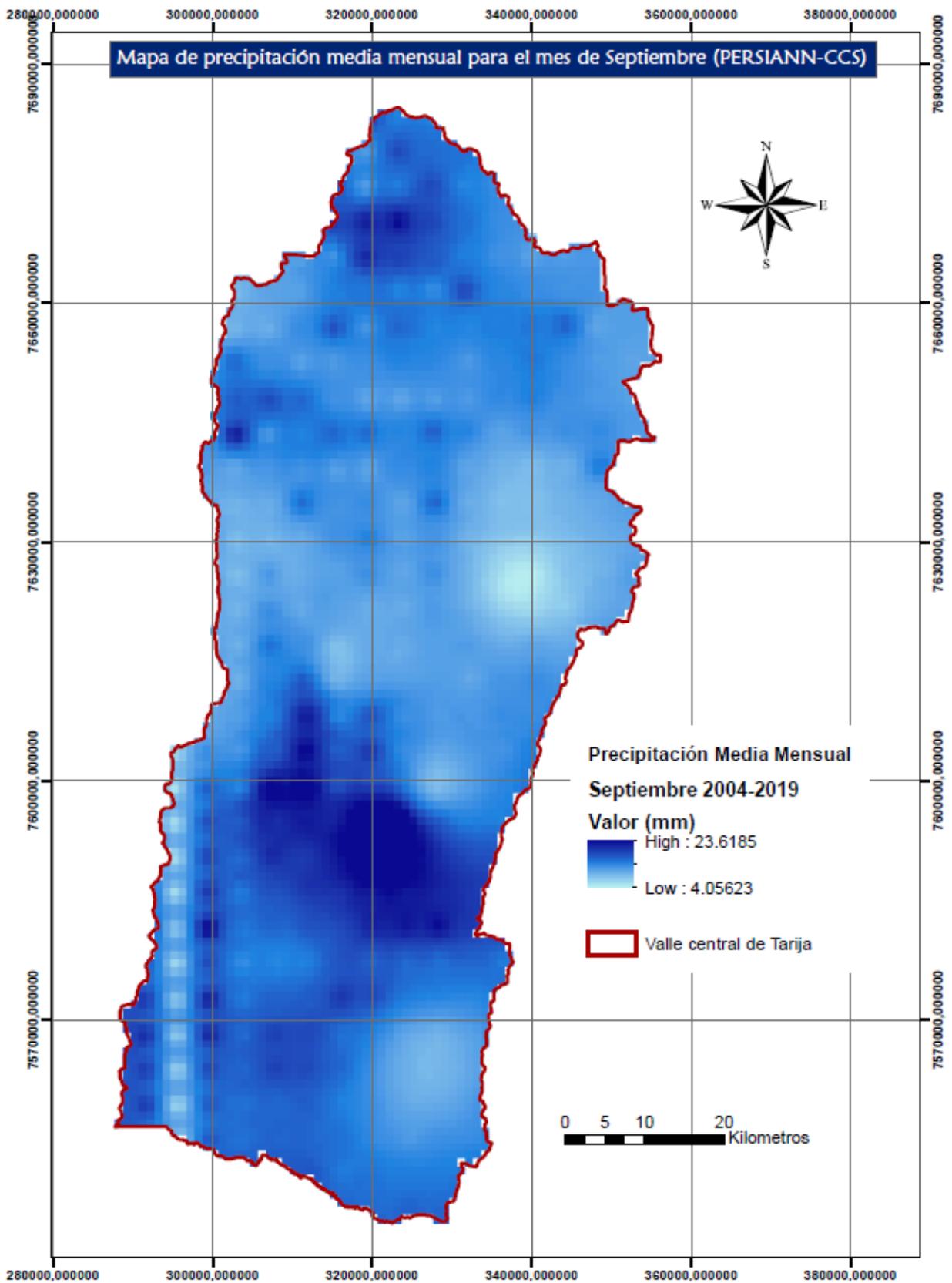


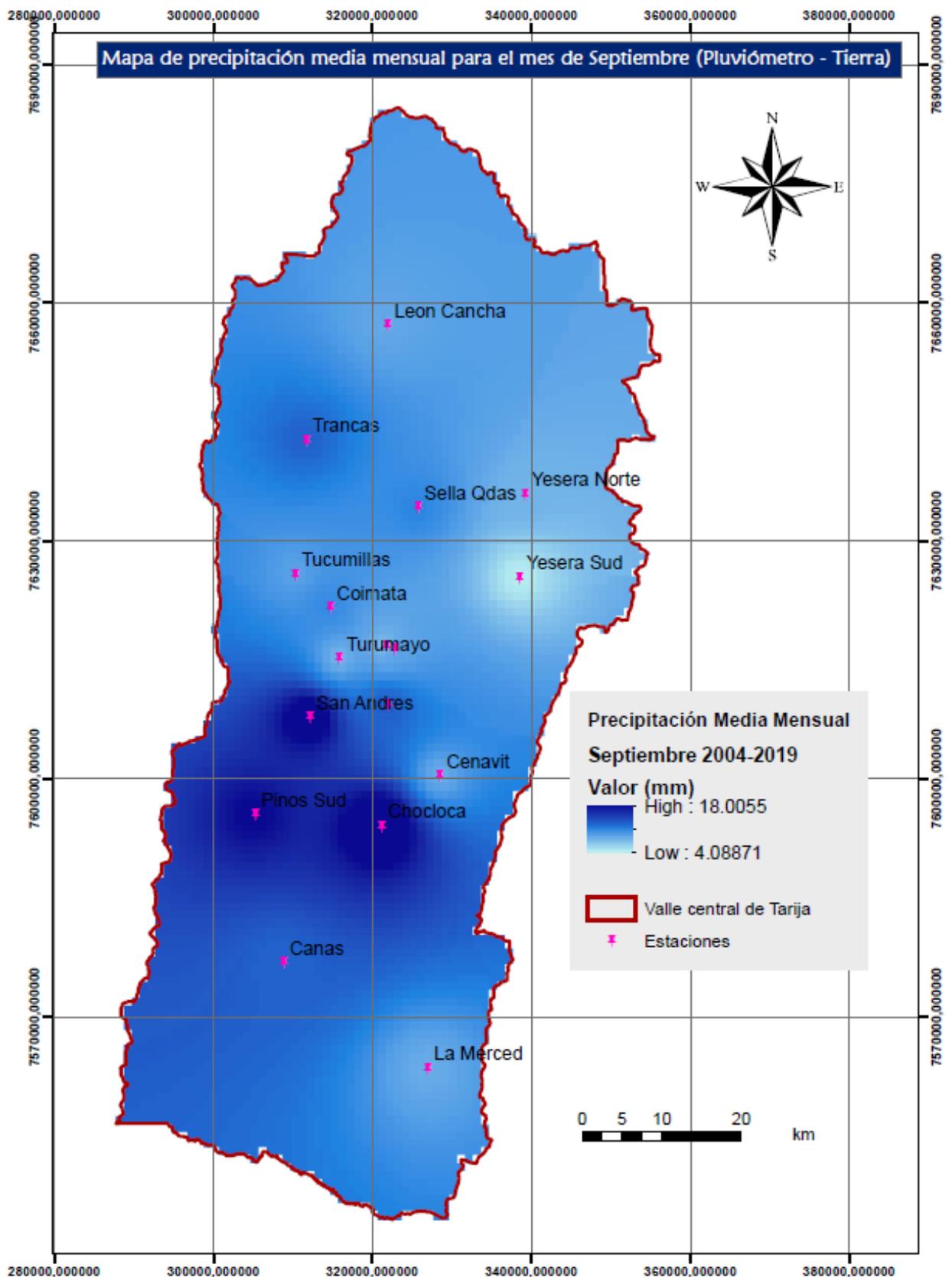


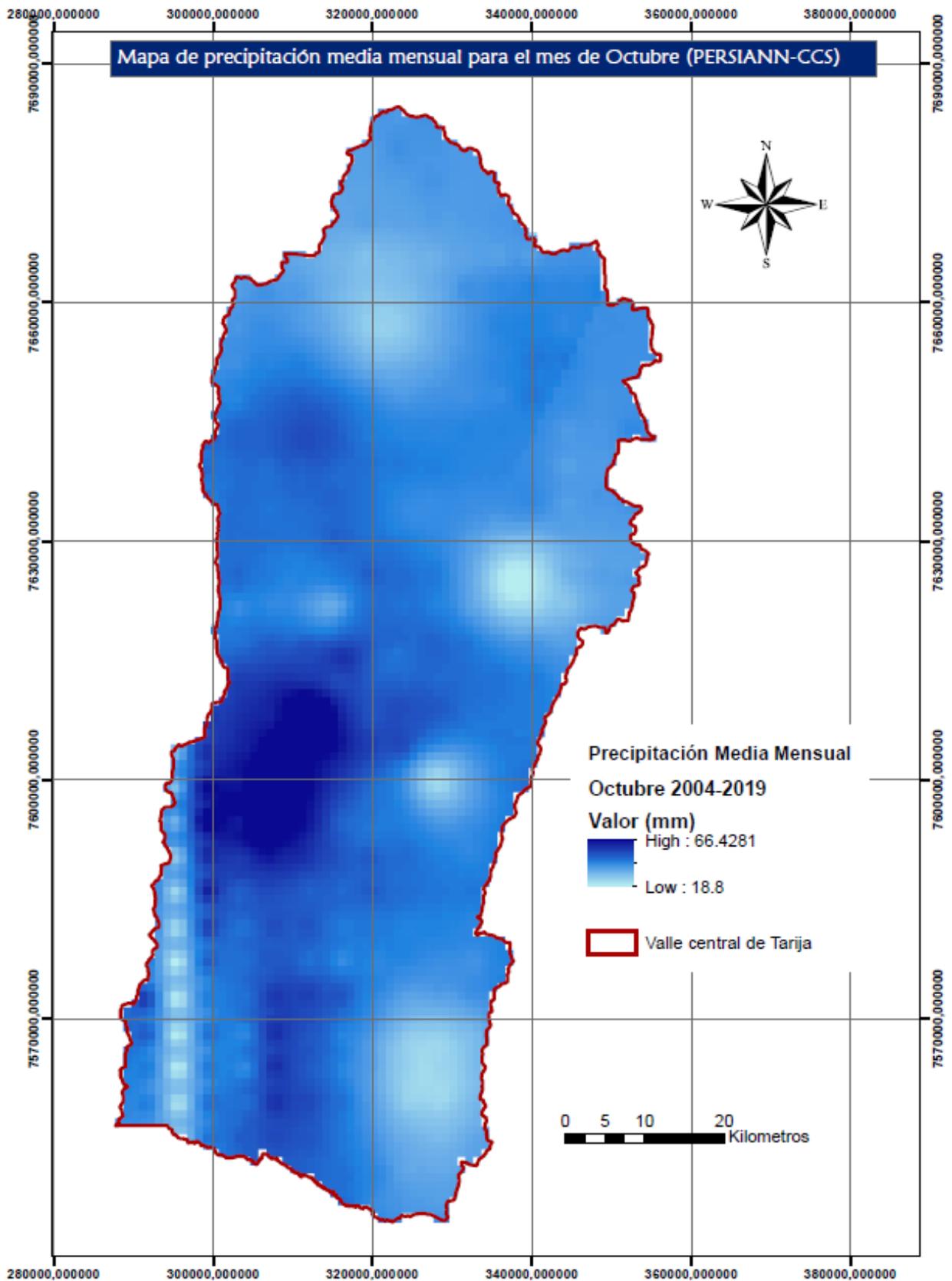


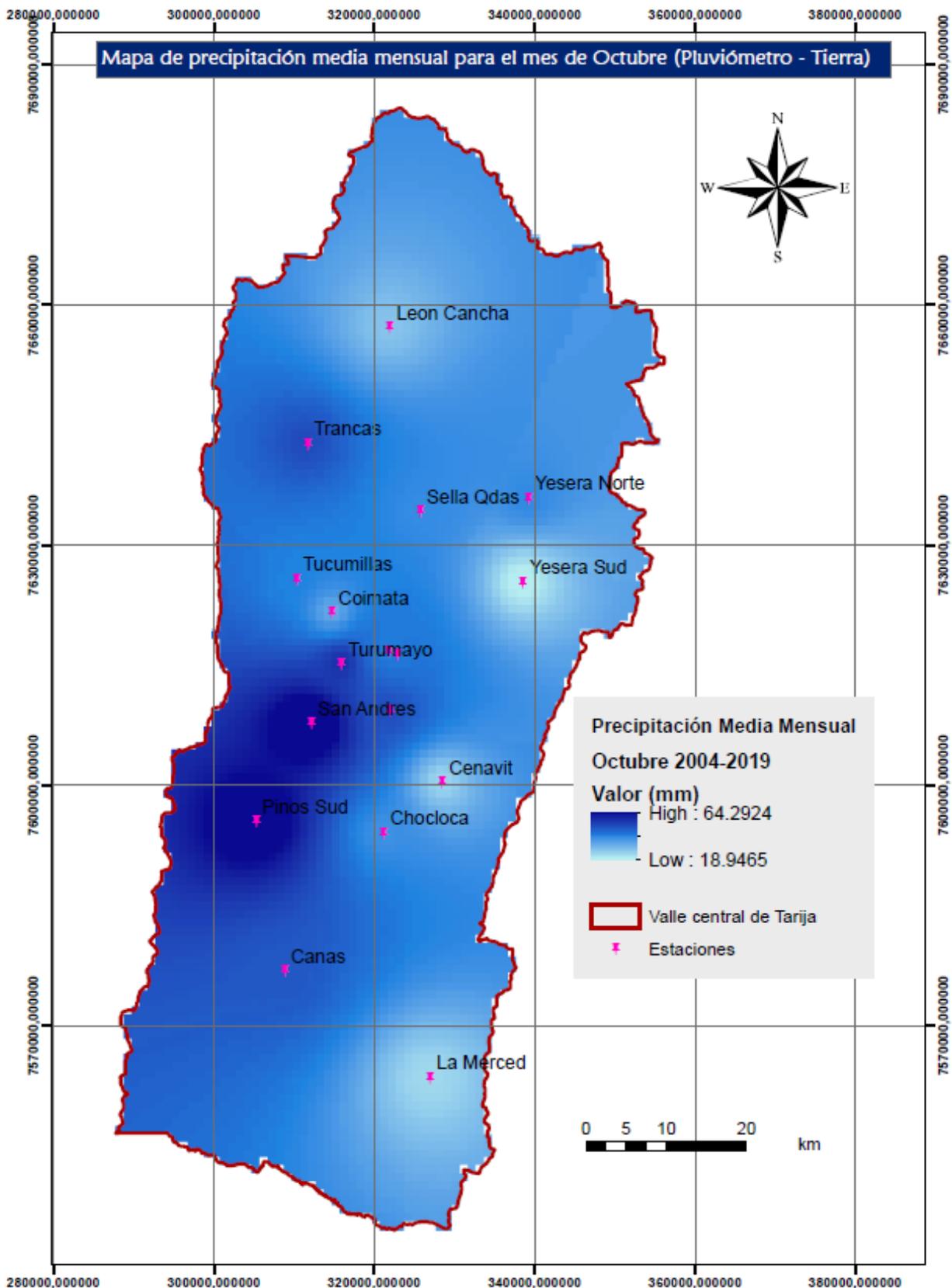


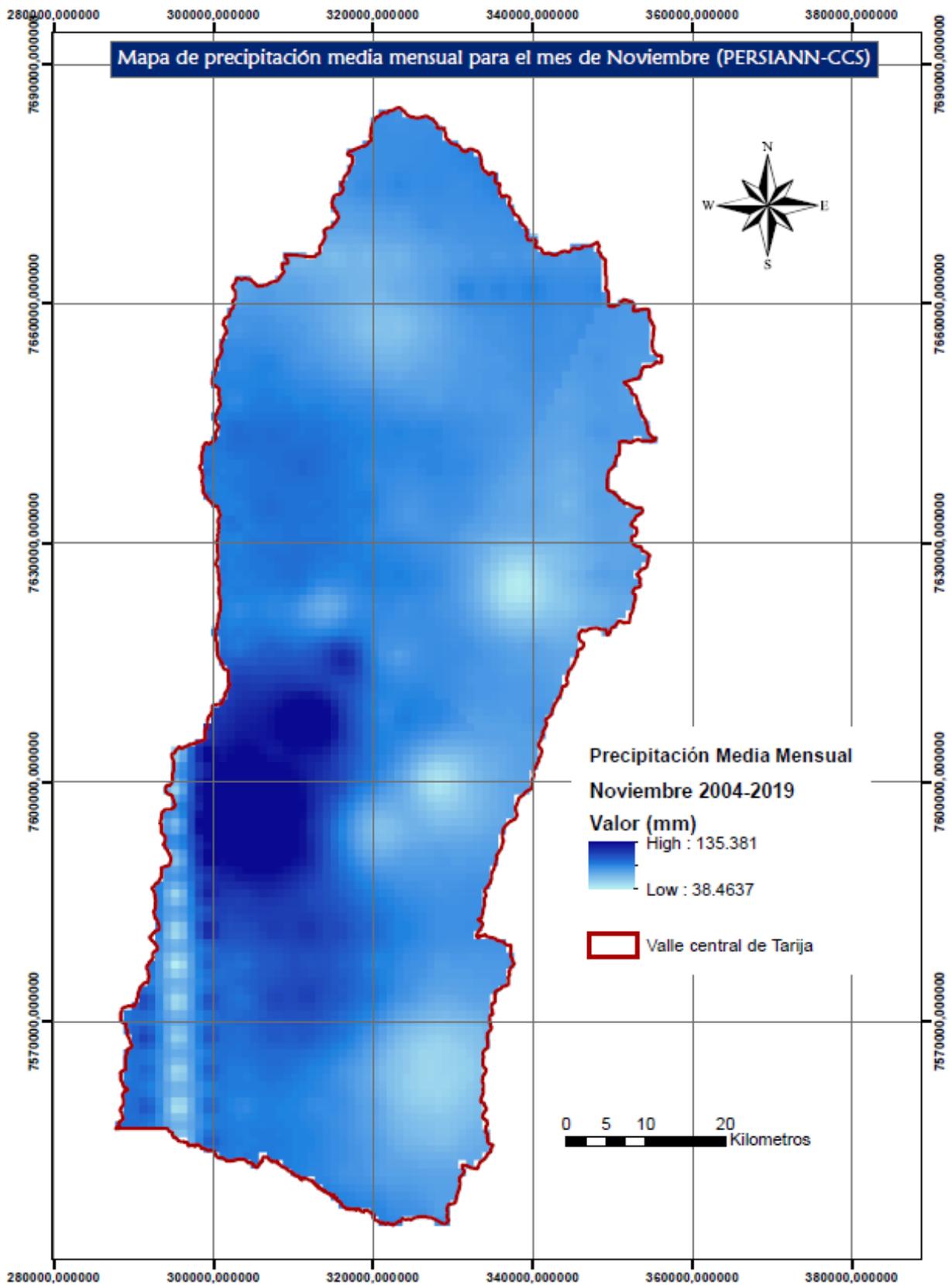


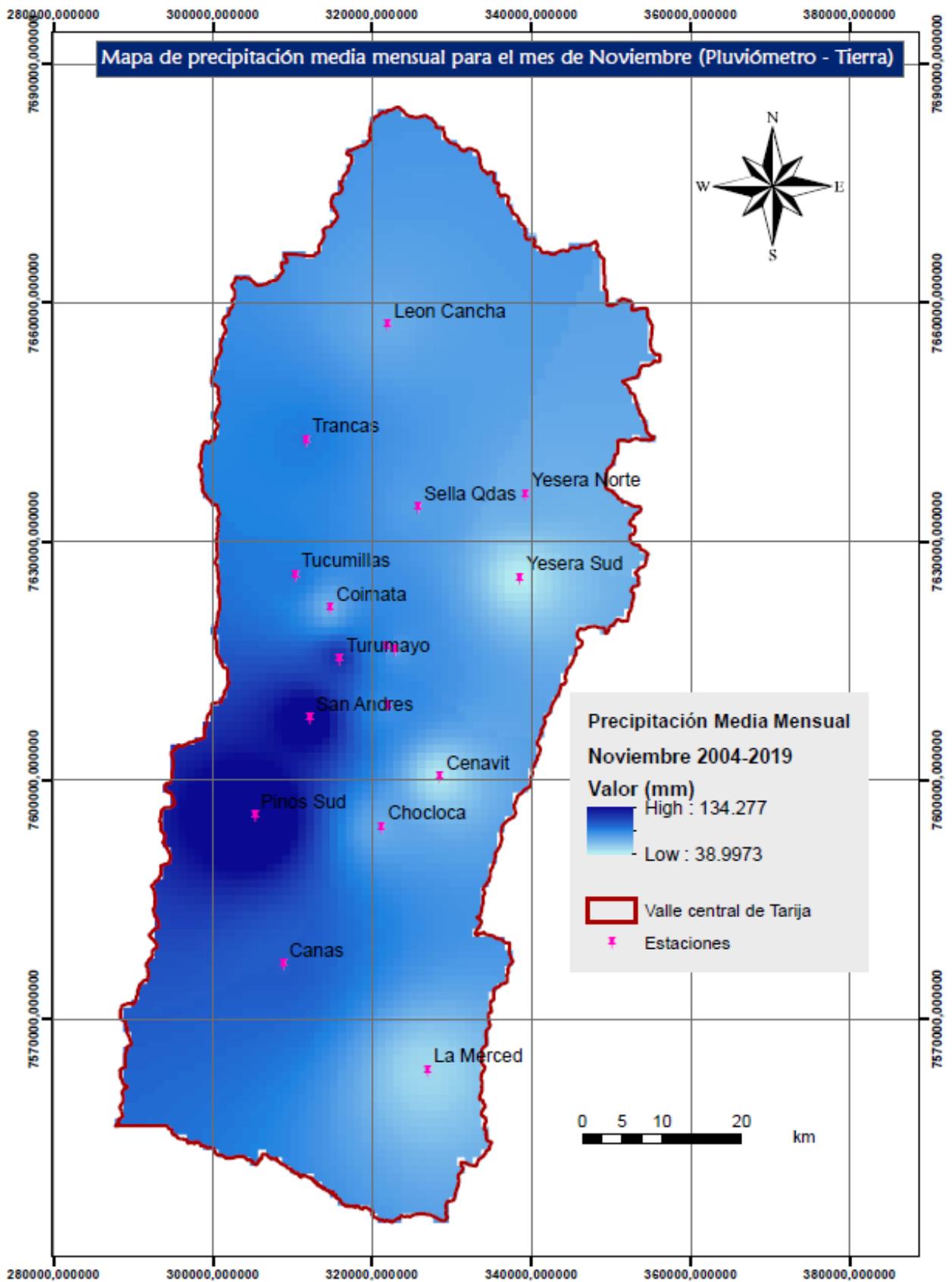


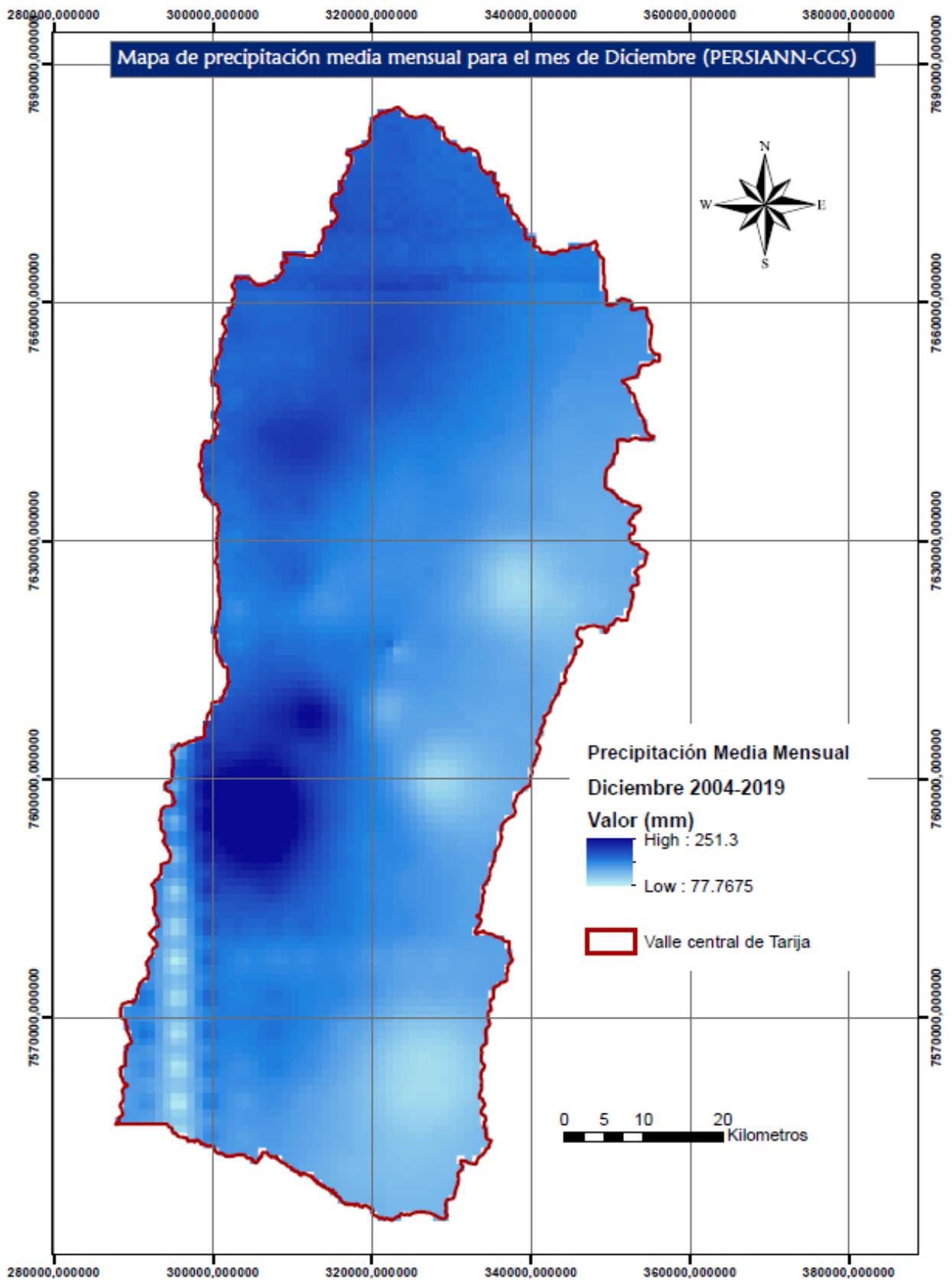


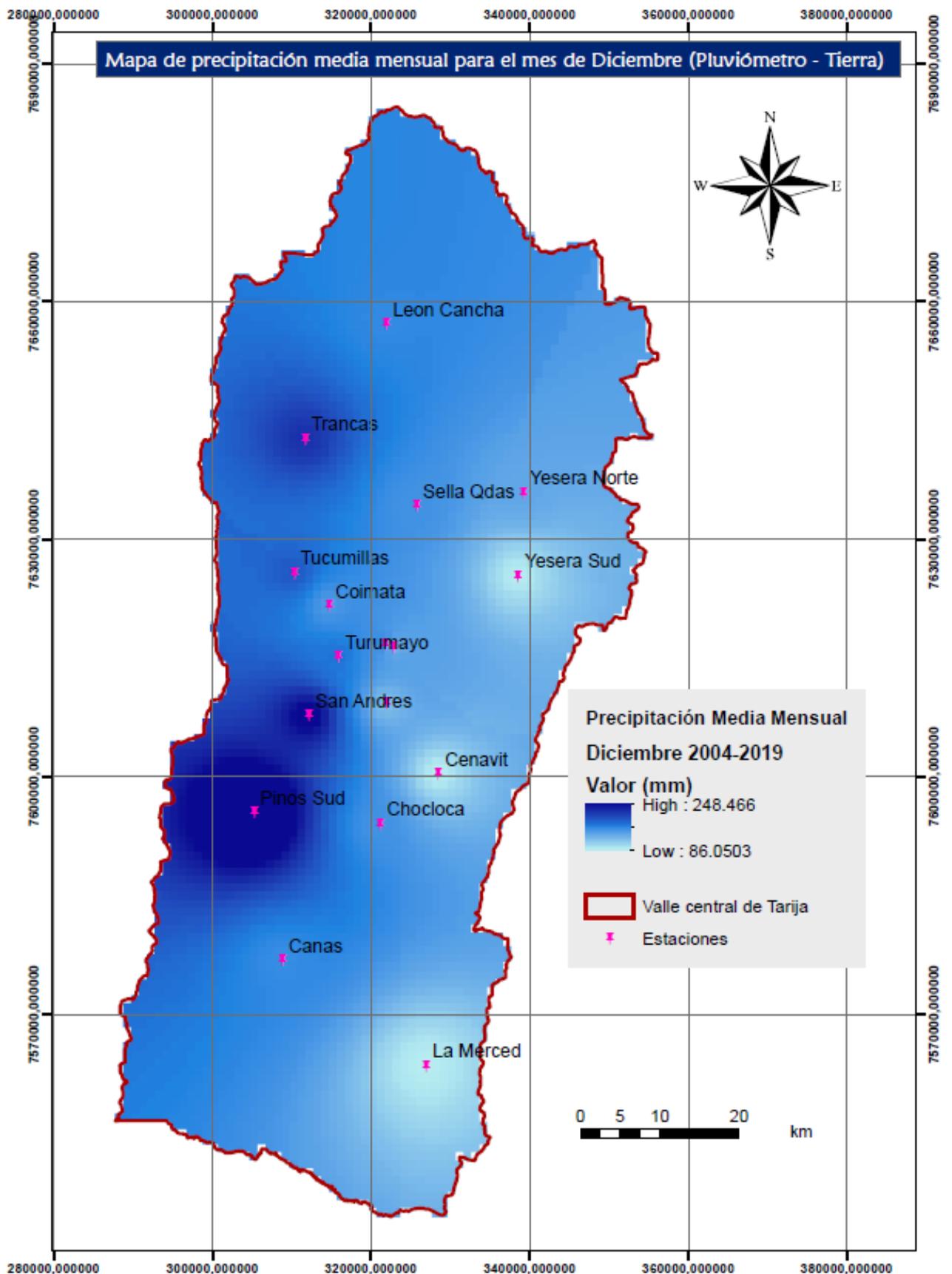












CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- **Conclusiones**

- ✚ Finalizando el análisis realizado a la precipitación estimada por el producto satelital PERSIANN-CCS, de manera general, el producto sobreestima la precipitación en toda la zona del valle central de Tarija. Como bien se ha considerado estudiar solo la parte de los valles del departamento de Tarija, se debe mencionar que; el producto satelital brinda como resultado de las estimaciones que realiza el algoritmo interno, valores mucho más altos en las zonas montañosas, que limitan la parte del valle central, con la parte alta de Tarija y la zona del chaco. Esto se debe principalmente a los efectos orográficos, debido a la nubosidad que se concentra principalmente en la parte de la cordillera del abra del cóndor (zona sureste del departamento de Tarija) y con menor frecuencia en la cordillera de Sama (Zona noroeste del valle central). Entonces, el producto satelital sobrevalora la precipitación en toda la zona del valle central, pero con mayor intensidad en las partes limítrofes mencionadas con anterioridad.
- ✚ El producto PERSIANN-CCS corregido, tuvo como resultado final del análisis, una aproximación promedio entre datos de precipitación satélite y tierra del **95,0%** para el periodo húmedo (Octubre hasta Marzo) y del **87,8%** para el periodo seco (Abril a Septiembre), este nivel de semejanza que existe entre los datos corregidos del producto de precipitación en base satelital, tienen una aproximación muy significativa, ya que en ambos periodos (húmedo - seco) la precipitación estimada de PERSIANN-CCS, es casi similar con los valores medidos en tierra (pluviométricos). Estos porcentajes obtenidos se evaluaron tomando en cuenta 60 puntos de control distribuidos en toda la zona del valle central del departamento de Tarija, puntos que fueron seleccionados de manera aleatoria para así poder evaluar una distribución uniforme de la precipitación en toda la zona geográfica de estudio. Cada punto representa un pixel de información es decir, un valor de precipitación, haciendo una comparativa con la información pluviométrica distribuida de las 17 estaciones pluviométricas utilizadas, que previamente la serie de datos han sido llevados a través de una interpolación de sus mismos valores, a una grilla pixelada de igual resolución

espacial del producto (1x1 km), de este modo pudo evaluarse y realizarse la comparación entre ambas series de datos satélite-tierra y de esta manera encontrar un porcentaje de aproximación entre ambos datos para los 60 puntos de control que fueron escogidos para la zona de análisis.

✚ Los resultados del coeficiente de correlación (r) para los 60 puntos de control evaluados, dan como resultado un valor de $r = 0,88$ para el periodo húmedo y $r = 0,86$ para el periodo seco. Lo cual, según (Barria, 2010:32) de acuerdo al sistema de clasificación de valores de correlación propuestos por el mismo autor, indica que los resultados obtenidos en este trabajo de investigación son “muy altos”, esto quiere decir que estadísticamente los valores de precipitación del producto satelital corregido con respecto a los datos tierra, son muy próximos entre sí, teniendo una correlación “muy alta” entre datos satélite y datos tierra. La evaluación de la información satelital corregida también se realizó mediante un análisis gráfico-visual para la serie de datos comprendido en los 60 puntos que fueron utilizados para determinar la correlación entre datos del producto corregido y datos de las estaciones. Dicho análisis también tuvo como objeto ver el comportamiento de la precipitación del producto satelital corregido respecto a los datos pluviométricos consistentes, Este análisis fue plasmados en un eje de coordenadas “X, Y”. Donde en “Y” se encuentra la precipitación media mensual para el periodo de análisis 2004-2019, en milímetros. y en el eje “X” se encuentran los 60 puntos de control evaluados, de donde se han encontrado los resultados de correlación. (r) previamente mencionados.

✚ En la evaluación a la información del producto satelital, realizado a los 60 puntos de control distribuidos en toda la zona de estudio, muestra que existen 9 puntos de los 60 donde la información de precipitación media mensual del producto satelital corregido varía de los datos tierra alrededor de unos 20 mm de diferencia para los meses de enero, abril, septiembre y diciembre, como valores más altos de diferencia (valores críticos), y para los demás meses del año, en estos mismos 9 puntos de control, el producto sobreestima la precipitación alrededor de 10 mm. Esto tiene una explicación fundamental y se debe a que los puntos se encuentran sobre zonas altas

muy montañosas y que se encuentran fuera del valle central de Tarija. Lo cual correspondería a un análisis del producto a otra zona de estudio, ya que estos 9 puntos de control con variaciones críticas en sus valores de precipitación corregidos, están ubicados en las zonas altas montañosas y limítrofes del valle central, correspondiente a la zona chaco del departamento de Tarija.

- ✚ Los datos de precipitación satélite pueden ser de gran utilidad en lugares remotos o con información pluviométrica escasa, como es el caso de las zonas altas en los perímetros de la zona del valle central de Tarija, además de otros sectores dentro del valle central de Tarija, que también no cuentan con medidores de lluvia (Pluviómetros) o que si bien existían, han dejado de funcionar y ya no tienen continuidad en la lectura de datos debido a factores logísticos-operativos y/o económicos, de igual manera existen lugares quedando sin cobertura como las altas montañas y otros lugares menos accesibles. Entonces, los datos de precipitación en base satelital, vienen a cubrir estas zonas inaccesibles en las cuales los pluviómetros no alcanzan a cubrirlos debido a la distancia que se encuentran entre ellos, dejando vacíos considerables dentro toda el área del valle central de Tarija.
- ✚ El producto satelital PERSIANN-CCS sin corregir, que fue evaluado sobre la zona del valle central de Tarija, dio resultados correlativos incoherentes en varios puntos (píxeles) para la época de estiaje, existiendo sesgos importantes para la época húmeda o comienzos del año hidrológico, los sesgos que se presentan en las estimaciones del producto satelital con respecto a los datos medidos en los pluviómetros también son importantes, ya que el producto sobrevalora la precipitación. Esto tiene una explicación científica del producto PERSIANN-CCS, ya que se debe principalmente al momento de estimar la precipitación, el algoritmo interno de este producto satelital, trabaja con una serie de clasificación de nubes y características de estas, se puede decir entonces que, si hay días nublados pero sin lluvia, el satélite incorpora la imagen espectral de esa nubosidad al algoritmo interno, el cual comienza el procedimiento de clasificación en función a una serie de factores y características como ser el brillo de la nube, altura, forma, textura, entre muchos otros más, y lleva el resultado de esta

clasificación a una curva llamada “taza de precipitación”, la cual asigna un valor de precipitación a cada pixel de la nube previamente segmentada. Lo mismo ocurre con los valores de subestimación a la precipitación, es a causa de los parámetros de las nubes que no cumplen con ciertos requerimientos para que el valor asignado sea mayor o menor al valor medido en tierra. Entonces de manera general, si hay un día con mucha probabilidad de lluvia, pero no llegó a llover en la superficie, el satélite asimila esta alta probabilidad como si estuviese lloviendo realmente, cosa que no ha ocurrido de cierto modo. Pero no siempre el producto va a realizar una mala estimación en los días nublados, en muchas ocasiones el producto no asigna el valor de precipitación a los pixel, porque en realidad no está lloviendo a pesar de la nubosidad existente en la zona, esto se debe principalmente a los factores mencionados que requiere el algoritmo PERSIANN-CCS, características que no están cumpliendo los requerimientos necesarios como para que la curva de taza de precipitación del producto asigne los valores de precipitación a los pixel de la nube captada por el sensoramiento remoto del producto satelital.

- ✚ Los valores medios de precipitación del producto satelital PERSIANN-CCS, muestran un comportamiento diferente a los valores observados en los pluviómetros llegando a tenerse errores muy altos para el valle central de Tarija, y con factores de correlación que bajan hasta $r = 0,01$ lo cual se consideran valores "muy malos" según (Barria, 2010:32). Las regiones con mayores coeficientes de correlación (mejores) entre los datos estimados y observados, son generalmente, aquellas donde existe un fuerte gradiente de precipitación estacional (Temporada "húmedo" y "seco"). Además esto indica entonces que los datos del producto satelital PERSIANN-CCS son especialmente útiles cuando se trabajan a escalas de tiempo más largas (16 días a mensual o anual), donde la precipitación acumulada es mejor cuantificada por el producto satelital, esto quiere decir que las estimaciones del producto PERSIANN-CCS a nivel mensual, son apropiadas para realizar un análisis y corrección de esta base de datos, aunque todavía difieren de las mediciones puntuales acumuladas mensualmente en los pluviómetros. Sin embargo, cuando los datos de precipitación son promediados para un cierto periodo de tiempo sobre una determinada zona de

estudio, los resultados mejoran y se vuelven similares a los obtenidos a partir de la serie de datos pluviométricos.

- ✚ Como bien se mencionó anteriormente, la precipitación esta sobreestimada para la zona de los valles del departamento, por lo cual se procedió con la corrección de toda la base de datos de información descargada del producto satelital PERSIANN-CCS, logrando así concluir con el objetivo general. Donde se obtuvieron los datos de precipitación en base satelital corregidos en función a los datos tierra. Brindando un resultado que ha sido puesto en 12 mapas de precipitación media mensual para los 12 meses del año y para el periodo de análisis 2004-2019 cubriendo toda la zona del valle central del departamento de Tarija. Estos mapas de precipitación media mensual se encuentran en formato “shp” procesados en el software Arcgis 10.4.1, con una resolución espacial de 1,0 km por lado de pixel (1x1 km). Es decir que contiene un solo valor de altura de precipitación en cada kilómetro cuadrado, en total cada mapa de precipitación media mensual contiene 5.671 interesada pixeles de información corregida, que se encuentra listo para el uso de cualquier persona interesada en temas hidrológicos.
- ✚ PERSIANN – CCS es un producto de precipitación en base satelital que viene a facilitar en cuanto a datos, ya que sirve de ayuda en complementariedad a los datos que nos puede ofrecer el servicio nacional de meteorología e hidróloga (SENAMHI), para estudios del tipo hidrológico, como ser; Manejo integrado de cuencas, análisis de cambios climáticos, simulación hidrológica para la operación de embalses, balances hídricos, modelamientos de caudales en cuencas, subcuencas y microcuencas, y otros estudios que requiera de esta información. Entonces, a través de sus 12 mapas de precipitación corregidos, se puede obtener la precipitación media mensual de forma sencilla y práctica, ya que al tener una georeferenciación en coordenadas UTM es mucho más fácil identificar cualquier cuenca de estudio dentro de la zona del valle central de Tarija, ya que el mapa, en sus perímetros, no se cortan en base a límites fronterizos políticos, sino que siguen el trazo de límites geográficos, dividido por los parte aguas de las cuencas. Entonces, para extraer la información de

precipitación de una determinada zona dentro del valle central, no sería más que sobreponer la cuenca en estudio sobre el mapa de precipitación para así recortar solo el área de interés y trabajar únicamente con la información extraída para la determinada zona.

- ✚ Se realizó conforme a lo mencionado en la metodología de este trabajo, el análisis de consistencia a los datos de precipitación mensual para las 17 estaciones pluviométricas ubicadas en la zona del valle central del departamento de Tarija. Análisis que se realizó mediante el software Trend e Hydraccess, donde se obtuvieron resultados consistentes de las series de datos de cada estación seleccionada para el análisis, dando así su aprobación y validación de las mismas para su posterior uso en la comparación de información de precipitación Satélite - Tierra
- ✚ Se evaluaron los datos de precipitación de los 17 pluviómetros seleccionados en el software TREND, el cual evalúa en base a estadísticos de consistencia para saltos y tendencias en la serie de datos analizada. Los resultados que se obtuvieron de este proceso son confiables y por lo tanto la validación de la información pluviométrica de cada una de las estaciones es consistente para su uso en la comparación con los datos estimados por el producto satelital PERSIANN-CCS. el resultado interno que brinda el programa son valores de z (área bajo la curva de distribución), que están evaluados al 5% de nivel de significancia. De esta manera trabaja el software internamente para cada serie de datos de cada una de las estaciones pluviométricas, entonces, el programa presenta resultados en su interfaz principal de los diferentes estadísticos que indican textualmente si la estación es o no consistente. En este caso las series de datos de las 17 estaciones dieron resultados consistentes.
- ✚ Se compararon los datos de precipitación media mensual de los 17 pluviómetros distribuidos en toda la zona del valle central, con los datos de precipitación estimados del producto satelital PERSIANN-CCS, en lo cual se encontró un factor de corrección (F_c) para cada mes del año, para cada pixel ubicado en cada estación, y de esta manera ajustar los datos de precipitación del producto satelital a los datos tierra

(pluviométricos), entonces los factores de corrección encontrados inicialmente fueron 204, correspondiente únicamente a las estaciones que contienen información para la comparación de precipitación media mensual (Satélite – Tierra). Estos factores de corrección para los datos satelitales están corregidos al 100% de aproximación con los datos tierra, a partir de ellos salieron los demás 5.467 F.c. a través de una interpolación de factores de corrección, para así poder corregir toda la información del producto satelital en los 5.671 puntos que cubren toda la zona de estudio, cabe mencionar que los F.c. interpolados tienen una aproximación inferior al 100%. Dicho resultados de ese proceso se mostró a detalle en otra conclusión anterior.

- ✚ Para el análisis y evaluación de la información de precipitación, se ubicó inicialmente el pixel del producto satelital con el punto de la estación pluviométrica para extraer los datos de precipitación mensual, tanto de la misma estación como del pixel del producto satelital, esto se logró haciendo una superposición del mapa de precipitación descargado de la base de datos de PERSIANN-CCS (previo análisis de reconocimiento), sobre la superficie del valle central de Tarija. Proceso que se realizó en el software Arcgis 10.4.1, de esta manera se encontró las coordenadas X, Y del pixel ubicado justamente sobre la estación pluviométrica, y así recoger la información de la grilla de precipitación mes por mes y año por año para el periodo de análisis 2004-2019

- ✚ Finalmente, se puede concluir diciendo que, el producto de precipitación en base satelital PERSIANN-CCS corregido, es un producto auxiliar aceptable para su uso dentro del valle central de Tarija. La evaluación que se realizó a los datos de precipitación que han sido corregidos en función a los datos pluviométricos medidos en tierra, obtuvieron resultados muy favorables, observados desde un punto de vista estadístico como ya se han mostrado anteriormente. Además que este producto de precipitación en base satelital tiene resolución espacial de 4,453 km de lado por pixel, resolución muy buena, ya que al tratarse de satélites hidrometeorológicos la resolución espacial de estos, por lo general son de 0,25° para TRMM (aprox. 25 km por lado de pixel) y 0,1° para GPM (aprox. 10 km por lado de pixel). En este trabajo

se optó por usar el producto PERSIANN-CCS con resolución espacial de 0,04° (4,453x4,453 km). Como se puede observar, al ser un producto que tiene mayor resolución espacial respecto a otros, también contiene una mayor cantidad de información de precipitación. Es decir, es un producto enriquecido en cuanto a estos datos. No obstante, en este trabajo se vio la necesidad mejorar aún más dicha información y a través de procedimientos matemáticos - estadísticos mediante el software Arcgis, se mejoró aún más la resolución espacial, llevando de los 4.453 km inicialmente a 1.0 km por lado de pixel, lo cual generó aprox. 4 veces más en cantidad de información del producto de precipitación PERSIANN-CCS y de esta manera recién comenzar con el análisis, corrección y evaluación de dicha información de lluvia, cuyos resultados ya fueron expuestos en anteriores conclusiones de este trabajo. También es importante mencionar que la la grilla de precipitación al estar en resolución espacial de 1x1 km, viene a ser de gran utilidad al momento de querer trabajar con cuencas, subcuencas y microcuencas, ya que estas últimas al estar en la escala mas pequeña, no cuentan con varios puntos de información y si se trabajase con un solo dato por cada 4,453 km, como viene originalmete en el producto, las microcuencas contarian con muy pocos puntos de información de precipitación que considerar, aunque en el interior de las mismas no se veria esta gran diferencia ya que se estarían interpolando entre si los valores, pero si para las partes perimetrales, las partes altas de las cuencas, ya que en estas zonas se estaria extrayendo información para interpolar de los pixel que estan próximos a los perimetros de las cuencas vecinas, con esto se enriquece la información en las partes perimetrales de las cuencas subcuencas o microcuencas.

- **Recomendaciones**

- ✚ Usar los mapas de precipitación media mensual del producto PERSIANN-CCS corregido, como mapas que vayan a complementar la información pluviométrica, es decir, como información auxiliar para zonas con poca cantidad de información de lluvia o ninguna. Su uso puede ser para trabajos académicos universitarios o también proyectos que sean a nivel planificación, esto por las correlaciones existente entre la información satélite - tierra, si bien la estadística muestra que estos valores son buenos, no deberíamos de reemplazar la información de un pluviómetro con la de un producto satelital. El producto satelital solo sirve para complementar y ayudar con información necesaria en zonas que no cuentan con estos datos. La lluvia al ser una variable aleatoria es mejor, siempre usar el dato medido y solo en caso de no tenerlos recién recurrir a los productos de precipitación satelital.
- ✚ Realizar un análisis de los factores de corrección (**F_c**) con otro método de interpolación distinto al que se ha realizado en este proyecto, como por ejemplo: el método de interpolación kriging, que también es un método de interpolación para información hidrometeorológica, pero más estadístico que el método usado para este trabajo (IDW Distancia inversa ponderada).
- ✚ Hacer uso del método de interpolación kriging para obtener los factores de corrección de una manera más homogénea distribuida para toda la zona de estudio, y comparar con el método usado en este trabajo, cuya característica principal de IDW, es que realiza interpolaciones asignando pesos en base a la distancia de los puntos conocidos, creando núcleos alrededor de dichos puntos, cuyos valores interpolados son los que tienen mayor peso y en función a la distancia en la que se van alejando del punto conocido van reduciendo los valores generados, pero van tomando mayor peso los valores interpolados de la estación vecina más próxima que se encuentra.
- ✚ Se pone en consideración el uso del método kriging, para que así de esta manera se pueda evaluar la precipitación corregida con otros coeficientes de correlación (r) y observar que tan preciso llega a ser la aproximación de la precipitación del producto

satelital a los datos tierra usando métodos diferentes de interpolación en los factores de corrección.

- ✚ Lo más recomendable en el caso de corregir la información de un producto en base satelital, es la acumulada a partir de 16 días a mensual o a nivel anual, mientras el intervalo de tiempo sea más largo, es mejor la evaluación y los resultados obtenidos con los métodos mencionados en la teoría de este proyecto, para los distintos productos de precipitación que existen.