



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**CORRELACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS
MENSUALES APLICANDO DATOS DE SATÉLITE
GPM Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS
EN LA CUENCA ILAVE - PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

VICTOR WIELL PAVIO QUENTA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2024



VICTOR WIELL PAVIO QUENTA

CORRELACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES APLICANDO DATOS DE SATÉLITE GPM Y ESTAC...

- My Files
- My Files
- Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:417652374

111 Páginas

Fecha de entrega
19 dic 2024, 5:48 p.m. GMT-5

22,731 Palabras

Fecha de descarga
19 dic 2024, 5:52 p.m. GMT-5

106,720 Caracteres

Nombre de archivo
Tesis-Victor_2024.pdf

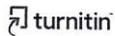
Tamaño de archivo
5.6 MB



M.Sc. Alcides Huayra Caldera Marcellino
DOCENTE
C.I.P: 122022



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
UNIDAD DE INVESTIGACION
Dr. EDUARDO VELARDE COAGUIRA
Director Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería Agrícola - UNA - Puno





15% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Fuentes principales

- 14% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

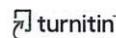
No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

M.Sc. Alexander Calderón Morúa
DOCENTE
CIP/122077

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
PUNO - PERU
D.Sc. EDILBERTO VELARDE COAQUIRA
Director Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería Agrícola - UNA - Puno





DEDICATORIA

La presente investigación se la dedico a la razón de mi inspiración, mi hija Emily Ariana, que con una sonrisa alegras mi día, y a mi esposa Gladys Yaneth, quien, con tanto amor, me motivaste para seguir adelante. A pesar de los tropiezos, supiste brindarme tu apoyo para lograr mis objetivos.

A mis queridos padres, Fidel y Dora, por haberme apoyado a lo largo de todos mis estudios, por ser los pilares fundamentales de mi formación profesional, los principales motores para alcanzar mis anhelos y sueños, por apoyarme incondicionalmente y confiar siempre en mí.

A mis hermanos: Henry, Sheyla y Rocío, quienes con su comprensión, apoyo, consejos y aliento me ayudaron a seguir adelante.

Victor Wiell PAVIO QUENTA



AGRADECIMIENTOS

A Dios, que con su bondad y amor me ha dado las fuerzas y la salud para concluir mis estudios y alcanzar uno de los mejores logros de mi vida.

A nuestra alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, en especial a la Facultad de Ingeniería Agrícola, por ser el centro de estudios donde me formé profesionalmente.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola, por brindarme los conocimientos a lo largo de mi vida universitaria, formando en mí valores y fortalezas que me permitirán desempeñarme como un profesional exitoso.

A los jurados: M. Sc. Oscar Raúl Mamani Luque, D.Sc. Edgar Vidal Hurtado Chávez y Dr. José Antonio Mamani Gómez, por sus sabios consejos e inculcar esfuerzo, respeto y disciplina.

A los amigos que generosamente me apoyaron en las diferentes etapas de la ejecución del presente trabajo.

Victor Wiell PAVIO QUENTA



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.2. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	19
1.2.1. Objetivo general	19
1.2.2. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. ANTECEDENTES	20
2.1.1. Antecedente de nivel internacional	20
2.1.2. Antecedente de nivel nacional	24
2.1.3. Antecedente de nivel regional	28
2.2. MARCO TEÓRICO	31
2.2.1. Cuenca	31
2.2.2. Precipitación.....	32



2.2.2.1. Precipitación Media Mensual.....	32
2.2.3. Medición y observación de la precipitación.....	32
2.2.3.1. Pluviómetros	33
2.2.3.2. Pluviógrafos	33
2.2.3.3. Satélites	33
2.2.4. Métodos de análisis de datos de precipitación	34
2.2.5. Medición de precipitación global – GPM	35
2.2.6. Validación de datos satelitales	38

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	39
3.1.1. Método Científico	39
3.1.2. Tipo de Investigación.....	39
3.1.3. Nivel de Investigación.....	40
3.1.4. Población y Muestra.....	40
3.1.4.1. Población.....	40
3.1.4.2. Muestra.....	41
3.1.4.3. Técnica	41
3.1.4.4. Instrumentos	41
3.2. ÁMBITO DE ESTUDIO	42
3.3. MATERIALES.....	43
3.3.1. Información meteorológica observada	43
3.3.2. Adquisición de datos del satélite GPM	44
3.3.3. Modelo digital de elevación (MDE)	44
3.3.4. Materiales de escritorio	46



3.3.5.	Materiales y equipos de campo	46
3.3.6.	Materiales y equipos de gabinete	46
3.3.7.	Programas de cómputo	46
3.3.7.1.	QGIS v3.18	47
3.3.7.2.	R v3.6.3 y RStudio v1.3.959	47
3.3.7.3.	Minitab v20.4 (versión de prueba)	47
3.3.7.4.	Microsoft Office 2016 (con licencia estudiantil)	48
3.4.	METODOLOGÍA	48
3.4.1.	Recopilación de datos meteorológicos	49
3.4.2.	Adquisición de datos satelitales	50
3.4.3.	Análisis Estadístico	50
3.4.3.1.	Coefficiente de Correlación (r)	50
3.4.3.2.	Coefficiente de Determinación (R^2)	51
3.4.3.3.	PBIAS (Percentage Bias)	51
3.4.3.4.	Error Medio Cuadrático (RMSE)	52
3.4.4.	Interpretación de resultados	52
CAPÍTULO IV		
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1.	ANÁLISIS DE DOBLE MASA	53
4.2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE DATOS	60
4.2.1.	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	60
4.2.2.	Raíz del error medio cuadrado	61
4.2.3.	Porcentaje de sesgo (pBIAS).	62
4.3.	VALIDACIÓN GRÁFICA DE SERIES TEMPORALES	65
4.3.1.	En relación con el primer objetivo específico	65



4.3.2. En relación con el segundo objetivo específico	70
4.3.2.1. Estación Puno	70
4.3.2.2. Estación Rincón de la Cruz	71
4.3.2.3. Estación Capazo	72
4.3.2.4. Estación Desaguadero	74
4.3.2.5. Estación Ilave	75
4.3.2.6. Estación Juli	77
4.3.2.7. Estación Laraqueri	78
4.3.2.8. Estación Mañazo	80
4.3.2.9. Estación Mazocruz	81
4.3.2.10. Estación Pampa Umalzo	83
4.3.2.11. Estación Pizacoma	84
4.3.2.12. Estación Vilacota	86
4.3.2.13. Resumen de R2 de las diferentes estaciones.....	87
4.3.3. En relación con el tercer objetivo específico	88
4.4. DISCUSIÓN	89
V. CONCLUSIONES.....	91
VI. RECOMENDACIONES	93
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
ANEXOS.....	97

Área: Ingeniería y Tecnología.

Línea: Recursos Hídricos.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 de diciembre de 2024.



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Agrupación y coordenadas de estaciones meteorológicas.	53
Tabla 2 Eficiencia de Nash-Sutcliffe para diferentes estaciones:	60
Tabla 3 RMSE para diferentes estaciones:	62
Tabla 4 pBIAS para diferentes estaciones:	63
Tabla 5 Resumen de R ² de las diferentes estaciones.....	88
Tabla 6 Cuadro resumen del coeficiente r de las diferentes estaciones	89



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Satélite de observatorio GPM Core.	36
Figura 2 Diagrama de la constelación de satélites GPM.....	37
Figura 3 Ubicación de la cuenca del Ramis y su estación Hidrométrica	43
Figura 4 Portal de descargas del MDE srtm v4.1	45
Figura 5 Diagrama de flujo de la metodología.....	49
Figura 6 Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 01.	54
Figura 7 Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 02.	55
Figura 8 Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 03.	55
Figura 9 Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 04.	56
Figura 10 Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 05.	56
Figura 11 Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 01.	57
Figura 12 Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 02.	58
Figura 13 Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 03.	58
Figura 14 Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 04.	59
Figura 15 Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 05.	59
Figura 16 Comparativo de eficiencia de Nash-Sutcliffe para diferentes estaciones. ...	61
Figura 17 Comparativo de eficiencia de RMSE para diferentes estaciones.....	62
Figura 18 Comparativo de eficiencia de BIAS para diferentes estaciones.	63
Figura 19 Serie de tiempo con registros de la estación Puno con GPM.	66
Figura 20 Serie de tiempo con registros de la estación Capazo con GPM.....	66
Figura 21 Serie de tiempo con registros de la estación Desaguadero con GPM.....	66
Figura 22 Serie de tiempo con registros de la estación Ilave con GPM.....	67
Figura 23 Serie de tiempo con registros de la estación Juli con GPM.	67



Figura 24	Serie de tiempo con registros de la estación Laraqueri con GPM.	67
Figura 25	Serie de tiempo con registros de la estación Mañazo con GPM.....	68
Figura 26	Serie de tiempo con registros de la estación Mazocruz con GPM.....	68
Figura 27	Serie de tiempo con registros de la estación Pampa Umalzo con GPM.	68
Figura 28	Serie de tiempo con registros de la estación Pizacoma con GPM.	69
Figura 29	Serie de tiempo con registros de la estación Rincón de la Cruz con GPM..	69
Figura 30	Serie de tiempo con registros de la estación Vilacota con GPM.	69
Figura 31	Grafica de matriz de dispersión en la estación de Puno.....	70
Figura 32	Grafica de dispersión en la estación de Puno.....	71
Figura 33	Grafica de matriz de dispersión en la estación de Rincón de la Cruz.....	72
Figura 34	Grafica de dispersión en la estación de Rincón de la Cruz.....	72
Figura 35	Grafica de matriz de dispersión en la estación Capazo.....	73
Figura 36	Grafica de dispersión en la estación Capazo.....	73
Figura 37	Grafica de matriz de dispersión en la estación Desaguadero.....	74
Figura 38	Grafica de dispersión en la estación Desaguadero.....	75
Figura 39	Grafica de matriz de dispersión en la estación Ilave.....	76
Figura 40	Grafica de dispersión en la estación Ilave.....	76
Figura 41	Grafica de matriz de dispersión en la estación Juli.....	77
Figura 42	Grafica de dispersión en la estación Juli.....	78
Figura 43	Grafica de matriz de dispersión en la estación Laraqueri	79
Figura 44	Grafica de dispersión en la estación Laraqueri	79
Figura 45	Grafica de matriz de dispersión en la estación Mañazo.....	80
Figura 46	Grafica de dispersión en la estación Mañazo.....	81
Figura 47	Grafica de matriz de dispersión en la estación Mazocruz.....	82
Figura 48	Grafica de dispersión en la estación Mazocruz.....	82



Figura 49	Grafica de matriz de dispersión en la estación Pampa Umalzo	83
Figura 50	Grafica de dispersión en la estación Pampa Umalzo	84
Figura 51	Grafica de matriz de dispersión en la estación Pizacoma	85
Figura 52	Grafica de dispersión en la estación Pizacoma	85
Figura 53	Grafica de matriz de dispersión en la estación Vilacota	86
Figura 54	Grafica de dispersión en la estación Vilacota	87



ACRÓNIMOS

GPM:	Global Precipitation Measurement
MDE:	Modelo Digital de Elevación
OMM:	Organización Meteorológica Mundial
GEE:	Google Earth Engine
PBIAS:	Porcentaje de sesgo
QGIS:	Quantum GIS
R ² :	Coefficiente de determinación
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú
SIG:	Sistema de Información Geográfica
SRTM:	Shuttle Radar Topography Mission
IMERG:	Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement
RMSE:	Root Mean Square Error (Raíz del Error Cuadrático Medio)
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
JAXA:	Japan Aerospace Exploration Agency



RESUMEN

La cuenca Ilave, ubicada en la región de Puno, enfrenta importantes limitaciones debido a la escasa cobertura de estaciones meteorológicas, lo que genera vacíos de información en los análisis hidrológicos. Para resolver esta problemática, el producto satelital GPM IMERG v6 surge como una herramienta complementaria para la estimación de precipitaciones en áreas con limitadas estaciones pluviométricas. El objetivo principal de esta investigación fue determinar la correlación entre las precipitaciones medias mensuales estimadas por el satélite GPM IMERG y los datos registrados por las estaciones meteorológicas del SENAMHI. La investigación es de tipo básico y aplicativo, con un enfoque cuantitativo, un nivel relacional, un diseño no experimental y correlacional. Los datos abarcaron un período de 21 años (junio de 2000 a junio de 2021) y fueron obtenidos de 12 estaciones meteorológicas del SENAMHI y del producto satelital GPM a través de la plataforma Giovanni de la NASA. Se aplicaron técnicas estadísticas para validar y comparar los datos, como curvas de doble masa, diagramas de dispersión y métricas de evaluación, entre ellas el coeficiente de correlación (r), el coeficiente de determinación (R^2), el Error Medio Cuadrático (RMSE) y el Porcentaje de Sesgo (PBIAS). Los resultados evidenciaron una correlación significativa entre ambas fuentes de datos, con valores de R^2 superiores al 75 % en la mayoría de las estaciones evaluadas. Las estaciones Rincón de la Cruz (87.37 %) y Capazo (88.50 %) destacaron por sus altos valores de correlación, validando la precisión del producto GPM IMERG. En conclusión, el satélite GPM IMERG v6 es una herramienta precisa y confiable para la estimación de precipitaciones medias mensuales en regiones con cobertura limitada de estaciones meteorológicas.

Palabras clave: Análisis estadístico, Porcentaje de sesgo Pbias. Precipitación satelital.



ABSTRACT

The Ilave basin, located in the Puno region, faces significant limitations due to the poor coverage of meteorological stations, which generates information gaps in hydrological analyses. To solve this problem, the GPM IMERG v6 satellite product emerges as a complementary tool for estimating rainfall in areas with limited rainfall stations. The main objective of this research was to determine the correlation between the average monthly rainfall estimated by the GPM IMERG satellite and the data recorded by SENAMHI meteorological stations. The research is of a basic and applicative type, with a quantitative approach, a relational level, a non-experimental and correlational design. The data covered a period of 21 years (June 2000 to June 2021) and were obtained from 12 SENAMHI meteorological stations and from the GPM satellite product through NASA's Giovanni platform. Statistical techniques were applied to validate and compare the data, such as double-mass curves, scatter diagrams, and evaluation metrics, including the correlation coefficient (r), the coefficient of determination (R^2), the Root Mean Square Error (RMSE), and the Bias Percentage (PBIAS). The results showed a significant correlation between both data sources, with R^2 values higher than 75% in most of the stations evaluated. The Rincón de la Cruz (87.37%) and Capazo (88.50%) stations stood out for their high correlation values, validating the accuracy of the GPM IMERG product. In conclusion, the GPM IMERG v6 satellite is an accurate and reliable tool for estimating average monthly rainfall in regions with limited coverage of meteorological stations..

Keywords: Statistical analysis, Pbias percentage, Satellite precipitation.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La gestión de los recursos hídricos en la cuenca Ilave enfrenta desafíos importantes debido a la limitada cobertura de estaciones pluviométricas, lo que genera vacíos de información para el análisis hidrológico. Esta situación afecta directamente la capacidad de planificar y tomar decisiones, especialmente en regiones donde la variabilidad climática es pronunciada y las actividades socioeconómicas dependen significativamente de los recursos hídricos disponibles.

En este contexto, los productos satelitales de precipitación, como el GPM (IMERG), se han convertido en herramientas fundamentales para complementar los registros de datos de precipitación mensual de las estaciones y reducir los vacíos de información. Sin embargo, su implementación requiere validación para garantizar la precisión y representatividad. Según Asurza et al. (2018), la integración de datos satelitales con registros de estaciones meteorológicas permite mejorar las estimaciones de precipitación, aportando mayor consistencia a los análisis hidrológicos y favoreciendo su aplicación en la modelización y la gestión de cuencas.

La presente investigación tiene como objetivo determinar la correlación entre las precipitaciones medias mensuales estimadas por el producto GPM (IMERG) y los datos registrados en las estaciones meteorológicas del SENAMHI. Este estudio busca proporcionar herramientas que fortalezcan la gestión en la cuenca Ilave, contribuyendo a la planificación y toma de decisiones.



1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La cuenca Ilave enfrenta limitaciones significativas debido a la escasa cobertura de estaciones pluviométricas, lo que genera vacíos en los registros necesarios para realizar un análisis hidrológico detallado. Estas limitaciones dificultan la representación precisa de los patrones de precipitación, afectando la planificación y la gestión sostenible de los recursos hídricos en una región que depende directamente de estos para su desarrollo económico y social.

En este escenario, los productos satelitales de precipitación, como el GPM (IMERG), se presentan como herramientas prometedoras para complementar los datos de las estaciones pluviométricas, especialmente en áreas de difícil acceso. Sin embargo, es fundamental validar su desempeño para garantizar su aplicabilidad. Según Asurza et al. (2018), la evaluación de productos satelitales mediante métricas como el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio cuadrático (RMSE) mejora la calidad de las estimaciones de precipitación, fortaleciendo su uso en estudios hidrológicos. Por su parte, Aybar et al. (2019) desarrollaron el producto PISCO, que integra datos de estaciones terrestres y satelitales, demostrando su utilidad como herramienta para reducir los vacíos de información pluviométrica en el Perú.

La presente investigación tiene como objetivo determinar la correlación entre las precipitaciones medias mensuales estimadas por el producto satelital GPM (IMERG) y los datos registrados por las estaciones pluviométricas del SENAMHI. Este estudio busca proporcionar una base para mejorar los análisis hidrológicos en la cuenca Ilave, contribuyendo a la planificación frente a eventos climáticos extremos y a su desarrollo sostenible.



1.2. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

1.2.1. Objetivo general

Determinar la correlación de las precipitaciones medias mensuales aplicando datos de satélite GPM y estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave – Puno.

1.2.2. Objetivos específicos

Comparar el comportamiento de histogramas de datos de precipitación media mensual medidos por el satélite GPM (IMERG) y estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave.

Determinar el coeficiente de determinación (R^2) de los datos de precipitación media mensual medidos por el satélite GPM (IMERG) con respecto a los datos de precipitación media mensual medidos por estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave.

Determinar el coeficiente de correlación (r) de los datos de precipitación media mensual medidos por el satélite GPM (IMERG) con respecto a los datos de precipitación media mensual medidos por estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Antecedente de nivel internacional

Ly y Wu (2024) llevaron a cabo una evaluación exhaustiva del producto satelital GPM IMERG en su versión final, con el objetivo de analizar la precisión de sus estimaciones de precipitación en comparación con observaciones horarias obtenidas de estaciones meteorológicas terrestres distribuidas en el hemisferio norte. La metodología consistió en la utilización de métricas estadísticas como el coeficiente de correlación, el error absoluto medio (MAE) y el sesgo, aplicadas a diferentes escalas temporales, desde datos horarios hasta promedios mensuales. Los resultados revelaron una correlación significativa entre los datos satelitales y los de las estaciones terrestres, con coeficientes de determinación superiores a 0.85 en la mayoría de las regiones de baja altitud. Sin embargo, se identificaron limitaciones en áreas montañosas y de alta latitud, donde las complejidades atmosféricas y topográficas afectaron la precisión de las mediciones, observándose errores sistemáticos en las precipitaciones estimadas. A pesar de estas limitaciones, el producto GPM IMERG mostró un desempeño notable, particularmente en regiones de topografía simple, consolidándose como una herramienta confiable para estudios hidrológicos y climáticos. Los autores concluyeron que, si bien el IMERG es adecuado para diversas aplicaciones, es necesario realizar ajustes metodológicos para mejorar su rendimiento en regiones complejas. Este estudio subraya la importancia de combinar datos satelitales con observaciones terrestres para obtener estimaciones más precisas y útiles en la



gestión de recursos hídricos y en investigaciones relacionadas con el cambio climático.

Delgado, Sadaoui, Ludwig y Méndez (2024) realizaron un estudio integral para analizar la erosión del suelo en cuencas ecuatorianas durante el período 2001-2020, empleando el modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), datos de alta resolución del satélite GPM IMERG y herramientas GIS. El objetivo principal fue evaluar las tasas de erosión del suelo y los factores ambientales que las influyen, tales como las precipitaciones, la textura del suelo (proporción de arena y arcilla) y el uso del terreno. La metodología consistió en integrar datos satelitales de precipitación con mapas de cobertura terrestre y características del suelo en un entorno GIS, permitiendo modelar las tasas de erosión y su distribución espacial en la región. Los resultados indicaron que las áreas con mayores precipitaciones, estimadas en más de 1500 mm anuales, y suelos predominantemente arenosos experimentaron tasas de erosión significativamente altas, superiores a 50 toneladas por hectárea por año. Además, las precipitaciones estimadas por el producto GPM IMERG mostraron una alta consistencia con los datos de estaciones locales, validando su utilidad en regiones con escasa infraestructura meteorológica. Este trabajo destacó que las principales zonas de riesgo se encuentran en áreas de pendiente pronunciada y suelos de baja cohesión, donde los cambios en el uso de la tierra podrían exacerbar la degradación. Los autores concluyeron que la integración de datos satelitales y modelos GIS es fundamental para evaluar y mitigar los riesgos de erosión, especialmente en contextos de alta vulnerabilidad ambiental y limitada cobertura de estaciones meteorológicas, y recomendaron el uso continuo de tecnologías satelitales para apoyar la gestión de recursos naturales.



Shirmohammadi-Aliakbarkhani (2023) realizó un estudio para comparar los datos de precipitación obtenidos de satélites y estaciones terrestres en la provincia de Khorasan Razavi, Irán, durante el período 2000-2020, con el objetivo de evaluar la utilidad de los datos satelitales en el cálculo del índice de sequía SPI (Standardized Precipitation Index). El análisis se centró en determinar la precisión del producto GPM IMERG al estimar las precipitaciones en diferentes condiciones climáticas y topográficas. La metodología incluyó la validación de datos satelitales mediante la comparación con mediciones locales de 45 estaciones terrestres distribuidas por toda la región. Los resultados revelaron que el GPM IMERG presentó una alta correlación con los datos terrestres en áreas de baja altitud, con un coeficiente de determinación promedio de 0.87, lo que lo hace adecuado para el monitoreo de sequías. Sin embargo, en zonas montañosas se observaron discrepancias significativas debido a la influencia de las condiciones atmosféricas en las mediciones satelitales, con errores superiores al 20% en eventos de precipitación extrema. A pesar de estas limitaciones, el estudio concluyó que el uso de datos satelitales como GPM IMERG complementa la cobertura limitada de estaciones terrestres, proporcionando una herramienta esencial para monitorear sequías en regiones con infraestructura meteorológica insuficiente. Además, se recomienda ajustar los algoritmos de corrección de datos satelitales en regiones con topografía compleja para mejorar su precisión.

Badarneh, Hazaymeh y Almagbile (2023) realizaron un estudio para mapear sequías agrícolas en el norte de Jordania mediante datos de percepción remota, integrando mediciones de precipitación satelital y observaciones terrestres. El trabajo utilizó datos del producto satelital GPM IMERG y combinó información obtenida de los sensores Landsat y MODIS para evaluar la relación



entre la precipitación y los índices de vegetación en áreas afectadas por la sequía. La validación incluyó el cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para comparar condiciones meteorológicas entre los años 2000 y 2020, destacando que 2020 presentó las condiciones menos secas y 2019 el período más crítico. Los resultados evidenciaron que el GPM IMERG mostró alta correlación con los datos SPI locales, con coeficientes superiores a 0.90 en áreas de baja altitud, pero presentó limitaciones en regiones montañosas y áridas. Los autores concluyeron que el uso de datos satelitales, junto con índices de sequía derivados de vegetación, es crucial para la gestión agrícola en regiones vulnerables al cambio climático, y recomendaron una mayor integración de datos satelitales para monitorear los cambios estacionales y mejorar la planificación de recursos hídricos.

Mirhoseini, Gheiby y Memarian (2019) realizaron un estudio en la cuenca central de Irán para estimar la precipitación utilizando datos satelitales y técnicas de redes neuronales. El objetivo fue mejorar la precisión en la estimación de precipitaciones en una región con infraestructura limitada de estaciones terrestres, empleando datos derivados del satélite GPM IMERG combinados con modelos de aprendizaje automático. Para el análisis, el 75% de los datos se asignó al entrenamiento del modelo, el 15% a la validación y el 10% a la prueba final. Los resultados mostraron que el modelo basado en redes neuronales logró un coeficiente de correlación superior a 0.85 en la validación, lo que confirma su efectividad para capturar patrones de precipitación en diferentes escalas temporales. Sin embargo, se observó que en los meses de verano, los errores relativos aumentaron debido a la complejidad climática de la región. Los autores concluyeron que el uso de datos satelitales en combinación con redes neuronales



puede complementar significativamente las observaciones terrestres, especialmente en regiones áridas donde la recolección de datos meteorológicos es limitada.

2.1.2. Antecedente de nivel nacional

Delgado Quispe (2019), en su investigación titulada "Validación y corrección de la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS, usando el modelo de redes neuronales artificiales en la cuenca del río Vilcanota - Región Cusco" realizada por como parte de su tesis de pregrado en la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Andina del Cusco, examinó la calidad de la estimación de precipitación proporcionada por el producto satelital CHIRPS. El estudio comparó los datos de precipitación diaria obtenidos del CHIRPS, con una resolución espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ($\sim 5*5$ km), con los datos observados por pluviómetros en 20 estaciones meteorológicas. Se concluyó que, aunque el CHIRPS mostraba mayores probabilidades de detectar la precipitación, aún existía un porcentaje significativo de falsas alarmas. A pesar de que el 35% de las estaciones demostraron un sesgo muy bueno, la eficiencia general fue insatisfactoria, con una correlación deficiente en algunos casos, en comparación con otros productos como PISCO, que superó al CHIRPS y CHIRPM. Para la precipitación mensual, se evaluaron 31 estaciones meteorológicas y se encontraron mayores probabilidades de detección en comparación con la generación de falsas alarmas. Además, se observaron resultados mejores en la variación estacional que en la anual. En general, PISCO mostró mejores indicadores de sesgo, eficiencia y correlación que CHIRPS y CHIRPM en la precipitación mensual, estacional y anual, excepto en las estaciones que no se utilizaron para la generación de PISCO.



Gutiérrez, Huerta, Sabino, Bourrel y Frappart (2023) desarrollaron un conjunto de datos de alta resolución sobre erosividad de la lluvia en Perú basado en las estimaciones del satélite GPM IMERG para el período 2000-2020. El objetivo principal del estudio fue evaluar la distribución espacial y temporal de la erosividad de la lluvia en diferentes regiones del país. La metodología incluyó una validación cruzada utilizando datos de estaciones meteorológicas locales para ajustar las estimaciones satelitales y analizar tendencias en regiones específicas, como la Amazonía y la cordillera de los Andes. Los resultados indicaron que las zonas andinas presentan valores medios de erosividad superiores a $3500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo estas áreas las más vulnerables a los procesos de erosión debido a su topografía y altos niveles de precipitación concentrados en periodos cortos. Por otro lado, la región costera mostró valores significativamente menores, por debajo de $1000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, debido a su clima árido. El estudio también identificó un aumento de la erosividad promedio del 15% durante las dos últimas décadas, asociado a variaciones climáticas y eventos de El Niño. Este trabajo concluye que el uso de datos satelitales como GPM IMERG permite una evaluación precisa de la erosividad en zonas con infraestructura meteorológica limitada, lo que es fundamental para implementar estrategias de conservación del suelo.

Gutiérrez, Huerta, Sabino, Bourrel y Frappart (2023) desarrollaron un conjunto de datos de alta resolución sobre erosividad de la lluvia en Perú basado en las estimaciones del satélite GPM IMERG para el período 2000-2020. El objetivo principal del estudio fue evaluar la distribución espacial y temporal de la erosividad de la lluvia en diferentes regiones del país. La metodología incluyó una validación cruzada utilizando datos de estaciones meteorológicas locales para



ajustar las estimaciones satelitales y analizar tendencias en regiones específicas, como la Amazonía y la cordillera de los Andes. Los resultados indicaron que las zonas andinas presentan valores medios de erosividad superiores a $3500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo estas áreas las más vulnerables a los procesos de erosión debido a su topografía y altos niveles de precipitación concentrados en periodos cortos. Por otro lado, la región costera mostró valores significativamente menores, por debajo de $1000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, debido a su clima árido. El estudio también identificó un aumento de la erosividad promedio del 15% durante las dos últimas décadas, asociado a variaciones climáticas y eventos de El Niño. Este trabajo concluye que el uso de datos satelitales como GPM IMERG permite una evaluación precisa de la erosividad en zonas con infraestructura meteorológica limitada, lo que es fundamental para implementar estrategias de conservación del suelo.

Quenta, Rau, Bourrel y Frappart (2023) evaluaron la capacidad de los productos satelitales de precipitación, como GPM IMERG y SM2RAIN, para estimar caudales fluviales en cuencas del Pacífico peruano. Este estudio se centró en la validación de modelos hidrológicos a través de la combinación de datos satelitales con observaciones terrestres, utilizando datos de 15 estaciones de monitoreo en cuencas como el río Chillón y el río Piura. La metodología incluyó el cálculo del coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el error absoluto medio (MAE) y la correlación para evaluar la precisión de los datos satelitales en comparación con observaciones locales. Los resultados indicaron que el producto GPM IMERG presentó un NSE promedio de 0.82 en las cuencas bajas, reflejando una alta precisión en áreas con menor complejidad topográfica. En contraste, en las zonas montañosas, el NSE disminuyó a valores por debajo de 0.65 debido a la dificultad



de los sensores satelitales para capturar las precipitaciones en estas regiones. Asimismo, el MAE promedio en las cuencas analizadas fue de 28.5 mm, siendo los valores más altos observados durante eventos extremos de precipitación, como los asociados a fenómenos de El Niño. Los autores concluyeron que la integración de datos satelitales con observaciones terrestres mejora significativamente la capacidad de los modelos hidrológicos, proporcionando herramientas clave para la gestión de recursos hídricos en regiones vulnerables al cambio climático.

Villavicencio, Medina y Loarte (2022) llevaron a cabo un análisis para mejorar la calidad de los datos de precipitación y temperatura satelital en la región de Ancash, donde la infraestructura meteorológica es limitada. Utilizando información de los satélites TRMM y GPM, los autores diseñaron algoritmos de ajuste que incorporaron observaciones locales de estaciones meteorológicas para corregir los sesgos en los datos originales. El estudio abarcó tanto regiones de baja altitud como áreas montañosas, destacando la utilidad de combinar modelos estadísticos y datos satelitales. En el proceso de validación, los ajustes lograron una reducción del error absoluto promedio del 18%, lo que permitió mejorar significativamente la representación de la precipitación. La correlación entre los datos satelitales ajustados y las observaciones terrestres alcanzó un promedio de 0.91 en regiones de baja altitud y 0.84 en las áreas montañosas. Además, se destacó que los algoritmos propuestos mejoraron la identificación de eventos extremos, como lluvias torrenciales asociadas a fenómenos de El Niño, que previamente eran subestimadas en las versiones originales de los productos satelitales. Este trabajo concluyó que las mejoras en los datos satelitales son esenciales para áreas como Ancash, donde la limitada disponibilidad de estaciones terrestres dificulta la planificación y gestión hídrica.



Salas Choquehuanca (2022) evaluó la precisión del producto satelital GPM IMERG v6 en la cuenca Madre de Dios, comparando las estimaciones satelitales con los datos observados de estaciones meteorológicas terrestres. El análisis abarcó el periodo 2010-2019 y se realizó utilizando métricas estadísticas como R^2 , RMSE y PBIAS para determinar la relación entre ambas fuentes de datos. Los resultados mostraron valores R^2 superiores al 70 % y RMSE en un rango de 20 a 35 mm, indicando que el producto satelital presenta una buena correspondencia con los registros terrestres, aunque con limitaciones en áreas de topografía compleja. El estudio concluyó que, tras ajustes metodológicos, el producto GPM IMERG puede complementar los datos de estaciones, especialmente en regiones con cobertura limitada de estaciones meteorológicas.

2.1.3. Antecedente de nivel regional

Coaquira Quispe et al. (2019) publicaron en la Revista Científica de Investigaciones Ambientales un estudio que tuvo como objetivo comparar las precipitaciones medias mensuales estimadas por el satélite TRMM 3B43 con los datos observados por las estaciones meteorológicas del SENAMHI en la cuenca Huancané, Puno. Además, se buscó determinar la correlación existente entre ambas fuentes de datos. Inicialmente, los datos no corregidos del satélite TRMM 3B43 mostraron un coeficiente de determinación (R^2) de 0.72 y una correlación moderada ($r = 0.85$), aunque presentaron limitaciones en la cuantificación de la intensidad de las precipitaciones, evidenciada por un sesgo porcentual (BIAS) de +21.61 %. Sin embargo, al aplicar correcciones a los datos inconsistentes del satélite, los resultados mejoraron significativamente, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) de 0.90, una correlación elevada ($r = 0.95$) y un sesgo reducido (BIAS = +20.60 %). A pesar de estas mejoras, el sesgo porcentual indicó que las



estimaciones satelitales aún no cuantifican con precisión la intensidad de las precipitaciones. Por lo tanto, los autores concluyeron que los datos del satélite TRMM 3B43 pueden ser utilizados como una fuente complementaria en regiones con información limitada, pero no como una herramienta principal para representar la intensidad de las precipitaciones en la cuenca Huancané.

Coaquira, Calderón y Huaccoto (2019), realizaron el estudio “Comparación de dos productos del satélite TRMM 3B43 con datos observados por SENAMHI en la cuenca Ilave-Puno (1998-2016)”. Al contrastar la precipitación media mensual de ambos productos, se obtuvieron resultados significativos. Inicialmente, se observó que la correlación entre los datos de TRMM 3B43 y los datos observados por SENAMHI era notable, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.72 y un coeficiente de correlación (r) de 0.85. Sin embargo, se detectó una discrepancia en la cuantificación de la intensidad de la precipitación, reflejada en un sesgo porcentual (BIAS) del 21.61%. Posteriormente, al realizar una corrección de los datos, se encontró una mejora significativa en la precisión de la estimación de precipitación. Los valores corregidos mostraron un coeficiente de determinación (R^2) de 0.90 y un coeficiente de correlación (r) de 0.95, con un BIAS reducido al 20.60%. Estos resultados indican una mayor concordancia entre los datos de TRMM 3B43 y los datos observados por SENAMHI después de aplicar las correcciones necesarias.

En su tesis de pregrado presentada en la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Asurza Veliz (2017) evaluó la capacidad de los productos satelitales de precipitación TRMM y GPM para su aplicación en el modelamiento hidrológico en la cuenca del río Huancané. El estudio se centró en determinar la representatividad de los patrones de



precipitación y su precisión en la cuantificación de la intensidad de la lluvia. Los resultados iniciales mostraron que el producto IMERG del GPM representa adecuadamente los patrones de precipitación (R^2 : 0.38), pero subestima significativamente la intensidad, con un sesgo porcentual (BIAS) de -32 %. En contraste, el producto TRMM 3B42V7 demostró una mejor representación de la intensidad de la lluvia en comparación con el 3B42RT, que presentó sobrestimaciones elevadas. Además, una evaluación inicial de estos productos, sin correcciones, utilizando el modelo hidrológico agregado GR4J, indicó que el TRMM 3B42V7 era la mejor opción para estimar las descargas en ausencia de datos observados. Al aplicar una corrección de sesgo por promedio al producto IMERG, se observaron mejoras significativas en las estimaciones de precipitación, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.90 y un sesgo reducido (BIAS: -10.1 %). En consecuencia, el producto IMERG corregido fue considerado como el mejor insumo satelital de precipitación para su aplicación en modelación hidrológica en la cuenca del río Huancané.

Lujano Laura et al. (2015) llevaron a cabo una investigación publicada en la revista Investigación Alto Andino, cuyo objetivo principal fue validar las precipitaciones estimadas por el satélite TRMM y analizar su aplicabilidad en la modelación hidrológica del río Ramis, ubicado en Puno, Perú. El estudio abarcó el período comprendido entre enero de 1998 y diciembre de 2013, mediante la comparación de datos de precipitación observados y estimados. Los resultados demostraron que las precipitaciones estimadas por el satélite TRMM son confiables y pueden ser utilizadas como una alternativa en zonas con información limitada. Esto se evidenció con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.86 y un sesgo porcentual de +21.7 %. En términos de modelación hidrológica, los



resultados fueron aceptables, con eficiencias de Nash-Sutcliffe de 0.78 en la etapa de calibración y 0.75 en la validación. El estudio concluyó que el producto de estimación satelital TRMM es válido para la cuenca del río Ramis y puede ser empleado como insumo en modelos hidrológicos para transformar lluvia en escorrentía.

Centeno Jarita (2022) llevó a cabo un estudio en la cuenca del río Ramis para evaluar el desempeño del producto satelital PISCO como insumo en la modelización hidrológica utilizando el modelo SWAT. Este trabajo incluyó la validación del producto mediante la calibración y validación de los flujos simulados, obteniendo coeficientes NSE de 0.78 en la etapa de calibración y 0.77 en validación mensual. Los resultados evidenciaron que el producto PISCO puede representar con precisión los flujos hídricos en zonas altoandinas, incluso en áreas con limitada cobertura de estaciones pluviométricas. Asimismo, se destacó que la integración de datos grillados permite reducir los vacíos de información pluviométrica y mejorar la representación espacio-temporal de las precipitaciones.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Cuenca

La unidad Hidrográfica es un espacio geográfico natural o unidad territorial delimitada por una parcelación topográfica, que capta la precipitación y caen sobre ellas donde las aguas tienen drenar hasta un colector principal denominado río principal (Vásquez, 2000).

Una unidad hidrográfica está delimitada por los puntos de mayor elevación que forman cuencas u subcuencas, de dichos sitios se conoce como parteaguas y



reúne en un lugar de salida y drena aguas que puede formar ríos, quebradas, riachuelos o simples corrientes (Gámez, 2010).

2.2.2. Precipitación

La precipitación está referido a toda el agua proveniente de las nubes, con la consecuencia caída hacia la tierra en cualquiera de sus estados físicos. Existen diversas formas de precipitación, los cuales dependen de las condiciones meteorológicas existentes, en latitudes medias pueden distinguirse las llovizna, lluvia, granizo, nieve, rocío y escarcha (Linsley et al., 1977).

2.2.2.1. Precipitación Media Mensual

La precipitación media mensual se define como el promedio de la cantidad de agua que cae en forma de lluvia, nieve o granizo durante un mes en un área específica. Esta variable es crucial para analizar la distribución temporal de los recursos hídricos, ya que permite identificar patrones estacionales y evaluar la disponibilidad hídrica en regiones de interés. Además, sirve como insumo principal en modelos hidrológicos que simulan flujos y balances hídricos (Clarke, 1973).

2.2.3. Medición y observación de la precipitación

La precipitación es una variable fundamental en el ciclo hidrológico, ya que su medición precisa es esencial para comprender los procesos climáticos y realizar estudios hidrológicos efectivos. Los principales instrumentos utilizados para este propósito incluyen los pluviómetros, que miden la cantidad total de precipitación acumulada; los pluviógrafos, que registran su intensidad y duración en el tiempo; y los satélites, que permiten observar la distribución espacial de la

precipitación, especialmente en regiones con acceso limitado a estaciones terrestres (WMO, 2012).

2.2.3.1. Pluviómetros

Los pluviómetros son dispositivos diseñados para recoger y medir la cantidad de precipitación en una ubicación específica. Están compuestos por un recipiente graduado y un embudo o boca de captación en la parte superior, cuya función es canalizar la precipitación hacia el recipiente. Las dimensiones del pluviómetro pueden variar dependiendo de las características del lugar donde se instale, con el objetivo de garantizar mediciones precisas (Breña, 2015).

2.2.3.2. Pluviógrafos

Los pluviógrafos son dispositivos similares a los pluviómetros, pero con la capacidad de registrar la precipitación de manera continua, en lugar de hacerlo cada 24 horas. Estos instrumentos cuentan con un mecanismo que permite un registro continuo de la cantidad de precipitación, lo que facilita no solo la medición acumulada de la lluvia, sino también su distribución temporal a lo largo del tiempo (Breña, 2015).

2.2.3.3. Satélites

Los satélites representan una tecnología avanzada para estimar la precipitación, superando las limitaciones de cobertura de los pluviómetros y pluviógrafos. Su principal ventaja radica en la capacidad de monitorear grandes áreas de la superficie terrestre, incluidas regiones remotas y océanos. Los satélites climáticos ofrecen información actualizada



continuamente sobre las condiciones atmosféricas a nivel global, lo que permite el monitoreo en tiempo real de fenómenos meteorológicos y climáticos (Coaquira, Calderón, & Huaccoto, 2019).

2.2.4. Métodos de análisis de datos de precipitación

Los pluviómetros son instrumentos meteorológicos esenciales para la recolección de datos de precipitación. Sin embargo, su precisión puede verse afectada por dos factores principales: errores en la medición puntual y errores en la estimación espacial. La precisión de la estimación espacial depende en gran medida de la densidad de los puntos de monitoreo (Linsley, Kohler y Paulus, 1994).

Las regiones andinas de Perú, Colombia, Ecuador y Venezuela son conocidas por ser grandes proveedores de agua de excelente calidad y por contar con ríos de buen caudal; sin embargo, la falta de estaciones de monitoreo en estas áreas dificulta la recolección precisa de datos meteorológicos (Buytaert et al., 2006).

Los productos satelitales ofrecen una mejor cobertura espacial para la estimación de la precipitación. No obstante, estos productos a menudo requieren correcciones debido a sesgos en comparación con datos de puntos de monitoreo confiables, lo que es crucial para una evaluación precisa de los datos satelitales. En áreas sin instrumentos de monitoreo, los datos satelitales pueden evitar la necesidad de mediciones precisas y la interpolación de información (Caicedo, 2008).

Actualmente, existen muchos productos satelitales que se pueden clasificar según su tipo de órbita: geoestacionarios y de órbita terrestre baja. Los satélites



geoestacionarios permanecen fijos en relación con un punto específico sobre la superficie de la Tierra, proporcionando datos continuos de esa región. Por otro lado, los satélites de órbita terrestre baja proporcionan información detallada sobre la Tierra y su atmósfera con imágenes casi en tiempo real y una amplia cobertura. Sin embargo, estos datos a menudo requieren validación y calibración (Ceccato y Dinku, 2010).

2.2.5. Medición de precipitación global – GPM

Hasta el momento, existen varios productos satelitales diseñados para medir la precipitación con diversa resolución espacial. Uno de los más importantes ha sido el TMPA de la misión TRMM, lanzada a finales de 1997, que ha proporcionado información casi global para la investigación y aplicaciones diversas. Los productos TMPA han sido fundamentales para la evaluación científica y social en la organización y gestión de los recursos hídricos, así como en los pronósticos de desastres y fenómenos meteorológicos. Sin embargo, a pesar de sus grandes beneficios, el satélite TRMM presenta limitaciones en cuanto a cobertura, incertidumbre en la estimación de precipitación y en las mediciones según la latitud y longitud (Huffman et al., 2007; Chang y Hong, 2012; Yong et al., 2015).

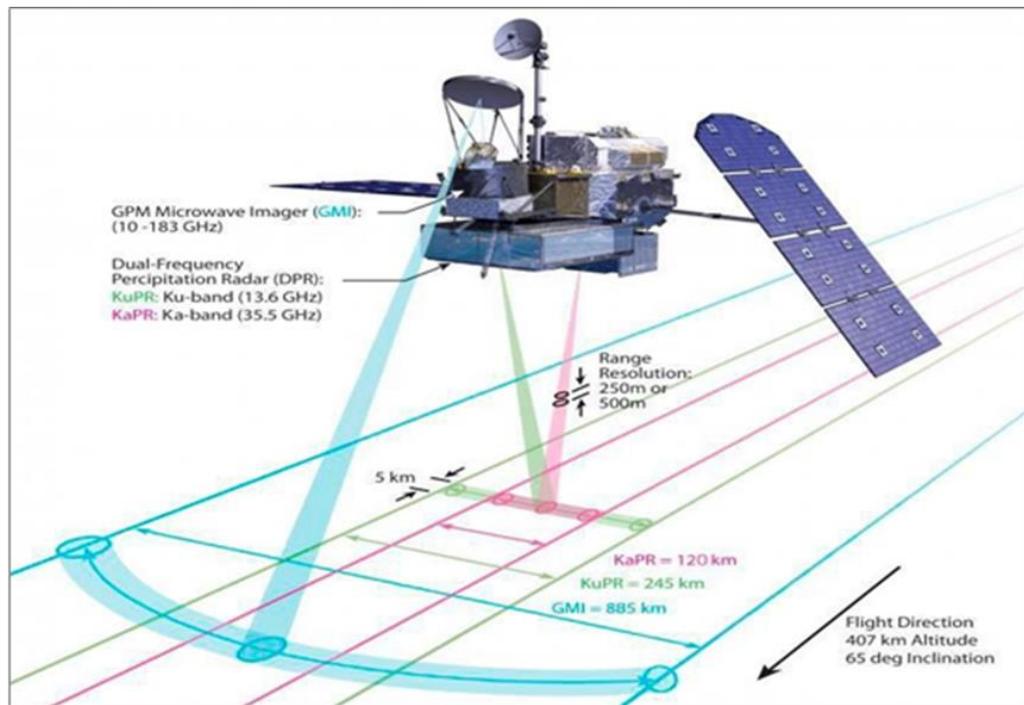
Con el mismo propósito del TRMM, la misión GPM ha llegado para continuar y mejorar la medición de lluvia y nieve. La misión GPM, lanzada el 27 de febrero de 2014, es una colaboración internacional organizada por la NASA y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Este satélite opera a una altitud de 407 km en una órbita no sincronizada con el sol, proporcionando un muestreo constante similar al del TRMM. A futuro, se espera que la observación

por satélites se extienda a latitudes más altas, cubriendo todo el globo terráqueo (Huffman et al., 2019).

Como se aprecia en la Figura 1, los satélites utilizan datos de diferentes sensores para estimar la precipitación y sus imágenes coinciden en tiempo y espacio, por lo que es fundamental conocer la resolución espacial de las imágenes para asegurar la precisión de las estimaciones.

Figura 1

Satélite de observatorio GPM Core.



Nota: El satélite GPM Core, desarrollado por la NASA y la JAXA.

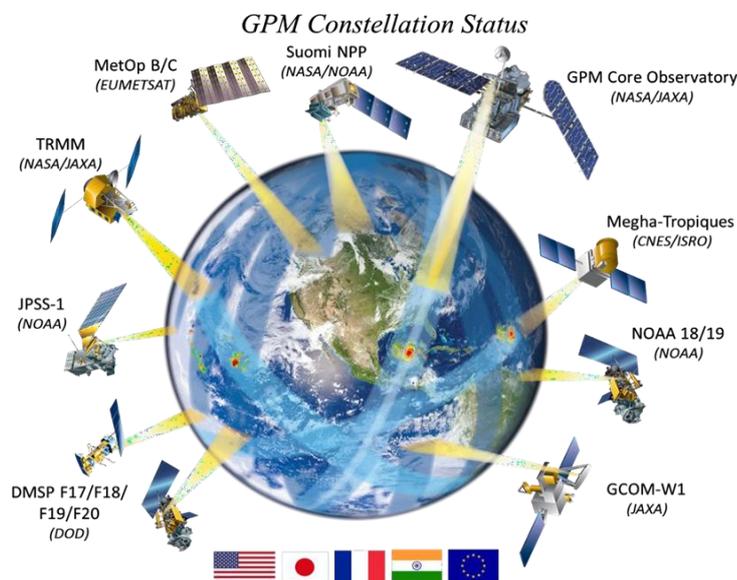
En la actualidad, el satélite GPM opera a una altitud que cubre desde los 90° N hasta los 90° S y está equipado con herramientas avanzadas para la estimación de precipitación. El GPM Core Observatory está equipado con un sensor de lluvia activo denominado Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) y un sensor de lluvia pasivo llamado GPM Microwave Imager (GMI). Estos instrumentos mejoran significativamente la estimación de la lluvia y la nieve, un

evento que otros satélites no son capaces de medir adecuadamente (Sharifi, Steinacker y Saghafian, 2016; Huffman, 2019).

Como se puede apreciar en la Figura 2, la misión GPM utiliza una constelación de satélites que cubre casi todo el globo terráqueo, en colaboración internacional con diversos satélites (ver Figura 2). El DPR incluye un radar de banda Ka (35.5 GHz), conocido como KaPR, y un radar de banda Ku (13.6 GHz), conocido como KuPR, que cubren franjas de 120 y 245 km, respectivamente. Las mediciones proporcionadas por estos radares son simultáneas y superpuestas, ofreciendo datos precisos sobre la intensidad de la precipitación. El GMI, por su parte, es un radiómetro de microondas multicanal que realiza un escaneo continuo y cubre una franja de 885 km, operando en tres rangos de frecuencia desde 10 GHz hasta 183 GHz (Huffman et al., 2015).

Figura 2

Diagrama de la constelación de satélites GPM.



Nota: El GPM produce datos a través de varios niveles de algoritmos, destacándose el algoritmo IMERG.



Este algoritmo intercalibra, fusiona e interpola las estimaciones de todos los sensores involucrados, ofreciendo una resolución espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ y una resolución temporal casi en tiempo real de 30 minutos, diario, mensual y otros valores agregados en los centros de datos (Huffman, 2019).

Los datos del GPM están disponibles en un portal web (<https://gpm.nasa.gov/>), además de otras plataformas de búsqueda y acceso a datos como OpenDAP, GDS, WMS y WCS, con conversiones a diferentes formatos (NetCDF, HDF, KML). Asimismo, los datos pueden ser explorados y descargados a través de la plataforma GIOVANNI (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>), la cual permite el análisis estadístico de diferentes productos del GPM y otros conjuntos de datos meteorológicos.

2.2.6. Validación de datos satelitales

La validación de datos satelitales consiste en comparar las estimaciones obtenidas mediante productos satelitales, como el GPM (IMERG), con datos terrestres de estaciones meteorológicas para garantizar su precisión y aplicabilidad en estudios hidrológicos. Este proceso emplea métricas estadísticas, como el coeficiente de determinación (R^2), el error medio cuadrático (RMSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS), para evaluar la consistencia y representatividad de los datos (Ponce, 2014).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Método Científico

De acuerdo con Charaja Cutipa (2018), la ciencia como proceso se fundamenta en el método de investigación científica, el cual permite generar nuevos conocimientos mediante un conjunto de pasos racionales, lógicos, secuenciales y sistemáticos. Este método se divide en dos tipos principales: el método general, que abarca las etapas de la investigación desde la identificación del problema hasta la obtención de resultados, y los métodos específicos, que se aplican para probar las hipótesis o alcanzar los objetivos planteados (Charaja Cutipa, 2018).

En esta investigación se ha seguido el método general de la investigación científica, complementado con el método específico de investigación factual. Este enfoque implica la recopilación de datos directamente de la realidad mediante la observación y el uso de instrumentos especializados. El método general se basó en la observación sistemática de las precipitaciones medias mensuales registradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y estimadas por el satélite GPM. Esto permitió analizar y validar la correlación entre ambas fuentes de datos en la cuenca Ilave – Puno.

3.1.2. Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo **básico**. Es **básica** porque busca evaluar la correlación entre los datos satelitales obtenidos del producto GPM



(IMERG) y los registros terrestres de las estaciones meteorológicas del SENAMHI, contribuyendo al entendimiento de los procesos hidrológicos en la cuenca Ilave. Asimismo, los resultados podrán ser utilizados en estudios hidrológicos, planificación y gestión de recursos hídricos, proporcionando una herramienta para mejorar la estimación de precipitaciones en zonas con limitada densidad de estaciones pluviométricas.

3.1.3. Nivel de Investigación

El nivel de investigación es **relacional**, ya que se enfoca en determinar la relación existente entre las precipitaciones medias mensuales estimadas por el producto satelital GPM (IMERG) y los datos terrestres obtenidos de las estaciones del SENAMHI. Este enfoque permite analizar el grado de asociación entre estas dos variables y evaluar su consistencia, contribuyendo a la validación y mejora de los productos satelitales en zonas altoandinas.

3.1.4. Población y Muestra

3.1.4.1. Población

La población considerada en esta investigación incluye todos los datos de precipitación a escala mensual registrados en las 12 estaciones meteorológicas operadas por el SENAMHI y los correspondientes píxeles de las estimaciones satelitales del producto GPM IMERG v6 en el área de estudio. Esta población abarca un período de 21 años (junio de 2000 a junio de 2021) y representa el universo total de datos disponibles tanto terrestres como satelitales en la cuenca Ilave – Puno, proporcionando una base integral para el análisis comparativo.



3.1.4.2. Muestra

Se seleccionaron como muestra los datos de precipitación a escala mensual para las 12 estaciones meteorológicas y los correspondientes píxeles de las estimaciones satelitales en el área de estudio. Estos datos abarcaban un período de 21 años (junio de 2000 a junio de 2021), proporcionando una base robusta para el análisis comparativo.

3.1.4.3. Técnica

La técnica aplicada consistió en realizar un análisis estadístico comparativo entre las precipitaciones medias mensuales observadas por las estaciones del SENAMHI y las estimadas por el satélite GPM. Para ello, se utilizaron herramientas como curvas de doble masa, diagramas de dispersión y métricas estadísticas como el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de correlación (r), el error medio cuadrático (RMSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS). Estas métricas permitieron evaluar la calidad y consistencia de los datos analizados.

3.1.4.4. Instrumentos

Los instrumentos utilizados en esta investigación para la recopilación, procesamiento y análisis de datos incluyen:

Pluviómetros y Pluviógrafos: Instalados en las estaciones meteorológicas del SENAMHI, estos dispositivos permiten medir la cantidad acumulada de precipitación y registrar su intensidad y duración de manera continua.



Producto Satelital GPM IMERG v6: Herramienta que proporciona estimaciones de precipitación a nivel global con una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, adecuada para áreas de difícil acceso.

Software Estadístico (Excel, R y Minitab): Empleados para procesar y analizar los datos de precipitación, permitiendo el cálculo de métricas estadísticas como el coeficiente de determinación (R^2), el error medio cuadrático (RMSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS). Minitab fue utilizado específicamente para análisis de regresión y validación estadística.

Curvas de Doble Masa: Técnica aplicada para evaluar la consistencia de los datos de precipitación registrados en las estaciones meteorológicas.

3.2. ÁMBITO DE ESTUDIO

Según la Autoridad Nacional del Agua en el año 2008, la cuenca en estudio se encuentra ubicada en la Región Hidrográfica del Titicaca, La cuenca del río Ilave esta jerarquizada en el nivel 3 con código 016, tal como se aprecia en la figura 3.

La presente investigación se realizó en:

Región : Puno

Provincia : Chucuito, El Collao y Puno.

Distrito : Huacullani, Juli, Capaso, Mazocruz, Conduriri, Ilave, Acora, Platería, Chucuito, Laraqueri, Puno y San Antonio.

Cuenca : Ilave

3.3. MATERIALES

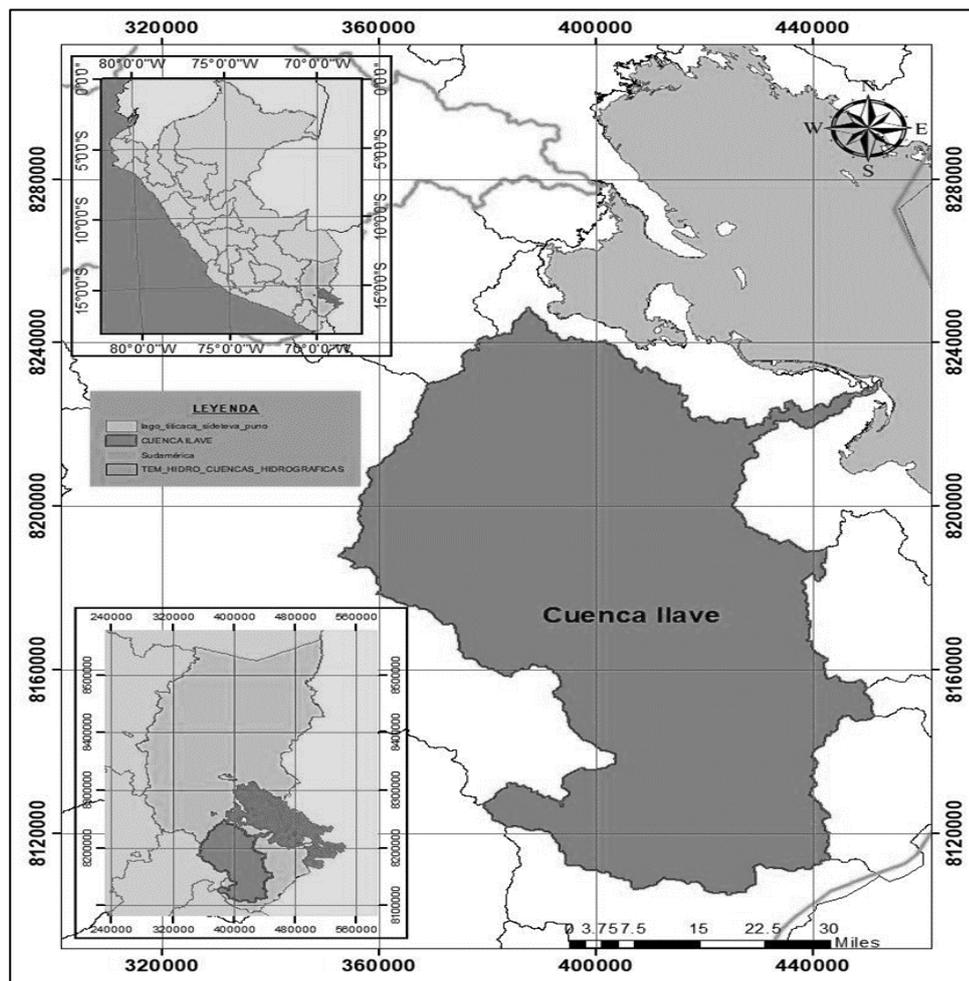
3.3.1. Información meteorológica observada

La información meteorológica se solicitó al SENAMHI, respuesta a la solicitud se tomó la plataforma virtual del Servicio Nacional de Meteorología e hidrología (SENAMHI), con su página oficial de acceso a datos meteorológicos:

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>, para su respectiva descarga de datos se procedió:

Figura 3

Ubicación de la cuenca del Ramis y su estación Hidrométrica



Nota: la cuenca en estudio se encuentra ubicada en la Región Hidrográfica del Titicaca



Paso 1: Estando en la página oficial del SENAMHI, se inicia con la búsqueda de estaciones dentro y alrededores de la cuenca del río Ilave que estén actualmente funcionando.

Paso 2: Al seleccionar la estación meteorológica, te mostrara el histograma.

Paso 3: Luego aparece descargar datos de precipitación.

Los datos de precipitación que nos brinda el SENAMHI en formato Excel que son diarios acumulados con unidad de medida en mm, de cada estación meteorológica con diferente tiempo de observación.

Las estaciones que se tomaron en cuenta son: Capazo, Vilacota, Pampa Umalzo, Laraqueri, Puno, Rincon De La Cruz, Ilave, Juli, Desaguadero, Pizacoma, Mazo Cruz y Mañazo.

3.3.2. Adquisición de datos del satélite GPM

Se procede a descargar los datos para la evaluación del producto IMERG v6 a escala diaria de la plataforma web GIOVANNI durante el tiempo de evaluación de junio de 2000 a junio de 2021.

3.3.3. Modelo digital de elevación (MDE)

Conocer la topografía del área de estudio es esencial para entender muchos de los procesos que ocurren en la superficie terrestre. Para nuestra área de estudio en Perú, disponemos de tres productos que ofrecen información altimétrica de libre acceso:

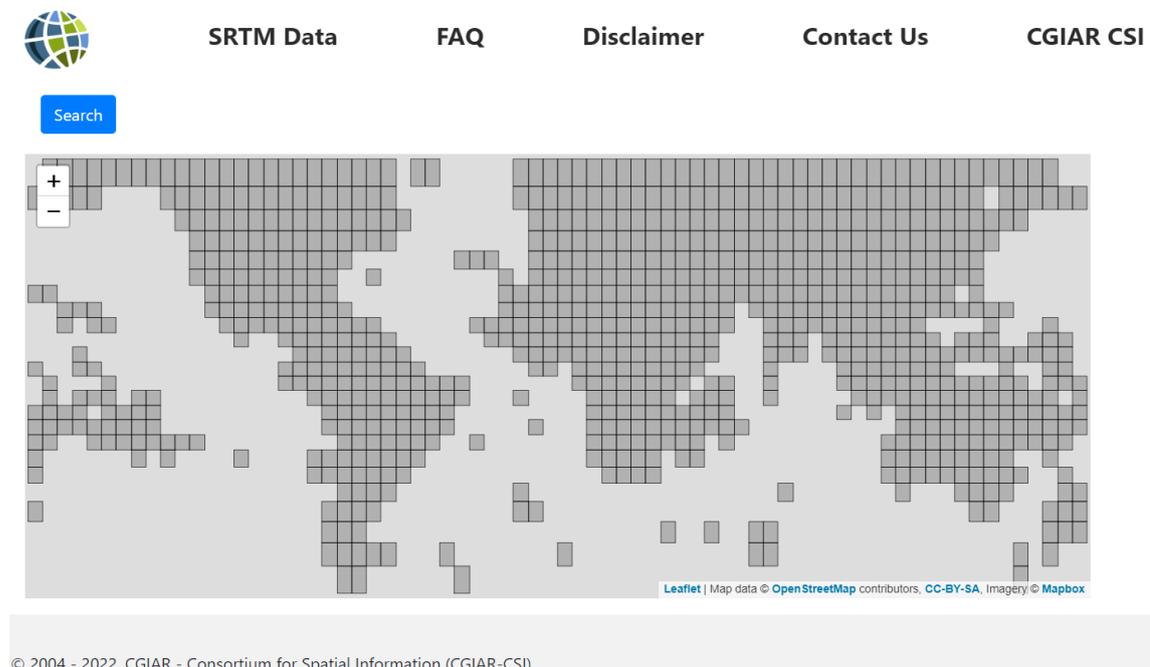
- La carta nacional del IGN a escala 1:100 000.

- Modelos Digitales de Elevación (MDE) obtenidos mediante técnicas interferométricas, como el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
- MDE generados a partir de técnicas estereoscópicas, como el Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER).

De estos datos, se decidió trabajar con el producto SRTM debido a su amplio uso en investigaciones hidrológicas. El modelo digital de elevación (DEM) del producto SRTM v4.1, con una resolución de 90 m, está disponible en el sitio web del CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information of the Consultative Group of International Agricultural Research), cuyo enlace es <http://srtm.csi.cgiar.org/> (ver Figura 14).

Figura 4

Portal de descargas del MDE srtm v4.1



Nota: modelo digital de elevación (DEM) del producto SRTM v4.1, con una resolución de 90 m.



3.3.4. Materiales de escritorio

Para las actividades de oficina, se utilizaron los siguientes materiales: papel bond tamaño A4, una memoria USB de 128 GB, tinta para impresora y otros materiales de papelería como bolígrafos, gomas de borrar y rotuladores.

3.3.5. Materiales y equipos de campo

En el trabajo de campo se emplearon una cámara digital y un dispositivo GPS Garmin.

3.3.6. Materiales y equipos de gabinete

Para el trabajo de gabinete, se contó con la bibliografía necesaria, fotografías digitalizadas, una impresora multifuncional Epson L4260 con sistema continuo y un plotter. Además, se utilizó un equipo electrónico para almacenar y mostrar la información, compuesto por el siguiente hardware y software:

- Computadora portátil: Dell XPS 15
- Procesador: Intel(R) Core(TM) i7-9750H a 2.60GHz (6 núcleos)
- Memoria RAM: 32 GB
- Almacenamiento: 1 TB SSD
- Tarjeta gráfica: NVIDIA GeForce GTX 1650 con 4 GB de memoria

3.3.7. Programas de cómputo

Los diversos cálculos y el manejo de la información se realizaron mediante varios softwares, tales como:



3.3.7.1. QGIS v3.18

QGIS es un sistema de información geográfica de código abierto. El proyecto comenzó en mayo de 2002 y se convirtió en un proyecto de SourceForge en junio del mismo año. Desde entonces, se ha trabajado arduamente para hacer que este software GIS, que tradicionalmente es costoso y propietario, esté disponible para cualquier persona con acceso a una computadora personal. QGIS es compatible con la mayoría de las plataformas Unix, Windows y macOS.

3.3.7.2. R v3.6.3 y RStudio v1.3.959

R es un lenguaje y entorno para la computación estadística y gráficos. Ofrece una amplia variedad de técnicas estadísticas, como el modelado lineal y no lineal, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series temporales, clasificación y agrupación. Es muy extensible y se usa a menudo en la investigación de metodologías estadísticas. R es software libre disponible bajo la licencia pública general GNU de la Free Software Foundation y puede ejecutarse en sistemas FreeBSD, Linux, Windows y macOS. RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para R que incluye una consola, un editor de sintaxis, y herramientas para gráficos, historial, depuración y gestión del espacio de trabajo.

3.3.7.3. Minitab v20.4 (versión de prueba)

Minitab es un software especializado en análisis estadístico y visualización de datos, utilizado ampliamente en investigación científica, ingeniería y gestión de calidad. Este programa ofrece herramientas avanzadas para realizar análisis descriptivos, pruebas de hipótesis,



regresiones lineales y no lineales, y análisis multivariado. También permite la creación de gráficos estadísticos, como histogramas, gráficos de dispersión y gráficos de control, que facilitan la interpretación visual de los datos.

3.3.7.4. Microsoft Office 2016 (con licencia estudiantil)

Microsoft Office es una suite de aplicaciones ofimáticas para computadoras de escritorio, servidores y servicios para los sistemas operativos Microsoft Windows, Mac OS X, iOS, Android y Linux.

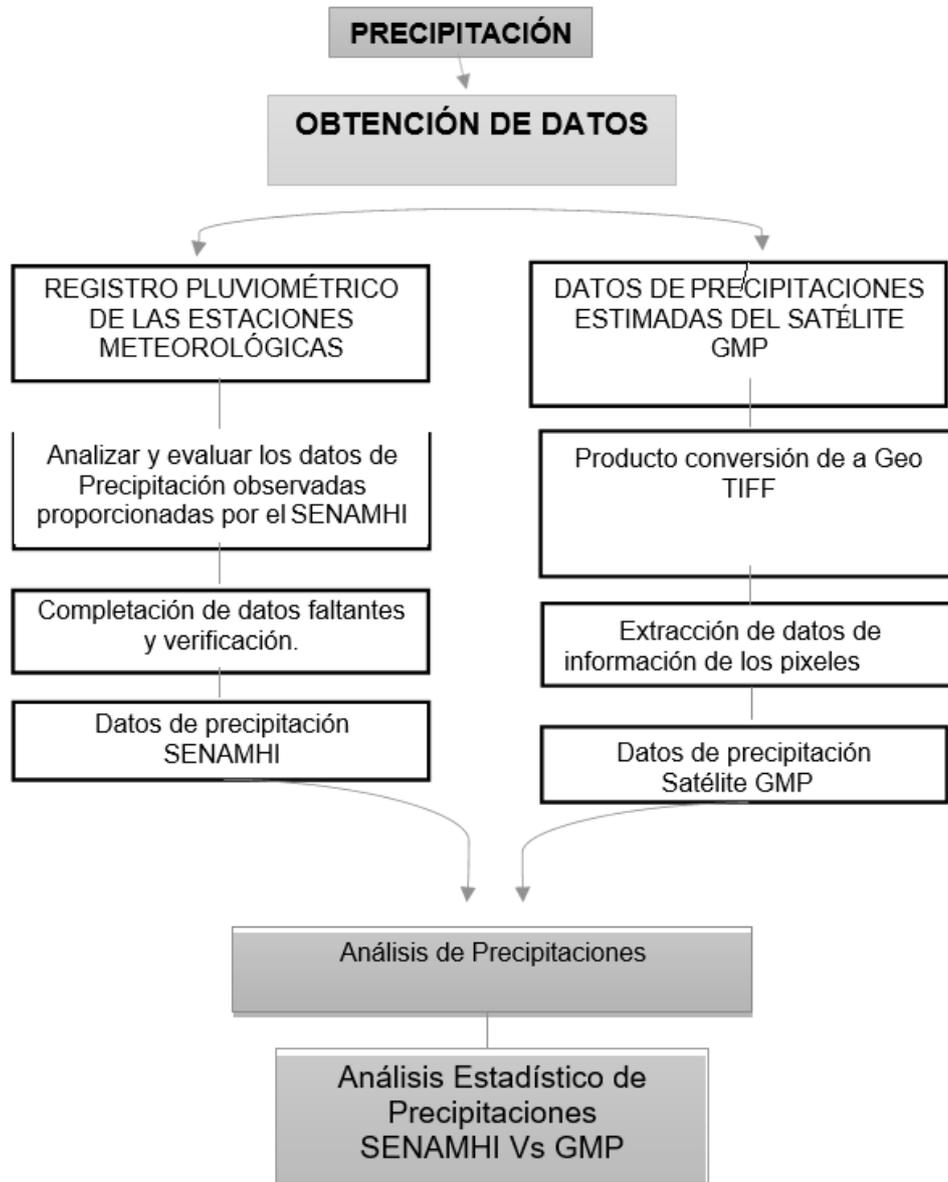
3.4. METODOLOGÍA

El presente estudio adoptó un enfoque cuantitativo y se aplicó un diseño no experimental y correlacional con el objetivo de analizar la correlación entre los datos de precipitaciones medias mensuales obtenidos a partir de estaciones meteorológicas y las estimaciones del satélite Global Precipitation Measurement (GPM).

En la **Figura 5** presenta el esquema general del proceso metodológico desarrollado. Este incluye las etapas de recopilación, procesamiento y análisis comparativo de datos de precipitación, destacando los procedimientos aplicados a las observaciones del SENAMHI y las estimaciones del satélite GPM.

Figura 5

Diagrama de flujo de la metodología



Nota: Este diseño metodológico asegura que los resultados obtenidos sean representativos.

A continuación, se detalla cada etapa del proceso metodológico:

3.4.1. Recopilación de datos meteorológicos

Los datos meteorológicos observados fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Estos incluyeron



registros mensuales de precipitación, correspondientes a 12 estaciones meteorológicas ubicadas estratégicamente en la cuenca Ilave – Puno.

Los datos recopilados abarcaron un periodo comprendido entre junio de 2000 y junio de 2021. Para asegurar la consistencia en las series temporales, se implementaron procesos de validación y completación de valores faltantes utilizando técnicas estadísticas avanzadas.

3.4.2. Adquisición de datos satelitales

Los datos satelitales fueron extraídos del producto IMERG v6 del satélite GPM, utilizando la plataforma Giovanni de la NASA. Este producto, reconocido por su resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, permitió obtener registros diarios que se agregaron a una escala mensual, alineando su temporalidad con los datos meteorológicos. Adicionalmente, se realizó un procesamiento previo de los datos, incluyendo la conversión a formato GeoTIFF y la extracción de información por píxeles correspondientes a las coordenadas de las estaciones meteorológicas.

3.4.3. Análisis Estadístico

Los datos recopilados y procesados fueron sometidos a un análisis de validación mediante curvas de doble masa, asegurando la homogeneidad de las series temporales provenientes de ambas fuentes. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis estadístico que incluyó las siguientes métricas:

3.4.3.1. Coeficiente de Correlación (r)

El coeficiente de correlación (r) se utilizará para determinar el grado de relación lineal entre las precipitaciones registradas por las estaciones meteorológicas y las estimadas por el satélite GPM. Este

coeficiente varía entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una fuerte correlación positiva, valores cercanos a -1 indican una fuerte correlación negativa, y valores cercanos a 0 indican una correlación débil o nula. Se calculará utilizando la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Donde X_i y Y_i son las precipitaciones medidas y estimadas, respectivamente, y \bar{X} y \bar{Y} son sus respectivas medias.

3.4.3.2. Coeficiente de Determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) indica la proporción de la varianza en las precipitaciones medidas que puede ser explicada por las precipitaciones estimadas. Este coeficiente varía entre 0 y 1, con valores cercanos a 1 indicando un alto grado de explicación. Se calcula como el cuadrado del coeficiente de correlación:

$$R^2 = r^2$$

3.4.3.3. PBIAS (Percentage Bias)

El PBIAS se utiliza para evaluar el sesgo sistemático en las estimaciones en comparación con los datos observados. Se calcula mediante la fórmula:

$$PBIAS = \frac{\sum(Y_i - X_i)}{\sum X_i} \times 100$$

Donde Y_i son las precipitaciones estimadas y X_i son las precipitaciones medidas.

Este índice proporciona una medida relativa del sesgo, expresado como un porcentaje de la media de las observaciones medidas (X_i).

3.4.3.4. Error Medio Cuadrático (RMSE)

El error medio cuadrático (RMSE) se utilizará para medir la magnitud promedio de los errores de predicción. Se calcula utilizando la fórmula:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - X_i)^2}{n}}$$

Donde n es el número total de observaciones.

Estas pruebas estadísticas se aplicarán a los datos de precipitaciones mensuales para el período comprendido entre junio de 2000 y junio de 2021. Los resultados de estas pruebas proporcionarán una evaluación detallada de la correlación y precisión de las estimaciones de precipitación obtenidas del satélite GPM en comparación con las mediciones de las estaciones meteorológicas del SENAMHI en la cuenca Ilave – Puno.

3.4.4. Interpretación de resultados

Finalmente, se interpretaron los resultados obtenidos del análisis estadístico, destacando la correlación significativa entre las precipitaciones estimadas por el satélite GPM y las medidas por las estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave – Puno. Este proceso metodológico contribuyó a validar el uso de datos satelitales como herramienta complementaria para estudios hidrológicos y climáticos en el ámbito de estudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta los resultados de la investigación: Determinar la correlación de las precipitaciones medias mensuales aplicando datos de satélite GMP y estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave – Puno; y posteriormente su discusión.

Como etapa preliminar al análisis comparativo, se detallará el análisis de las variables. La información de estas variables corresponde a los datos de precipitación total mensual, recopilados de doce estaciones meteorológicas, analizando su homogeneidad y luego sus errores estadísticos.

4.1. ANÁLISIS DE DOBLE MASA

Para el análisis de doble masa, se realizó en 05 grupos las estaciones meteorológicas, con el fin de obtener una comparación adecuada de las series de precipitaciones tal como se aprecia en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Agrupación y coordenadas de estaciones meteorológicas.

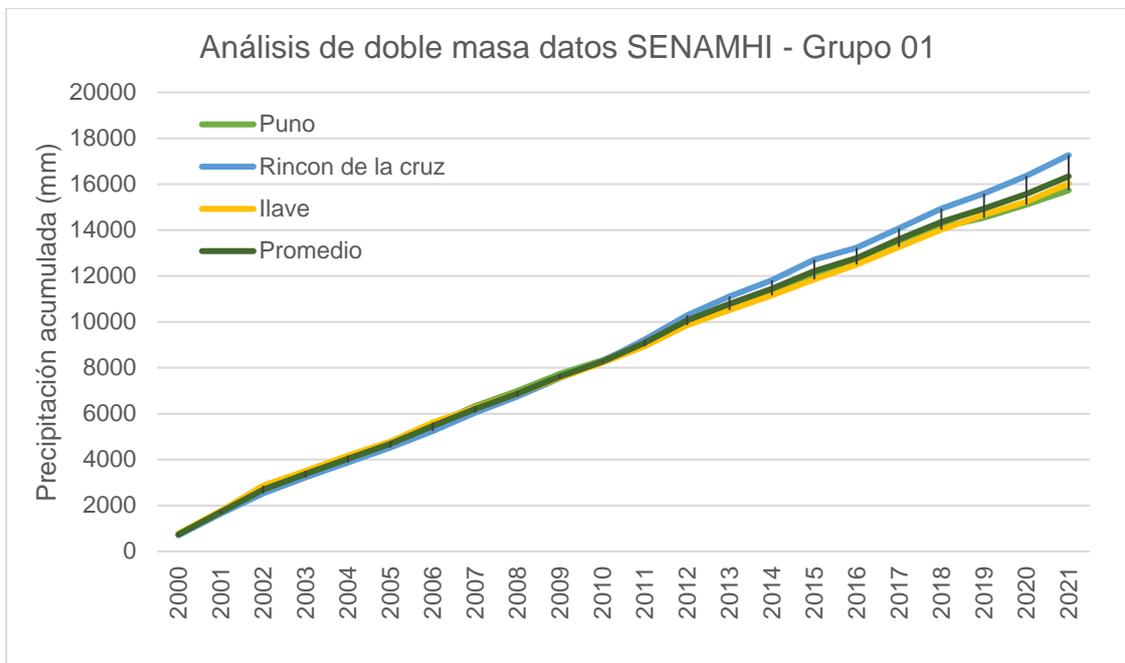
Nº	Grupo	Estaciones	Norte	Este
1		Puno	8250022.65	391617.70
2	1	Rincón de la Cruz	8231937.13	413241.13
3		Ilave	8221195.27	431019.57
4		Juli	8208468.60	450842.53
5	2	Desaguadero	8168747.95	495857.00
6		Mañazo	8252723.44	355407.10
7	3	Laraqueri	8213657.74	385967.18
8		Mazo cruz	8149061.24	424737.79
9	4	Pizacoma	8130693.26	460750.24
10		Pampa Umalzo	8133726.09	348358.99
11	5	Vilacota	8107052.51	388211.12
12		Capazo	8099529.66	421787.57

Nota: Ubicación geográfica las coordenadas geográficas y coordenadas UTM (WGS84).

La utilización de las curvas de masa para analizar la proporcionalidad en todas las estaciones se distribuyó en 05 grupos cercanos entre sí como se aprecia en las Figura 6 a la Figura 15. Asimismo, se presenta una buena correlación entre todas las estaciones, sin saltos y quiebres que representen una homogeneidad en las series mensuales, lo cual se aprecia en las gráficas de doble masa.

Figura 6

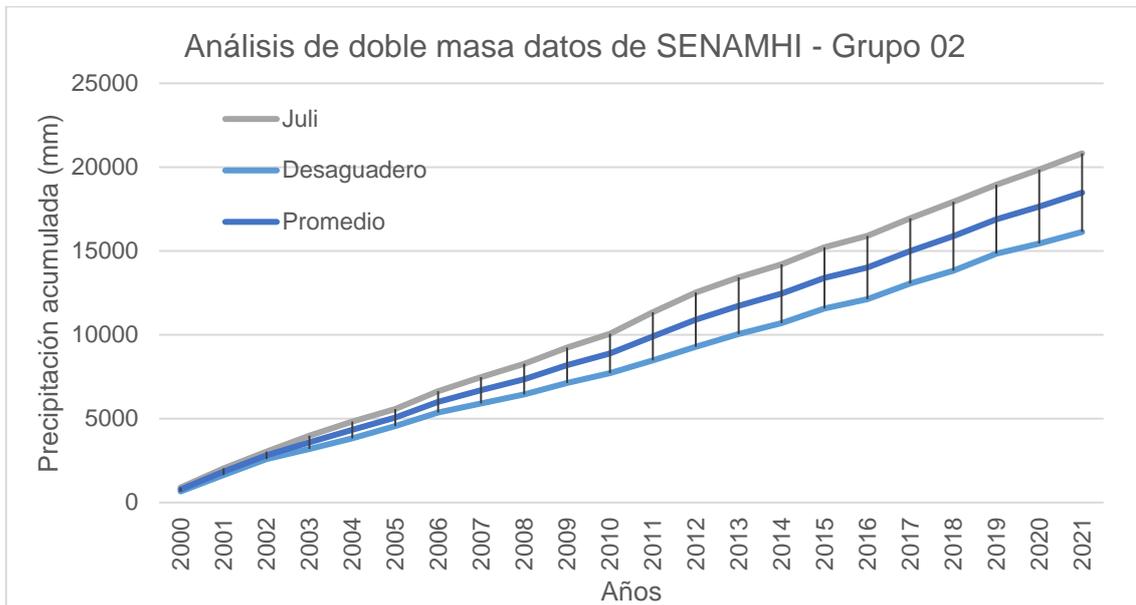
Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 01.



Nota: *Nota.* Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del SENAMHI de las estaciones Puno, Rincón de la cruz e Ilave, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Figura 7

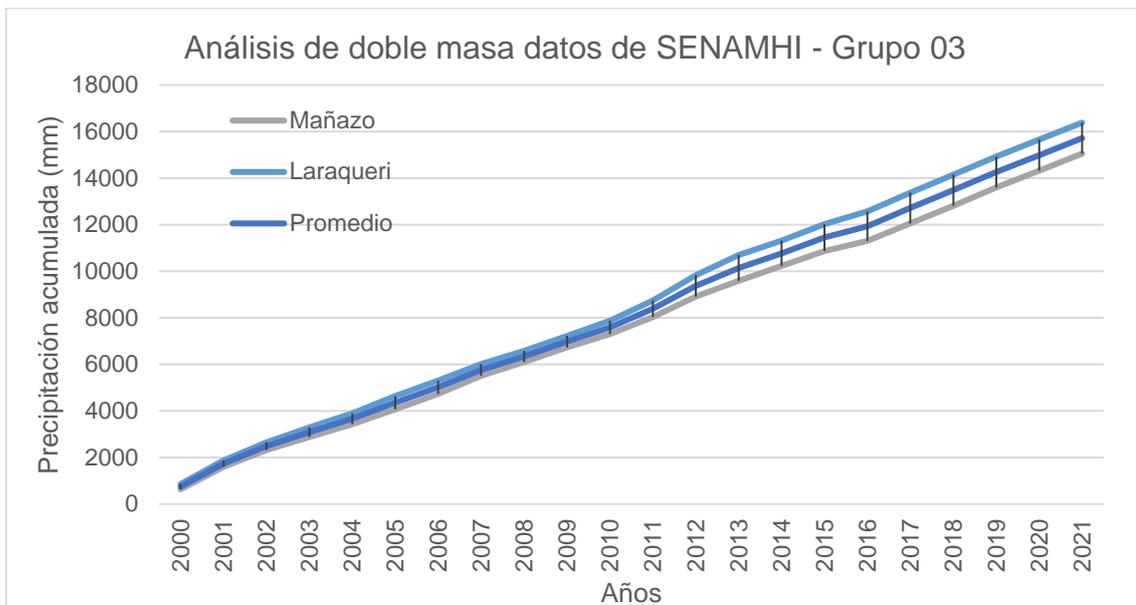
Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 02.



Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del SENAMHI de las estaciones Juli y Desaguadero, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Figura 8

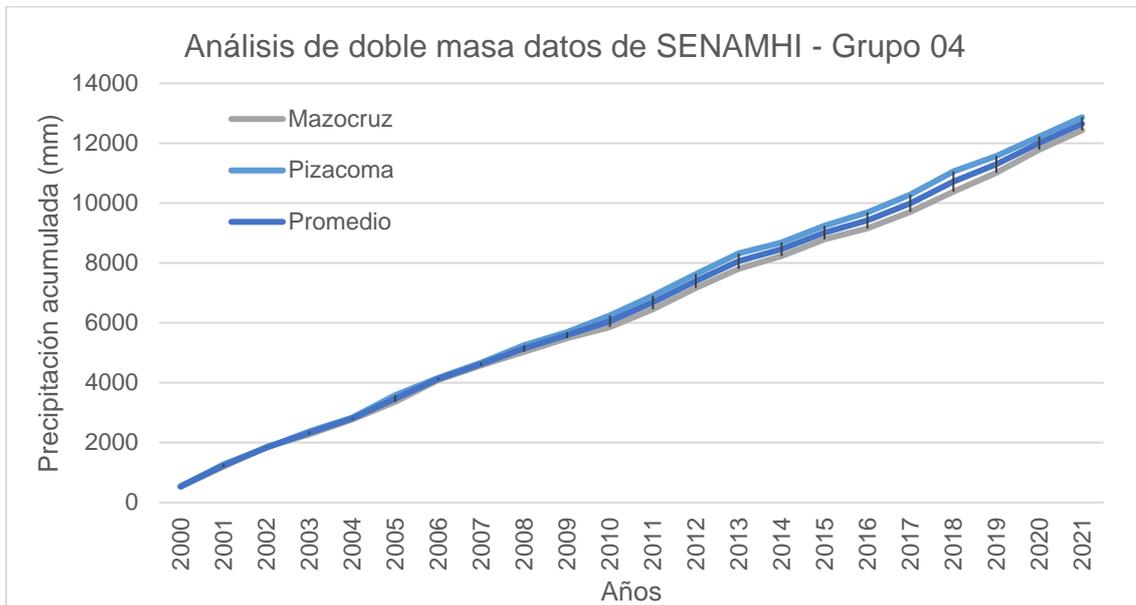
Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 03.



Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del SENAMHI de las estaciones Mañazo y Laraqueri, se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Figura 9

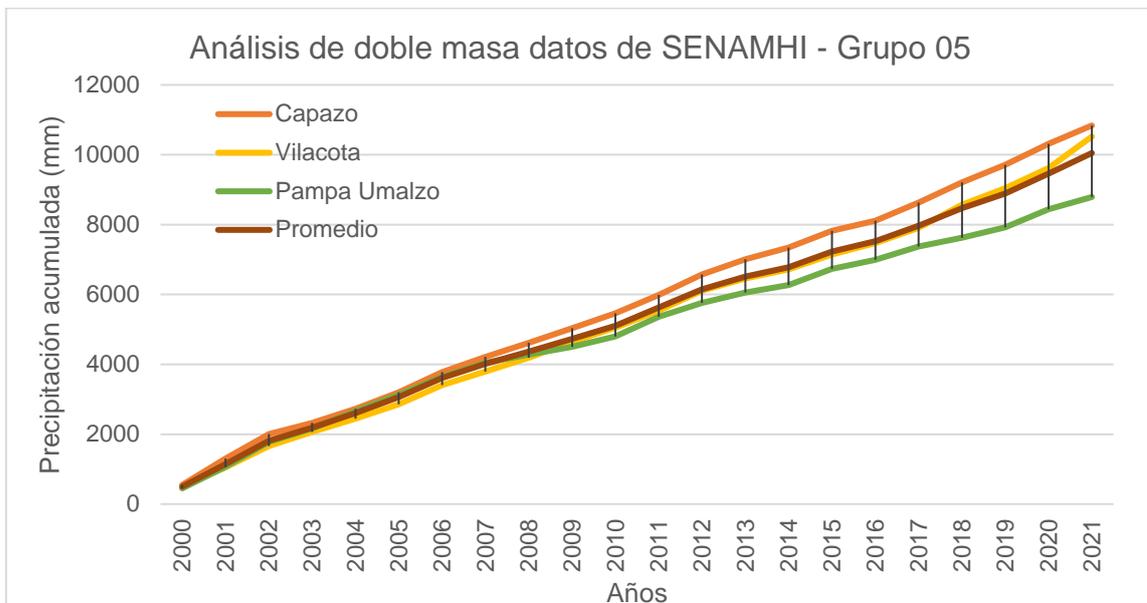
Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 04.



Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del SENAMHI de las estaciones Mazocruz y Pizacoma, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Figura 10

Doble masa de datos del SENAMHI de las estaciones del Grupo 05.

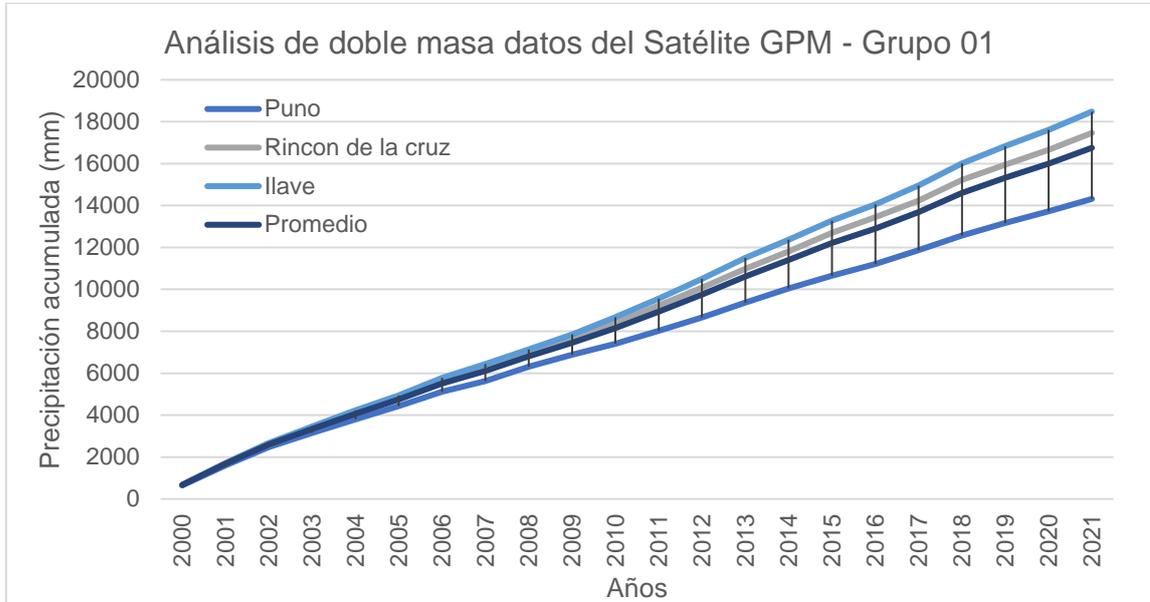


Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del SENAMHI de las estaciones Capazo, Vilacota y Pampa Umalzo, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

A continuación, se presenta los resultados del análisis de doble masa para los registros provenientes del satélite GPM (IMERG):

Figura 11

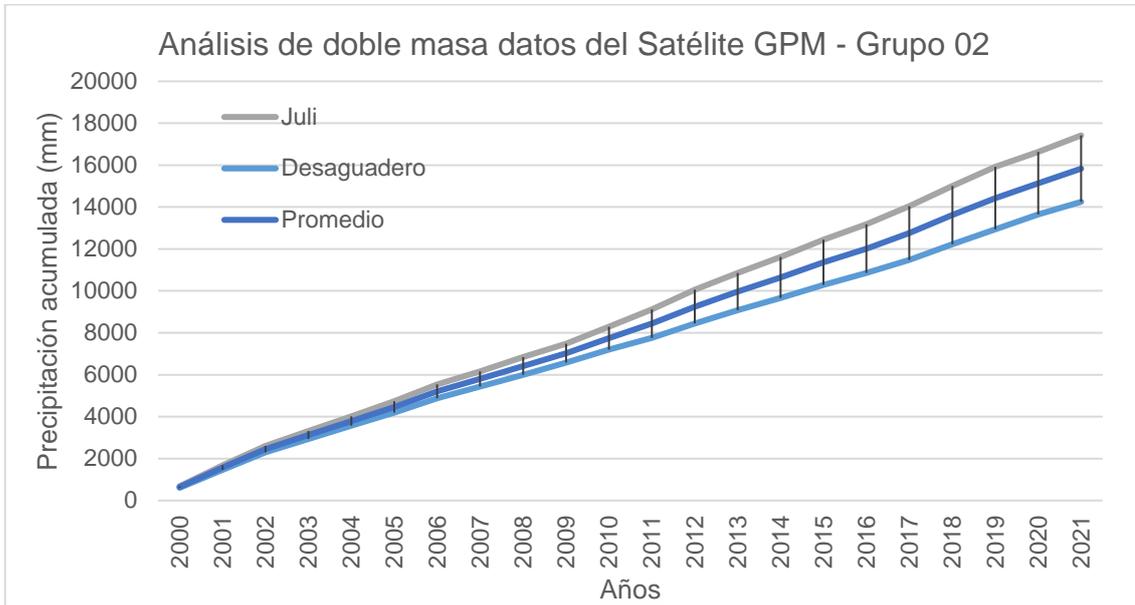
Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 01.



Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del Satélite GPM de las estaciones Puno, Rincón de la cruz e Ilave, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Figura 12

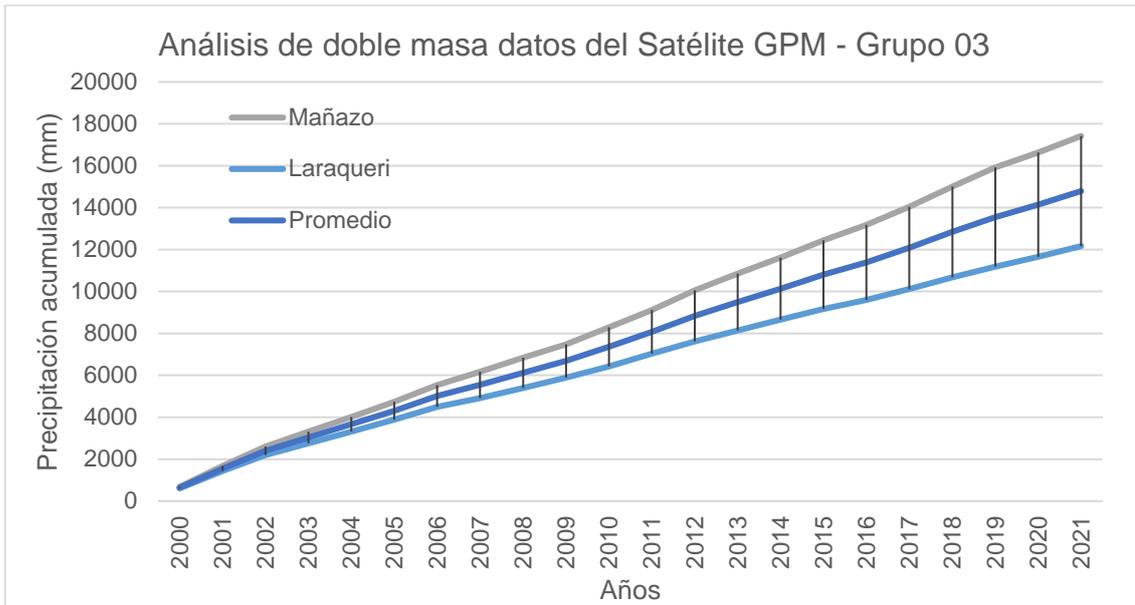
Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 02.



Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del Satélite GPM de las estaciones Juli y Desaguadero, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Figura 13

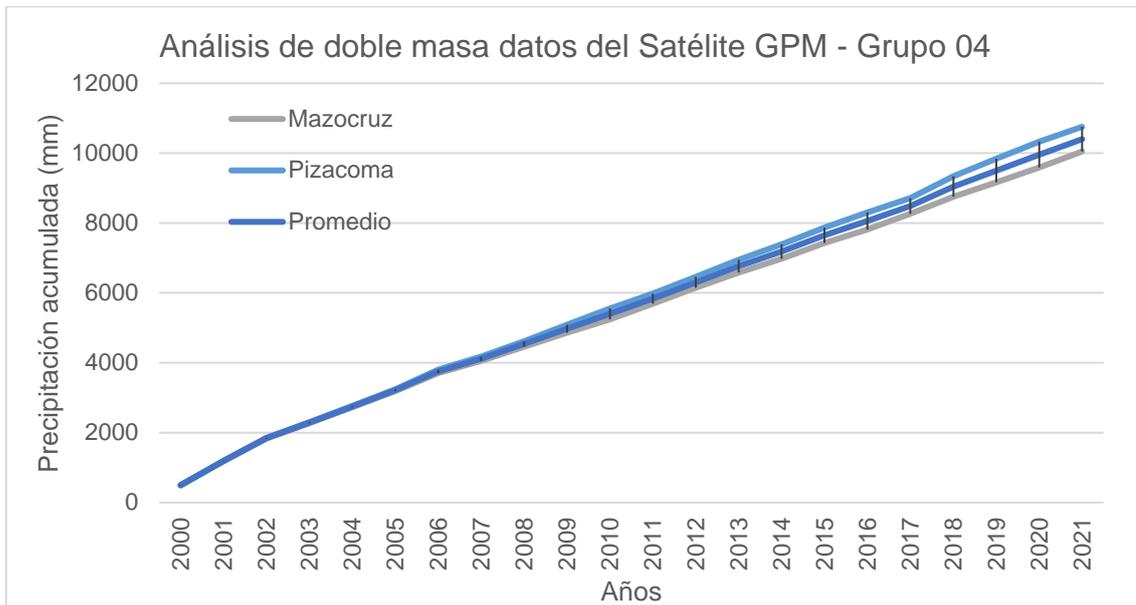
Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 03.



Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del Satélite GPM de las estaciones Mañazo y Laraqueri, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Figura 14

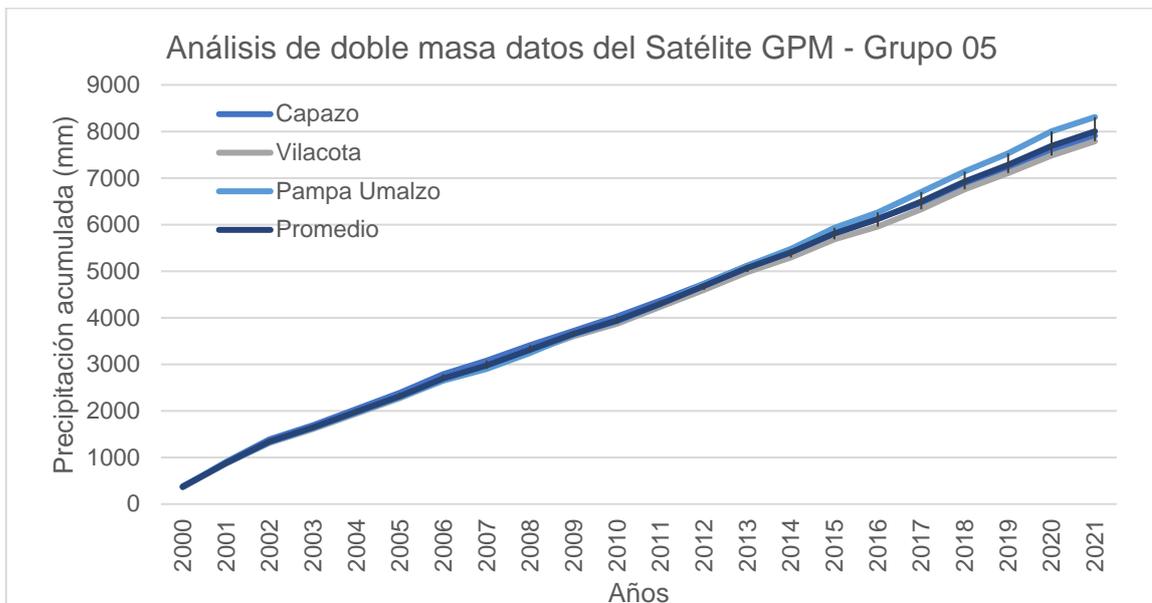
Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 04.



Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del Satélite GPM de las estaciones Mazocruz y Pizacoma, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Figura 15

Doble masa de datos del Satélite GPM de las estaciones del Grupo 05.



Nota: Se representa la curva de doble masa de las precipitaciones observadas del Satélite GPM de las estaciones Capazo, Vilacota y Pampa Umalzo, donde se aprecia una buena homogeneidad de líneas en la gráfica.

Del análisis de sobre masa aplicado a los registros provenientes del SENAMHI y del Satélite GPM (IMERG) se observa la linealidad de los registros, considerando que los datos son consistentes.

4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE DATOS

La comparación cuantitativa entre los datos estimados por el satélite con los datos observados por las estaciones se analizó con; Eficiencia de Nash-Sutcliffe, Raíz del error medio cuadrado y porcentaje de sesgo (pBIAS).

4.2.1. Eficiencia de Nash-Sutcliffe

El desempeño de modelos hidrológicos al comparar los valores observados con los valores de las estaciones de SENAMHI con los registro de los datos Satelitales GPM, se muestran a continuación en la Tabla 2 y Figura 16:

Tabla 2

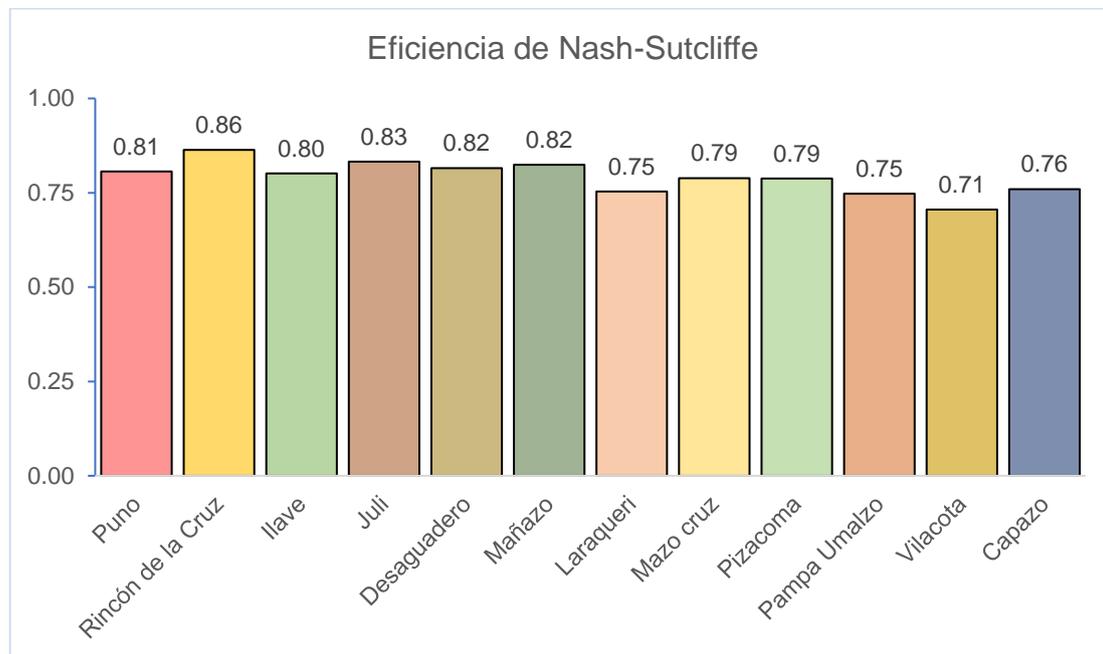
Eficiencia de Nash-Sutcliffe para diferentes estaciones:

Estación	Ubicación		NSE
	Norte	Este	
Puno	8250022.65	391617.70	0.81
Rincón de la Cruz	8231937.13	413241.13	0.86
Ilave	8221195.27	431019.57	0.80
Juli	8208468.60	450842.53	0.83
Desaguadero	8168747.95	495857.00	0.82
Mañazo	8252723.44	355407.10	0.82
Laraqueri	8213657.74	385967.18	0.75
Mazo cruz	8149061.24	424737.79	0.79
Pizacoma	8130693.26	460750.24	0.79
Pampa Umalzo	8133726.09	348358.99	0.75
Vilacota	8107052.51	388211.12	0.71
Capazo	8099529.66	421787.57	0.76

Nota: Elaboración propia, Coordenadas UTM (GSM-84).

Figura 16

Comparativo de eficiencia de Nash-Sutcliffe para diferentes estaciones.



Nota: La comparación de Nash-Sutcliffe para las estaciones es un buen indicador.

Se aprecia que los registros provenientes del satélite GPM (IMERG) tienen un desempeño “bueno” en relación a los registros de SENAMHI sobre un NSE de 0.71 para todas las estaciones y con un valor máximo de 0.86 en la estación Rincón de la Cruz.

4.2.2. Raíz del error medio cuadrado

El RMSE se logró un valor mínimo de 23.74 en la estación Vilacota y un valor de 36.32 en la estación Juli al tener esos valores relativamente bajo, representan que los datos simulados están generando buenas estimaciones que son óptimos como se aprecia en la Tabla 3 y Figura 17.

Tabla 3

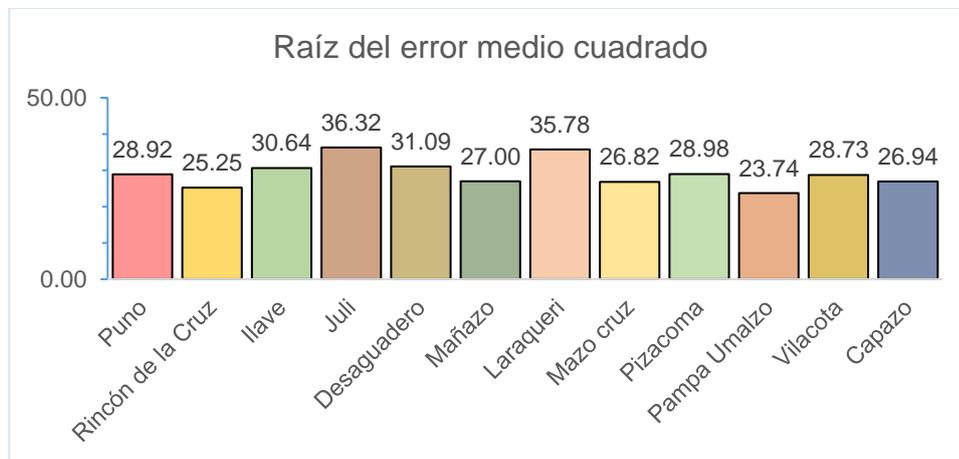
RMSE para diferentes estaciones:

Estación	Ubicación		RMSE
	Norte	Este	
Puno	8250022.65	391617.70	28.92
Rincón de la Cruz	8231937.13	413241.13	25.25
Ilave	8221195.27	431019.57	30.64
Juli	8208468.60	450842.53	36.32
Desaguadero	8168747.95	495857.00	31.09
Mañazo	8252723.44	355407.10	27.00
Laraqueri	8213657.74	385967.18	35.78
Mazo cruz	8149061.24	424737.79	26.82
Pizacoma	8130693.26	460750.24	28.98
Pampa Umalzo	8133726.09	348358.99	23.74
Vilacota	8107052.51	388211.12	28.73
Capazo	8099529.66	421787.57	26.94

Nota: En Coordenadas UTM (GSM-84).

Figura 17

Comparativo de eficiencia de RMSE para diferentes estaciones.



Nota: *RMSE para diferentes estaciones.*

4.2.3. Porcentaje de sesgo (pBIAS).

En BIAS la estación óptima es Puno con menor magnitud (cerca a cero) el cual indica que tiene una buena correlación de 0.09 igual a 9%, en la mayoría de estaciones el sesgo permanece entre 0 a 1.15, de los datos analizados. En la

Tabla 4 y Figura 18 se aprecia el valor más alto es 8.12 correspondiente a la estación Juli.

Tabla 4

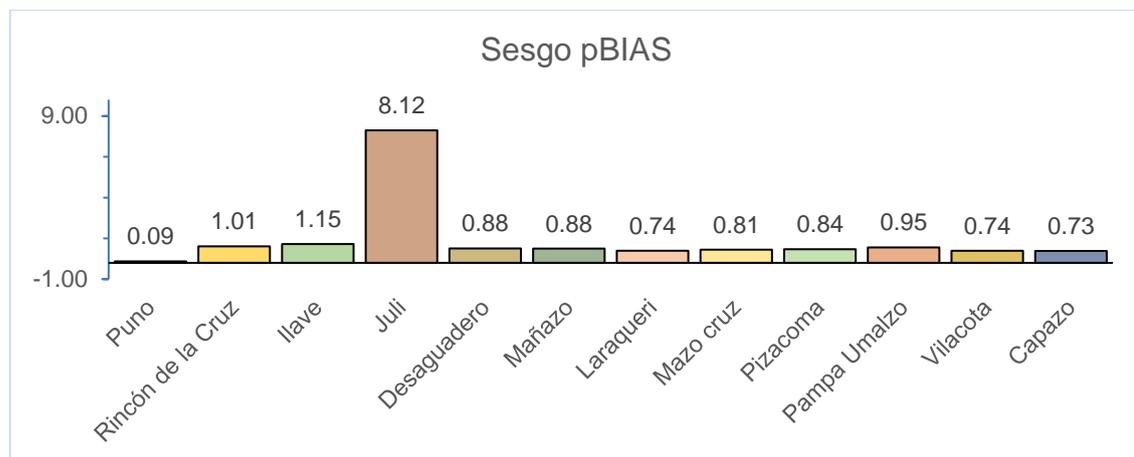
pBIAS para diferentes estaciones:

Estación	Ubicación		BIAS
	Norte	Este	
Puno	8250022.65	391617.70	0.09
Rincón de la Cruz	8231937.13	413241.13	1.01
Ilave	8221195.27	431019.57	1.15
Juli	8208468.60	450842.53	8.12
Desaguadero	8168747.95	495857.00	0.88
Mañazo	8252723.44	355407.10	0.88
Laraqueri	8213657.74	385967.18	0.74
Mazo cruz	8149061.24	424737.79	0.81
Pizacoma	8130693.26	460750.24	0.84
Pampa Umalzo	8133726.09	348358.99	0.95
Villacota	8107052.51	388211.12	0.74
Capazo	8099529.66	421787.57	0.73

Nota: Realizado en Coordenadas UTM (GSM-84).

Figura 18

Comparativo de eficiencia de BIAS para diferentes estaciones.



Nota: Eficiencia de BIAS para diferentes estaciones

En el análisis estadístico realizado, se evaluaron los errores de las precipitaciones estimadas por el satélite GPM (IMERG) en comparación con los datos observados por las estaciones meteorológicas del SENAMHI en la cuenca

Ilave – Puno. En la Tabla 4 se presenta los indicadores utilizados para esta evaluación fueron la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) y el Porcentaje de Sesgo (BIAS). A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 4

Cuadro resumen de los errores estadísticos de las diferentes estaciones

Estación	Ubicación		NSE	RMSE	BIAS
	Norte	Este			
Puno	8250022.65	391617.70	0.81	28.92	0.09
Rincón de la Cruz	8231937.13	413241.13	0.86	25.25	1.01
Ilave	8221195.27	431019.57	0.80	30.64	1.15
Juli	8208468.60	450842.53	0.83	36.32	8.12
Desaguadero	8168747.95	495857.00	0.82	31.09	0.88
Mañazo	8252723.44	355407.10	0.82	27.00	0.88
Laraqueri	8213657.74	385967.18	0.75	35.78	0.74
Mazo cruz	8149061.24	424737.79	0.79	26.82	0.81
Pizacoma	8130693.26	460750.24	0.79	28.98	0.84
Pampa Umalzo	8133726.09	348358.99	0.75	23.74	0.95
Vilacota	8107052.51	388211.12	0.71	28.73	0.74
Capazo	8099529.66	421787.57	0.76	26.94	0.73

Nota: Elaboración propia, Coordenadas UTM (GSM-84).

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE): Este indicador evalúa la capacidad del modelo para reproducir los datos observados. Los valores obtenidos en las estaciones meteorológicas varían entre 0.71 (Vilacota) y 0.86 (Rincón de la Cruz), siendo considerados "buenos" en la mayoría de las estaciones. Esto refleja que las estimaciones del satélite GPM tienen un desempeño aceptable en la representación de las precipitaciones mensuales.

Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE): El RMSE mide la magnitud promedio del error entre los valores observados y los estimados. Los resultados muestran que los valores oscilan entre 23.74 mm (Pampa Umalzo) y 36.32 mm



(Juli). Los errores más bajos indican que las estimaciones son consistentes con los datos observados.

Porcentaje de Sesgo (BIAS): Este indicador evalúa las tendencias sistemáticas en las estimaciones. Los valores de BIAS varían entre 0.09 (Puno) y 8.12 (Juli), siendo Puno la estación más precisa con un sesgo cercano a cero. Aunque Juli presenta el mayor sesgo, la mayoría de las estaciones tienen valores bajos de BIAS, indicando una adecuada representación de las precipitaciones.

4.3. VALIDACIÓN GRÁFICA DE SERIES TEMPORALES

4.3.1. En relación con el primer objetivo específico

Para el presente trabajo de investigación se ha realizado una gráfica de series de tiempos de estaciones pluviométricas, con el fin de comparar los registros de las estaciones administradas por SENAMHI y con los registros provenientes del satélite GPM (IMERG). Desde la Figura 19 a la Figura 30, se presenta un análisis visual de las distribuciones temporales de toda la información hidrometeoro lógica disponible para detectar la regularidad o la irregularidad de los mismos.

Figura 19

Serie de tiempo con registros de la estación Puno con GPM.

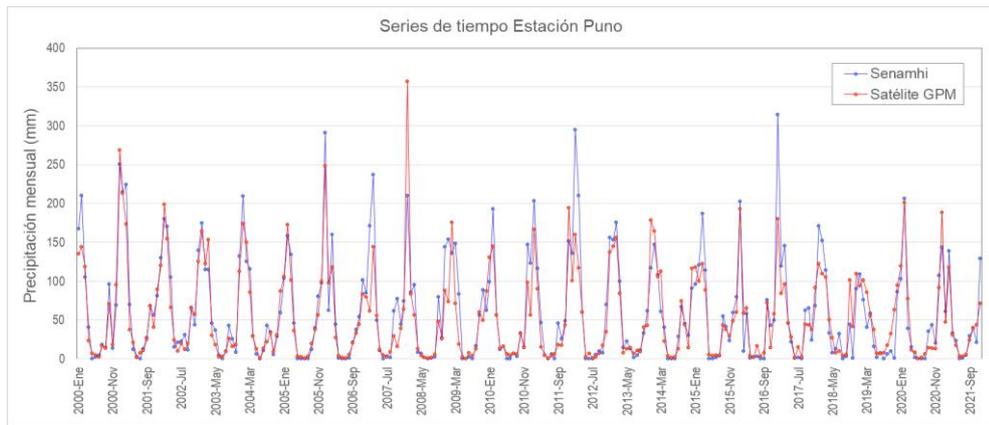


Figura 20

Serie de tiempo con registros de la estación Capazo con GPM.

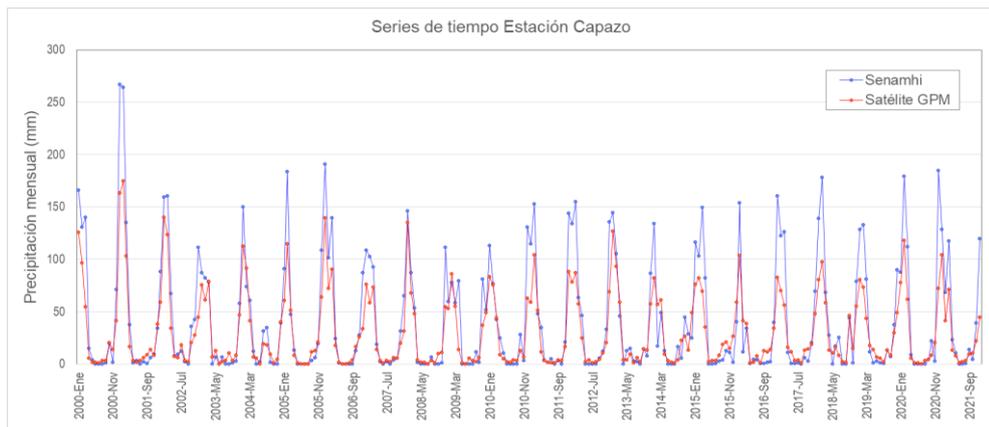


Figura 21

Serie de tiempo con registros de la estación Desaguadero con GPM.

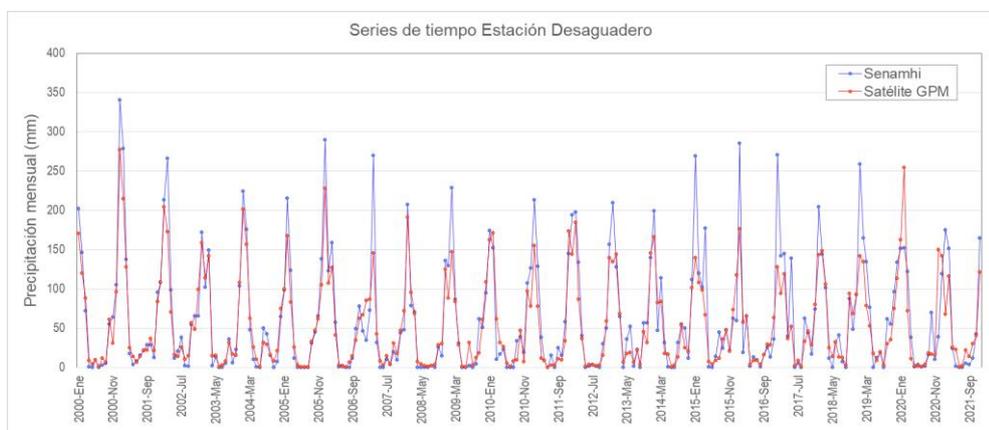


Figura 22

Serie de tiempo con registros de la estación Ilave con GPM.

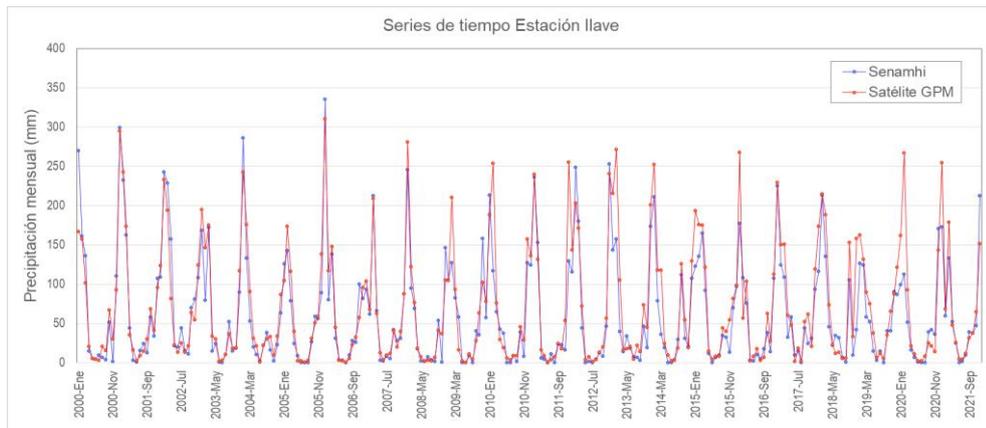


Figura 23

Serie de tiempo con registros de la estación Juli con GPM.

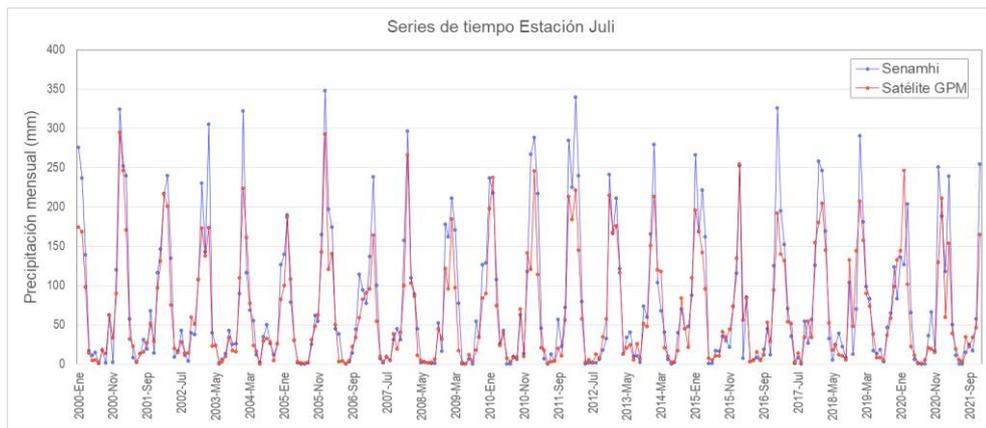


Figura 24

Serie de tiempo con registros de la estación Laraqueri con GPM.

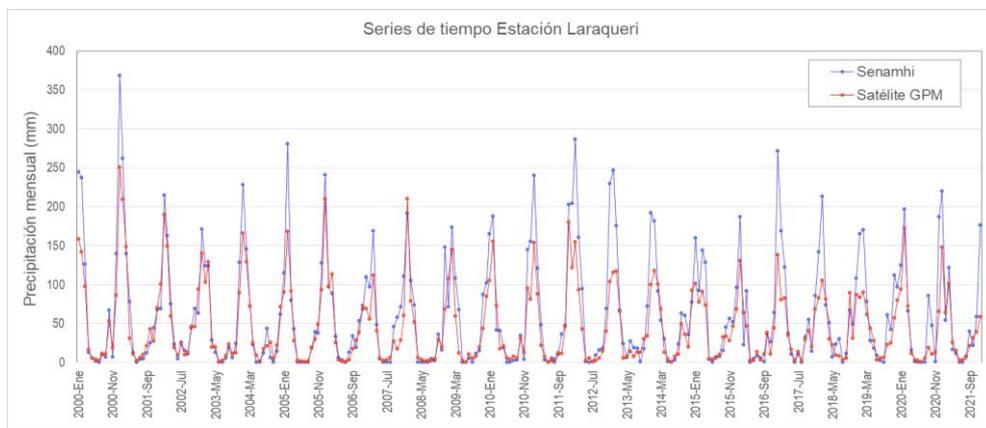


Figura 25

Serie de tiempo con registros de la estación Mañazo con GPM.

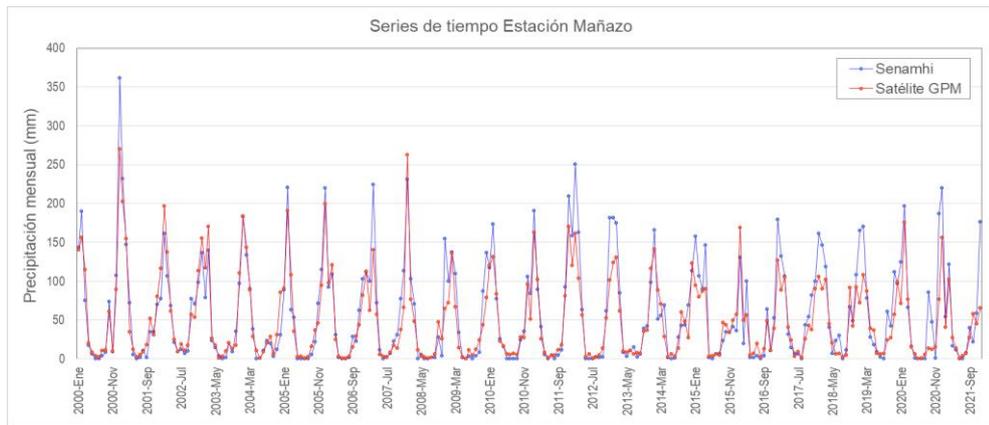


Figura 26

Serie de tiempo con registros de la estación Mazocruz con GPM.

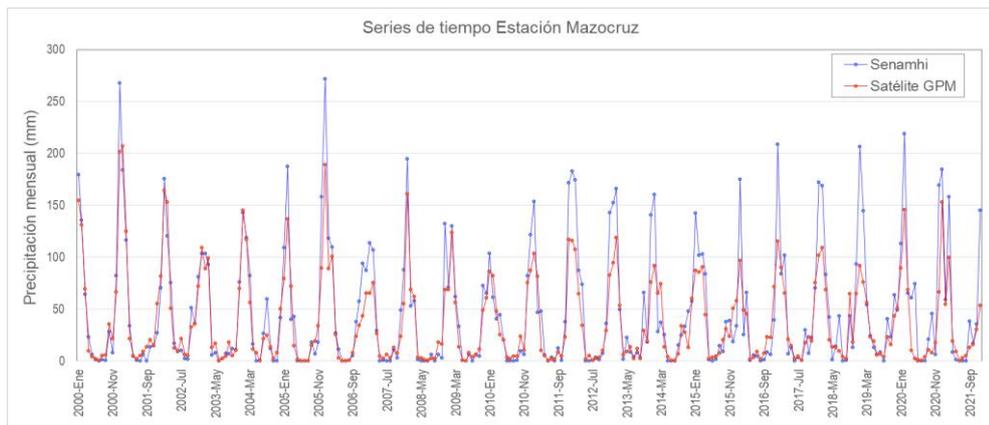


Figura 27

Serie de tiempo con registros de la estación Pampa Umalzo con GPM.

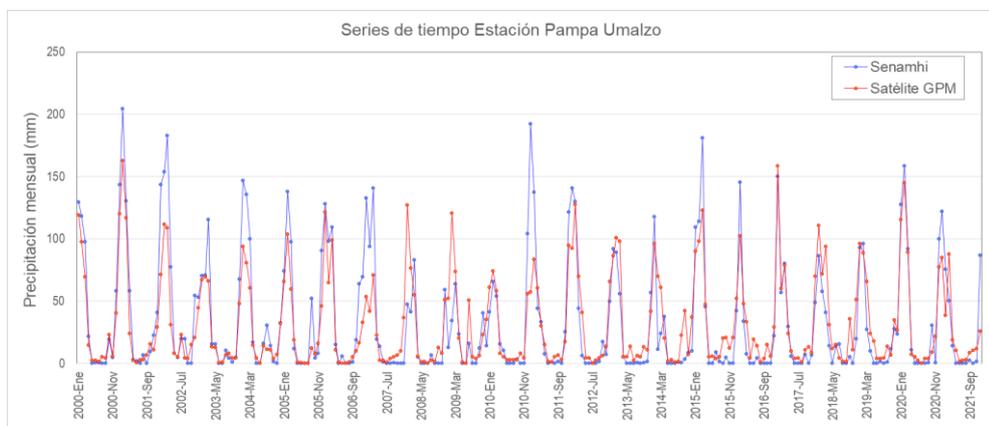


Figura 28

Serie de tiempo con registros de la estación Pizacoma con GPM.

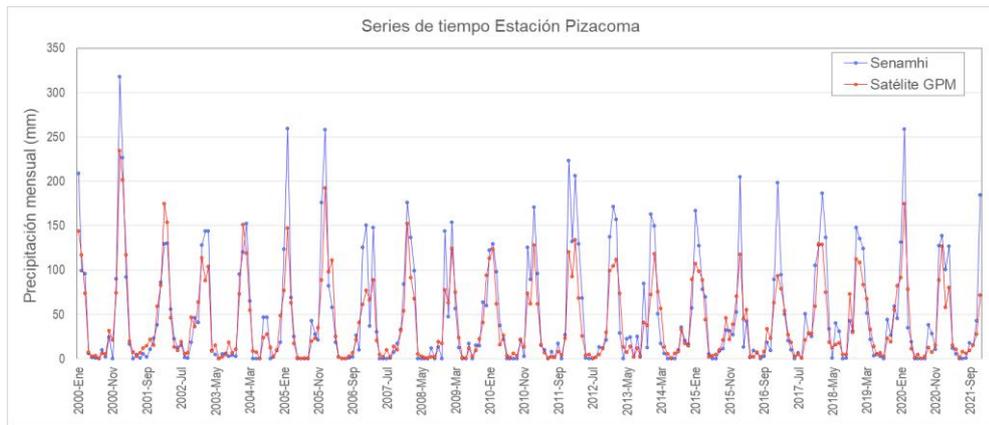


Figura 29

Serie de tiempo con registros de la estación Rincón de la Cruz con GPM.

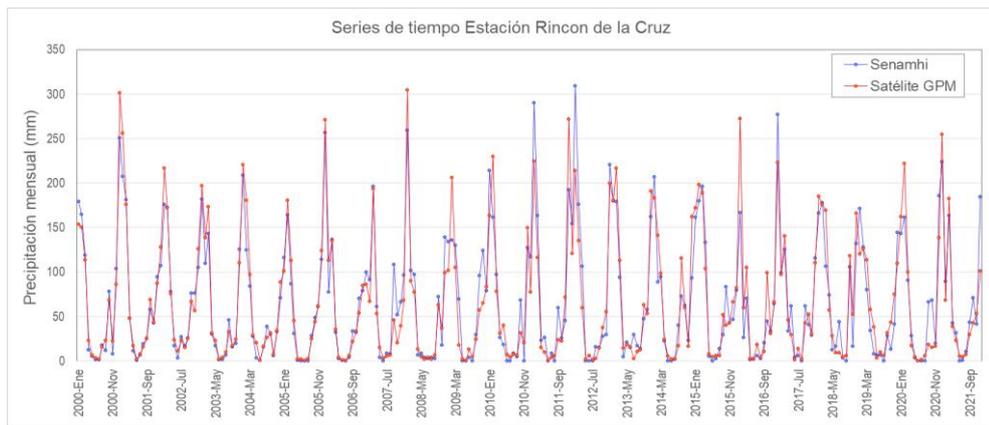
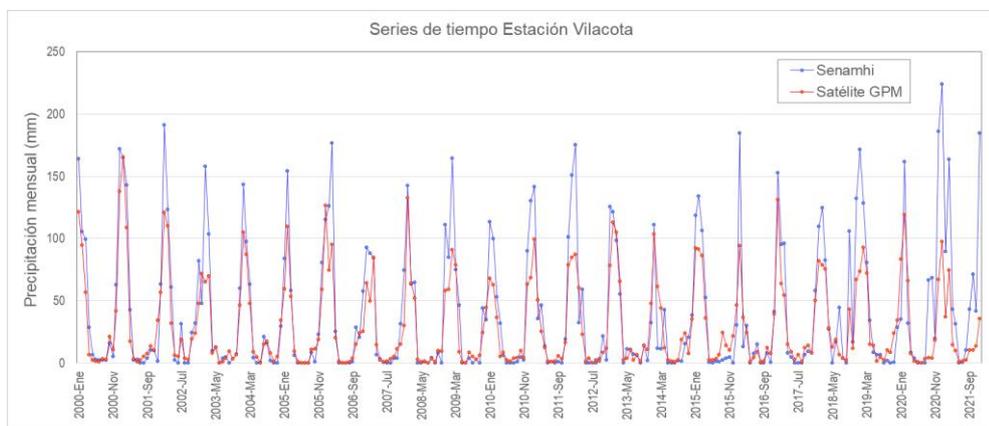


Figura 30

Serie de tiempo con registros de la estación Vilacota con GPM.



De acuerdo a los histogramas de datos de precipitaciones media mensuales medidos por el satélite GPM (IMERG) y estaciones meteorológicas, se puede apreciar que tienen el mismo comportamiento en la cuenca Ilave - Puno.

4.3.2. En relación con el segundo objetivo específico

Para la determinación el coeficiente de determinación (r^2) de datos precipitación media mensual medidos por el satélite GMP (IMERG) con respecto a los datos de precipitación media mensual medidos por estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave, para este objetivo se utilizó las evaluaciones estadísticas como el coeficiente de correlación (CC) y el coeficiente de determinación (R^2) los cuales se muestran en las Figura 31 a la Figura 54.

4.3.2.1. Estación Puno

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 31

Gráfica de matriz de dispersión en la estación de Puno.

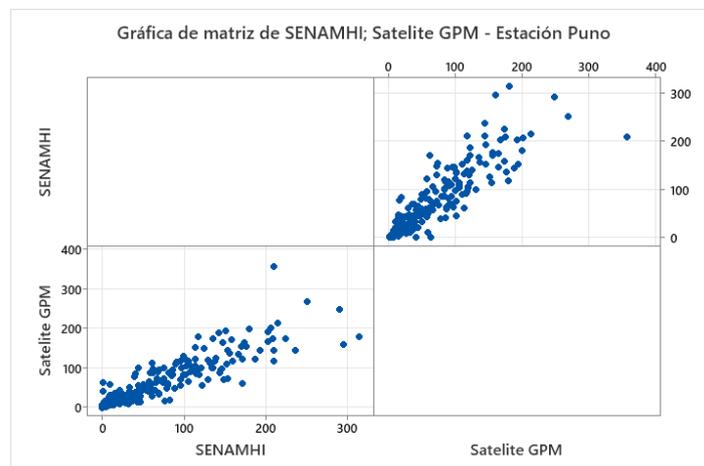
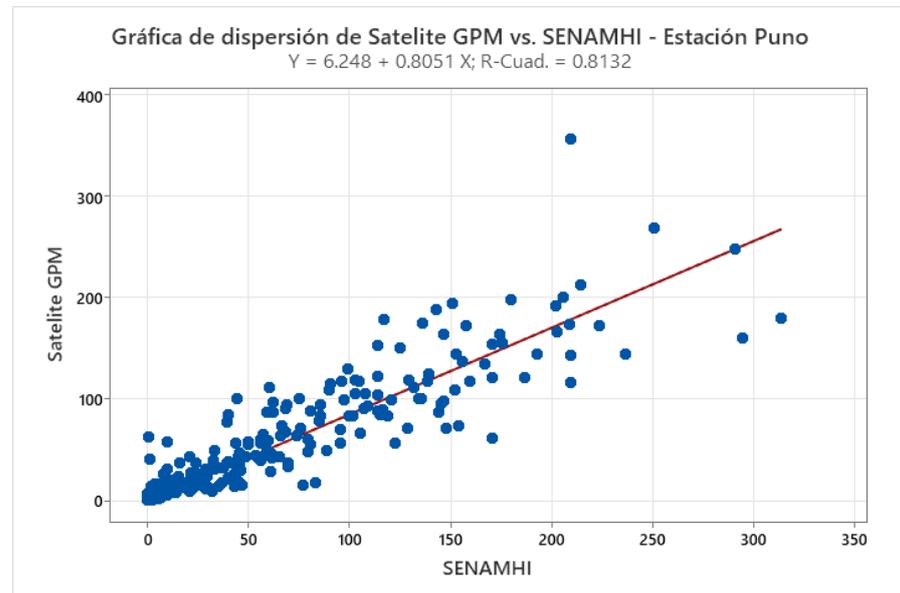


Figura 32

Gráfica de dispersión en la estación de Puno.



Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8132$ indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 81.32% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.2. Estación Rincón de la Cruz

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 33

Gráfica de matriz de dispersión en la estación de Rincón de la Cruz.

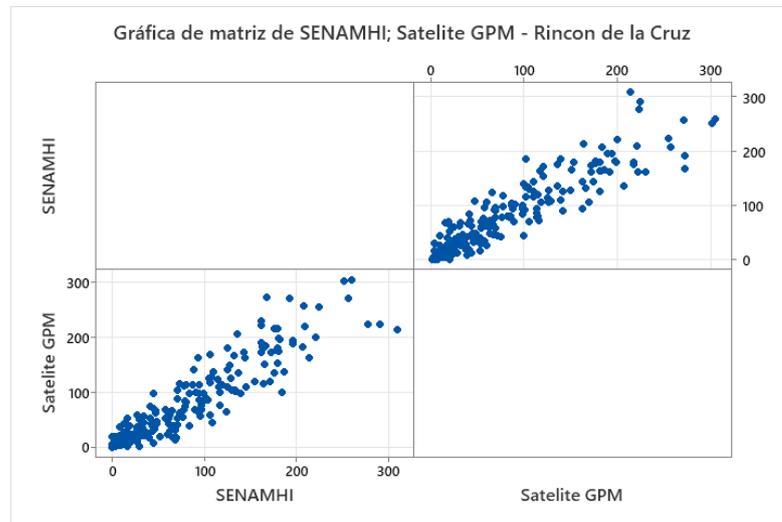
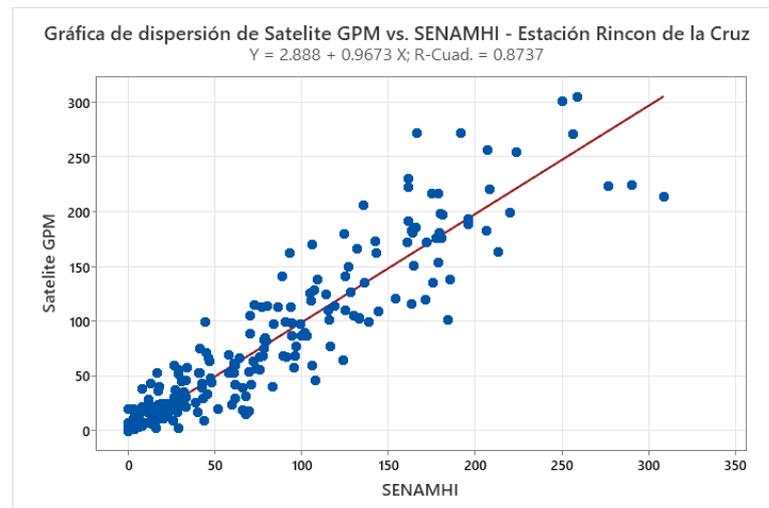


Figura 34

Gráfica de dispersión en la estación de Rincón de la Cruz.



4.3.2.3. Estación Capazo

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 35

Grafica de matriz de dispersión en la estación Capazo

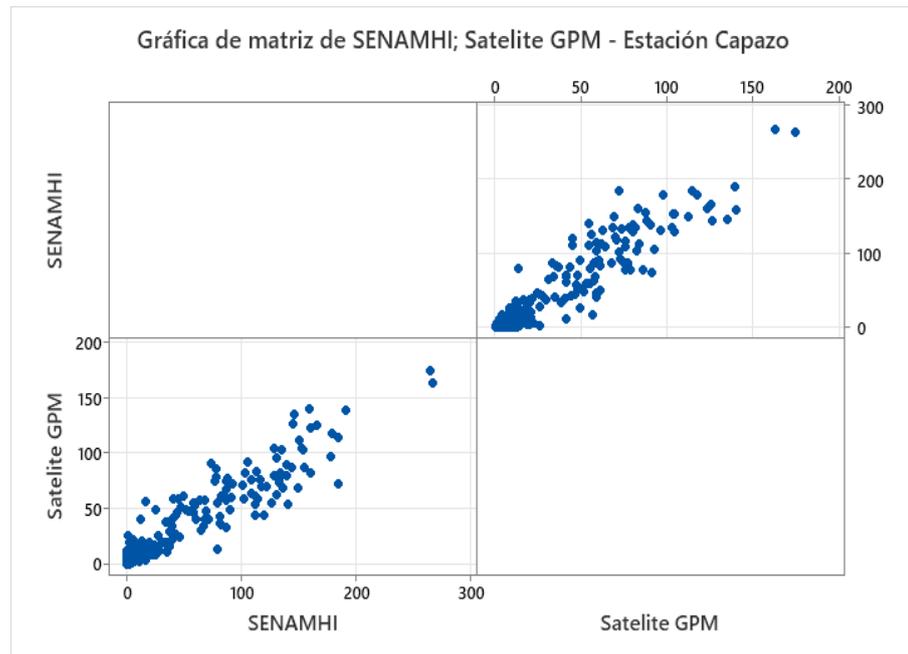
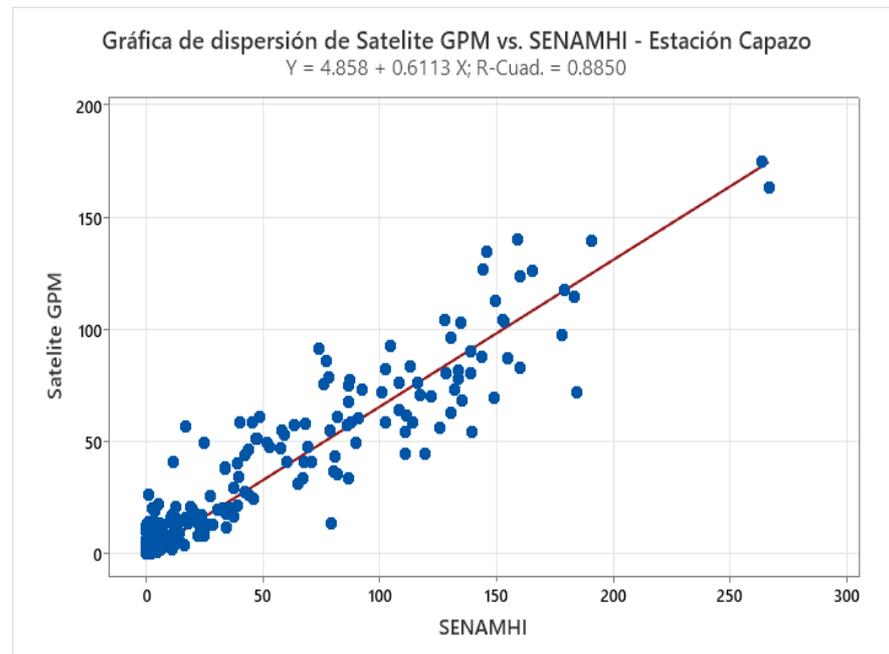


Figura 36

Grafica de dispersión en la estación Capazo



Nota: Fuente Propia

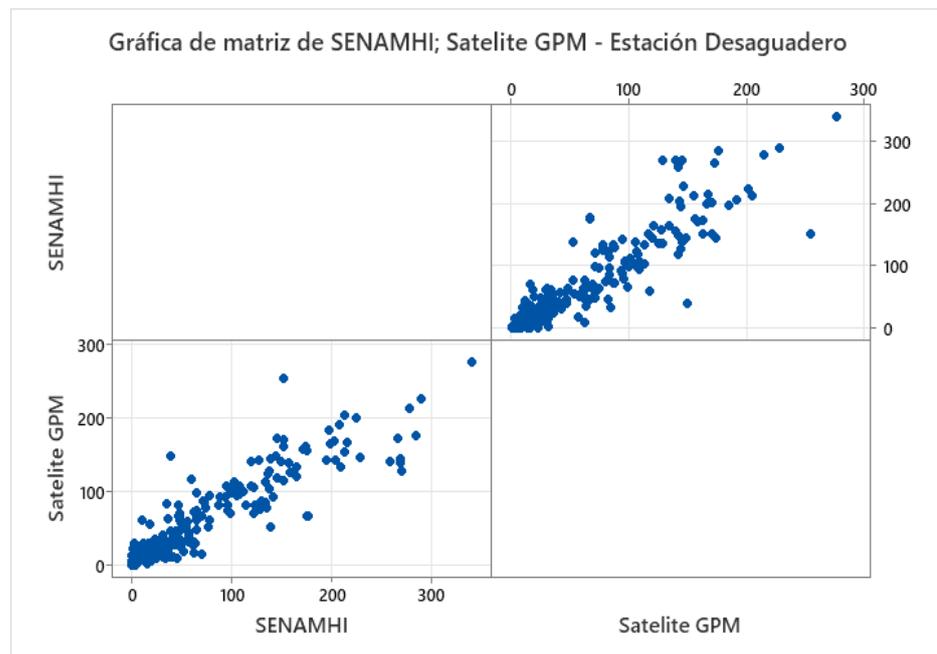
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8850$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 88.50% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.4. Estación Desaguadero

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 37

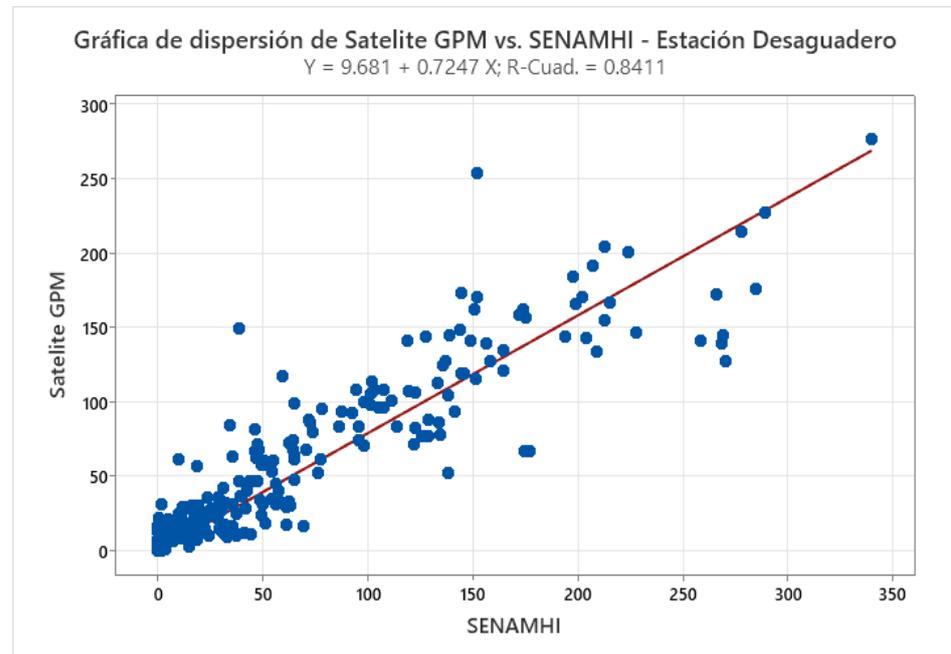
Gráfica de matriz de dispersión en la estación Desaguadero



Nota: Fuente Propia

Figura 38

Gráfica de dispersión en la estación Desaguadero



Nota: Fuente Propia

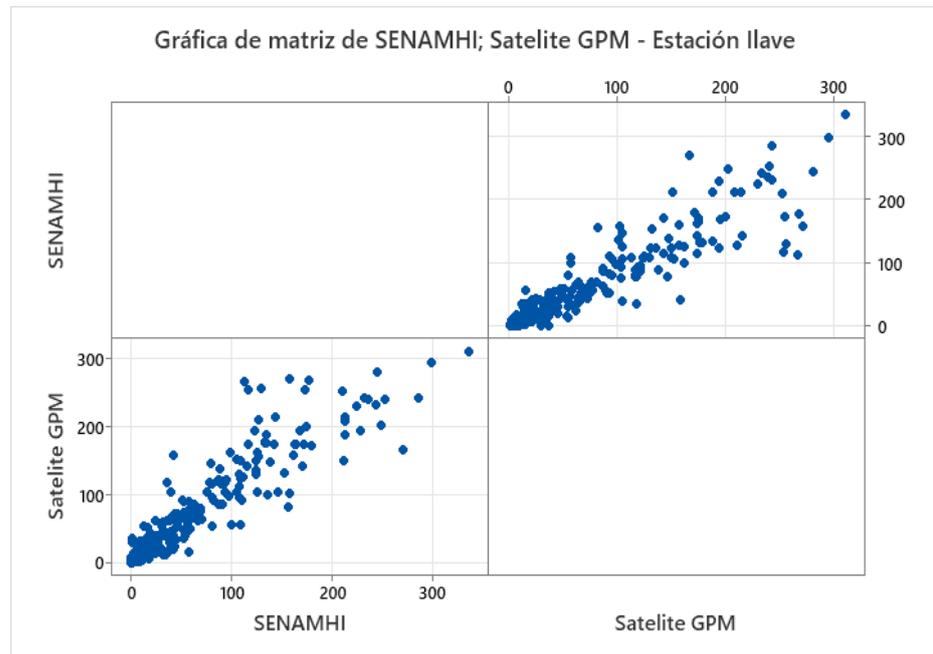
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8411$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 84.11% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.5. Estación Ilave

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 39

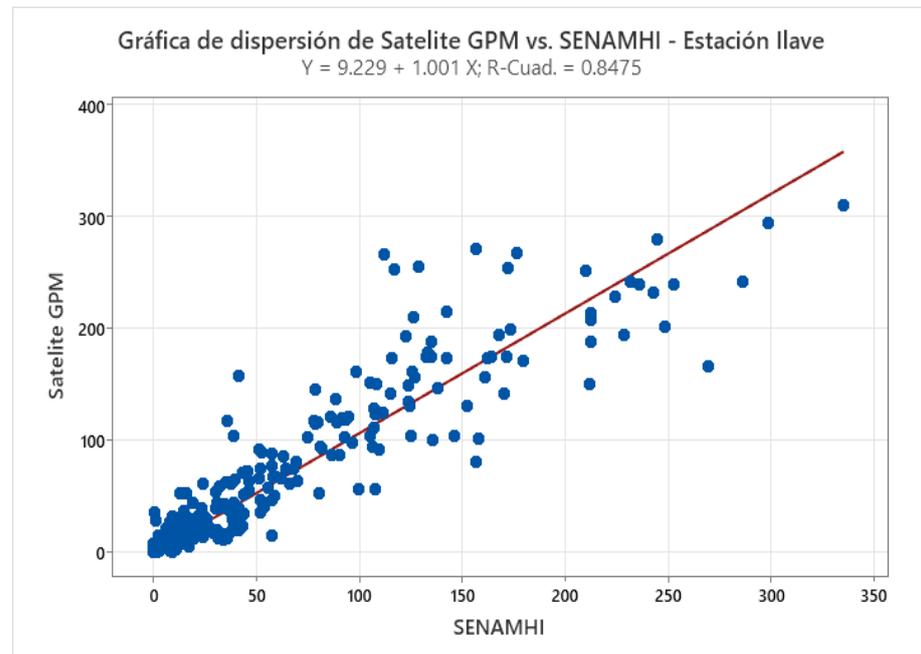
Gráfica de matriz de dispersión en la estación Ilave



Nota: Fuente Propia

Figura 40

Gráfica de dispersión en la estación Ilave



Nota: Fuente Propia

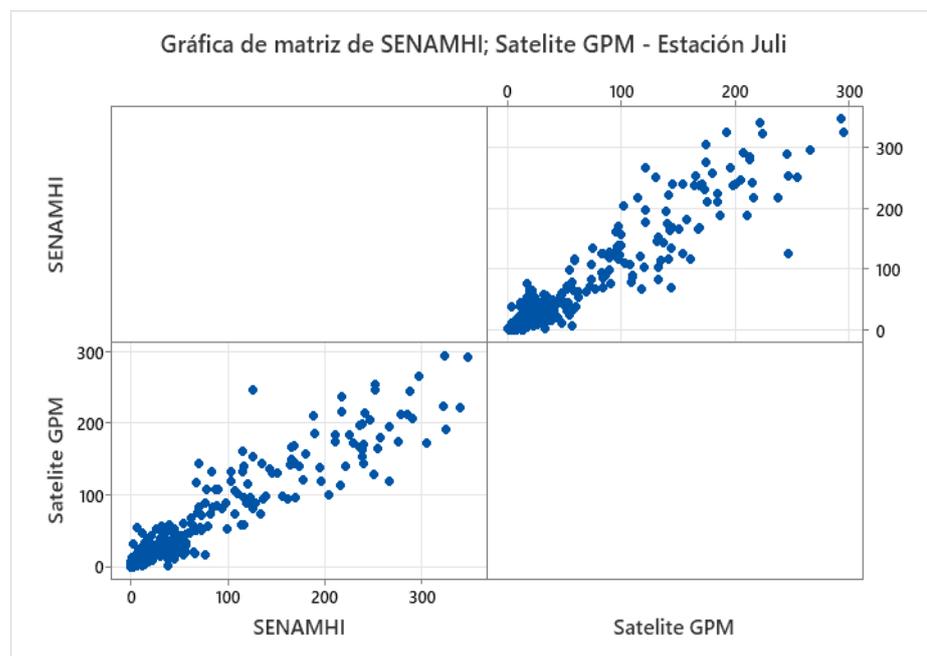
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8475$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 84.75% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.6. Estación Juli

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 41

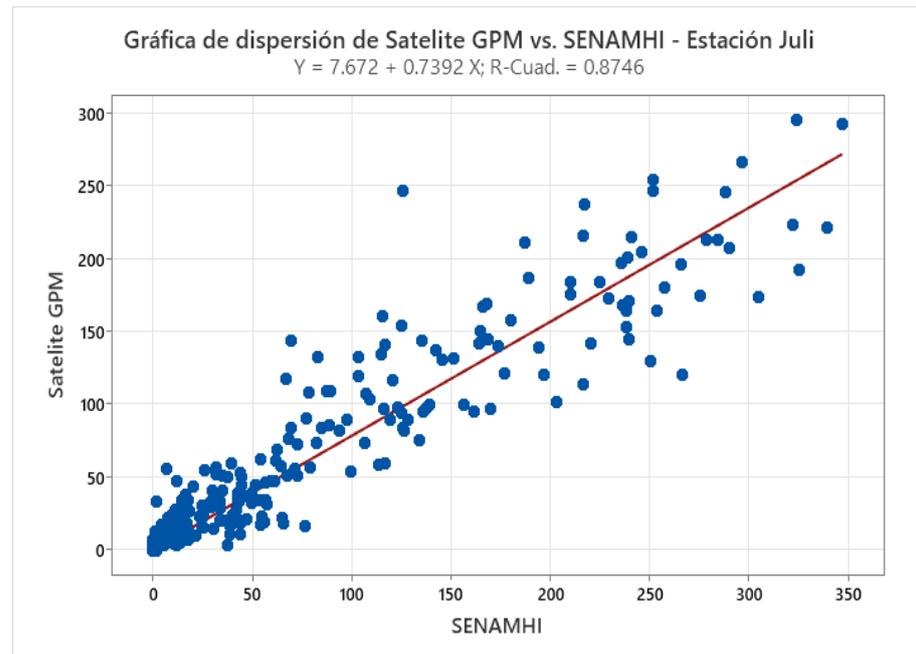
Gráfica de matriz de dispersión en la estación Juli



Nota: Fuente Propia

Figura 42

Gráfica de dispersión en la estación Juli



Nota: Fuente Propia

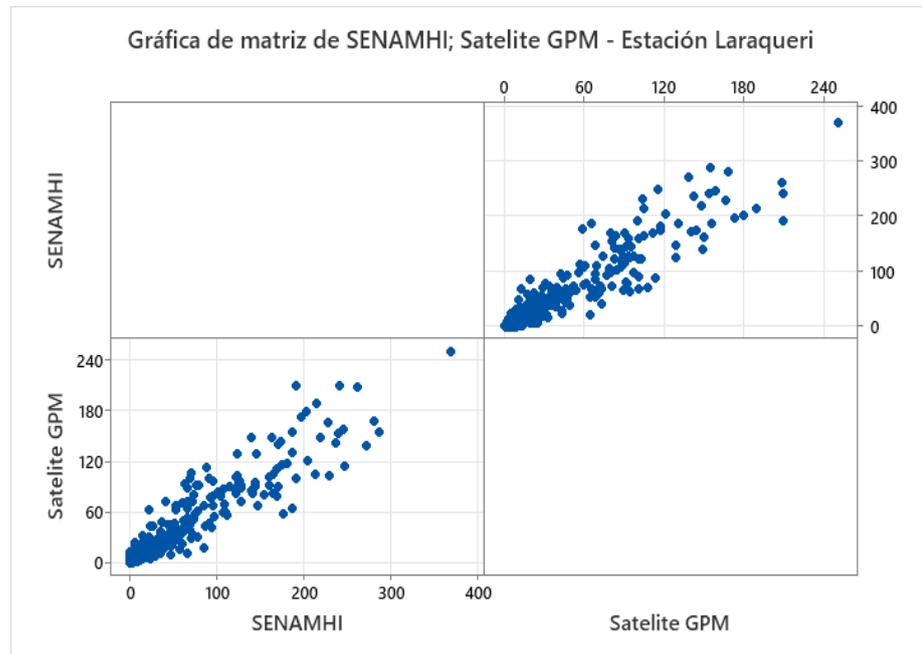
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8746$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 87.46% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.7. Estación Laraqueri

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 43

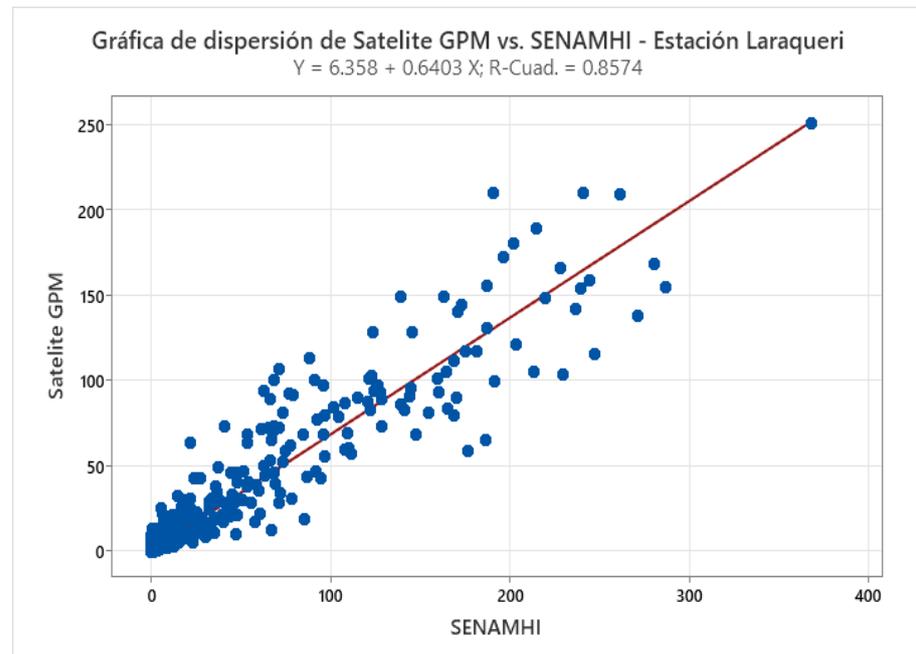
Grafica de matriz de dispersión en la estación Laraqueri



Nota: Fuente Propia

Figura 44

Grafica de dispersión en la estación Laraqueri



Nota: Fuente Propia

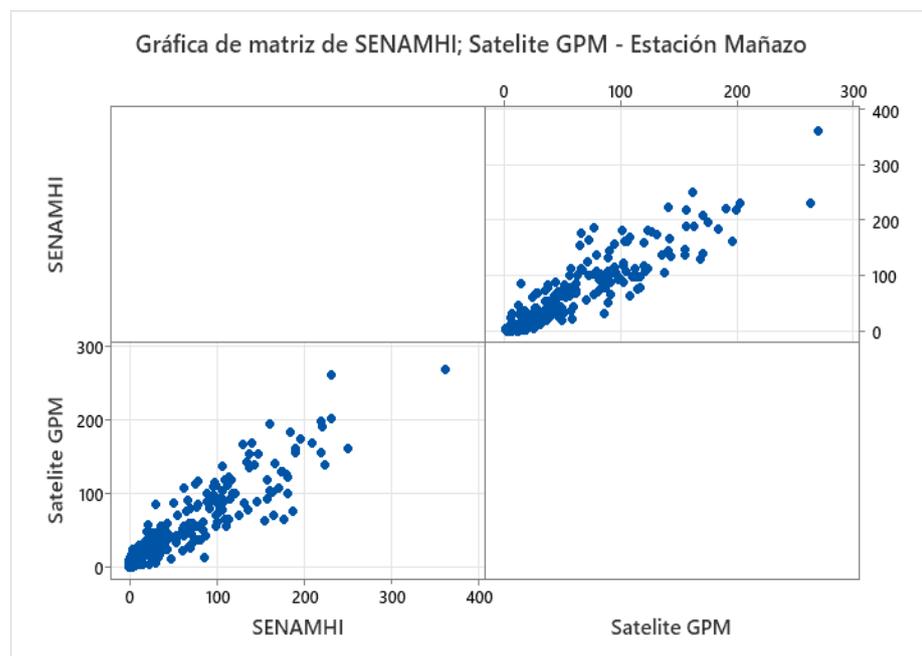
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8574$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 85.74% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.8. Estación Mañazo

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 45

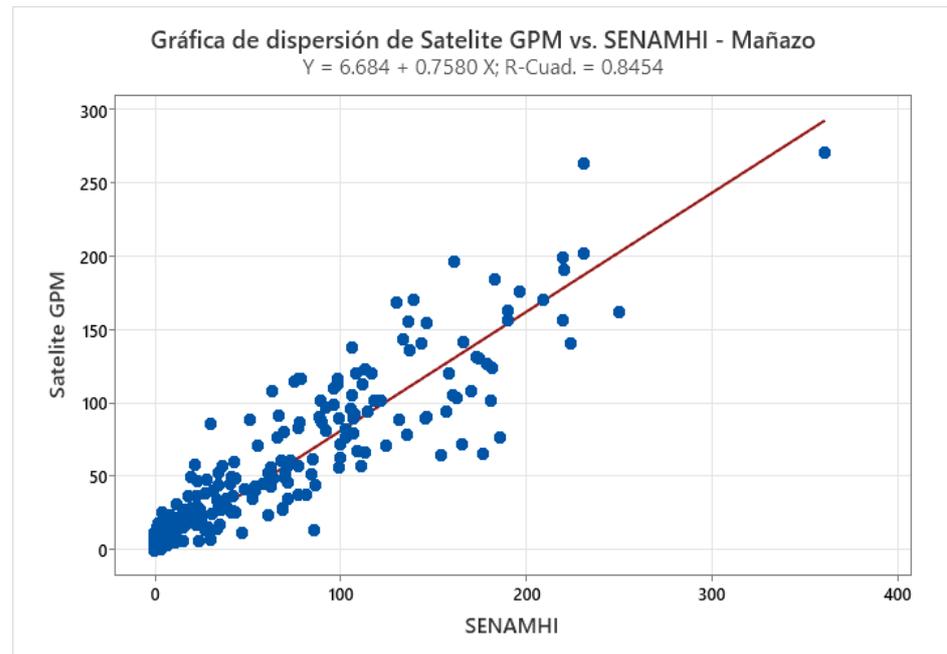
Gráfica de matriz de dispersión en la estación Mañazo



Nota: Fuente Propia

Figura 46

Gráfica de dispersión en la estación Mañazo



Nota: Fuente Propia

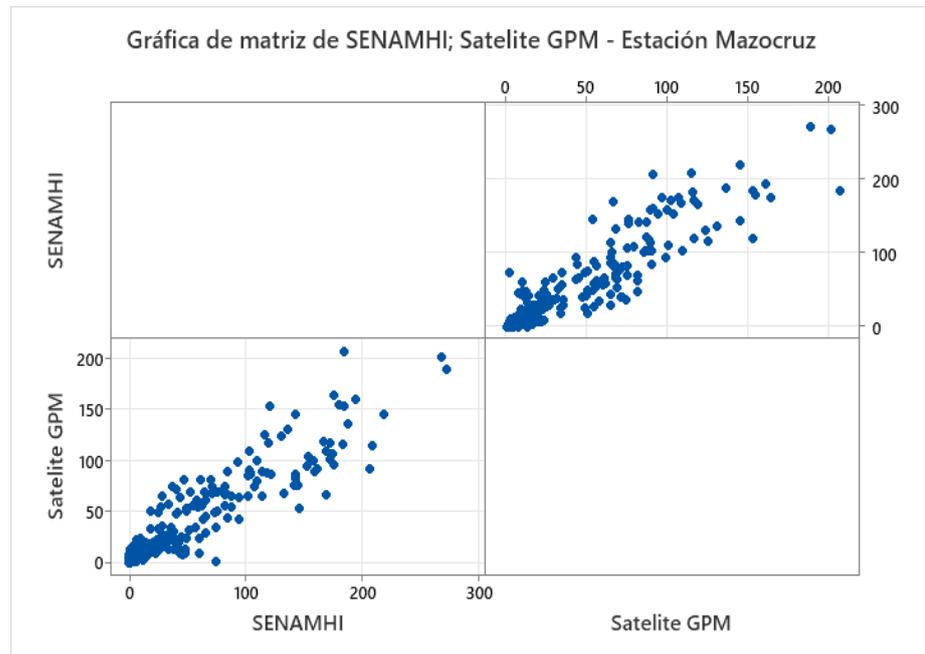
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8454$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 84.54% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.9. Estación Mazocruz

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 47

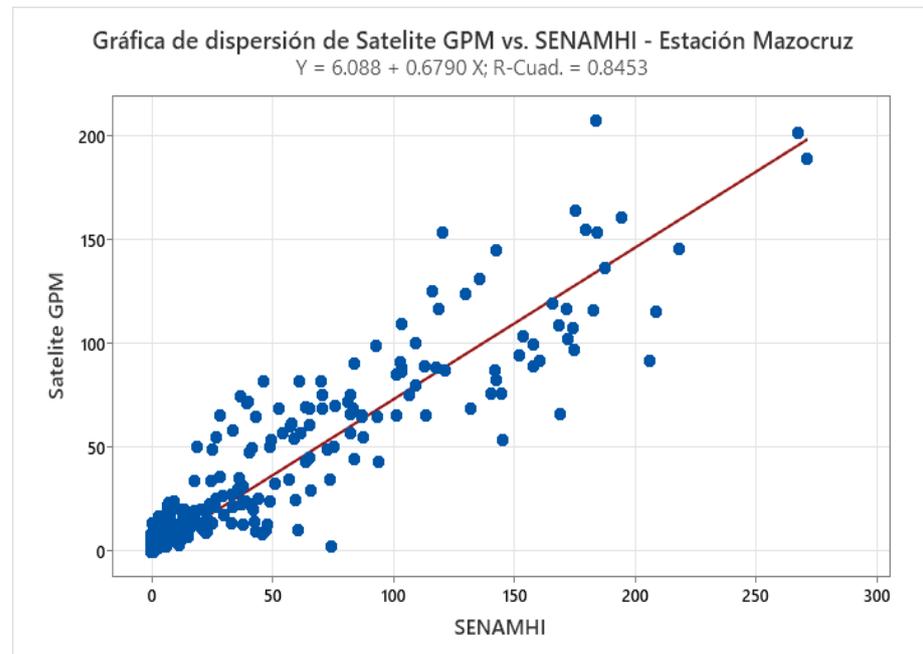
Grafica de matriz de dispersión en la estación Mazocruz



Nota: Fuente Propia

Figura 48

Grafica de dispersión en la estación Mazocruz



Nota: Fuente Propia

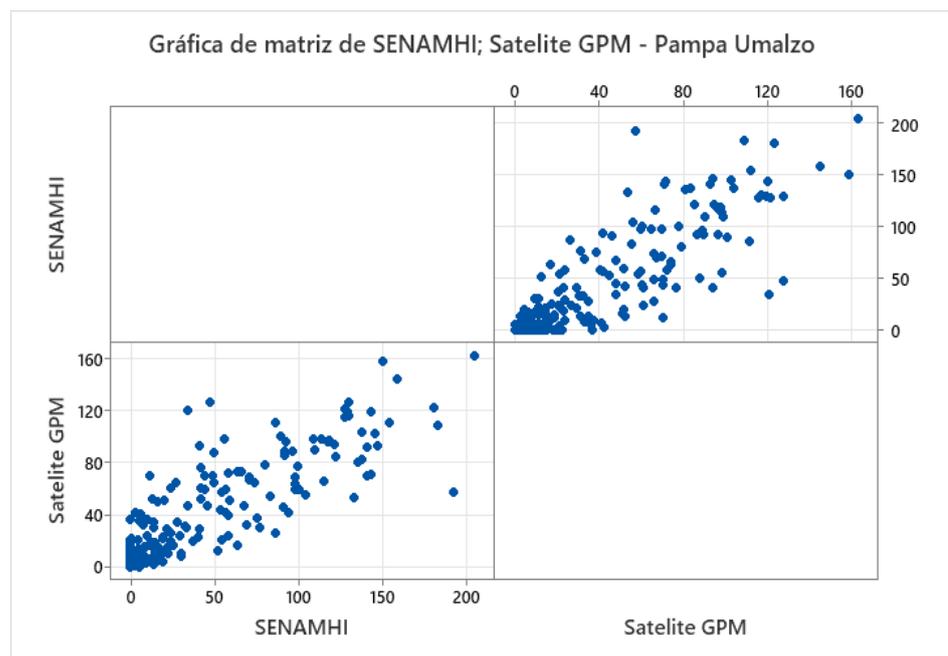
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8453$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 84.53% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.10. Estación Pampa Umalzo

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 49

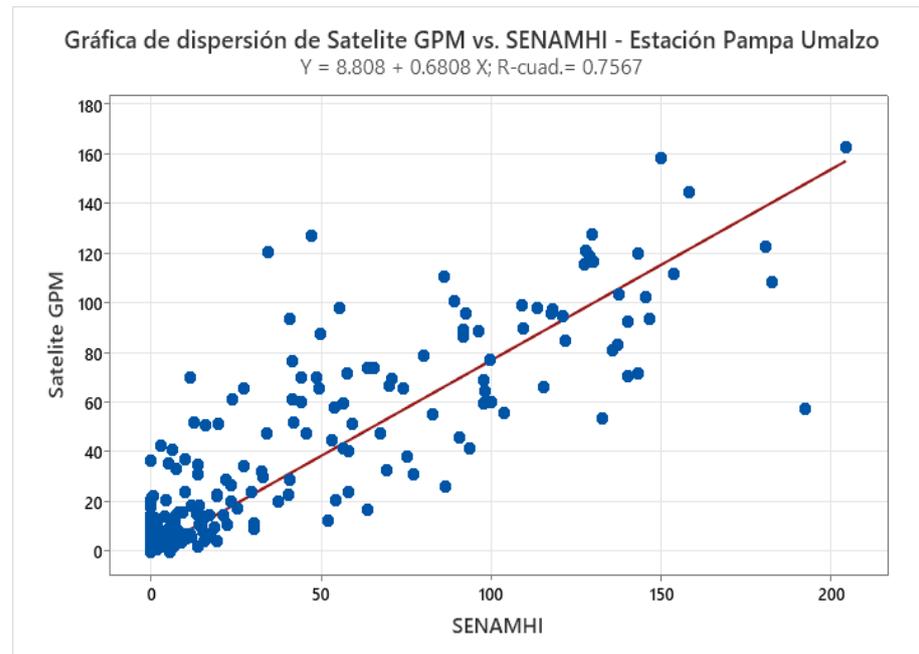
Gráfica de matriz de dispersión en la estación Pampa Umalzo



Nota: Fuente Propia

Figura 50

Gráfica de dispersión en la estación Pampa Umalzo



Nota: Fuente Propia

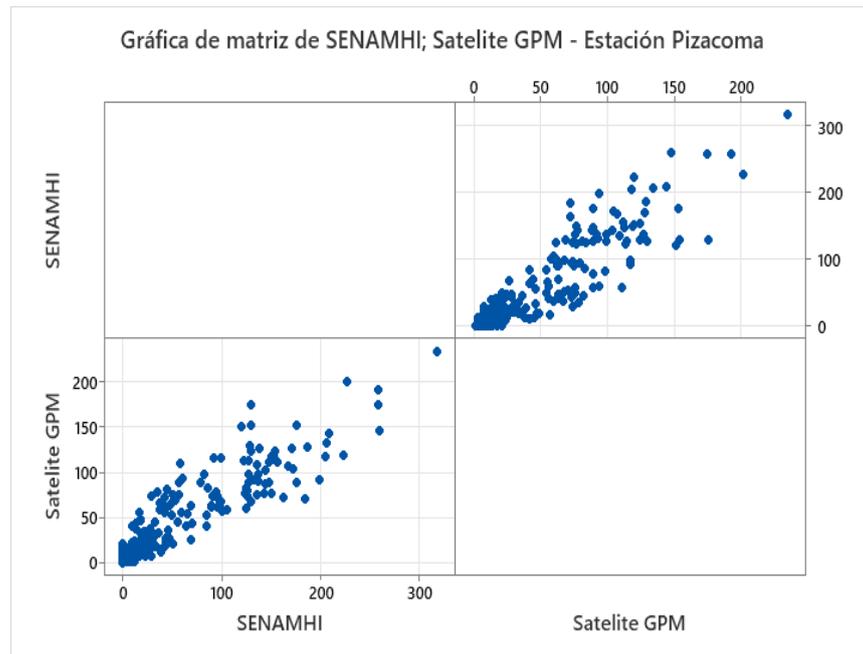
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.7567$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 75.67% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.11. Estación Pizacoma

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 51

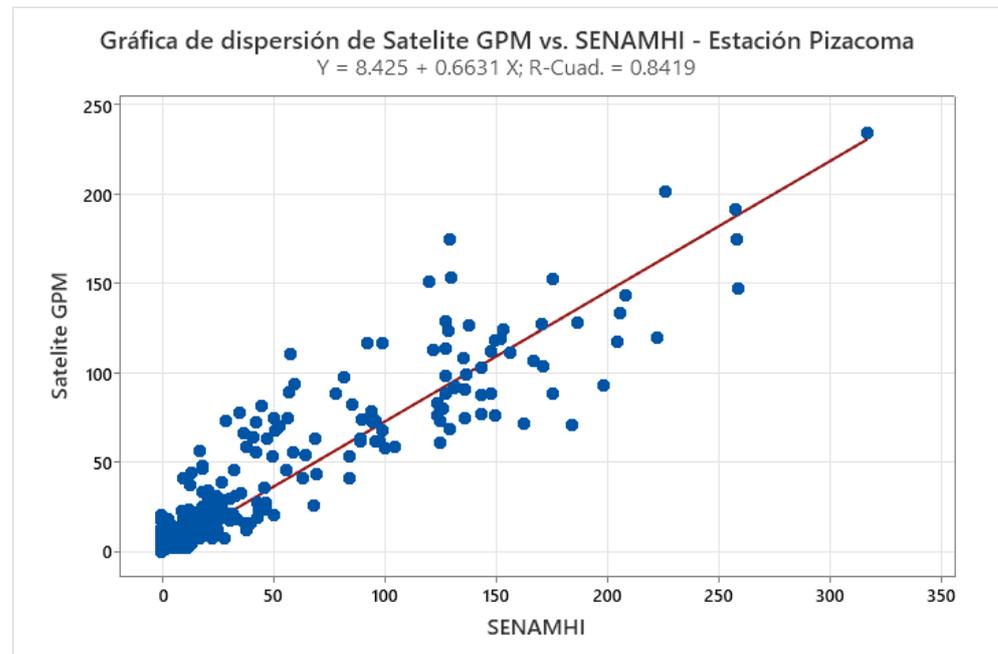
Gráfica de matriz de dispersión en la estación Pizacoma



Nota: Fuente Propia

Figura 52

Gráfica de dispersión en la estación Pizacoma



Nota: Fuente Propia

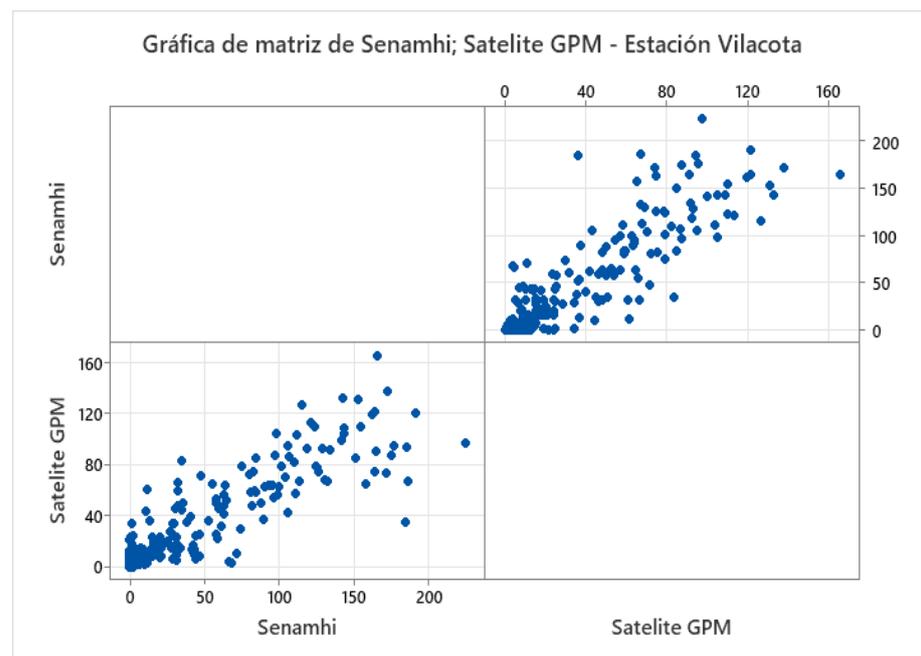
Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.8419$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 84.19% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.12. Estación Vilacota

Se procede a generar las gráficas de matriz de dispersión y el comportamiento de la regresión lineal entre datos de precipitaciones medias mensuales observadas por el SENAMHI con los registros satelitales del GPM (IMERG).

Figura 53

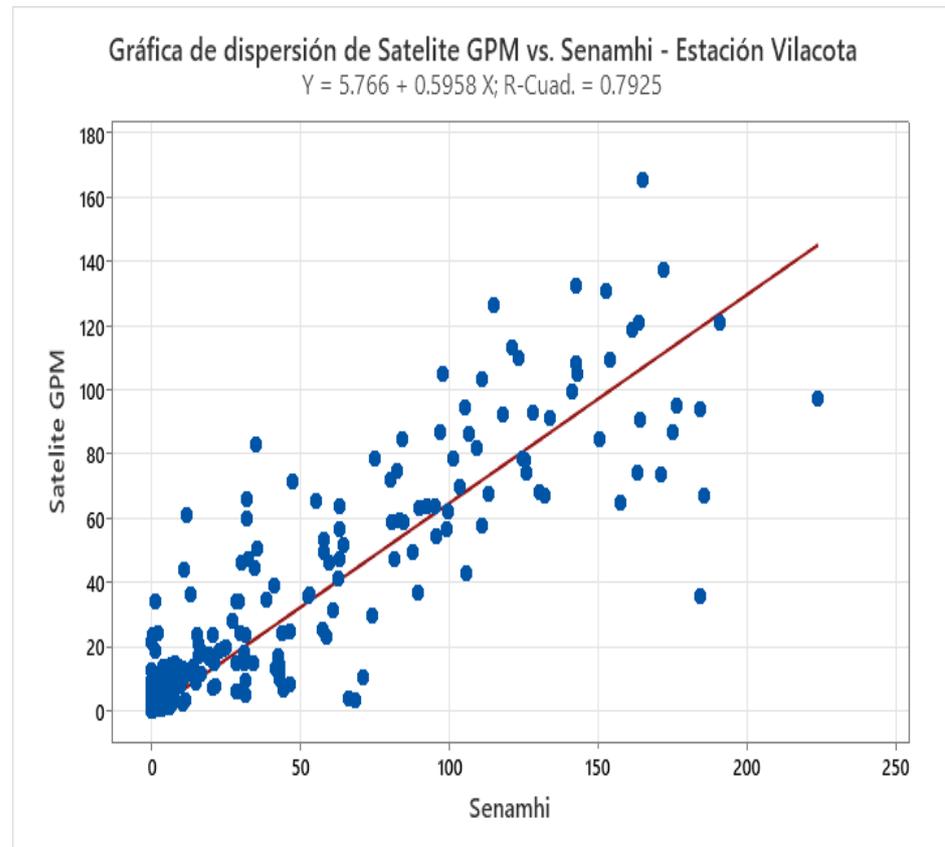
Gráfica de matriz de dispersión en la estación Vilacota



Nota: Fuente Propia

Figura 54

Gráfica de dispersión en la estación Vilacota



Nota: Fuente Propia

Del gráfico de dispersión se obtiene un $R^2=0.7925$, indicando un coeficiente de determinación bueno. El modelo de regresión puede explicar 79.25% de la variación en el Satélite GPM (IMERG).

4.3.2.13. Resumen de R2 de las diferentes estaciones.

A continuación, se presenta la Tabla 5, del resumen de R2 de las estaciones.

Tabla 5*Resumen de R2 de las diferentes estaciones*

Estación	Ubicación		R ²
	Norte	Este	
Puno	8250022.65	391617.70	81.32%
Rincón de la Cruz	8231937.13	413241.13	87.37%
Ilave	8221195.27	431019.57	84.75%
Juli	8208468.60	450842.53	87.46%
Desaguadero	8168747.95	495857.00	84.11%
Mañazo	8252723.44	355407.10	84.54%
Laraqueri	8213657.74	385967.18	85.74%
Mazo cruz	8149061.24	424737.79	84.53%
Pizacoma	8130693.26	460750.24	84.19%
Pampa Umalzo	8133726.09	348358.99	75.37%
Vilacota	8107052.51	388211.12	79.25%
Capazo	8099529.66	421787.57	88.50%

Nota: Elaboración propia

Del cuadro anterior se aprecia que todas las estaciones guardan relación entre sí, siendo el R2 más bajo 75.37% perteneciente a la estación Pampa Umalzo. Se determina que los datos de precipitación media mensual medidos por el satélite GPM (IMERG) tienen un buen coeficiente de determinación (r^2) con los datos medidos por estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave.

4.3.3. En relación con el tercer objetivo específico

Para la determinación del coeficiente de correlación (r) de datos precipitación media mensual medidos por el satélite GPM (IMERG) con respecto a los datos de precipitación media mensual medidos por estaciones meteorológicas en la cuenca Ilave, se desprende de la tabla de R2 tal como se aprecia en la Tabla 6.

Tabla 6*Cuadro resumen del coeficiente r de las diferentes estaciones*

Estación	Ubicación		R ²	r
	Norte	Este		
Puno	8250022.65	391617.70	81.32%	0.902
Rincón de la Cruz	8231937.13	413241.13	87.37%	0.935
Ilave	8221195.27	431019.57	84.75%	0.921
Juli	8208468.60	450842.53	87.46%	0.935
Desaguadero	8168747.95	495857.00	84.11%	0.917
Mañazo	8252723.44	355407.10	84.54%	0.919
Laraqueri	8213657.74	385967.18	85.74%	0.926
Mazo cruz	8149061.24	424737.79	84.53%	0.919
Pizacoma	8130693.26	460750.24	84.19%	0.918
Pampa Umalzo	8133726.09	348358.99	75.37%	0.868
Vilacota	8107052.51	388211.12	79.25%	0.890
Capazo	8099529.66	421787.57	88.50%	0.941

Nota: Elaboración propia

Los valores cercanos a 1 (uno), de una correlación positiva, indican que cuando los registros de SENAMHI se incrementan, también lo hace los del Satélite GPM (IMERG).

4.4. DISCUSIÓN

El análisis realizado mediante curvas de doble masa permitió confirmar la homogeneidad de las series temporales tanto de los datos observados del SENAMHI como de las estimaciones satelitales del producto GPM IMERG v6. Este resultado coincide con lo señalado por Asurza Veliz (2017), quien destacó que, tras la aplicación de correcciones de consistencia, las series temporales de datos satelitales y terrestres pueden ser utilizadas de manera complementaria en estudios hidrológicos.

Además, los resultados obtenidos en estaciones como Juli y Pampa Umalzo confirman que el producto GPM IMERG tiene alta precisión en zonas con menor complejidad topográfica, lo que valida su aplicación en estas condiciones. Sin embargo, en áreas más complejas, como Pampa Umalzo (R²=75.37%), se observaron ligeras limitaciones,



consistentes con lo indicado por Salas Choquehuanca (2022) en estudios realizados en la cuenca Madre de Dios.

El análisis del error medio cuadrático (RMSE) mostró valores que oscilaron entre 23.74 mm en estaciones como Pampa Umalzo y 36.32 mm en Juli, lo que indica una buena correspondencia entre los datos satelitales y observados. Asimismo, el porcentaje de sesgo (PBIAS) evidenció una subestimación leve en algunas estaciones, como Juli (PBIAS=8.12%), mientras que en la estación de Puno, mostraron valores prácticamente neutros (PBIAS=0.09%). Estos resultados son consistentes con lo señalado por Coaquira et al. (2019), quienes encontraron comportamientos similares en la evaluación de datos satelitales en cuencas altoandinas.



V. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de los tres objetivos específicos del estudio, los cuales proporcionaron las siguientes conclusiones:

En relación al primer objetivo específico: Se logró comparar las precipitaciones medias mensuales obtenidas por las estaciones meteorológicas del SENAMHI y el satélite GPM (IMERG) mediante gráficas de series temporales y análisis visuales. Las gráficas mostraron un comportamiento similar entre ambas fuentes de datos, validando la capacidad del satélite GPM para estimar precipitaciones en la cuenca Ilave – Puno. Esta comparación permitió identificar patrones de regularidad en las precipitaciones y demostró la utilidad de los datos satelitales como complemento a las observaciones terrestres.

En relación al segundo objetivo específico: El análisis estadístico confirmó la correlación significativa entre los datos observados y estimados. El coeficiente de determinación (R^2) fue superior al 75 % en la mayoría de las estaciones, con valores destacados como Rincón de la Cruz (87.37 %) y Capazo (88.50 %), lo que indica una alta confiabilidad en las estimaciones satelitales. Las métricas estadísticas adicionales, como el NSE y el RMSE, respaldaron estos resultados, mostrando un buen desempeño en la mayoría de las estaciones evaluadas.

En relación al tercer objetivo específico: El análisis del coeficiente de correlación (r) evidenció una relación positiva y significativa entre las precipitaciones medias mensuales de ambas fuentes de datos. Valores cercanos a 0.90 en estaciones como Rincón de la Cruz (0.935) y Capazo (0.941) resaltaron la precisión de las estimaciones satelitales en comparación con las observaciones terrestres. Esto demuestra la viabilidad



del uso de datos satelitales para el monitoreo hidrometeorológico en áreas con infraestructura limitada.

Como conclusión general. Los resultados de esta investigación validaron la utilidad y precisión del satélite GPM (IMERG) para estimar las precipitaciones medias mensuales en la cuenca Ilave – Puno. Lo cual permite complementar y fortalecer los registros de las estaciones meteorológicas del SENAMHI, contribuyendo significativamente a la gestión de los recursos hídricos y a estudios hidrológicos en regiones con infraestructura limitada.



VI. RECOMENDACIONES

Al concluir este estudio de investigación, es fundamental considerar las siguientes recomendaciones para orientar futuras líneas de investigación:

Fortalecimiento de la red de estaciones meteorológicas: Es fundamental incrementar la densidad y mejorar la distribución de las estaciones meteorológicas en la región de estudio. Una red más robusta permitirá captar con mayor precisión las variables climáticas críticas, especialmente las precipitaciones, mejorando así la calidad y representatividad de los datos terrestres utilizados para comparaciones y validaciones futuras.

Aplicaciones prácticas de los datos satelitales: Se recomienda ampliar la investigación sobre el uso de los datos de precipitación obtenidos del satélite GPM (IMERG) en la gestión hídrica. Esto incluye el monitoreo de sequías, la planificación de recursos hídricos, modelación hidrológica, prevención de inundaciones y la mitigación de riesgos asociados a eventos hidrometeorológicos extremos. Estas aplicaciones prácticas pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad de los recursos en la cuenca Ilave – Puno.

Análisis comparativo entre modelos hidrológicos: Es recomendable realizar comparaciones entre diferentes modelos hidrológicos, integrando tanto datos satelitales como tradicionales. Este enfoque permitirá identificar el modelo más adecuado para predecir las precipitaciones medias mensuales y evaluar su desempeño en escenarios climáticos actuales y futuros.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asurza, F. A., Ramos, C. L., & Lavado, W. S. (2018). Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 53-62.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru: PISCO precipitation. *Hydrological Sciences Journal*, 64(12), 1-12. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649413>.
- Badarneh, S., Hazaymeh, K., & Almagbile, N. (2023). Mapping agricultural droughts in northern Jordan using satellite precipitation and vegetation data. *Agricultural Water Management*, 267, 107611. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107611>.
- Breña, J. (2015). Instrumentos meteorológicos: principios y aplicaciones. Lima: Editorial Hidromet.
- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B. De, Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>.
- Caicedo, F. (2008). Asimilación de precipitación estimada por imágenes de satélite en modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos: Caso de estudio afluencias al embalse de Betania (Huila, Colombia). Pontificia Universidad Javeriana.
- Ceccato, P., & Dinku, T. (2010). Geo-stationary vs. low earth orbit satellites: Advantages for precipitation monitoring. *International Journal of Climatology*, 30(5), 649-667. <https://doi.org/10.1002/joc.1930>.
- Centeno Jarita, T. G. (2022). Evaluación del desempeño del producto de precipitación PISCO en la modelización hidrológica de la cuenca del río Ramis. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Clarke, R. T. (1973). *Hydrology for Engineers*. Edward Arnold Publishers.



- Coaquira, H., Calderón, J., & Huaccoto, L. (2019). Comparación de dos productos del satélite TRMM 3B43 con datos observados por SENAMHI en la cuenca Ilave-Puno (1998-2016). *Revista Científica de Investigaciones Ambientales*.
- Delgado, J., Sadaoui, M., Ludwig, W., & Méndez, E. (2024). Soil erosion analysis in Ecuadorian basins using GPM IMERG and RUSLE model. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.116712>.
- Delgado Quispe, A. (2019). Validación y corrección de la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS, usando el modelo de redes neuronales artificiales en la cuenca del río Vilcanota, Región Cusco. Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco.
- Gámez, R. (2010). Conceptos básicos de unidades hidrográficas y su importancia en la planificación territorial. *Revista de Geografía Aplicada*.
- Gutiérrez, C., Huerta, A., Sabino, R., Bourrel, L., & Frappart, F. (2023). Rainfall erosivity dataset for Peru based on GPM IMERG. *Journal of Environmental Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.107611>.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., & Wolff, D. B. (2019). Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG). *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs11070712>.
- Lv, X., & Wu, J. (2024). Evaluation of GPM IMERG for precipitation estimation: A hemispheric analysis. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.113358>.
- Lujano Laura, J. (2015). Validation of TRMM precipitation for hydrological modeling in the Ramis Basin. *Investigación Alto Andino*. <https://doi.org/10.1016/j.altoandino.2015.52>.
- Mirhoseini, S., Gheiby, S., & Memarian, H. (2019). Enhancing precipitation estimation using neural networks in central Iran. *Advances in Water Resources*. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.004>.
- Ponce, V. M. (2014). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall.



- Qqenta, M., Rau, P., Bourrel, L., & Frappart, F. (2023). Validation of GPM IMERG and SM2RAIN for hydrological modeling in Peruvian basins. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2023WR030741>.
- Salas Choquehuanca, M. (2022). Evaluación de la precisión del producto satelital GPM IMERG v6 en la cuenca Madre de Dios. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Sharifi, A., Steinacker, R., & Saghafian, B. (2016). Advanced radar technology for precipitation estimation: A review of applications with GPM sensors. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.05.009>.
- Shirmohammadi-Aliakbarkhani, F. (2023). Evaluating satellite precipitation data for SPI drought monitoring in Khorasan Razavi Province, Iran. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129023>.
- Villavicencio, E. E., Medina, K. D., & Loarte, E. A. (2022). Enhancing satellite precipitation and temperature data in Ancash, Peru. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7456>.
- World Meteorological Organization (WMO). (2012). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12407.
- Yong, B., Hong, Y., Gourley, J. J., Huffman, G. J., Chen, S., & Gao, Y. (2015). Assessment of TMPA satellite-based multisatellite precipitation analysis and its utility in hydrological prediction in basins with sparse networks. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2015WR016956>.



ANEXOS



Anexo. Estaciones meteorológicas para el análisis

CAPAZO

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	165.7	130.7	139.8	14.8	3.8	0.0	0.0	0.0	0.9	19.6	1.7	70.7
2001	266.8	264.1	134.7	37.4	1.1	3.1	0.0	2.0	0.4	5.8	9.2	33.8
2002	88.1	159.2	160.4	67.1	7.4	9.2	11.8	2.1	0.0	35.8	42.4	111.3
2003	86.8	82.2	78.1	0.0	6.4	0.0	6.3	0.0	0.0	0.9	2.5	57.8
2004	149.7	73.9	60.5	11.9	0.0	2.0	31.0	34.4	1.3	0.0	0.0	39.2
2005	91.0	183.6	47.1	12.9	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	5.7	19.1	108.2
2006	190.8	101.1	139.1	24.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.4	27.4	86.9
2007	108.3	102.4	92.4	18.3	1.9	0.0	1.9	0.0	3.8	5.2	31.4	65.0
2008	145.8	86.9	53.2	1.5	0.0	0.0	0.0	6.6	0.0	0.0	0.6	111.3
2009	59.3	77.3	58.4	79.3	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	1.4	80.7	51.8
2010	113.0	76.4	42.5	24.8	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.9	3.2	130.6
2011	114.4	152.6	47.6	34.5	3.6	1.5	4.8	0.0	2.9	0.0	20.7	143.8
2012	133.8	154.8	63.4	46.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	12.1	33.1	135.4
2013	144.5	105.0	45.4	0.0	12.5	14.6	2.7	2.2	0.0	13.9	7.6	86.2
2014	133.8	16.8	48.8	12.5	0.0	0.0	0.0	16.5	5.3	44.2	28.5	24.7
2015	116.3	102.7	149.2	82.2	0.0	0.0	0.2	2.7	3.7	12.7	11.0	1.4
2016	40.3	153.6	11.5	34.2	0.1	4.4	3.9	0.5	0.3	1.2	2.2	39.6
2017	160.2	122.0	125.9	10.8	0.2	0.1	1.0	0.0	5.6	2.7	20.2	69.1
2018	139.0	178.0	68.3	27.3	0.0	17.0	25.1	0.0	0.0	43.8	1.1	78.8
2019	128.4	132.5	81.1	11.4	0.8	2.7	0.9	0.1	13.1	7.1	37.4	89.9
2020	87.3	179.2	111.7	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	22.1	2.5	184.4
2021	128.2	67.9	117.4	22.7	10.0	0.0	0.0	0.5	13.4	4.1	39.0	119.3

FUENTE: SENAMHI



VILACOTA

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	164.0	105.4	99.1	28.5	6.3	2.7	2.2	2.2	2.2	15.7	5.1	62.7
2001	172.0	165.1	142.9	42.6	2.2	2.6	0.0	0.0	3.6	10.3	9.7	1.3
2002	63.0	191.0	123.3	60.8	2.3	0.0	31.3	0.0	0.0	24.3	31.6	81.8
2003	47.6	157.8	103.7	9.7	12.6	0.0	3.6	4.4	0.0	3.2	7.1	59.9
2004	143.3	97.2	63.1	4.2	0.0	0.5	21.1	15.7	1.8	0.0	0.0	29.3
2005	83.6	154.1	58.0	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	0.9	22.9	80.6
2006	115.0	126.1	176.6	25.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	28.3	20.4	57.7
2007	92.5	87.9	84.3	6.6	3.2	0.5	0.0	0.0	3.9	3.8	31.2	74.3
2008	142.5	63.4	64.5	0.0	0.0	1.0	0.0	4.2	0.0	8.1	0.0	110.9
2009	84.6	164.3	75.0	46.3	0.0	0.0	3.9	0.0	2.7	0.0	43.9	34.7
2010	113.2	99.7	53.0	31.7	5.9	0.0	0.0	0.0	0.9	4.6	2.4	90.0
2011	130.4	141.3	35.5	46.4	13.3	0.0	1.0	0.0	0.8	0.0	19.2	101.2
2012	150.6	175.1	32.1	58.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	21.5	2.3	125.5
2013	121.2	98.1	55.1	0.0	11.4	10.6	6.9	6.1	0.0	14.0	1.8	32.3
2014	111.2	11.8	11.0	42.8	0.0	0.0	0.0	1.7	1.4	15.5	20.5	38.4
2015	118.3	133.8	106.5	52.6	0.3	0.0	1.4	0.7	2.3	3.9	4.5	0.0
2016	30.4	184.6	13.2	30.0	0.0	7.5	15.0	0.0	0.0	7.8	0.2	41.1
2017	152.6	95.2	95.8	7.7	4.8	0.0	0.0	0.0	6.3	9.3	7.7	58.0
2018	109.5	124.5	82.5	27.3	0.0	16.8	44.3	3.6	0.0	105.9	16.7	132.2
2019	171.4	128.3	80.3	34.0	8.2	6.3	6.6	0.0	1.6	0.1	0.6	28.7
2020	35.1	161.6	31.8	8.2	3.5	0.0	0.0	0.0	66.3	68.3	19.5	185.9
2021	224.0	89.6	163.3	42.9	31.4	0.0	0.4	10.4	43.1	71.1	41.5	184.5

FUENTE: SENAMHI



PAMPA UMALZO

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	129.2	118.3	97.7	21.5	0	0.3	0.6	0	0	19.3	4.9	58.2
2001	143.4	204.4	130.2	58.1	2.8	1.9	0	6.5	0	9.4	22.3	41
2002	143.2	153.9	182.8	77.2	8.1	4.5	19.5	19.5	0	0	54.4	53.2
2003	70.3	70.9	115.4	15.5	15.6	0	0	10.4	4.3	0.8	4.9	67.5
2004	146.6	135.6	100	17.1	0	0	16.2	30.3	14.3	1.4	0.1	32.5
2005	74.1	137.7	97.7	11.9	0	0	0	0	52.2	4.1	8.2	90.6
2006	127.8	98.2	109	14.8	0	5.5	0	0	1	18.7	63.6	69.3
2007	132.8	93.9	140.4	19.4	13.8	1.2	0	0.06	0.46	0	0	0
2008	47.4	41.5	82.8	5	0	0	0	6.6	0	0	0	59.2
2009	12.8	34.4	63.6	23.6	0	0	16	0	0	12.1	40.5	13.9
2010	41.5	65.7	54	15.3	10.5	0	0	0	3.4	0	0	104
2011	192.3	137.3	44.3	33.1	7.5	0	1	0	1.6	0	25.4	121.3
2012	140.4	129.8	44.1	6.3	0	0	0	0	1.3	17.6	7.2	49.5
2013	92	89.2	55.6	5.07	0.09	0	0.02	0.36	0.09	0.3	1.27	56.6
2014	117.7	11.5	23.9	37.4	0	0	0	0.8	0.7	3.1	8.4	10.1
2015	109.4	113.8	180.7	45.6	0	0	8.8	1.4	0	4.6	0	0
2016	42	145.5	34	7.49	0	0	4.2	0	0	0	0	21.9
2017	150.1	56.6	80.2	29.4	5.5	0	0	0	7.2	0	6.5	48.6
2018	86.3	57.9	40.8	14	0	13.5	15.7	0	0	5.1	0	19.9
2019	92.7	96.3	27.3	10	0	0	1.6	0	0.9	11.7	27.5	23.7
2020	127.6	158.3	91.9	10.7	0	0	0.02	0	0.5	30.3	0.4	99.8
2021	121.83	75.46	50	14.24	0.1	0.15	0	0.07	2.5	0.13	1.65	86.6

FUENTE: SENAMHI



LARAQUERI

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	244.8	236.7	126.3	12.5	5.3	1.4	0.0	10.1	6.5	66.7	7.1	139.5
2001	368.5	261.5	139.3	78.2	13.1	0.0	3.5	4.7	12.1	24.5	44.5	67.8
2002	68.9	214.8	163.0	74.8	23.6	4.6	25.9	15.0	10.9	44.3	68.8	63.0
2003	170.8	123.4	123.7	28.2	12.6	0.0	0.0	5.6	19.1	6.1	24.3	128.4
2004	228.3	145.8	71.8	22.5	0.0	1.8	11.7	43.9	6.1	0.0	14.1	61.4
2005	115.1	280.3	79.3	42.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.1	39.0	37.5	127.8
2006	240.8	96.5	88.3	32.7	6.3	3.4	0.0	12.9	34.0	18.7	53.5	68.6
2007	109.3	96.8	168.9	48.0	4.9	0.0	0.0	0.0	45.8	57.8	71.4	110.6
2008	190.9	105.0	73.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	2.3	35.9	15.6	147.5
2009	71.4	173.4	107.9	67.2	0.0	0.0	5.1	0.0	11.1	15.0	86.7	102.1
2010	165.0	187.4	41.4	40.6	19.0	0.0	0.0	2.6	3.4	34.3	4.1	144.8
2011	155.0	239.9	120.9	48.3	3.4	0.0	5.3	0.2	9.6	35.7	47.3	202.3
2012	203.9	286.7	160.5	94.9	0.6	0.0	0.5	9.2	15.5	18.1	69.3	229.7
2013	247.1	175.2	66.9	23.8	6.3	26.9	18.7	17.9	0.9	17.5	72.0	191.7
2014	181.5	91.3	54.1	29.8	0.5	0.0	2.8	23.5	62.9	60.4	35.5	77.2
2015	160.1	92.4	144.1	128.4	3.5	0.0	6.8	7.9	15.2	45.0	56.1	51.9
2016	96.0	187.0	22.3	91.9	0.3	4.3	8.6	5.1	0.9	36.5	26.0	63.7
2017	271.4	169.1	122.2	37.2	10.5	0.0	10.6	0.0	32.4	54.8	14.2	85.2
2018	141.5	213.2	73.5	50.7	6.7	23.5	30.3	0.0	11.2	66.7	48.6	108.0
2019	165.3	170.3	78.1	27.5	17.9	8.7	2.2	0.0	61.1	42.4	111.5	96.6
2020	124.8	196.4	66.1	15.5	0.9	0.0	0.0	0.0	85.6	47.3	1.0	186.4
2021	219.6	54.1	121.7	16.9	11.0	0.0	0.0	7.8	39.9	22.0	58.5	176.6

FUENTE: SENAMHI



PUNO

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	167.1	210.0	105.1	40.3	0.4	2.3	4.2	17.9	14.6	95.8	13.9	69.0
2001	250.8	214.6	224.1	69.8	12.2	2.2	0.0	12.5	27.1	68.4	56.2	81.0
2002	129.6	180.0	170.6	105.3	15.4	21.1	22.7	30.6	11.6	65.9	43.8	139.2
2003	174.5	114.4	114.4	46.1	36.7	4.8	0.2	9.6	42.9	25.4	8.6	131.8
2004	208.9	125.2	115.5	29.2	6.2	0.0	10.2	43.0	34.3	5.6	28.9	59.1
2005	103.3	157.9	134.6	45.7	0.4	0.0	0.0	0.0	11.8	39.5	80.5	97.4
2006	291.1	62.3	159.6	44.6	0.9	0.0	0.0	0.6	21.2	37.4	53.8	101.5
2007	84.8	171.0	236.7	49.7	10.6	0.0	3.3	1.6	61.3	77.0	44.2	74.1
2008	209.7	85.8	95.4	8.4	6.8	1.4	0.2	0.8	2.4	79.4	27.2	144.2
2009	154.0	136.1	148.3	83.0	0.4	0.0	2.5	0.0	16.4	56.4	88.9	62.5
2010	99.3	192.8	56.3	12.3	16.1	0.0	0.0	7.1	2.9	33.4	15.0	146.7
2011	122.7	202.9	116.5	46.8	4.8	0.0	6.4	0.2	45.8	25.7	48.5	151.3
2012	135.4	294.8	209.9	60.1	0.0	0.2	0.0	5.6	9.8	7.6	69.5	155.9
2013	153.0	175.8	100.0	14.3	22.4	12.5	1.5	4.5	11.6	32.9	61.4	117.1
2014	147.0	107.7	60.5	40.9	0.1	0.0	0.2	28.9	66.9	45.2	29.8	90.6
2015	96.4	121.0	187.0	114.1	0.2	0.0	1.8	4.0	54.5	41.5	23.2	59.4
2016	79.7	202.6	9.8	57.5	0.5	2.0	3.4	0.0	0.3	76.0	43.0	49.7
2017	314.3	119.2	145.7	45.5	21.7	1.0	1.6	0.0	62.3	65.2	23.9	68.5
2018	171.1	152.1	114.1	33.2	7.8	12.9	32.1	0.0	3.2	44.4	1.0	89.8
2019	109.0	75.5	40.3	58.7	15.9	1.9	7.6	0.0	6.2	9.6	0.6	86.0
2020	102.7	205.9	39.2	15.2	1.8	0.0	0.0	0.0	35.2	43.2	20.6	107.5
2021	143.1	61.0	138.5	33.2	23.0	0.0	1.0	4.2	29.5	40.1	21.2	129.2

FUENTE: SENAMHI



RINCON DE LA CRUZ

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	179.3	164.9	119.0	12.8	5.1	1.1	1.5	17.7	11.7	77.9	8.1	103.4
2001	250.7	207.3	180.8	48.0	11.3	0.8	6.8	19.3	25.3	57.9	42.7	94.6
2002	107.3	175.6	172.5	78.4	17.3	3.6	26.9	17.0	25.6	76.3	76.3	105.2
2003	181.5	109.4	142.8	30.2	17.1	1.6	1.3	6.4	45.9	16.0	19.5	125.5
2004	208.5	124.8	84.0	27.3	3.1	0.7	15.8	38.9	30.3	6.2	33.0	70.6
2005	116.4	164.0	86.6	31.2	0.4	0.0	0.0	0.0	28.0	48.3	61.0	114.2
2006	256.4	77.6	136.3	32.3	2.4	0.9	0.2	4.3	33.5	32.1	70.1	78.9
2007	99.9	91.5	196.1	61.0	3.8	0.0	8.6	8.2	108.3	51.8	66.5	96.4
2008	259.3	101.8	97.0	6.7	8.5	3.8	3.0	4.0	2.4	72.4	17.5	139.2
2009	133.6	135.9	130.0	69.7	0.0	0.0	3.8	0.0	29.6	95.7	124.2	78.7
2010	213.8	161.7	96.9	26.5	18.3	0.0	0.0	8.6	4.8	68.3	0.0	127.5
2011	116.7	290.3	163.4	23.1	26.4	0.0	8.8	0.0	59.8	25.6	45.0	192.1
2012	154.3	308.9	175.7	106.4	0.0	0.0	0.0	16.0	15.3	27.3	29.4	220.4
2013	179.7	179.1	94.0	4.5	20.9	15.0	29.4	16.9	13.7	47.2	58.1	161.8
2014	206.6	88.9	94.6	22.3	0.0	0.0	2.2	40.1	72.8	62.2	23.2	93.2
2015	161.3	180.0	196.0	133.3	5.0	0.0	2.8	13.9	29.5	83.2	42.6	46.6
2016	79.7	166.9	26.6	70.3	1.3	2.1	5.7	3.0	20.4	44.9	33.6	64.5
2017	277.1	99.2	125.3	33.8	61.8	3.8	5.8	0.0	61.7	40.9	28.6	115.3
2018	166.3	178.0	106.4	74.2	12.2	16.3	44.3	3.6	0.0	105.9	16.7	132.2
2019	171.4	128.3	80.3	34.0	8.2	6.3	6.6	0.0	28.2	13.2	41.6	144.5
2020	143.3	161.6	90.9	28.4	3.5	0.0	0.0	0.0	66.3	68.3	19.5	185.9
2021	224.0	89.6	163.3	42.9	31.4	0.0	0.4	10.4	43.1	71.1	41.5	184.5

FUENTE: SENAMHI



ILAVE

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	269.9	161.1	135.6	14.4	4.9	4.4	9.3	6.4	3.2	51.5	1.0	109.8
2001	298.9	231.8	162.2	44.1	2.5	0.1	15.0	23.9	12.2	58.0	33.8	106.9
2002	108.2	242.7	228.5	156.8	20.9	19.8	43.6	15.2	10.7	69.8	80.7	108.0
2003	168.1	78.9	172.0	14.5	24.3	0.5	0.0	10.3	52.2	14.1	17.9	89.3
2004	286.1	132.5	52.6	19.4	10.2	1.6	22.1	38.3	15.9	2.0	22.4	63.2
2005	125.1	142.5	78.7	23.6	8.3	0.0	0.0	0.0	26.2	58.7	55.7	88.5
2006	335.4	80.1	138.3	30.8	3.2	3.0	0.0	8.9	27.7	25.6	99.6	81.1
2007	92.9	61.8	212.4	66.2	2.5	2.1	7.8	5.2	41.5	27.5	30.6	87.1
2008	245.1	94.7	68.5	17.0	1.8	1.4	7.2	3.2	1.4	53.7	0.6	146.2
2009	105.1	126.7	81.7	57.5	0.0	0.0	8.2	0.0	40.5	35.2	158.0	57.4
2010	212.9	116.9	64.4	42.1	37.2	0.0	0.0	8.7	1.2	39.0	7.8	126.9
2011	124.1	235.9	152.6	5.6	4.0	0.0	11.0	0.0	23.1	22.6	16.0	128.9
2012	115.0	248.4	179.6	43.5	0.0	1.2	0.0	4.2	12.5	7.5	46.3	252.6
2013	142.8	157.0	39.3	13.4	33.7	18.3	7.2	6.5	2.5	46.0	19.1	173.6
2014	210.4	78.2	36.0	18.6	0.0	0.0	3.3	29.2	111.5	30.7	20.1	107.3
2015	122.6	135.0	164.2	91.5	11.6	0.0	6.1	9.2	34.5	31.9	12.9	69.6
2016	96.7	176.8	108.1	75.3	2.6	2.2	10.1	4.0	17.6	37.9	13.7	107.3
2017	224.6	123.8	108.5	32.3	57.7	9.1	14.5	0.0	44.1	24.3	30.8	93.4
2018	115.8	212.6	134.9	45.0	21.4	34.1	31.4	6.4	0.1	105.1	9.2	41.6
2019	126.0	124.3	57.5	51.8	14.6	2.3	14.7	0.0	40.1	39.8	90.4	86.3
2020	98.7	112.4	51.2	15.8	6.1	0.4	0.0	0.0	39.0	41.8	35.7	170.3
2021	172.3	59.3	133.1	51.9	24.7	0.0	0.9	9.2	38.4	37.2	46.5	211.9

FUENTE: SENAMHI



JULI

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	275.3	236.3	138.4	16.7	10.9	14.3	0.6	17.0	1.2	62.2	1.9	119.5
2001	324.0	251.9	239.6	57.4	7.9	1.9	12.7	30.9	18.8	67.7	13.8	116.2
2002	145.8	216.8	239.1	134.2	8.6	16.5	42.4	10.9	3.7	39.4	37.4	107.1
2003	229.7	142.7	304.8	39.3	23.4	0.0	5.9	12.6	42.6	24.6	25.6	89.6
2004	322.0	115.8	68.4	54.9	11.6	2.0	34.0	49.9	25.3	11.1	25.7	126.3
2005	139.1	189.2	78.7	29.5	1.5	0.0	0.0	1.0	24.7	61.2	54.0	164.2
2006	347.2	196.8	174.1	44.6	37.7	3.3	0.0	2.3	13.9	43.5	113.6	93.9
2007	77.1	136.4	238.3	99.6	6.6	1.2	8.3	5.1	30.4	44.4	30.3	156.9
2008	296.4	109.5	88.7	44.4	0.8	2.5	1.2	0.5	0.7	52.0	15.9	177.3
2009	161.7	210.5	170.1	77.0	0.0	0.0	6.6	0.0	54.0	34.0	125.9	128.5
2010	236.2	217.6	107.0	25.1	42.5	0.0	0.0	9.1	5.3	62.5	13.1	117.0
2011	266.7	288.1	216.6	45.3	6.4	0.0	12.0	3.6	56.0	21.8	71.7	284.6
2012	224.9	339.6	239.7	79.0	0.0	1.2	1.3	1.5	5.4	17.7	31.8	241.0
2013	166.0	210.5	120.9	12.2	33.7	40.4	9.1	10.2	2.1	73.0	59.3	165.0
2014	278.8	103.5	67.3	40.0	5.7	0.0	2.0	39.2	69.8	44.8	47.3	87.5
2015	266.2	167.9	220.8	161.8	0.4	0.2	16.7	15.6	34.9	29.2	20.7	73.0
2016	114.8	251.8	6.7	84.9	2.3	5.0	8.0	5.0	18.4	44.3	11.5	125.0
2017	325.5	194.4	151.6	70.1	35.3	0.1	8.0	0.0	53.9	26.1	56.6	125.6
2018	257.8	246.4	169.1	31.7	4.5	24.8	38.8	21.4	7.7	103.5	12.2	69.5
2019	290.3	180.6	98.1	82.6	16.9	12.8	17.9	2.6	46.0	64.5	123.2	82.8
2020	135.6	126.1	203.5	65.3	5.4	0.2	0.0	0.0	36.0	65.7	16.3	250.4
2021	187.6	117.0	238.7	49.6	10.6	0.0	0.0	14.7	25.0	16.6	56.7	254.0

FUENTE: SENAMHI



DESAGUADERO

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	202.1	145.7	71.8	0.5	0.0	9.4	0.0	2.9	4.8	55.2	63.5	104.9
2001	340.0	278.2	136.9	17.5	3.2	7.5	14.8	20.7	28.7	28.6	12.0	95.6
2002	107.5	213.2	266.2	98.1	11.5	20.4	37.8	1.7	1.5	53.9	64.9	65.1
2003	171.9	102.2	149.2	2.0	12.8	0.0	0.0	5.1	35.9	5.9	22.8	103.5
2004	224.2	175.3	47.2	9.8	0.7	0.0	49.8	42.1	14.8	0.0	7.3	64.5
2005	98.1	215.2	123.0	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	30.4	44.2	64.8	138.1
2006	289.6	122.5	158.6	57.3	0.6	2.0	0.0	0.0	11.1	48.7	77.8	46.2
2007	34.3	72.6	269.3	31.2	0.0	0.0	9.9	3.4	19.4	8.9	43.8	47.6
2008	207.2	78.2	70.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	25.7	14.6	136.1
2009	129.2	228.1	86.3	30.8	0.0	0.0	1.8	0.0	3.8	61.5	50.4	94.3
2010	174.2	152.2	10.2	16.5	22.2	0.0	0.0	0.0	33.4	39.0	19.0	107.4
2011	125.9	212.7	128.7	37.8	8.7	0.0	14.8	0.0	24.4	14.8	57.6	144.7
2012	194.2	197.6	133.7	40.2	0.0	0.8	3.3	1.0	0.0	29.6	49.7	156.4
2013	209.3	127.7	64.5	0.0	35.6	51.6	1.3	22.4	0.0	56.5	56.4	139.1
2014	199.1	46.4	113.8	31.6	0.5	0.0	0.0	31.2	54.6	49.5	11.3	111.7
2015	268.6	119.3	101.6	176.9	0.6	0.0	13.5	44.7	23.6	47.3	20.9	62.5
2016	59.6	284.9	18.5	65.1	1.3	13.2	9.5	0.4	16.2	25.5	12.7	35.6
2017	270.4	141.7	144.8	39.7	138.5	0.0	4.6	0.0	62.4	44.1	16.6	73.9
2018	204.4	144.2	101.3	11.3	0.0	32.4	41.0	7.0	0.0	87.5	48.4	92.7
2019	258.4	164.4	134.3	76.5	0.0	12.2	18.5	0.0	61.4	54.6	95.7	133.2
2020	151.2	152.2	121.8	37.8	0.2	3.4	0.3	1.5	15.9	69.4	9.8	38.8
2021	118.7	174.6	151.5	24.3	0.8	0.0	0.0	4.7	3.2	11.8	42.4	164.6

FUENTE: SENAMHI



PIZACOMA

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	208.6	99.4	95.8	6.2	1.5	0.7	0.0	9.6	2.0	24.6	0.0	90.2
2001	317.3	226.5	92.1	16.5	0.0	4.6	0.4	5.6	1.8	10.7	22.7	37.9
2002	85.7	129.5	130.0	55.8	22.5	12.8	15.4	1.3	0.4	18.4	46.3	40.9
2003	127.7	143.9	143.5	9.2	4.6	0.0	5.3	5.8	2.7	3.7	2.8	95.1
2004	120.4	152.3	64.7	0.0	0.0	0.0	46.6	46.8	0.0	1.8	9.1	18.3
2005	123.6	259.1	68.8	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	43.0	27.8	21.0	175.9
2006	257.6	81.8	57.8	18.3	2.0	0.0	0.0	0.9	2.1	26.3	9.8	125.1
2007	150.1	37.1	147.9	30.0	0.0	0.0	0.0	0.9	7.5	17.0	32.9	84.1
2008	175.8	136.4	99.2	0.0	0.0	0.0	0.0	11.6	0.0	13.5	0.0	143.4
2009	47.1	153.4	56.7	12.2	0.0	0.0	17.2	0.0	15.2	14.7	63.5	59.8
2010	122.0	129.0	97.9	37.6	21.8	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9	2.9	125.4
2011	89.3	170.8	95.9	15.3	10.2	0.0	7.9	1.6	17.1	0.0	27.2	222.8
2012	131.9	206.3	129.6	68.5	0.4	0.0	0.0	1.4	13.4	12.1	21.0	137.1
2013	171.4	156.6	29.0	0.0	22.5	24.2	2.0	25.1	2.1	84.4	12.5	162.8
2014	149.6	50.3	16.8	5.7	0.0	0.0	0.0	10.2	35.8	20.1	16.6	57.1
2015	166.9	127.5	78.3	69.8	5.0	0.0	0.0	8.8	11.4	32.5	31.8	27.2
2016	52.7	204.9	13.3	42.1	1.2	9.4	6.5	0.1	2.8	18.3	9.3	89.6
2017	198.4	94.2	49.6	20.4	9.6	0.0	6.6	0.4	50.4	28.2	25.2	104.7
2018	127.8	186.6	136.2	33.7	0.6	40.2	30.9	0.0	0.4	42.5	30.9	147.9
2019	135.4	124.2	51.0	21.5	3.3	5.6	2.7	0.0	43.7	26.1	59.2	45.0
2020	131.3	258.6	34.8	18.9	0.2	0.0	0.0	0.0	38.3	28.3	10.3	127.6
2021	138.2	100.6	126.5	11.9	5.2	0.0	0.0	0.4	17.7	15.1	43.0	184.4

FUENTE: SENAMHI



MAZOCRUZ

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	179.5	135.8	64.1	22.9	6.4	1.2	0.0	1.2	0.6	28.3	7.9	82.2
2001	267.5	184.1	116.3	33.6	4.8	0.6	0.0	6.4	0.2	13.8	14.4	27.0
2002	70.4	175.4	120.3	75.6	17.0	9.2	10.0	2.2	2.0	51.1	36.3	81.1
2003	103.3	103.7	92.8	5.8	8.0	0.0	2.2	7.5	7.0	11.8	10.6	75.9
2004	142.8	118.8	82.4	16.2	0.0	0.8	26.2	59.6	12.1	0.0	0.0	41.9
2005	109.2	187.5	40.0	42.8	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	6.6	18.0	158.3
2006	271.5	118.1	109.5	26.9	11.4	0.2	0.0	0.4	5.0	37.7	57.2	94.2
2007	87.4	113.4	107.0	29.4	0.0	0.4	0.0	0.2	10.8	3.1	49.2	87.8
2008	194.4	52.7	57.9	1.4	0.0	0.0	0.0	6.4	0.0	6.3	3.0	132.2
2009	71.0	130.0	61.8	33.4	0.7	0.0	6.4	0.0	6.4	4.6	72.7	65.4
2010	103.5	61.4	40.6	44.2	20.5	0.0	0.0	0.0	0.8	9.4	6.3	82.4
2011	121.6	153.6	46.6	47.7	5.8	0.0	3.2	0.0	12.4	0.4	37.6	171.6
2012	183.0	174.4	87.1	73.8	0.2	0.0	0.4	3.4	0.9	7.6	36.0	142.6
2013	152.4	166.0	49.4	1.8	22.4	8.2	4.0	8.0	2.6	65.8	18.0	140.8
2014	160.5	28.2	37.0	25.5	0.0	0.0	0.0	15.0	24.6	33.0	47.8	57.4
2015	142.4	101.6	103.0	83.9	1.2	0.0	2.0	14.4	9.0	38.0	39.0	18.8
2016	33.8	174.8	25.4	65.7	0.4	5.8	4.4	0.2	1.4	8.6	6.5	39.4
2017	208.6	84.0	101.6	7.0	13.2	0.0	3.4	0.4	29.8	7.2	22.6	70.6
2018	172.1	168.6	83.2	42.3	1.4	14.1	43.4	0.2	0.6	43.2	13.0	93.6
2019	206.2	144.6	54.2	24.0	13.0	6.5	8.3	0.0	40.6	23.2	63.8	48.8
2020	113.3	218.6	65.3	60.5	74.3	0.0	0.0	0.0	21.0	45.8	6.0	169.2
2021	184.4	58.9	158.0	8.2	1.4	0.0	0.0	0.0	38.2	16.8	35.6	145.2

FUENTE: SENAMHI



MAÑAZO

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	143.5	190.0	75.1	17.6	6.3	0.0	0.0	3.8	8.6	73.3	9.3	107.3
2001	361.1	231.4	146.8	72.1	5.4	0.0	1.2	10.5	1.9	34.4	34.3	69.8
2002	77.3	161.2	106.2	68.3	21.2	8.7	12.4	6.8	9.7	77.2	70.7	98.5
2003	136.7	78.8	139.4	23.4	14.1	3.7	0.0	1.6	20.1	9.1	35.3	96.8
2004	183.3	133.7	89.7	38.0	0.0	1.1	10.8	23.3	19.6	3.4	11.8	30.5
2005	88.5	220.3	63.0	53.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	22.1	71.5	114.6
2006	219.8	92.6	108.8	30.7	1.2	0.0	0.0	1.8	28.5	22.8	62.5	103.1
2007	111.7	100.1	224.0	71.9	11.4	0.0	2.5	6.7	22.4	30.8	77.6	113.6
2008	231.1	103.0	70.2	0.0	5.5	0.0	0.0	1.2	1.2	27.9	4.1	154.5
2009	99.7	137.3	109.3	33.5	1.5	0.0	3.0	0.0	4.1	8.1	86.9	136.2
2010	116.9	173.4	77.3	25.2	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	24.4	35.5	105.5
2011	84.3	190.3	89.2	41.6	5.2	0.0	4.2	0.0	4.4	11.4	92.2	209.4
2012	158.3	250.3	163.1	62.7	0.0	0.0	0.0	2.2	1.5	2.3	61.2	181.4
2013	181.5	174.9	85.1	8.2	2.9	10.8	15.4	2.1	6.2	38.9	42.3	98.3
2014	166.0	51.3	55.8	68.7	1.2	0.2	0.8	27.7	43.0	43.4	69.3	113.2
2015	157.3	106.9	90.4	145.9	1.9	0.0	5.8	6.8	23.0	34.7	33.8	41.6
2016	36.4	130.2	19.7	99.6	1.4	1.5	4.1	0.0	3.5	64.0	10.6	52.9
2017	179.1	131.8	106.7	31.5	14.4	7.1	6.1	0.0	43.6	54.4	81.9	99.5
2018	161.0	146.6	118.3	40.6	6.7	23.5	30.3	0.0	11.2	66.7	48.6	108.0
2019	165.3	170.3	78.1	27.5	17.9	8.7	2.2	0.0	61.1	42.4	111.5	96.6
2020	124.8	196.4	66.1	15.5	0.9	0.0	0.0	0.0	85.6	47.3	1.0	186.4
2021	219.6	54.1	121.7	16.9	11.0	0.0	0.0	7.8	39.9	22.0	58.5	176.6

FUENTE: SENAMHI



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo VICTOR WIEL PAVIO QUENTRO
identificado con DNI 73868655 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA AGRICOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" CORRELACION DE LAS PRECIPITACIONES MEDIOS MENSUALES APLICANDO
DATOS DE SATELITE GPM Y ESTACIONES METEOROLOGICAS EN LA
CUENCA MOSE - PUNO "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 19 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo VICTOR WILLY PAVIO OLANTA
identificado con DNI 73868655 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA AGRICOLA.

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ CORRELACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MENSUALES APLICANDO DATOS DE SATELITE GPS Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUSCA ILOVE - PUNO ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 19 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella