



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

---

**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**

---

**Presentada por el Bachiller:**

Yordan Alexander Delgado Quispe

**Para optar al Título Profesional de  
Ingeniero Civil**

**Asesor:**

M.Sc. Ing. Víctor Manuel Arangoitia Valdivia

**CUSCO – PERÚ**

**2019**



## DEDICATORIA

La presente investigación la dedico:

A mi madre Elizabeth Quispe Huamani y mi padre Bernaldo Roberto Delgado Vera, por el amor incondicional que siempre me brindan, por confiar en mí, por sus consejos y enorme sacrificio en pro de mi educación, inculcado en valores y principios, parte importante de mi formación personal y profesional.

A mis hermanos: Nelson, Hernan, Belisario, Flor de Yanet y Bernaldo; por su apoyo constante y quienes siempre están pendientes de mi formación profesional.

A mis abuelos Carmen y Francisca (QEPPD), por inculcarme siempre valores y principios.

A mis amigos que siempre han estado a mi lado dándome su aliento para continuar.



## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Andina del Cusco.

A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, quienes contribuyeron en mi formación académica.

A mi asesor M.Sc. Ing. Víctor Arangoitia Valdivia, por su apoyo, su orientación, confianza y amistad en el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Carlos Luna Loayza, por las recomendaciones brindadas para el desarrollo de la investigación.

A la Ing. Jackeline Alejandra Peláez Gamarra, por los aportes brindados para el desarrollo de la investigación.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) - Sede Cusco y la UNSAAC por facilitarme la información.

Al Ing. Juan Carlos Diaz Valencia, por su apoyo y recomendaciones en el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Hector Acurio Cruz, por encaminarme en esta hermosa profesión y sus consejos.

A mis padres, hermanos y familiares por su incesante apoyo.

A mis amigos Juan Carlos, Epifanio, Alexander y todas las personas que siempre estuvieron durante el proceso de la investigación y están junto a mí.



## RESUMEN

Esta investigación, aplicada en la cuenca del río Vilcanota en el periodo de 1981-2017, tiene como objetivo evaluar la calidad de la precipitación estimada por satélite CHIRPS, con información grillada a una resolución espacial de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  ( $\sim 5*5$  km), con respecto a la precipitación observada por los pluviómetros.

Para la precipitación diaria CHIRPS, de 20 estaciones meteorológicas, se concluye que, a pesar de tener mayores probabilidades de acertar en la detección, todavía existe un gran porcentaje considerable que se manifiesta como falsa alarma, a pesar de que el 35% de las estaciones muestran sesgo muy bueno, la totalidad de estaciones muestra la eficiencia como insatisfactorio y correlación mala e incluso en ciertos casos no hay correlación, comparado con otros productos; PISCO es mejor que CHIRPS y CHIRPM. En la precipitación mensual, de 31 estaciones meteorológicas, en general, hay mayores Probabilidades de Detección que la generación de Falsa Alarma, Sesgo muy bueno y bueno, Eficiencia muy buena y buena y Correlación excelente y buena. Se obtienen mejores resultados de sesgo, eficiencia y correlación en la variación estacional que anual. En la precipitación mensual, estacional y anual, PISCO tiene mejores indicadores que CHIRPS y CHIRPM, excepto en las estaciones que no se utilizó para la generación de PISCO.

Se logra corregir la información CHIRPS mediante el Modelo de Redes Neuronales Artificiales (RNA), determinándose que el MAE y PBIAS son los indicadores estadísticos que más se mejoran.

Tras cumplir con los objetivos planteados en la investigación, se concluye que la información pluvial estimada por satélite del producto CHIRPS mediante una adecuada calibración y/o corrección se convierte en una valiosa alternativa de información para trabajos de gestión, monitoreo hidrometeorológico y modelización de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Vilcanota con limitaciones en términos de cobertura espacial y uniformidad temporal.

**PALABRAS CLAVE:** Cuenca del río Vilcanota, Validación, Corrección, Precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS, corrección mediante el Modelo de Redes Neuronales Artificiales (RNA).





### ABSTRACT

This research, applied in the Vilcanota river basin in the 1981-2017 period, aims to assess the quality of the precipitation estimated by CHIRPS satellite, with information grated at a spatial resolution of  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  ( $\sim 5 * 5$  km), with respect to the precipitation observed by the rain gauges.

For the CHIRPS daily precipitation of 20 weather stations, it is concluded that, despite having a greater probability of being successful in the detection, there is still a considerable percentage that manifests as a false alarm, despite the fact that 35% of the stations they show very good bias, all stations show efficiency as unsatisfactory and poor correlation and even in certain cases there is no correlation, compared to other products; PISCO is better than CHIRPS and CHIRPM. In the monthly precipitation of 31 weather stations, in general, there are much higher Detection Probabilities than the generation of False Alarm, Very good and good Bias, Very good and good Efficiency and Excellent and good Correlation. Better bias, efficiency and correlation results are obtained in the seasonal variation than in the annual one. In the monthly, seasonal and annual rainfall, PISCO has better indicators than CHIRPS and CHIRPM, except in stations that were not used for the generation of PISCO.

CHIRPS information is corrected by means of the Artificial Neural Networks (RNA) Model, determining that the MAE and PBIAS are the statistical indicators that are most improved.

After fulfilling the objectives set out in the investigation, it is concluded that the rainfall information estimated by satellite of the CHIRPS product by means of an adequate calibration and / or correction becomes a valuable alternative of information for management work, hydrometeorological monitoring and availability modeling water in the Vilcanota river basin with limitations in terms of spatial coverage and temporal uniformity.

**KEYWORDS:** Vilcanota River Basin, Validation, Correction, Precipitation estimated by satellite of the CHIRPS product, correction using the Neural Networks model (RNA).



## INTRODUCCIÓN

La precipitación es una variable climática de gran importancia para el estudio de procesos meteorológicos y mediante ello realizar trabajos de gestión, monitoreo hidrometeorológico y modelización de la disponibilidad hídrica.

Las estimaciones de la distribución espacial de las precipitaciones en el Perú representan un gran desafío, considerando su compleja fisiografía y la falta de pluviómetros sobretodo en la región amazónica (Mantas et al., 2015).

La medición de precipitación en la cuenca del Vilcanota, mediante estaciones in situ tiene grandes limitaciones en términos de cobertura espacial y uniformidad temporal; tal es así que, al año 2018, de 58 estaciones pluviométricas identificadas dentro y fuera de la cuenca sólo el 48% se encuentra en funcionamiento y de 20 estaciones ubicadas dentro de la cuenca sólo el 40% se encuentra en funcionamiento, las cuales la gran parte presenta inconsistencias de salto y tendencia en sus datos, lo que evidencia la falta de disponibilidad de datos y limitada uniformidad temporal. Además, se observa que las 20 estaciones ubicadas dentro de la cuenca del río Vilcanota con un área de 9613 Km<sup>2</sup>, forman una red pluviométrica con una densidad de 1 estación cada 480 km<sup>2</sup>, siendo mucho menor a la recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que para regiones montañosas en zonas tropicales, mediterráneas o templadas como es el caso de ésta investigación, se debe tener 1 estación cada 100 a 250 km<sup>2</sup>, evidenciando la limitada cobertura espacial.

Existe información de precipitación satelital con cobertura espacial y uniformidad temporal dentro del territorio peruano, disponible de manera libre; siendo la precipitación estimada por satélite CHIRPS en sus siglas en inglés (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) con cobertura espacial de 0.05° x 0.05° (~ 5\*5 km) y resolución temporal diaria, pentadal, decadal y mensual; con datos disponibles de manera libre con reporte de información desde 1981 hasta el presente (Funk, y otros, 2015); posibilitando el acceso a una nueva fuente de información pluvial, lo que hace necesario evaluar la calidad de esta información para garantizar la confiabilidad de los datos, antes de su utilización.

A nivel internacional la validación de la precipitación CHIRPS fueron realizados principalmente por (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016) en Colombia y (Collarani & Villazon, 2018) en Bolivia.



En el Perú, la validación de datos CHIRPS fue realizado por (Yupanqui & SENAMHI, 2015) para el monitoreo de periodos secos y húmedos en el Peru, que forma parte de la Dirección Genera de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI. Los principales estudios de corrección mediante Redes Neuronales Artificiales fueron realizados por (Lujano & Felipe, 2013)

La información observada mediante estaciones meteorológicas presenta inconsistencia de datos que pueden ser generada por efectos de la naturaleza o intervención del hombre. (Aliaga Araujo, 1983). Se manifiestan en saltos, tendencias y ausencia de datos; por lo tanto, es necesario realizar análisis de saltos y tendencias para la corrección de posibles errores de medición y posterior completación de datos.

Para (Bertona, 2005), las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son modelos matemáticos que intentan reproducir el funcionamiento del sistema nervioso. Según (Retalis, Tymvios, Katsanos, & Michaelides, 2017), una red neuronal artificial (RNA) es un grupo interconectado de neuronas artificiales que puede aprender y exhibir un comportamiento específico basado en la experiencia obtenida a través de procedimientos de entrenamiento similares a los del cerebro.

Es así que, se desarrolla la presente investigación con el tema: “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”, Con el objetivo de validar la base de datos CHIRPS sobre la cuenca del río Vilcanota en el periodo de 1981 a 2017, usando los datos observados por las estaciones *in situ* disponibles como valor verdadero.

Por lo tanto, se evalua la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS con respecto a la precipitación observada por los pluviómetros, mediante Estadísticos de Validación Categórica (POD, FAR, TS), Estadísticos de Comparación por Pares (MAE, PBIAS, NSE, CORRELACIÓN PEARSON) y en comparación con los productos CHIRPM y PISCO, antes y después de la corrección mediante el modelo de Redes Neuronales Artificiales; para determinar si la información es de calidad, y disponer datos con suficiente cobertura espacial y uniformidad temporal.



ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA ..... i**

**AGRADECIMIENTOS ..... ii**

**RESUMEN ..... iii**

**ABSTRACT ..... iv**

**INTRODUCCIÓN..... v**

**ÍNDICE GENERAL..... vii**

**ÍNDICE DE TABLAS ..... xi**

**ÍNDICE DE FIGURA ..... xviii**

**Capítulo I: Planteamiento del Problema..... 1**

**1.1. Identificación del Problema..... 1**

**1.1.1. Descripción del Problema ..... 1**

**1.1.2. Formulación interrogativa del problema ..... 8**

**1.2. Justificación e Importancia de la investigación..... 9**

**1.2.1. Justificación técnica..... 9**

**1.2.2. Justificación social ..... 9**

**1.2.3. Justificación por viabilidad..... 9**

**1.2.4. Justificación por relevancia ..... 10**

**1.3. Limitaciones de la Investigación ..... 10**

**1.3.1. Limitaciones de orden geográfico ..... 10**

**1.3.2. Limitaciones del estudio ..... 10**

**1.3.3. Limitaciones de información ..... 10**

**1.4. Objetivo de la Investigación ..... 11**

**1.4.1. Objetivo General..... 11**

**1.4.2. Objetivos Específicos..... 11**

**Capítulo II: Marco Teórico ..... 12**

**2.1. Antecedentes de la Tesis o Investigación Actual ..... 12**

**2.2.1 Antecedentes a Nivel Nacional..... 12**

**2.2.2 Antecedentes a Nivel Internacional..... 14**

**2.2. Aspectos Teóricos Pertinentes..... 18**

**2.2.1 Ciclo hidrológico ..... 18**

**2.2.2 Precipitación..... 18**



- 2.2.2.1. Formas de precipitación ..... 19
- 2.2.2.2. Clasificación de la precipitación ..... 19
- 2.2.2.3. Instrumentos de medición ..... 20
- 2.2.2.4. Herramientas de percepción remota ..... 23
- 2.2.3 Precipitaciones estimadas por satélite ..... 28
  - 2.2.3.1. CHIRPS ..... 29
  - 2.2.3.2. CHIRP ..... 30
  - 2.2.3.3. CHIRPM ..... 31
  - 2.2.3.4. PISCO ..... 32
- 2.2.4 Tratamiento de datos hidrometeorológicos ..... 35
  - 2.2.4.1. Análisis de consistencia ..... 35
  - 2.2.4.2. Completación de datos ..... 45
- 2.2.5 Red Neuronal Artificial ..... 46
  - 2.2.5.1. Historia de las Redes Neuronales Artificiales ..... 47
  - 2.2.5.2. Funcionamiento y Modelos de Redes Neuronales Artificiales ..... 49
  - 2.2.5.3. Descripción del Modelo de Neurona Artificial ..... 50
  - 2.2.5.4. Clasificación de las Redes Neuronales ..... 52
  - 2.2.5.5. Perceptron ..... 54
  - 2.2.5.6. Mecanismos de aprendizaje ..... 57
  - 2.2.5.7. Modelamiento con Redes Neuronales Artificiales ..... 61
- 2.2.6 Métricas estadísticas de desempeño ..... 62
  - 2.2.6.1. Estadísticos de Validación Categórica ..... 62
  - 2.2.6.2. Estadísticas de Comparación por Pares. .... 64
- 2.3. Hipótesis ..... 69
  - 2.3.1. Hipótesis General ..... 69
  - 2.3.2. Sub hipótesis ..... 69
- 2.4. Definición de Variables ..... 70
  - 2.4.1. Variables Independientes ..... 70
  - 2.4.2. Variables Dependientes ..... 70
  - 2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables ..... 70
- Capítulo III: Metodología ..... 71
  - 3.1. Metodología de la Investigación ..... 71
    - 3.1.1. Enfoque de la investigación ..... 71
    - 3.1.2. Nivel o alcance de la investigación ..... 71



- 3.1.3. Método de investigación ..... 71
- 3.2. Diseño de la Investigación..... 71
  - 3.2.1. Diseño metodológico ..... 71
  - 3.2.2. Diseño de Ingeniería ..... 72
- 3.3. Población y Muestra..... 73
  - 3.3.1. Población ..... 73
    - 3.3.1.1. Descripción de la población..... 73
    - 3.3.1.2. Cuantificación de la población..... 73
  - 3.3.2. Muestra..... 73
    - 3.3.2.1. Descripción de la muestra..... 73
    - 3.3.2.2. Cuantificación de la muestra..... 73
    - 3.3.2.3. Método de muestreo ..... 74
    - 3.3.2.4. Criterios de evaluación de muestra ..... 74
  - 3.3.3. Criterios de inclusión..... 75
- 3.4. Instrumentos ..... 76
  - 3.4.1. Instrumentos Metodológicos o Instrumentos de Recolección de Datos ..... 76
  - 3.4.2. Instrumentos de Ingeniería ..... 78
  - 3.4.3. Equipos y programas de cómputo ..... 78
- 3.5. Procedimientos de Recolección de Datos ..... 79
  - 3.5.1. Procedimiento de recolección de datos de la precipitación pluvial ..... 79
    - 3.5.1.1. Precipitación diaria..... 79
    - 3.5.1.2. Precipitación mensual..... 91
- 3.6. Procedimientos de Análisis de datos..... 102
  - 3.6.1. Descripción general de la cuenca ..... 102
    - 3.6.1.1. Ubicación geográfica y política ..... 102
    - 3.6.1.2. Ubicación hidrográfica ..... 103
    - 3.6.1.3. Codificación de la cuenca – Metodo Pfastetter ..... 103
    - 3.6.1.4. Características de la cuenca ..... 104
  - 3.6.2. Precipitación Diaria ..... 106
    - 3.6.2.1. Diagrama de flujo ..... 106
    - 3.6.2.2. Estadísticos de validación categórica ..... 107
    - 3.6.2.3. Estadísticas de comparación por pares..... 112
    - 3.6.2.4. Comparación con otros productos de precipitación diaria..... 118
  - 3.6.3. Precipitación Mensual..... 119



- 3.6.3.1. Análisis de consistencia de datos mensuales ..... 119
- 3.6.3.2. Completación de datos faltantes en precipitaciones mensuales..... 150
- 3.6.3.3. Estadísticos de validación de datos mensuales ..... 164
- 3.6.3.4. Estadísticos de validación de datos multimensuales ..... 187
- 3.6.4. Precipitación Estacional ..... 199
- 3.6.4.1. Estadísticos de validación de datos estacionales ..... 205
- 3.6.4.2. Estadísticos de validación de datos multiestacionales ..... 215
- 3.6.5. Precipitación Anual..... 222
- 3.6.5.1. Estadísticas de comparación por pares precipitación anual..... 226
- 3.6.5.2. Comparación con otros productos de precipitación anual ..... 232
- 3.6.6. Corrección mediante Redes Neuronales Artificiales (RNA) ..... 233
- 3.6.6.1. Arquitectura de las Redes Neuronales Artificiales ..... 235
- 3.6.6.2. Entrenamiento de los modelos ..... 235
- 3.6.6.3. Selección del mejor modelo de red neuronal..... 236
- 3.6.6.4. Resumen de arquitecturas obtenidas ..... 277
- 3.6.6.5. Completación de datos faltantes luego de la corrección mediante RNA ..... 282
- 3.6.7. Precipitación mensual corregida mediante RNA ..... 286
- 3.6.7.1. Estadísticos de validación de datos mensuales corregidos con RNA ..... 286
- 3.6.7.2. Estadísticos de validación de datos multimensuales corregidos con RNA ... 308
- 3.6.8. Precipitación Estacional corregida mediante RNA..... 316
- 3.6.8.1. Estadísticos de validación de datos estacionales corregidos con RNA ..... 316
- 3.6.8.2. Estadísticos de validación de datos multiestacionales corregidos con RNA. 322
- 3.6.9. Precipitación Anual..... 326
- 3.6.9.1. Estadísticas de comparación por pares precipitación anual..... 330
- 3.6.9.2. Comparación con otros productos de precipitación anual ..... 334
- Capítulo IV: Resultados..... 335
- 4.1. Precipitación estimada por satélite sin corrección ..... 335
- 4.1.1. Precipitación diaria ..... 335
- 4.1.2. Precipitación mensual ..... 351
- 4.1.3. Precipitación estacional..... 371
- 4.1.4. Precipitación anual ..... 378
- 4.2. Corrección de la precipitación mensual mediante RNA..... 384
- 4.3. Precipitación estimada por satélite corregida mediante RNA ..... 386
- 4.3.1. Precipitación mensual. .... 386



4.3.2. Precipitación estacional..... 413

4.3.3. Precipitación anual..... 424

Capítulo V: Discusión ..... 434

5.1. Contraste de resultados con referentes del marco teórico..... 434

5.2. Interpretación de los resultados encontrados en la investigación..... 435

5.3. Comentario de la demostración de la hipótesis ..... 438

5.4. Aporte de la investigación..... 440

5.5. Incorporación de temas nuevos que se han presentado durante el proceso de la investigación que no estaba considerado dentro de los objetivos de la investigación .... 441

Glosario ..... 442

Conclusiones ..... 443

Recomendaciones ..... 447

Referencias..... 448

Anexos ..... 454

**ÍNDICE DE TABLAS**

**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas convencionales identificadas. .... 2

**Tabla 2.** Estado de funcionamiento al 2018 de las Estaciones meteorológicas identificadas en el área de estudio. .... 4

**Tabla 3.** Resumen de estado actual de las estaciones meteorológicas en el área de estudio.... 5

**Tabla 4.** Estaciones meteorológicas convencionales identificadas dentro de la cuenca Vilcanota. .... 6

**Tabla 5.** Resumen de estado actual de las estaciones meteorológicas-Cuenca Vilcanota. .... 6

**Tabla 6.** Productos de precipitación disponibles. .... 28

**Tabla 7.** Versiones de PISCO de precipitación anteriores y la versión de este reporte (2.0).. 33

**Tabla 8.** Funciones de activación ..... 56

**Tabla 9.** Tipos de redes con aprendizaje supervisado más conocidas..... 59

**Tabla 10.** Redes con aprendizaje no supervisado más conocidas. .... 61

**Tabla 11.** Estadísticas basadas en una tabla de contingencia. .... 63

**Tabla 12.** Estadísticos de Validación Categórica. .... 64

**Tabla 13.** Rangos e interpretación del Sesgo Porcentual (PBIAS). .... 65





<b>Tabla 14.</b> Rangos e interpretación de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). .....	66
<b>Tabla 15.</b> Rango e interpretación de la correlación de Pearson (r). .....	67
<b>Tabla 16.</b> Resumen de indicadores estadísticos. ....	67
<b>Tabla 17.</b> Operacionalización de variables.....	70
<b>Tabla 18.</b> Muestra de la precipitación diaria. ....	73
<b>Tabla 19.</b> Muestra de la precipitación mensual. ....	74
<b>Tabla 20.</b> Formato de recolección de datos de precipitación diaria. ....	76
<b>Tabla 21.</b> Formato de recolección de datos de precipitación mensual. ....	77
<b>Tabla 22.</b> Información del uso de los programas de cómputo utilizados .....	78
<b>Tabla 23.</b> Estaciones meteorológicas del SENAMHI – Precipitación diaria. ....	79
<b>Tabla 24.</b> Precipitación diaria CHIRPS organizada. ....	84
<b>Tabla 25.</b> Precipitación diaria CHIRPMd organizada.....	87
<b>Tabla 26.</b> Precipitación diaria PISCO_Pd organizada.....	90
<b>Tabla 27.</b> Estaciones meteorológicas – Precipitación mensual. ....	92
<b>Tabla 28.</b> Precipitación mensual CHIRPS organizada – Estación Kayra. ....	95
<b>Tabla 29.</b> Precipitación diaria CHIRPMm organizada – Estación Kayra. ....	98
<b>Tabla 30.</b> Precipitación diaria PISCO_Pm organizada – Estación Kayra. ....	101
<b>Tabla 31.</b> Provincias y distritos de la cuenca del Vilcanota . ....	102
<b>Tabla 32.</b> Aciertos (A), Falsa Alarma (B) y Pérdida (C) para umbral = 0.8 mm en Pd.....	107
<b>Tabla 33.</b> Tabla de contingencia para el umbral de 0.8mm/día. ....	107
<b>Tabla 34.</b> Indicadores estadísticos de validación Categórica para umbral = 0.8 mm. ....	108
<b>Tabla 35.</b> Resultados de aciertos (A) para los umbrales de precipitación.....	109
<b>Tabla 36.</b> Resultados de falsa alarma (B) para los umbrales de precipitación.....	110
<b>Tabla 37.</b> Resultados de Pérdida (C) para los umbrales de precipitación. ....	111
<b>Tabla 38.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares. ....	114
<b>Tabla 39.</b> Precipitación mensual estación Kayra.....	120
<b>Tabla 40.</b> Distribucion “t – Student”. ....	123
<b>Tabla 41.</b> Valores de distribución de Fisher F, $\alpha=0.05$ .....	125
<b>Tabla 42.</b> Organización de los datos de precipitación pluvial mensual de la estación Kayra.	128
<b>Tabla 43.</b> Distribución “t – Student”. ....	131
<b>Tabla 44.</b> Datos de precipitación mensual estación Colquepata. ....	132
<b>Tabla 45.</b> Primero y segundo periodo de precipitación mensual – estación Colquepata. ....	135
<b>Tabla 46.</b> Distribución “t – Student”. ....	138
<b>Tabla 47.</b> Valores de distribución de Fisher F, $\alpha=0.05$ . ....	141



<b>Tabla 48.</b> Organización de los datos de precipitación pluvial mensual de la estación Colquepata.....	143
<b>Tabla 49.</b> Distribución “t – Student”.....	146
<b>Tabla 50.</b> Análisis de consistencia de la precipitación mensual – primera parte. ....	147
<b>Tabla 51.</b> Análisis de consistencia de la precipitación mensual – segunda parte. ....	148
<b>Tabla 52.</b> Resumen de análisis de tendencia en la media de la precipitación mensual.....	149
<b>Tabla 53.</b> Disposición de la precipitación mensual por cada estación por año dentro del periodo 1964-2017. ....	151
<b>Tabla 54.</b> Formación de grupos para la completación de datos. ....	154
<b>Tabla 55.</b> Formación de grupos para la completación de datos – Estacion Colquepata. ....	160
<b>Tabla 56.</b> Indicadores de comparación del promedio multimensual-Estacion Colquepata. .	161
<b>Tabla 57.</b> Indicadores de comparación de la desviación estándar multimensual-Estación Colquepata.....	161
<b>Tabla 58.</b> Datos completados de la precipitación mensual – Estación Colquepata. ....	163
<b>Tabla 59.</b> Aciertos (A), Falsa Alarma (B) y Pérdida (C) para un umbral de 60 mm. ....	165
<b>Tabla 60.</b> Tabla de contingencia para un umbral de 60 mm/día-Estación Kayra. ....	165
<b>Tabla 61.</b> Indicadores estadísticos de validación Categórica para umbral = 60 mm. ....	166
<b>Tabla 62.</b> Resultados de aciertos (A) para los umbrales de precipitación mensual. ....	170
<b>Tabla 63.</b> Resultados de falsa alarma (B) para los umbrales de precipitación mensual.....	171
<b>Tabla 64.</b> Resultados de Pérdida (C) para los umbrales de precipitación mensual.....	172
<b>Tabla 65.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares. ....	175
<b>Tabla 66.</b> Resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD)-PISCO.....	180
<b>Tabla 67.</b> Resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD)-PISCO.....	180
<b>Tabla 68.</b> Resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR)-PISCO.....	180
<b>Tabla 69.</b> Resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR)-PISCO.....	181
<b>Tabla 70.</b> Resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección critico (TS)-PISCO.....	181
<b>Tabla 71.</b> Resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección critico (TS)-PISCO.....	181
<b>Tabla 72.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares. ....	182



**Tabla 73.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD)-CHIRPM..... 183

**Tabla 74.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD)-CHIRPM..... 183

**Tabla 75.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR)-CHIRPM..... 183

**Tabla 76.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR)-CHIRPM..... 184

**Tabla 77.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección critico (TS)-CHIRPM..... 184

**Tabla 78.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección critico (TS)-CHIRPM..... 184

**Tabla 79.** Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares. .... 185

**Tabla 80.** Precipitación mensual observada completada - estación Kayra..... 187

**Tabla 81.** Precipitación mensual estimada por satélite CHIRPS - estación Kayra. .... 188

**Tabla 82.** Promedio y desviación estándar multimensual precipitación mensual observada – Estación Kayra. .... 188

**Tabla 83.** Promedio y desviación estándar multimensual precipitación mensual estimada por satélite CHIRPS – Estación Kayra. .... 189

**Tabla 84.** Resumen de indicadores de comparación multimensual – estación Kayra..... 190

**Tabla 85.** Precipitación mensual estacional observada completada - estación Kayra..... 199

**Tabla 86.** Precipitación mensual estimada por satélite CHIRPS - estación Kayra. .... 200

**Tabla 87.** Precipitación mensual observada completada según año hidrológico- estación Kayra. .... 201

**Tabla 88.** Precipitación mensual estimada por satélite CHIRPS según año hidrológico - estación Kayra. .... 202

**Tabla 89.** Precipitación estacional observada – Estación Kayra. .... 203

**Tabla 90.** Precipitación estacional Estimada por satélite CHIRPS – Estación Kayra..... 204

**Tabla 91.** Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares precipitación estacional..... 208

**Tabla 92.** Promedio y desviación estándar precipitación estacional observada – Estación Kayra. .... 215

**Tabla 93.** Promedio y desviación estándar precipitación estacional estimada por satélite CHIRPS – Estación Kayra. .... 215



<b>Tabla 94.</b> Resumen de indicadores de comparación de la precipitación estacional– estación Kayra. ....	217
<b>Tabla 95.</b> Precipitación anual observados sin corregir. ....	222
<b>Tabla 96.</b> Precipitación anual observados sin corregir. ....	223
<b>Tabla 97.</b> Precipitación anual estimada por satélite CHIRPS sin corregir. ....	224
<b>Tabla 98.</b> Precipitación anual estimada por satélite CHIRPS sin corregir. ....	225
<b>Tabla 99.</b> Resumen de los indicadores de comparación de la precipitación anual. ....	228
<b>Tabla 100.</b> Distribución de datos de precipitación mensual para la corrección por RNA. ...	235
Tabla 101. Planteamiento de los modelos de RNA de acuerdo a la cantidad de variables de entrada. ....	235
<b>Tabla 102.</b> Consideraciones importantes para el modelamiento de Redes Neuronales Artificiales. ....	235
<b>Tabla 103.</b> Precipitación estimada por satélite CHIRPS – Estación Kayra. ....	236
<b>Tabla 104.</b> Precipitación observada según SENAMHI – Estación Kayra. ....	237
<b>Tabla 105.</b> Salida de las diferentes arquitecturas, mes de enero – Kayra. ....	240
<b>Tabla 106.</b> Salida de las diferentes arquitecturas – mes de febrero – Kayra. ....	244
<b>Tabla 107.</b> Salida de las diferentes arquitecturas mes de abril – Kayra. ....	249
<b>Tabla 108.</b> Salida de las diferentes arquitecturas, mes de mayo – Kayra. ....	253
<b>Tabla 109.</b> Salida de las diferentes arquitecturas – mes de julio – Kayra. ....	258
<b>Tabla 110.</b> Salida de las diferentes arquitecturas – mes de agosto – Kayra. ....	262
<b>Tabla 111.</b> Salida de las diferentes arquitecturas, mes de octubre – Kayra. ....	267
<b>Tabla 112.</b> Salida de las diferentes arquitecturas, mes de noviembre – Kayra. ....	271
<b>Tabla 113.</b> Salida de las diferentes arquitecturas, mes de diciembre – Kayra. ....	275
<b>Tabla 114.</b> Resumen de las arquitecturas para cada modelo de RNA – Estación Kayra. ....	277
<b>Tabla 115.</b> Resumen de arquitecturas de RNA para cada modelo planteado – primera parte. ....	278
<b>Tabla 116.</b> Resumen de arquitecturas de RNA para cada modelo planteado - segunda parte. ....	279
<b>Tabla 117.</b> Resumen de arquitecturas por modelo y estación. ....	280
<b>Tabla 118.</b> Resumen total de modelos de RNA obtenidos para las 31 estaciones. ....	281
<b>Tabla 119.</b> Cantidad de datos eliminados en el proceso de corrección mediante RNA. ....	282
<b>Tabla 120.</b> Aciertos (A), Falsa Alarma (B) y Perdida (C) de la precipitación mensual CHIRPS_rna. ....	287
<b>Tabla 121.</b> Tabla de contingencia para un umbral de 60 mm/día – CHIRPS_RNA. ....	287



<b>Tabla 122.</b> Indicadores estadísticos de validación Categórica para umbral = 60 mm. ....	288
<b>Tabla 123.</b> Resultados de aciertos (A) para los umbrales de precipitación – CHIRPS_RNA. .....	292
<b>Tabla 124.</b> Resultados de falsa alarma (B) para los umbrales de precipitación – CHIRPS_RNA. ....	293
<b>Tabla 125.</b> Resultados de Pérdida (C) para los umbrales de precipitación – CHIRPS_RNA. .....	294
<b>Tabla 126.</b> Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD), precipitación mensual – RNA. ....	295
<b>Tabla 127.</b> Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD), precipitación mensual – RNA. ....	295
<b>Tabla 128.</b> Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR), precipitación mensual – RNA.....	295
<b>Tabla 129.</b> Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR), precipitación mensual – RNA.....	296
<b>Tabla 130.</b> Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección critico (TS), precipitación mensual – RNA.....	296
<b>Tabla 131.</b> Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección critico (TS), precipitación mensual – RNA.....	296
<b>Tabla 132.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares. ....	297
<b>Tabla 133.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares precipitación estacional corregida mediante RNA.....	317
<b>Tabla 134.</b> Precipitación anual observados. ....	326
<b>Tabla 135.</b> Precipitación anual observados. ....	327
<b>Tabla 136.</b> Precipitación anual estimada por satélite CHIRPS corregidos mediante RNA. .	328
<b>Tabla 137.</b> Precipitación anual estimada por satélite CHIRPS corregidos mediante RNA. .	329
<b>Tabla 138.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares precipitación anual corregida mediante RNA. ....	330
<b>Tabla 139.</b> Relación de estaciones con precipitación diaria.....	335
<b>Tabla 140.</b> Indicadores estadísticos de validación Categórica para umbral = 0.8 mm. ....	336
<b>Tabla 141.</b> Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD).....	340
<b>Tabla 142.</b> Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR) .....	340



**Tabla 143.** Cuadro resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección crítico (TS) ..... 340

**Tabla 144.** Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares. .... 341

**Tabla 145.** Resumen de estaciones que requieren primera corrección..... 352

**Tabla 146.** Resumen de Análisis de saltos en la media y desviación estándar de la precipitación mensual – segunda parte..... 352

**Tabla 147.** Resumen de análisis de tendencia en la media de la precipitación mensual..... 352

**Tabla 148.** Resumen de los datos completados – primera parte. .... 354

**Tabla 149.** Resumen de los datos completados – segunda parte..... 355

**Tabla 150.** Resumen de los datos completados – tercera parte. .... 356

**Tabla 151.** Resumen de los datos completados – cuarta parte. .... 357

**Tabla 152.** Indicadores estadísticos de validación Categórica para umbral = 60 mm. .... 358

**Tabla 153.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD). .... 359

**Tabla 154.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Probabilidad de detección (POD). .... 359

**Tabla 155.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR). .... 359

**Tabla 156.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Ratio de falsa alarma (FAR). .... 360

**Tabla 157.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección crítico (TS)..... 360

**Tabla 158.** Resumen de los estadísticos de validación categórica. Índice de detección crítico (TS)..... 360

**Tabla 159.** Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares. .... 361

**Tabla 160.** Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares precipitación estacional. .... 371

**Tabla 161.** Resumen de los indicadores de comparación de la precipitación anual. .... 378

**Tabla 162.** Resumen de arquitecturas por modelo y estación. .... 384

**Tabla 163.** Resumen total de modelos de RNA obtenidos para las 31 estaciones. .... 385

**Tabla 164.** Indicadores estadísticos de validación Categórica para umbral = 60 mm. .... 386

**Tabla 165.** Probabilidad de Detección (POD) para umbral = 60 mm precipitación mensual. .... 387

**Tabla 166.** Cantidad de estaciones CHIRPS mejoradas en la POD para umbral = 60 mm. . 388



<b>Tabla 167.</b> Ratio de Falsa Alarma (FAR) para umbral = 60 mm precipitación mensual.....	390
<b>Tabla 168.</b> Cantidad de estaciones CHIRPS mejoradas en la FAR para umbral = 60 mm...	391
<b>Tabla 169.</b> Índice de Detección Crítico (TS) para umbral = 60 mm precipitación mensual.	393
<b>Tabla 170.</b> Cantidad de estaciones CHIRPS mejoradas en la TS para umbral = 60 mm.....	394
<b>Tabla 171.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares. ....	396
<b>Tabla 172.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares precipitación estacional corregida mediante RNA.....	413
<b>Tabla 173.</b> Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares precipitación anual corregida mediante RNA. ....	424
<b>Tabla 174.</b> Mejora de la precipitación mensual, estacional y anual corregida mediante RNA .....	437

## ÍNDICE DE FIGURA

<b>Figura 1.</b> Distribución espacial de las estaciones ubicadas en el área de estudio. ....	3
<b>Figura 2.</b> Distribución temporal de la precipitación mensual total-Estación Colquepata.....	3
<b>Figura 3.</b> Distribución espacial de las estaciones según estado de funcionamiento al 2018. ...	5
<b>Figura 4.</b> Porcentaje de las estaciones en estado de funcionamiento. ....	6
<b>Figura 5.</b> Porcentaje de las estaciones dentro de la cuenca Vilcanota en estado de funcionamiento y no funcionamiento.....	7
<b>Figura 6.</b> Ciclo hidrológico. ....	18
<b>Figura 7.</b> Esquema de pluviómetro. ....	21
<b>Figura 8.</b> Ilustración de pluviógrafo.....	22
<b>Figura 9.</b> Medición de la precipitación mediante radar.....	23
<b>Figura 10.</b> Sistema de satélites geoestacionarios Meteorológicos Mundial.....	24
<b>Figura 11.</b> Red global de satélites geoestacionarios y de órbita polar. ....	25
<b>Figura 12.</b> Esquema conceptual de la generación de datos CHIRPS.....	30
<b>Figura 13.</b> Esquema de producción y aplicación de CHIRPS (a), Mapa que muestra las temporadas de tres meses más húmedas basadas en CHPclim (b).....	31
<b>Figura 14.</b> Esquema general del desarrollo de PISCOp. V2.1. ....	34
<b>Figura 15.</b> Identificación de un salto en un hidrograma.....	36
<b>Figura 16.</b> Identificación de tendencia en un hidrograma.....	41
<b>Figura 17.</b> Segunda corrección de datos hidrometeorológicos. ....	44





**Figura 18.** Representación esquemática del procedimiento de completación de datos faltantes método CUTOFF..... 46

**Figura 19.** Modelo simplificado de una neurona biológica..... 49

**Figura 20.** Neurona artificial..... 50

**Figura 21.** Modelo de red neuronal artificial. .... 50

**Figura 22.** Clasificación de las Redes neuronales artificiales. .... 52

**Figura 23 .** Red monocapa ..... 53

**Figura 24.** Red Multicapa..... 53

**Figura 25.** Perceptron. .... 54

**Figura 26.** Perceptron multicapa. .... 55

**Figura 27.** Elementos de una Red Neuronal Artificial..... 55

**Figura 28.** Ciclo del aprendizaje supervisado. .... 58

**Figura 29.** Ciclo del aprendizaje no supervisado. .... 60

**Figura 30.** Diagrama de Taylor para la comparación del desempeño de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPMm. Estación Kayra..... 68

**Figura 31.** Flujograma del diseño de ingeniería..... 72

**Figura 32.** Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas – precipitación diaria. .... 80

**Figura 33.** Página web de acceso para la descarga de datos CHIRPS-PDIARIO..... 81

**Figura 34.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación CHIRPS. .... 82

**Figura 35.** Extracción de datos mediante código de programación en R..... 83

**Figura 36.** Página web de acceso a la descarga de datos CHIRPM-PDIARIO. (CHIRPMd). 85

**Figura 37.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación CHIRPMd..... 86

**Figura 38.** Página web de acceso para la descarga de datos PISCO (PISCO\_Pd)..... 88

**Figura 39.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación PISCO\_Pd. .... 89

**Figura 40.** Distribución espacial de las estaciones con precipitación mensual identificadas y seleccionadas en el área de estudio. .... 91

**Figura 41.** Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas – precipitación mensual. .... 93

**Figura 42.** Página web de acceso para la descarga de datos CHIRPS-PMENSUAL. .... 93

**Figura 43.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación CHIRPS. .... 94





<b>Figura 44.</b> Página web de acceso para la descarga de datos CHIRPM-PMENSUAL (CHIRPMm).....	96
<b>Figura 45.</b> Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación CHIRPMm. ....	97
<b>Figura 46.</b> Página web de acceso para la descarga de datos PISCO (PISCO_Pm).....	99
<b>Figura 47.</b> Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación PISCO_Pm. ....	100
<b>Figura 48.</b> Ubicación geográfica y política de la cuenca del río Vilcanota. ....	102
<b>Figura 49.</b> Unidades Hidrográficas nivel 1 hasta nivel 4. ....	103
<b>Figura 50.</b> Unidades Hidrográficas nivel 5 y ubicación de cuenca Vilcanota. ....	104
<b>Figura 51.</b> Ubicación de la zona de estudio según el Modelo Digital de Elevaciones (MDE). .....	105
<b>Figura 52.</b> Variación de la elevación dentro del área de la cuenca del río Vilcanota. ....	105
<b>Figura 53.</b> Diagrama de flujo de validación de la precipitación diaria estimada por satélite CHIRPS. ....	106
<b>Figura 54.</b> Serie de tiempo de la precipitación diaria e indicadores estadísticos de comparación por pares – Kayra.....	114
<b>Figura 55.</b> Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación diaria. ....	115
<b>Figura 56.</b> Variación espacial de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) de la precipitación diaria. ....	116
<b>Figura 57.</b> Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación diaria.....	117
<b>Figura 58.</b> Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación diaria.....	117
<b>Figura 59.</b> Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) de la precipitación diaria. ..	118
<b>Figura 60.</b> Comparativo de los estadísticos de validación categórica. Kayra. ....	119
<b>Figura 61.</b> Serie de tiempo de la precipitación mensual por periodo seleccionado – Kayra. ....	121
<b>Figura 62.</b> Identificación de tendencia en un hidrograma. ....	127
<b>Figura 63.</b> Serie de tiempo de la precipitación mensual Est. Colquepata. ....	133
<b>Figura 64.</b> Comparativo de la precipitación de las Estaciones Colquepata-Paucartambo-Pisac. .....	133
<b>Figura 65.</b> Comparativo de la precipitación mensual Estaciones Colquepata-Kayra.....	134
<b>Figura 66.</b> Serie de tiempo de la precipitación mensual Est. Colquepata por periodo. ....	134
<b>Figura 67.</b> Identificación de tendencia en un hidrograma. ....	142
<b>Figura 68.</b> Procedimiento general de completación de datos faltantes. ....	150



**Figura 69.** Número de estaciones con años completos de datos mensuales por año dentro del periodo (1964-2017)..... 151

**Figura 70.** Disponibilidad temporal de la información en las 31 estaciones, período 1964 – 2017..... 152

**Figura 71.** Diagrama de bloques del procedimiento de completación de datos mensuales. . 153

**Figura 72.** Visualización espacial de los grupos formados para completación de datos. .... 155

**Figura 73.** Visualización espacial de los grupos formados para completación de datos g) Grupo 07..... 156

**Figura 74.** Serie de tiempo de precipitación mensual incompletas por cada estación-Grupo 1. .... 156

**Figura 75.** Disponibilidad temporal de la información en las estaciones (grupo 1). Período 1964 – 2017..... 157

**Figura 76.** Correlación entre cada estación del grupo 01..... 158

**Figura 77.** Serie de tiempo de precipitación mensual completadas por cada estación. .... 159

**Figura 78.** Indicadores de error de los promedios multimensuales – Estación Colquepata.. 161

**Figura 79.** Indicadores de error de las desviaciones estándar multimensuales. .... 162

**Figura 80.** Flujograma general de la validación de los datos mensuales. .... 164

**Figura 81.** Probabilidad de detección (POD) de la precipitación diaria para umbral = 60 mm. .... 167

**Figura 82.** Ratio de Falsa Alarma (FAR) de la precipitación mensual para umbral = 60 mm. .... 168

**Figura 83.** Índice de detección crítico (TS) de la precipitación mensual para umbral=60 mm. .... 169

**Figura 84.** Serie de tiempo de la precipitación mensual de datos observados y estimados por satélite CHIRPS..... 175

**Figura 85.** Variación espacial del Error Absoluto Medio (MAE) precipitación mensual sin corregir. .... 176

**Figura 86.** Variación espacial de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) de la precipitación mensual sin corregir. .... 176

**Figura 87.** Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación mensual sin corregir. .... 177

**Figura 88.** Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación mensual sin corregir. .... 178



**Figura 89.** Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) de la precipitación mensual sin corregir. .... 179

**Figura 90.** Comparativo de los estadísticos de validación categórica. Kayra. .... 186

**Figura 91.** Comparativo Precipitación promedio multimensual de la Precipitación mensual observada y estimada por satélite CHIRPS – Estación Kayra. .... 189

**Figura 92.** Comparativo de la desviación estándar multimensual de la Precipitación mensual observada y estimada por satélite CHIRPS – Estación Kayra. .... 189

**Figura 93.** Comparativo de indicadores multimensuales estación Kayra, Parte 1 ..... 190

**Figura 94.** Comparativo de indicadores multimensuales estación Kayra, Parte 2. .... 190

**Figura 95.** Error absoluto medio (MAE) de la precipitación multimensual enero a junio ... 191

**Figura 96.** Error absoluto medio (MAE) de la precipitación multimensual julio a diciembre. .... 192

**Figura 97.** Porcentaje de sesgo (PBIAS) de la precipitación multimensual enero a junio.... 193

**Figura 98.** Porcentaje de sesgo (PBIAS) de la precipitación multimensual julio a diciembre. .... 194

**Figura 99.** Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación multimensual enero a junio..... 195

**Figura 100.** Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación multimensual julio a diciembre. .... 196

**Figura 101.** Correlación Pearson (r) de la precipitación multimensual enero a junio..... 197

**Figura 102.** Correlación Pearson (r) de la precipitación multimensual julio a diciembre. ... 198

**Figura 103.** Flujograma de la validación de los datos estacionales de manera general. .... 205

**Figura 104.** Serie de tiempo de la precipitación estacional de datos observados y estimados por satélite CHIRPS. .... 208

**Figura 105.** Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación estacional sin corregir. .... 209

**Figura 106.** Variación espacial de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) de la precipitación mensual sin corregir. .... 210

**Figura 107.** Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación estacional sin corregir..... 211

**Figura 108.** Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación estacional sin corregir..... 212

**Figura 109.** Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) de la precipitación estacional sin corregir..... 213



**Figura 110.** Dispersión de datos observados y productos a) SENAMHI vs CHIRPS, b) SENAMHI vs CHIRPMd, c) SENAMHI vs PISCO, de la precipitación estacional - Kayra.214

**Figura 111.** Diagrama de Taylor de datos observados y productos CHIRPS, CHIRPM, PISCO de la precipitación estacional – estación Kayra. .... 214

**Figura 112.** Comparativo del promedio y la desviación estándar de la Precipitación multiestacional observada y estimada por satélite CHIRPS – Estación Kayra. .... 215

**Figura 113.** Diagramas de dispersión y series de tiempo estacional estación kayra. .... 216

**Figura 114.** Comparativo de indicadores de la precipitación estacional- Kayra, Parte 1. .... 217

**Figura 115.** Comparativo de indicadores de la precipitación estacional - Kayra, Parte 2. ... 217

**Figura 116.** Error Absoluto Medio por cada estación SON, DEF, MAM y JJA. .... 218

**Figura 117.** Sesgo Porcentual (PBIAS) para las 4 estaciones del año. .... 219

**Figura 118.** Eficiencia de Nash (NSE) para las 4 estaciones del año. .... 220

**Figura 119.** Correlación de Pearson (r) para las 4 estaciones del año..... 221

**Figura 120.** Diagramas de dispersión y series de tiempo de precipitación anual estación kayra. .... 228

**Figura 121.** Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación anual sin corregir. .... 229

**Figura 122.** Variación espacial de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) de la precipitación anual sin corregir. .... 230

**Figura 123.** Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación anual sin corregir. .... 231

**Figura 124.** Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación anual sin corregir. .... 231

**Figura 125.** Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) de la precipitación anual sin corregir. .... 232

**Figura 126.** Diagrama de dispersión de la precipitación anual CHIRPS, CHIRPM y PISCO. .... 232

**Figura 127.** Diagrama de Taylor de datos observados y productos CHIRPS, CHIRPMd, PISCO de la precipitación anual– estación Kayra. .... 233

**Figura 128.** Diagrama de flujo de la corrección mediante el Modelo de Redes Neuronales Artificiales. .... 234

**Figura 129.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de enero-Kayra. .... 238



**Figura 130.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de enero -  
 Kayra. .... 239

**Figura 131.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(ENE\_T), RNA-  
 2(ENE\_T\_1), RNA-3 (ENE\_T\_2), mes de enero – Kayra. .... 241

**Figura 132.** Serie de tiempo antes y después de la corrección mediante RNA, enero – Kayra.  
 ..... 241

**Figura 133.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos  
 RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de febrero – Kayra. .... 242

**Figura 134.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de febrero -  
 Kayra. .... 243

**Figura 135.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(FEB\_T), RNA-  
 2(FEB\_T\_1), RNA-3 (FEB\_T\_2) – mes de febrero – Kayra..... 245

**Figura 136.** Serie de tiempo antes y después de la corrección mediante RNA, febrero –  
 Kayra. .... 245

**Figura 137.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos  
 RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de abril – Kayra. .... 247

**Figura 138.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de abril -  
 Kayra. .... 248

**Figura 139.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(ABR\_T), RNA-  
 2(ABR\_T\_1), RNA-3 (ABR\_T\_2), mes de abril – Kayra. .... 250

**Figura 140.** Serie de tiempo antes y después de la corrección mediante RNA, abril – Kayra.  
 ..... 250

**Figura 141.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos  
 RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de mayo – Kayra..... 251

**Figura 142.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de mayo -  
 Kayra. .... 252

**Figura 143.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(MAY\_T), RNA-  
 2(MAY\_T\_1), RNA-3 (MAY\_T\_2) – mes de mayo – Kayra. .... 254

**Figura 144.** Serie de tiempo antes y después de la corrección mediante RNA, mayo – Kayra.  
 ..... 254

**Figura 145.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos  
 RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de julio – Kayra. .... 256

**Figura 146.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de julio -  
 Kayra. .... 257



**Figura 147.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(JUL\_T), RNA-2(JUL\_T\_1), RNA-3 (JUL\_T\_2), mes de julio – Kayra..... 259

**Figura 148.** Serie de tiempo antes y después de la corrección mediante RNA, julio – Kayra. .... 259

**Figura 149.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de agosto – Kayra. .... 260

**Figura 150.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de agosto - Kayra. .... 261

**Figura 151.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(AGO\_T), RNA-2(AGO\_T\_1), RNA-3 (AGO\_T\_2) – mes de agosto – Kayra. .... 263

**Figura 152.** Serie de tiempo antes y después de la corrección mediante RNA, agosto – Kayra. .... 263

**Figura 153.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de octubre – Kayra..... 265

**Figura 154.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de octubre - Kayra. .... 266

**Figura 155.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(OCT\_T), RNA-2(OCT\_T\_1), RNA-3 (OCT\_T\_2) – mes de octubre – Kayra. .... 268

**Figura 156.** Serie de tiempo antes y después de corrección mediante RNA, octubre–Kayra. .... 268

**Figura 157.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de noviembre – Kayra. .... 269

**Figura 158.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de noviembre - Kayra. .... 270

**Figura 159.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(NOV\_T), RNA-2(NOV\_T\_1), RNA-3 (NOV\_T\_2), mes de noviembre – Kayra. .... 272

**Figura 160.** Serie de tiempo antes y después de corrección mediante RNA, noviembre– Kayra. .... 272

**Figura 161.** Análisis y Preprocesamiento (normalización) de los datos para los modelos RNA-1, RNA-2 y RNA-3, mes de diciembre – Kayra..... 273

**Figura 162.** Modelos de RNA planteados para la corrección de datos del mes de diciembre - Kayra. .... 274

**Figura 163.** Selección de arquitectura óptima de los modelos RNA-1(DIC\_T), RNA-2(DIC\_T\_1), RNA-3 (DIC\_T\_2), mes de diciembre – Kayra. .... 276



**Figura 164.** Serie de tiempo antes y después de corrección mediante RNA, diciembre–Kayra ..... 276

**Figura 165.** Número de meses corregidos con RNA por estación. .... 281

**Figura 166.** Porcentaje total de arquitecturas por modelos planteados. .... 281

**Figura 167.** Años con datos mensuales perdidos por cada estación en el proceso de corrección mediante RNA. .... 283

**Figura 168.** Series de tiempo de la precipitación mensual estimada por satélite corregida mediante RNA. .... 284

**Figura 169.** Correlación de precipitación mensual corregida por RNA del grupo 01. .... 285

**Figura 170.** Correlación de precipitación mensual corregida por RNA del grupo 02. .... 285

**Figura 171.** Flujograma de la validación de los datos mensuales corregidos de manera general. .... 286

**Figura 172.** Probabilidad de Detección (POD) de la precipitación diaria para umbral = 60 mm. .... 289

**Figura 173.** Ratio de Falsa Alarma (FAR) de la precipitación mensual para umbral = 60 mm. .... 290

**Figura 174.** Índice de Detección Crítico (TS) de la precipitación mensual para umbral = 60 mm. .... 291

**Figura 175.** Resumen de cantidad de estaciones según el Error Absoluto Medio (MAE) Pm-RNA. .... 297

**Figura 176.** Resumen de cantidad de estaciones según el Porcentaje de sesgo (PBIAS) Pm-RNA. .... 298

**Figura 177.** Resumen de cantidad de estaciones según Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) Pm-RNA. .... 298

**Figura 178.** Resumen de cantidad de estaciones según Correlación Pearson (r) Pm-RNA. . 298

**Figura 179.** Variación espacial del error absoluto medio (MAE) de la precipitación mensual corregido mediante RNA. .... 299

**Figura 180.** Variación espacial de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) de la precipitación mensual corregida mediante RNA. .... 299

**Figura 181.** Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación mensual corregida mediante RNA. .... 300

**Figura 182.** Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación mensual corregida mediante RNA. .... 301





<b>Figura 183.</b> Variación espacial de la Correlación de Pearson ( $r$ ) de la precipitación mensual corregida mediante RNA.....	302
<b>Figura 184.</b> Comparativo de los estadísticos de validación categórica. Kayra_RNA. ....	303
<b>Figura 185.</b> Error absoluto medio (MAE) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS_RNA, PISCO Y CHIRPMm en cada estación.....	304
<b>Figura 186.</b> Raíz del error medio absoluto (RMSE) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS_RNA, PISCO Y CHIRPMm en cada estación. ....	305
<b>Figura 187.</b> Porcentaje de sesgo (PBIAS) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS_RNA, PISCO Y CHIRPMm en cada estación.....	305
<b>Figura 188.</b> Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS_RNA, PISCO Y CHIRPMm en cada estación.....	306
<b>Figura 189.</b> Correlación Pearson ( $r$ ) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS_RNA, PISCO Y CHIRPMm en cada estación.....	306
<b>Figura 190.</b> Diagrama de dispersión de datos observados y productos CHIRPS_RNA, CHIRPMm Y PISCO. ....	307
<b>Figura 191.</b> Comparativo de los productos CHIRPS_RNA, PISCO Y CHIRPM mediante Diagrama de Taylor.....	307
<b>Figura 192.</b> Error Absoluto Medio (MAE) - precipitación multimensual de enero a junio.	308
<b>Figura 193.</b> Error Absoluto Medio (MAE) - precipitación multimensual de julio a diciembre. ....	309
<b>Figura 194.</b> Sesgo Porcentual (PBIAS) - precipitación multimensual de enero a junio. ....	310
<b>Figura 195.</b> Sesgo Porcentual (PBIAS) - precipitación multimensual de julio a diciembre.	311
<b>Figura 196.</b> Eficiencia de Nash (NSE) - precipitación multimensual de enero a junio. ....	312
<b>Figura 197.</b> Eficiencia de Nash (NSE) - precipitación multimensual de julio a diciembre. .	313
<b>Figura 198.</b> Correlación de Pearson ( $r$ ) - precipitación multimensual de enero a junio. ....	314
<b>Figura 199.</b> Correlación de Pearson ( $r$ ) - precipitación multimensual de julio a diciembre.	315
<b>Figura 200.</b> Flujograma de la validación de los datos estacionales. ....	316
<b>Figura 201.</b> Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación estacional corregida mediante RNA.....	318
<b>Figura 202.</b> Variación espacial de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) de la precipitación estacional corregido mediante RNA.....	318
<b>Figura 203.</b> Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación estacional corregido mediante RNA. ....	319





**Figura 204.** Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación estacional corregido mediante RNA. .... 320

**Figura 205.** Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) de la precipitación estacional corregido mediante RNA. .... 320

**Figura 206.** Dispersión de la precipitación estacional de los datos observados vs CHIRPS\_RNA, CHIRPSM y PISCO..... 321

**Figura 207.** Diagrama de Taylor de la precipitación estacional de los productos CHIRPS\_RNA, PISCO y CHIRPM – estación Kayra. .... 321

**Figura 208.** Error Absoluto Medio (MAE) de la precipitación estacional corregida de las estaciones SON, DEF, MAM y JJA..... 322

**Figura 209.** Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación estacional corregida de las estaciones SON, DEF, MAM y JJA..... 323

**Figura 210.** Eficiencia de Nash (NSE) de la precipitación estacional corregida de las estaciones SON, DEF, MAM y JJA..... 324

**Figura 211.** Correlación de Pearson (r) de la precipitación estacional corregida de las estaciones SON, DEF, MAM y JJA..... 325

**Figura 212.** Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación anual corregido mediante RNA..... 331

**Figura 213.** Variación espacial de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) de la precipitación anual corregido mediante RNA. .... 331

**Figura 214.** Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación anual corregidos mediante RNA..... 332

**Figura 215.** Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación anual corregido mediante RNA..... 333

**Figura 216.** Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) de la precipitación anual corregido mediante RNA. .... 333

**Figura 217.** Diagrama de dispersión de la precipitación anual CHIRPS\_RNA, CHIRPM y PISCO..... 334

**Figura 218.** Diagrama de Taylor de la precipitación anual CHIRPS\_RNA, PISCO y CHIRPM..... 334

**Figura 219.** Ubicación espacial de las estaciones con datos de precipitación diaria. .... 335

**Figura 220 .** Estadísticos de Validación Categórica (POD, FAR y TS) para umbral = 0.8 mm. .... 336



**Figura 221.** Probabilidad de detección (POD) de la precipitación diaria para umbral = 0.8 mm..... 337

**Figura 222.** Ratio de Falsa Alarma (FAR) de la precipitación diaria para umbral = 0.8 mm. .... 338

**Figura 223.** Índice de detección crítico (TS) de la precipitación diaria para umbral = 0.8 mm. .... 339

**Figura 224.** Error Absoluto Medio (MAE) de la precipitación diaria..... 342

**Figura 225.** Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación diaria. .... 343

**Figura 226.** Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación diaria. .... 344

**Figura 227.** Correlación Pearson (r) de la precipitación diaria. .... 345

**Figura 228.** Comparativo de los estadísticos de validación categórica Pd. Kayra..... 346

**Figura 229.** Error absoluto medio (MAE) de la precipitación diaria de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPM por estación. .... 347

**Figura 230.** Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación diaria de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPM por estación. .... 347

**Figura 231.** Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación diaria de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPM por estación. .... 348

**Figura 232.** Correlación de Pearson (r) de la precipitación diaria de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPM por estación. .... 348

**Figura 233.** Dispersión de datos observados y productos a) SENAMHI vs CHIRPS, b) SENAMHI vs CHIRPMd, c) SENAMHI vs PISCO. Estación Kayra. .... 349

**Figura 234.** Diagrama de Taylor de datos observados y productos CHIRPS, CHIRPMd, PISCO..... 349

**Figura 235.** Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas – precipitación mensual. .... 351

**Figura 236.** Periodo con mayor pérdida de datos..... 353

**Figura 237.** Meses con mayor pérdida de datos. .... 353

**Figura 238.** Estadísticos de Validación Categórica para umbral = 60 mm. .... 358

**Figura 239.** Error Absoluto Medio (MAE) de la precipitación mensual CHIRPS. .... 362

**Figura 240.** Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación mensual CHIRPS..... 363

**Figura 241.** Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación mensual CHIRPS. .... 364

**Figura 242.** Correlación Pearson (r) de la precipitación mensual CHIRPS..... 365

**Figura 243.** Comparativo de los estadísticos de validación categórica. Kayra. .... 366

**Figura 244.** Error absoluto medio (MAE) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPMm en cada estación. .... 367



**Figura 245.** Porcentaje de sesgo (PBIAS) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPMm en cada estación. .... 367

**Figura 246.** Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPMm en cada estación. .... 368

**Figura 247.** Correlación Pearson (r) de la precipitación mensual de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPMm en cada estación. .... 368

**Figura 248.** Dispersion de los datos observados vs productos a) SENAMHI vs CHIRPS, b) SENAMHI vs CHIRPMm, c) SENAMHI vs PISCO. .... 369

**Figura 249.** Comparativo de los productos CHIRPS, PISCO y CHIRPM mediante Diagrama de Taylor. .... 369

**Figura 250.** Error Absoluto Medio (MAE) de la precipitación estacional CHIRPS..... 372

**Figura 251.** Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación estacional CHIRPS. .... 373

**Figura 252.** Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación estacional CHIRPS. ... 374

**Figura 253.** Correlación Pearson (r) de la precipitación estacional CHIRPS. .... 375

**Figura 254.** Dispersión de datos observados y productos a) SENAMHI vs CHIRPS, b) SENAMHI vs CHIRPMd, c) SENAMHI vs PISCO, de la precipitación estacional - Kayra.376

**Figura 255.** Diagrama de Taylor de datos observados y productos CHIRPS, CHIRPMd, PISCO de la precipitación estacional – estación Kayra. .... 376

**Figura 256.** Error Absoluto Medio (MAE) de la precipitación anual. .... 379

**Figura 257.** Sesgo Porcentual (PBIAS) de la precipitación anual. .... 380

**Figura 258.** Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación anual..... 381

**Figura 259.** Correlación Pearson (r) de la precipitación anual..... 382

**Figura 260.** Dispersión de la precipitación anual observada vs los productos CHIRPS, CHIRPM y PISCO - Estación Kayra. .... 383

**Figura 261.** Diagrama de Taylor de datos observados y productos CHIRPS, CHIRPMd, PISCO de la precipitación anual– estación Kayra. .... 383

**Figura 262.** Número de meses corregidos con RNA por estación. .... 385

**Figura 263.** Porcentaje total de arquitecturas por modelos planteados. .... 385

**Figura 264.** Comparativo de POD vs POD\_RNA para la precipitación mensual..... 387

**Figura 265.** Porcentaje de estaciones CHIRPS mejoradas en la POD para umbral = 60 mm. .... 388

**Figura 266.** Comparativo de la Probabilidad de Detección (POD) de la precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA. .... 389

**Figura 267.** Comparativo de FAR vs FAR\_RNA para la precipitación mensual. .... 391



**Figura 268.** Porcentaje de estaciones CHIRPS mejoradas en la FAR para umbral = 60 mm.  
..... 391

**Figura 269.** Comparativo de variación espacial del Ratio de Falsa Alarma (FAR) de la precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA..... 392

**Figura 270.** Comparativo de TS vs TS\_RNA para la precipitación mensual. .... 394

**Figura 271.** Porcentaje de estaciones CHIRPS mejoradas en la TS para umbral = 60 mm.. 394

**Figura 272.** Comparativo del Índice de Detección Crítico (TS) de la precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA. .... 395

**Figura 273.** Comparativo del error absoluto medio (MAE) precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA. .... 397

**Figura 274.** Comparativo de Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA..... 398

**Figura 275.** Comparativo del Sesgo Porcentual (PBIAS) precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA. .... 399

**Figura 276.** Comparativo de Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA..... 400

**Figura 277.** Comparativo de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA..... 401

**Figura 278.** Comparativo de Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) precipitación mensual sin corregir y corregido. mediante RNA..... 402

**Figura 279.** Comparativo de Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA..... 403

**Figura 280.** Comparativo de Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA..... 404

**Figura 281.** FAR, POD, y TS de la precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA para diferentes umbrales - Kayra. .... 405

**Figura 282.** FAR, POD, y TS de la precipitación mensual sin corregir y corregido mediante RNA para diferentes umbrales - Machupicchu. .... 405

**Figura 283.** Comparativo de Error absoluto medio (MAE) de la precipitación mensual del producto CHIRPS (sin corregir) y CHIRPS\_RNA (corregido) con los productos, PISCO Y CHIRPMm en cada estación. .... 406

**Figura 284.** Comparativo del Porcentaje de sesgo (PBIAS) de la precipitación mensual del producto CHIRPS (sin corregir) y CHIRPS\_RNA (corregido), con PISCO Y CHIRPMm en cada estación. .... 407



**Figura 285.** Comparativo de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de la precipitación mensual del producto CHIRPS (sin corregir) y CHIRPS\_RNA (corregido) con los productos, PISCO Y CHIRPMm en cada estación. .... 408

**Figura 286.** Comparativo de la Correlación Pearson (r) de la precipitación mensual del producto CHIRPS (sin corregir) y CHIRPS\_RNA (corregido) con los productos, PISCO Y CHIRPMm en cada estación. .... 409

**Figura 287.** Dispersión de precipitación mensual antes y después de la corrección mediante-Kayra. .... 410

**Figura 288.** Dispersión de precipitación mensual antes y después de la corrección mediante RNA-Machupicchu. .... 410

**Figura 289.** Comparativo del producto CHIRPS y CHIRPS\_RNA con los productos PISCO y CHIRPM-Estación Kayra..... 411

**Figura 290.** Comparativo del producto CHIRPS y CHIRPS\_RNA con los productos PISCO y CHIRPM-estacion Machupicchu. .... 411

**Figura 291.** Comparativo del error absoluto medio (MAE) precipitación estacional sin corregir y corregido mediante RNA..... 414

**Figura 292.** Comparativo de la Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación estacional sin corregir y corregido mediante RNA. .... 415

**Figura 293.** Comparativo del Sesgo Porcentual (PBIAS) precipitación estacional sin corregir y corregido mediante RNA. .... 416

**Figura 294.** Comparativo de Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) precipitación estacional sin corregir y corregido mediante RNA. .... 417

**Figura 295.** Comparativo de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) precipitación estacional sin corregir y corregido mediante RNA. .... 418

**Figura 296.** Comparativo de Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) precipitación estacional sin corregir y corregido mediante RNA. .... 419

**Figura 297.** Comparativo de la Correlación de Pearson (r) precipitación estacional sin corregir y corregido mediante RNA..... 420

**Figura 298.** Comparativo de Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) precipitación estacional sin corregir y corregido mediante RNA. .... 421

**Figura 299.** Dispersión de la precipitación estacional de los datos observados vs CHIRPS\_RNA, CHIRPSM y PISCO..... 422

**Figura 300.** Diagrama de Taylor de la precipitación estacional de los productos CHIRPS\_RNA, PISCO y CHIRPM – estación Kayra..... 422



**Figura 301.** Comparativo del error absoluto medio (MAE) precipitación anual sin corregir y corregido mediante RNA. .... 425

**Figura 302.** Comparativo de la Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación anual sin corregir y corregido mediante RNA..... 426

**Figura 303.** Comparativo del Sesgo Porcentual (PBIAS) precipitación anual sin corregir y corregido mediante RNA. .... 427

**Figura 304.** Comparativo de Variación espacial del Sesgo Porcentual (PBIAS) precipitación anual sin corregir y corregido mediante RNA. .... 428

**Figura 305.** Comparativo de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) precipitación anual sin corregir y corregido mediante RNA..... 429

**Figura 306.** Comparativo de Variación espacial de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) precipitación anual sin corregir y corregido mediante RNA..... 430

**Figura 307.** Comparativo de la Correlación de Pearson (r) precipitación anual sin corregir y corregido mediante RNA. .... 431

**Figura 308.** Comparativo de la Variación espacial de la Correlación de Pearson (r) precipitación anual sin corregir y corregido mediante RNA..... 432

**Figura 309.** Diagrama de dispersión de la precipitación anual CHIRPS\_RNA, CHIRPM y PISCO..... 433

**Figura 310.** Comparativo mediante el Diagrama de Taylor de la precipitación anual de los productos: CHIRPS\_RNA, PISCO y CHIRPM. .... 433

**Figura 311.** Comparativo de porcentaje de estaciones según evaluación por estadísticos a escalas diaria, mensual, estacional y anual. .... 439





## Capítulo I: Planteamiento del Problema

### 1.1. Identificación del Problema

#### 1.1.1. Descripción del Problema

La precipitación pluvial es una variable climática de gran importancia para los sistemas hidrológico, agrícola, industrial y energético. El entendimiento de su comportamiento temporal y espacial es de sumo interés, especialmente en los estudios de riesgos climáticos, donde la disponibilidad de información de alta resolución y de buena calidad es esencial (Carrasco, Yarlequé, & Posadas, 2010).

Según recopilación de la información de (Aybar, y otros, 2017), Los pluviómetros ofrecen una acertada información acerca de la cantidad y la frecuencia de las lluvias. Sin embargo, no posibilitan una adecuada cobertura espacial (Almazroui, 2011; Chappell et al., 2013). Las estimaciones de la distribución espacial de las precipitaciones en el Perú representan un gran desafío, considerando su compleja fisiografía y la falta de pluviómetros sobretodo en la región amazónica (Mantas et al., 2015).

Según recopilación de la investigación de (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016). La medición de la precipitación mediante estaciones in situ posee grandes limitaciones en términos de cobertura geográfica y uniformidad temporal. Por un lado, existen zonas de difícil acceso donde la instalación y seguimiento de estaciones resulta inviable y por otro lado las series de tiempo de las estaciones instaladas suelen presentar datos faltantes y una gran variedad de periodos de registro. Adicionalmente se pueden presentar errores de medición o de sistematización de los datos en el caso de estaciones manuales; aun así, siguen siendo la forma más directa para la medición de la precipitación y su información sirve como insumo para la calibración y validación de diferentes productos de precipitación tales como modelos, mediciones satelitales y de radar. Estos productos conllevan una gran variedad de beneficios en términos de continuidad espacial y temporal, además de generar estimaciones en tiempo casi real, lo cual es sumamente útil en la operación de la gestión del agua (Serrat-Capdevila, Valdes, y Stakhiv, 2014).

En relación a las menciones anteriores se presenta la cobertura espacial y temporal de las estaciones meteorológicas existentes dentro y fuera de la cuenca del río Vilcanota que forman parte de la presente investigación.

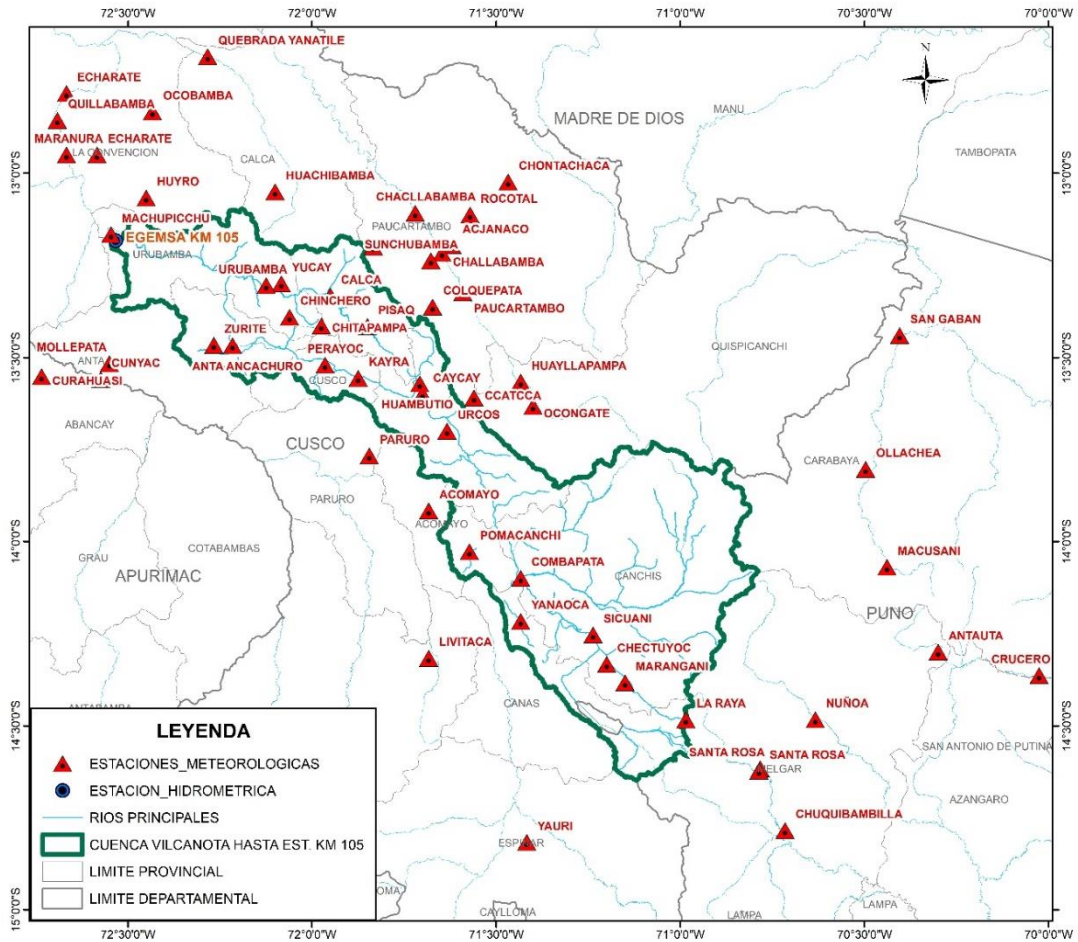
**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas convencionales identificadas.

N°	Código	Nombre	Cuenca	Departamento	Provincia	Distrito	Latitud	Longitud	Altitud
1	155518	CHACLLABAMBA	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	-13.108547222	-71.720002778	2701
2	156224	CUNYAC	UCA YALI	APURIMAC	ABANCA Y	CURAHUASI	-13.560000000	-72.573888889	2345
3	156300	ECHARATE	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	ECHARATE	-12.783611111	-72.666944444	1014
4	156303	HUACHIBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	LARES	-13.050277778	-72.100277778	4225
5	156306	COLQUEPATA	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	COLQUEPATA	-13.363055556	-71.673055556	3729
6	156307	CHITAPAMPA	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	CHINCHERO	-13.415000000	-71.974722222	4306
7	156401	SAN GABAN	MADRE DE DIOS	PUNO	CARABA YA	SAN GABAN	-13.440805556	-70.404916667	635
8	157320	LIVITACA	UCA YALI	CUSCO	CHUMBIVILCAS	LIVITACA	-14.316944444	-71.683611111	3741
9	157402	SANTA ROSA	PUCARA	PUNO	MELGAR	SANTA ROSA	-14.616944444	-70.783611111	3956
10	157404	NUÑO A	AZANGARO	PUNO	MELGAR	NUÑO A	-14.483611111	-70.633611111	4013
11	157406	ANTAUTA	AZANGARO	PUNO	MELGAR	ANTAUTA	-14.300277778	-70.300277778	4193
12	5571	ACIANACO	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	KOSÑIPATA	-13.196388889	-71.620000000	3487
13	606	QUILLABAMBA	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	SANTA ANA	-12.856444444	-72.691666667	990
14	607	KAYRA	URUBAMBA	CUSCO	CUSCO	SAN JERONIMO	-13.556666667	-71.875000000	3219
15	654	QUEBRADA YANATILE	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	YANATILE	-12.683611111	-72.283611111	1050
16	6670	CHALLABAMBA	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	-13.217500000	-71.647222222	2740
17	6671	CHONTACHACA	MADRE DE DIOS	CUSCO	PAUCARTAMBO	KOSÑIPATA	-13.023888889	-71.467777778	982
18	6672	ROCOTAL	MADRE DE DIOS	CUSCO	PAUCARTAMBO	KOSÑIPATA	-13.113333333	-71.570833333	2010
19	674	YUCA Y	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	YUCA Y	-13.300277778	-72.083611111	3481
20	676	MARANURA	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	MARANURA	-12.950277778	-72.666944444	1063
21	677	CURAHUASI	UCA YALI	APURIMAC	ABANCA Y	CURAHUASI	-13.552222222	-72.734722222	2763
22	678	HUYRO	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	HUAYOPATA	-13.066944444	-72.450277778	2326
23	679	MACHUPICCHU	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	MACHUPICCHU	-13.166944444	-72.545850000	2548
24	680	MOLLEPATA	UCA YALI	CUSCO	ANTA	MOLLEPATA	-13.516944444	-72.550277778	2601
25	681	OCOBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	OCOBAMBA	-12.833611111	-72.433611111	1305
26	682	ZURITE	URUBAMBA	CUSCO	ANTA	ZURITE	-13.466944444	-72.266944444	3506
27	683	URUBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	URUBAMBA	-13.305166667	-72.124555556	2850
28	684	ANTA ANCACHURO	URUBAMBA	CUSCO	ANTA	ZURITE	-13.468333333	-72.215833333	3340
29	685	CALCA	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	CALCA	-13.333611111	-71.950277778	2926
30	686	PARURO	UCA YALI	CUSCO	PARURO	PARURO	-13.767500000	-71.844722222	3084
31	687	ACOMAYO	UCA YALI	CUSCO	ACOMAYO	ACOMAYO	-13.916944444	-71.683611111	3160
32	688	URCOS	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	URCOS	-13.700277778	-71.633611111	3666
33	689	PAUCARTAMBO	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	PAUCARTAMBO	-13.324444444	-71.590555556	3042
34	690	CCATCCA	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	CCATCCA	-13.610000000	-71.560277778	3729
35	692	OCONGATE	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	OCONGATE	-13.633611111	-71.400277778	3647
36	695	OLLACHEA	MADRE DE DIOS	PUNO	CARABA YA	OLLACHEA	-13.803888889	-70.497138889	2850
37	715	HUAYLLAPAMPA	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	CCATCCA	-13.566944444	-71.433611111	3358
38	716	ECHARATE	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	ECHARATE	-12.950277778	-72.583611111	3279
39	756	COMBAPATA	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	COMBAPATA	-14.100000000	-71.433333333	3464
40	759	SICUANI	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	SICUANI	-14.253611111	-71.237222222	3574
41	769	YANA OCA	URUBAMBA	CUSCO	CANAS	YANA OCA	-14.216944444	-71.433611111	3913
42	772	VILCABAMBA	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	VILCABAMBA	-13.116944444	-73.016944444	4000
43	777	MACUSANI	MADRE DE DIOS	PUNO	CARABA YA	MACUSANI	-14.070000000	-70.439083333	4345
44	809	CAYCAY	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CAYCAY	-13.600277778	-71.700277778	3150
45	812	POMACANCHI	URUBAMBA	CUSCO	ACOMAYO	POMACANCHI	-14.028055556	-71.572777778	3200
46	823	SANTA ROSA	PUCARA	PUNO	MELGAR	SANTA ROSA	-14.623750000	-70.786527778	3986
47	844	PISAQ	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	PISAQ	-13.416111111	-71.849722222	2950
48	766	HACIENDA SANTA INES	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	-13.200277778	-71.833611111	4125
49	156341	SUNCHUBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	-13.237705000	-71.677589000	2600
50	767	CHINCHERO	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	CHINCHERO	-13.391023000	-72.061110000	3762
51	704	PERAYOC	URUBAMBA	CUSCO	CUSCO	CUSCO	-13.521111111	-71.964722222	3365
52	768	HUAMBUTIO	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CAYCAY	-13.571738000	-71.707489000	3063
53	770	CHECTUYOC	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	MARANGANI	-14.333611111	-71.200277778	3830
54	156333	MARANGANI	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	MARANGANI	-14.383611111	-71.150277778	4150
55	884	LA RAYA	URUBAMBA	CUSCO	MELGAR	SANTA ROSA	-14.484166667	-70.984833333	4350
56	757	YAURI	UCA YALI	CUSCO	ESPINAR	ESPINAR	-14.816944444	-71.416944444	3927
57	764	CHUQUIBAMBILLA	PUCARA	PUNO	MELGAR	UMACHIRI	-14.784722222	-70.715833333	3971
58	7415	CRUCERO	AZANGARO	PUNO	CARABA YA	CRUCERO	-14.364194444	-70.025916667	4183

Fuente: SENAMHI

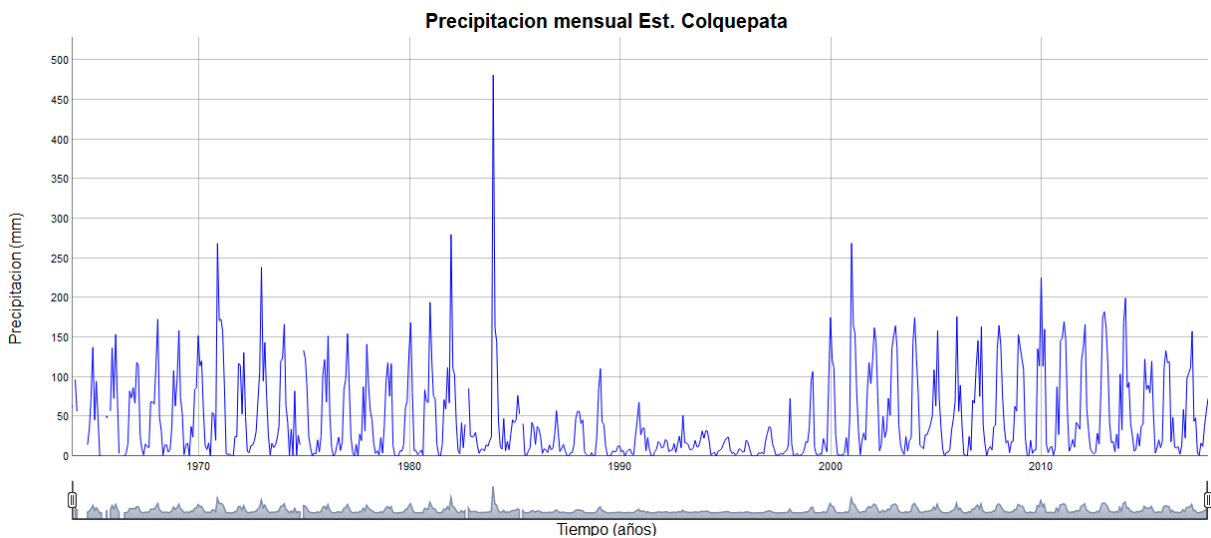


La **Figura 1** muestra la distribución espacial heterogénea de las estaciones meteorológicas



**Figura 1.** Distribución espacial de las estaciones ubicadas en el área de estudio.

En la **Figura 2** no se observa uniformidad temporal de la precipitación mensual.

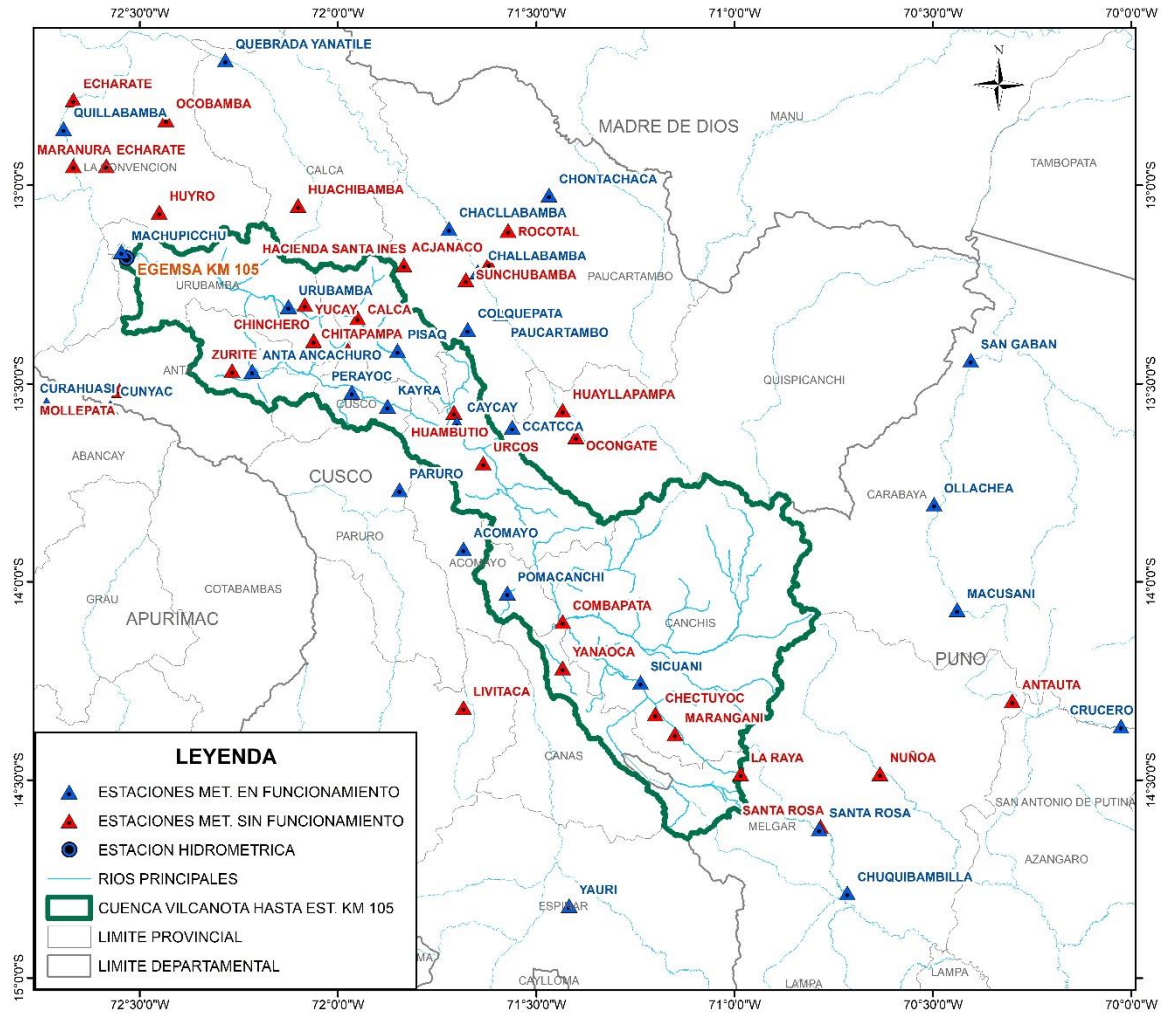


**Figura 2.** Distribución temporal de la precipitación mensual total-Estación Colquepata.

**Tabla 2.** Estado de funcionamiento al 2018 de las Estaciones meteorológicas identificadas en el área de estudio.

N°	Código	Nombre	Cuenca	Departamento	Provincia	Distrito	Estado_2018
1	155518	CHACLLABAMBA	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	FUNCIONA
2	156224	CUNYAC	UCA YALI	APURIMAC	ABANCA Y	CURAHUASI	FUNCIONA
3	156300	ECHARATE	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	ECHARATE	NO FUNCIONA
4	156303	HUACHIBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	LARES	NO FUNCIONA
5	156306	COLQUEPATA	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	COLQUEPATA	FUNCIONA
6	156307	CHITAPAMPA	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	CHINCHERO	NO FUNCIONA
7	156401	SAN GABAN	MADRE DE DIOS	PUNO	CARABAYA	SAN GABAN	FUNCIONA
8	157320	LIVITACA	UCA YALI	CUSCO	CHUMBIVILCAS	LIVITACA	NO FUNCIONA
9	157402	SANTA ROSA	PUCARA	PUNO	MELGAR	SANTA ROSA	NO FUNCIONA
10	157404	NUÑO A	AZANGARO	PUNO	MELGAR	NUÑO A	NO FUNCIONA
11	157406	ANTAUTA	AZANGARO	PUNO	MELGAR	ANTAUTA	NO FUNCIONA
12	5571	ACJANACO	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	KOSÑIPATA	NO FUNCIONA
13	606	QUILLABAMBA	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	SANTA ANA	FUNCIONA
14	607	KAYRA	URUBAMBA	CUSCO	CUSCO	SAN JERONIMO	FUNCIONA
15	654	QUEBRADA YANATILE	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	YANATILE	FUNCIONA
16	6670	CHALLABAMBA	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	FUNCIONA
17	6671	CHONTACHACA	MADRE DE DIOS	CUSCO	PAUCARTAMBO	KOSÑIPATA	FUNCIONA
18	6672	ROCOTAL	MADRE DE DIOS	CUSCO	PAUCARTAMBO	KOSÑIPATA	NO FUNCIONA
19	674	YUCA Y	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	YUCA Y	NO FUNCIONA
20	676	MARANURA	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	MARANURA	NO FUNCIONA
21	677	CURAHUASI	UCA YALI	APURIMAC	ABANCA Y	CURAHUASI	FUNCIONA
22	678	HUYRO	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	HUA YOPATA	NO FUNCIONA
23	679	MACHUPICHU	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	MACHUPICHU	FUNCIONA
24	680	MOLLEPATA	UCA YALI	CUSCO	ANTA	MOLLEPATA	NO FUNCIONA
25	681	OCOBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	OCOBAMBA	NO FUNCIONA
26	682	ZURITE	URUBAMBA	CUSCO	ANTA	ZURITE	NO FUNCIONA
27	683	URUBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	URUBAMBA	FUNCIONA
28	684	ANTA ANCACHURO	URUBAMBA	CUSCO	ANTA	ZURITE	FUNCIONA
29	685	CALCA	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	CALCA	NO FUNCIONA
30	686	PARURO	UCA YALI	CUSCO	PARURO	PARURO	FUNCIONA
31	687	ACOMAYO	UCA YALI	CUSCO	ACOMAYO	ACOMAYO	FUNCIONA
32	688	URCOS	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	URCOS	NO FUNCIONA
33	689	PAUCARTAMBO	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	PAUCARTAMBO	FUNCIONA
34	690	CCATCCA	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	CCATCCA	FUNCIONA
35	692	OCONGATE	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	OCONGATE	NO FUNCIONA
36	695	OLLACHEA	MADRE DE DIOS	PUNO	CARABAYA	OLLACHEA	FUNCIONA
37	715	HUAYLLAPAMPA	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	CCATCCA	NO FUNCIONA
38	716	ECHARATE	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	ECHARATE	NO FUNCIONA
39	756	COMBAPATA	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	COMBAPATA	NO FUNCIONA
40	759	SICUANI	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	SICUANI	FUNCIONA
41	769	YANA OCA	URUBAMBA	CUSCO	CANAS	YANA OCA	NO FUNCIONA
42	772	VILCABAMBA	URUBAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	VILCABAMBA	NO FUNCIONA
43	777	MACUSANI	MADRE DE DIOS	PUNO	CARABAYA	MACUSANI	FUNCIONA
44	809	CAYCAY	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CAYCAY	FUNCIONA
45	812	POMACANCHI	URUBAMBA	CUSCO	ACOMAYO	POMACANCHI	FUNCIONA
46	823	SANTA ROSA	PUCARA	PUNO	MELGAR	SANTA ROSA	FUNCIONA
47	844	PISAQ	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	PISAQ	FUNCIONA
48	766	HACIENDA SANTA INES	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	NO FUNCIONA
49	156341	SUNCHUBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	NO FUNCIONA
50	767	CHINCHERO	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	CHINCHERO	NO FUNCIONA
51	704	PERAYOC	URUBAMBA	CUSCO	CUSCO	CUSCO	FUNCIONA
52	768	HUAMBUTIO	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CAYCAY	NO FUNCIONA
53	770	CHECTUYOC	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	MARANGANI	NO FUNCIONA
54	156333	MARANGANI	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	MARANGANI	NO FUNCIONA
55	884	LA RAYA	URUBAMBA	CUSCO	MELGAR	SANTA ROSA	NO FUNCIONA
56	757	YAURI	UCA YALI	CUSCO	ESPINAR	ESPINAR	FUNCIONA
57	764	CHUQUIBAMBILLA	PUCARA	PUNO	MELGAR	UMACHIRI	FUNCIONA
58	7415	CRUCERO	AZANGARO	PUNO	CARABAYA	CRUCERO	FUNCIONA

Fuente: SENAMHI (Pagina web)

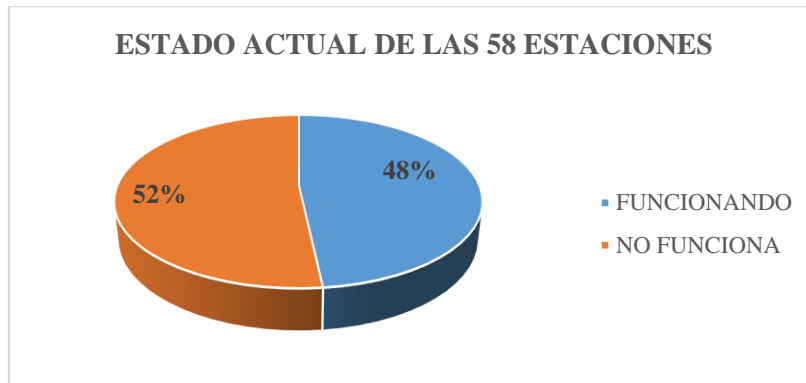


**Figura 3.** Distribución espacial de las estaciones según estado de funcionamiento al 2018.

Actualmente de las estaciones convencionales identificadas solo el 48% está en funcionamiento según se indica en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Resumen de estado actual de las estaciones meteorológicas en el área de estudio.

ESTADO	Nº ESTACIONES	%
FUNCIONANDO	28	48%
NO FUNCIONA	30	52%
<b>TOTAL</b>	<b>58</b>	<b>100%</b>



**Figura 4.** Porcentaje de las estaciones en estado de funcionamiento.

Dentro de la cuenca Vilcanota de las 20 estaciones meteorológicas identificadas, solo el 40% está en funcionamiento.

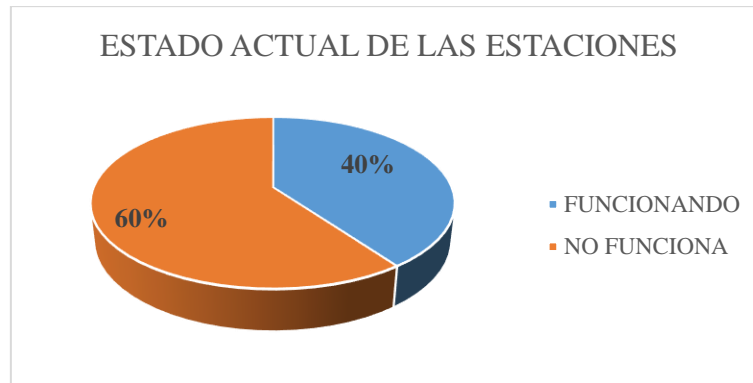
**Tabla 4.** Estaciones meteorológicas convencionales identificadas dentro de la cuenca Vilcanota.

N°	Código	Nombre	Cuenca	Departamento	Provincia	Distrito	Estado_2018
1	156307	CHITAPAMPA	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	CHINCHERO	NO FUNCIONA
2	607	KAYRA	URUBAMBA	CUSCO	CUSCO	SAN JERONIMO	FUNCIONA
3	674	YUCAY	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	YUCAY	NO FUNCIONA
4	682	ZURITE	URUBAMBA	CUSCO	ANTA	ZURITE	NO FUNCIONA
5	683	URUBAMBA	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	URUBAMBA	FUNCIONA
6	684	ANTA ANCACHURO	URUBAMBA	CUSCO	ANTA	ZURITE	FUNCIONA
7	685	CALCA	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	CALCA	NO FUNCIONA
8	688	URCOS	URUBAMBA	CUSCO	QUISPICANCHI	URCOS	NO FUNCIONA
9	756	COMBAPATA	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	COMBAPATA	NO FUNCIONA
10	759	SICUANI	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	SICUANI	FUNCIONA
11	769	YANAOCA	URUBAMBA	CUSCO	CANAS	YANAOCA	NO FUNCIONA
12	809	CAYCAY	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CAYCAY	FUNCIONA
13	812	POMACANCHI	URUBAMBA	CUSCO	ACOMAYO	POMACANCHI	FUNCIONA
14	844	PISAQ	URUBAMBA	CUSCO	CALCA	PISAQ	FUNCIONA
15	767	CHINCHERO	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	CHINCHERO	NO FUNCIONA
16	704	PERAYOC	URUBAMBA	CUSCO	CUSCO	CUSCO	FUNCIONA
17	768	HUAMBUTIO	URUBAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CAYCAY	NO FUNCIONA
18	770	CHECTUYOC	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	MARANGANI	NO FUNCIONA
19	156333	MARANGANI	URUBAMBA	CUSCO	CANCHIS	MARANGANI	NO FUNCIONA
20	884	LA RAYA	URUBAMBA	CUSCO	MELGAR	SANTA ROSA	NO FUNCIONA

Fuente: SENAMHI.

**Tabla 5.** Resumen de estado actual de las estaciones meteorológicas-Cuenca Vilcanota.

ESTADO	N° ESTACIONES	%
<b>FUNCIONANDO</b>	8	40%
<b>NO FUNCIONA</b>	12	60%
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>100%</b>



**Figura 5.** Porcentaje de las estaciones dentro de la cuenca Vilcanota en estado de funcionamiento y no funcionamiento.

Se observa que las 20 estaciones ubicadas dentro de la cuenca del Vilcanota con un área de 9613 Km<sup>2</sup>, forman una red pluviométrica con una densidad de 1 estación cada 480 km<sup>2</sup>, siendo mucho menor a la recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), donde indica que para regiones montañosas en zonas tropicales, mediterráneas o templadas como es el caso de ésta investigación se debe tener 1 estación cada 100 a 250 km<sup>2</sup>, evidenciando la limitada cobertura espacial.

Por otro lado, de 58 estaciones identificadas dentro y fuera de la cuenca solo el 48% se encuentra en funcionamiento y de 20 estaciones ubicadas dentro de la cuenca, solo el 40% está en funcionamiento, de las cuales la gran parte presenta inconsistencias en sus datos (como es el caso de la estación Colquepata), el cual evidencia la falta de disponibilidad de datos y la no uniformidad temporal, consecuencia de errores de medición o de sistematización de los datos.





### **1.1.2. Formulación interrogativa del problema**

#### **1.1.2.1. Formulación interrogativa del problema general**

¿Cuál será la calidad de la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS con respecto a la precipitación observada por los pluviómetros, evaluada mediante Estadísticos de Validación Categórica (POD, FAR, TS), Estadísticos de Comparación por Pares (MAE, PBIAS, NSE, CORRELACION PEARSON) y en comparación con los productos CHIRPM y PISCO, antes y después de la corrección mediante el "Modelo de Redes Neuronales Artificiales (RNA)", en la Cuenca del Río Vilcanota para disponer datos con suficiente cobertura espacial y uniformidad temporal?

#### **1.1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos**

##### **Problema específico N° 1**

¿Habrá diferencias significativas entre la precipitación diaria observada y estimada por satélite del producto CHIRPS sin corrección mediante RNA?

##### **Problema específico N° 2**

¿Serán consistentes y completos los datos de precipitación mensual observada en las estaciones meteorológicas?

##### **Problema específico N° 3**

¿Tendrá información confiable la precipitación mensual estimada por satélite del producto CHIRPS sin corrección mediante RNA?

##### **Problema específico N° 4**

¿Será de calidad la información de la precipitación estacional y anual estimada por satélite del producto CHIRPS sin corrección mediante RNA?

##### **Problema específico N° 5**

¿Será posible la corrección mediante el "Modelo de Redes Neuronales Artificiales" de la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS?

##### **Problema específico N° 6**

¿Se obtendrá mejorar la información de la precipitación mensual, estacional y anual estimada por satélite del producto CHIRPS corregido mediante RNA?



## **1.2. Justificación e Importancia de la investigación**

### **1.2.1. Justificación técnica**

La precipitación es una variable climática de gran importancia para el estudio de procesos meteorológicos y mediante ello realizar trabajos de gestión, monitoreo hidrometeorológico y modelización de la disponibilidad hídrica.

La medición de precipitación mediante estaciones in situ tiene grandes limitaciones en términos de cobertura espacial y uniformidad temporal.

Pero la precipitación estimada por satélite CHIRPS con cobertura espacial de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (~  $5 \times 5$  km) y resolución temporal diaria, pentadal, decadal y mensual; con datos disponibles de manera libre; posibilitando el acceso a una nueva fuente de información pluvial, lo que hace necesario evaluar la calidad de esta información, antes de su utilización y garantizar la confiabilidad de los datos.

### **1.2.2. Justificación social**

La presente investigación se sustenta porque los datos de precipitación CHIRPS validados pueden ser utilizados en trabajos de gestión, monitoreo hidrometeorológico y modelización de la disponibilidad hídrica en la cuenca del Vilcanota, con influencia directa sobre la población dentro de la misma cuenca e indirecta sobre el resto de la población del departamento de Cusco.

La precipitación estimada por satélite CHIRPS es una alternativa de información pluvial de acceso libre.

### **1.2.3. Justificación por viabilidad**

Esta investigación es viable debido a que es posible el acceso a la información de la precipitación observada y estimada por satélite CHIRPS; ya que la información de precipitación observada será facilitada por el SENAMHI y la información satelital CHIRPS será descargada de la web de acceso gratuito el cual se detalla en el Item 3.5. (Procedimiento de recolección de datos).



#### **1.2.4. Justificación por relevancia**

Se evalúa la cobertura espacial y uniformidad temporal de la precipitación CHIRPS, con respecto a la precipitación observada mediante las estaciones meteorológicas, para determinar la calidad de la información.

Se plantea la corrección de la precipitación CHIRPS mediante el Modelo de Redes Neuronales Artificiales.

### **1.3. Limitaciones de la Investigación**

#### **1.3.1. Limitaciones de orden geográfico**

La investigación se limita a la validación de la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS, ubicados dentro y alrededores de la cuenca del río Vilcanota hasta la Estación Hidrométrica EGEMSA KM 105.

#### **1.3.2. Limitaciones del estudio**

- La investigación se limita a la validación de la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS, con respecto a la precipitación observada por los pluviómetros, evaluada mediante Estadísticos de Validación Categórica (POD, FAR, TS), Estadísticos de Comparación por Pares (MAE, PBIAS, NSE, CORRELACIÓN PEARSON) y en comparación con los productos CHIRPM y PISCO, antes y después de la corrección mediante el modelo de Redes Neuronales Artificiales.
- La investigación se limita a la validación de 20 estaciones de precipitación diaria entre el periodo de 1981-2017.
- La investigación se limita al análisis de consistencia y completación de datos de 31 estaciones de la precipitación mensual en el periodo de 1964 – 2017.
- La investigación se limita a la validación de 31 estaciones de precipitación mensual, estacional y anual entre el periodo de 1981-2017.

#### **1.3.3. Limitaciones de información**

La investigación se limita a:

- La precipitación diaria descargada de la web (pluviómetros del SENAMHI utilizados en la elaboración de PISCO V 2.1), datos con control de calidad y completados, como precipitación observada.
- La precipitación mensual administrada y facilitada por el SENAMHI y la UNSAAC, como precipitación observada.





- La precipitación diaria, mensual, estacional y anual descargada de la web del producto CHIRPS V 2.0 como precipitación estimada por satélite.
- La precipitación diaria, mensual, estacional y anual descargada de la web del producto PISCO V 2.1, como producto de precipitación grillada que ofrece el SENAMHI.
- La precipitación diaria, mensual, estacional y anual descargada de la web del producto CHIRPM (CHIRP modificado), como producto de precipitación grillada que ofrece el SENAMHI.

## **1.4. Objetivo de la Investigación**

### **1.4.1. Objetivo General**

Evaluar la calidad de la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS con respecto a la precipitación observada por los pluviómetros, evaluada mediante Estadísticos de Validación Categórica (POD, FAR, TS), Estadísticos de Comparación por Pares (MAE, PBIAS, NSE, CORRELACION PEARSON) y en comparación con los productos CHIRPM y PISCO, antes y después de la corrección mediante el "Modelo de Redes Neuronales Artificiales", en la Cuenca del río Vilcanota.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Determinar si hay diferencias significativas entre la precipitación diaria estimada por satélite del producto CHIRPS sin corrección mediante RNA.
- Analizar la consistencia y completar los datos de precipitación mensual observada en las estaciones meteorológicas.
- Evaluar la información de la precipitación mensual estimada por satélite del producto CHIRPS sin corrección mediante RNA.
- Evaluar la calidad de la información de la precipitación estacional y anual estimada por satélite del producto CHIRPS sin corrección mediante RNA.
- Corregir la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS mediante el "Modelo de Redes Neuronales Artificiales (RNA)".
- Mejorar la calidad de la información de la precipitación mensual, estacional y anual estimada por satélite del producto CHIRPS corregido mediante RNA.



## Capítulo II: Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes de la Tesis o Investigación Actual

#### 2.2.1 Antecedentes a Nivel Nacional

**“Validación y Corrección de la precipitación estimada por el satélite TRMM usando Redes Neuronales Artificiales – aplicación cuencas de Puno”**

**Lujano Laura, Oscar Felipe – Ing. Agrícola**

**Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – Diciembre del 2013**

#### **Resumen**

“Este trabajo fue aplicado en la cuenca del río Huancané, de la región hidrológica del Titicaca, con el objetivo de verificar la calidad de la información de las estimaciones de precipitación del satélite TRMM producto mensual 3B43 y proponer una metodología de corrección basado en RNA's (Redes Neuronales Artificiales). Para el análisis de los datos se utilizó información de 7 estaciones meteorológicas del SENAMHI con información de precipitación del periodo 1998-2010, los cuales fueron comparados con las estaciones virtuales del TRMM con datos sin corregir y luego con los datos corregidos mediante RNA's. para la aplicación del modelo de RNA's, en su etapa de entrenamiento y validación, se trabajó con el 70% y 30% del total de datos respectivamente con lo cual se verifica que el modelo de corrección propuesto mejora la bondad de ajuste entre la precipitación observada y las estimaciones del TRMM; evaluados a través del coeficiente de determinación, la raíz del error medio cuadrático y el BIAS; la significancia estadística de estos índices fue cuantificada aplicando el método bootstrap incorporado en el código FITEVAL...”

#### **Conclusiones**

Las estimaciones satelitales del TRMM para la zona evaluada muestran una mayor tendencia a la subestimación de los datos observados en el periodo húmedo; sin embargo, con el modelo de corrección propuesto la distribución de los sesgos es más uniforme en la cuenca y en menor magnitud.

Mediante el presente trabajo, se estableció 01 modelo de red neuronal artificial que está en función de la precipitación de satélite TRMM, el cual nos permite corregir con buena aproximación las precipitaciones estimadas por satélite, el modelo propuesto es:  
 $MRNA(P_{EST(t)}=f(P_{TRMM(t)}).$



El modelo propuesto, presenta mejoras, debido a que se han obtenido para el conjunto de datos una NSE de 92% y un RMSE de 13.07, frente a NSE de 74% y RMSE de 27.59 de los datos sin corregir...

## **Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1998-2007)**

**Pedro Rau Lavado & Thomas Condom**

**Universidad Nacional Agraria La Molina**

### **Resumen**

Con el objetivo de estimar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación sobre las zonas de montaña de los andes peruanos, se analizaron los registros mensuales de precipitación in situ y del satélite TRMM 3B43 (Tropical Rainfall Measuring Mission) del periodo 1998-2007, los cuales fueron comparados en regiones ubicadas sobre los 3000 msnm. En cada región la confiabilidad de los registros TRMM es variable en función de la raíz del error cuadrático medio relativo (%RMSE) y del coeficiente de correlación (%CC). Debido a esta variabilidad de la confiabilidad del TRMM, se propone su corrección mediante el empleo de factores aditivos y multiplicativos. Estos modelos de corrección de los datos TRMM brindan, en la mayoría de las regiones, una mejor aproximación de las precipitaciones mensuales, siendo también verificado para los valores anuales.

### **Conclusiones**

La precipitación total mensual en las 31 estaciones SENAMHI (datos in situ) ubicadas sobre los 3000 msnm, mantiene una estacionalidad muy marcada. Los valores elevados se hallan en el periodo húmedo (enero a marzo) y los más bajos en el periodo seco (junio a agosto).

En el periodo de octubre a marzo, los datos in situ son mayores al TRMM, estas diferencias son muy notorias en las estaciones de Janacancha (R4, región Quilca) y Colquepata (R6, región Urubamba). En el periodo de mayo a agosto, el TRMM sobre estima los datos in situ.

En la región R1 (Santa), el empleo de los datos TRMM originales es confiable solo en el periodo noviembre a abril. Para R2 (Pacífico Norte) en el periodo octubre a abril, con una mejor aproximación en el mes de noviembre. En R3 (Colca) y R4 (Quilca) no es confiable en todos los meses. En R5 (Apurímac) es confiable de agosto a abril. En R6 (Urubamba) solo en los meses de enero y febrero. En R7 (Ocoña) en el periodo de noviembre a abril. En R8 (Mantaro)



es aceptable en todos los meses. En R9 (Chavin) no es aceptable solo en el mes de junio. En los meses húmedos existe una buena aproximación de los datos TRMM en contraste del periodo seco donde las estimaciones TRMM no se garantizan con ningún parámetro evaluado.

Dos modelos estadísticos son planteados para la corrección de los datos de TRMM, uno aditivo y otro multiplicativo. El modelo aditivo ofrece buenas aproximaciones en las regiones Santa (R1), Pacifico Norte (R2), Colca (R3), Quilca (R4), Apurimac (R5) y Ocoña (R7). El modelo multiplicativo brinda mejores resultados en la región Alto Marañón (R9).

Existiendo zonas del territorio peruano con escasa cobertura de estaciones pluviométricas, esta validación de los datos TRMM ofrece un mejor entendimiento de la variabilidad espacial de las precipitaciones y el conocimiento de las magnitudes de precipitación que existen en las zonas de montaña.

## **2.2.2 Antecedentes a Nivel Internacional**

### **Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014**

**Viviana Urrea, Andrés Ochoa, Oscar Mesa**

**Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellin, Colombia – 2016**

#### **Resumen**

“En este trabajo se presenta la validación para Colombia de la base de datos de precipitación CHIRPS v.2.0. esta información tiene resolución espacial de  $0.05^\circ$  y temporal diaria. La validación se hizo a escala diaria, mensual y anual usando para ello 904 series historias de precipitación diaria en el periodo 1981-2014. La metodología empleada consta de tres análisis: (1) análisis exploratorio y descriptivo con graficas (series de tiempo, ciclo anual, boxplot, curva de masa simple) y estadísticos (media, desviación estándar, porcentaje de datos faltantes), (2) análisis comparativo en el cual se calcularon diez medidas de error diferentes (RMSE, MSE, MAE, MPE, BIAS, E,  $E1$ ,  $dr$ ,  $r$ , y  $r^2$ ), se evaluó el desempeño de la base de datos representando el número de días y meses sin precipitación mediante matrices de confusión y se usaron graficas como el diagrama de dispersión y la curva de masa doble, (3) análisis de probabilidad en el cual se evaluó si las series de tiempo siguen la misma función de distribución de probabilidad mediante las pruebas Chi cuadrado y Kolmogorov – Smirnov. Por último, se muestra la distribución espacial de resultados obtenidos en las diferentes pruebas. Los resultados de la



validación son buenos, CHIRPS conserva características importantes de la precipitación como la media y la estacionalidad en las tres escalas de tiempo. La varianza está mejor representada en las escalas mensual y anual; en la escala diaria es menor en CHIRPS que en IDEAM, lo cual se ve reflejado a su vez en las diferentes medidas del error y en el análisis de probabilidad. La base de datos CHIRPS es un insumo valioso para el estudio y la gestión del agua en Colombia”.

### **Conclusiones**

CHIRPS conserva características importantes de la precipitación como la media, la precipitación acumulada total y la estacionalidad en las tres escalas temporales analizadas. La variabilidad temporal es menor en CHIRPS que en IDEAM lo cual es razonable debido a que la serie de tiempo de IDEAM es una medición puntual y la de CHIRPS representa un área de aproximadamente 25 km<sup>2</sup>.

Se obtuvieron errores menores y mejores ajustes de las funciones de probabilidad para las escalas mensual y anual que para la diaria, lo cual puede ser producto de la suavización de los datos diarios al ser agregados a escalas mayores.

En la mayoría de los casos más del 60% de los datos aciertan los días de precipitación y los días sin precipitación.

CHIRPS captura mejor la variabilidad temporal de la precipitación a escalas mensuales que a escalas menores, lo cual no debe ser extraño debido a la suavización de las series al disminuir la resolución. La base de datos CHIRPS es un insumo valioso para el estudio y la gestión del agua en Colombia, especialmente en sectores relacionados con el aprovechamiento del recurso para energía, consumo humano y demás. Por otra parte, es recomendable tener mucha precaución en el análisis de riesgos con base en información diaria, como por ejemplo crecientes y desbordamientos de pequeñas corrientes fluviales.

Dentro de las fortalezas de CHIRPS se puede destacar las siguientes: a) la resolución espacial es la más alta entre los productos actualmente disponibles para Colombia b) la resolución temporal es relativamente alta, y suficiente para muchas aplicaciones, c) representa bien los valores medios multianuales, la estacionalidad y la precipitación acumulada total.

Una de las desventajas de CHIRPS es que la varianza de las series de tiempo a escalas diarias es mucho menor que en las series in situ; este efecto disminuye a medida que aumenta la escala temporal de la información.



## **Validación del satélite meteorológico CHIRPS en la cuenca Rurrenabaque-Bolivia**

**Collarani Freddy, Villazon Mauricio**

**Universidad Nacional Agraria La Molina (Unalm), Laboratorio de Hidráulica**

**Universidad Mayor de San Simón (LHUMSS) – 2018**

### **Resumen**

“El presente trabajo, se basa en la validación de los datos de precipitación obtenidos con el satélite CHIRPS v2.0 para la cuenca del río Rurrenabaque hasta la estación hidrométrica del mismo nombre. Para tal fin se realizó un análisis de la precipitación a nivel diario y mensual usando 75 estaciones meteorológicas con información desde enero 2005 hasta septiembre 2016.

La metodología empleada consta de tres análisis: i) análisis exploratorio ii) análisis descriptivo con gráficas series de tiempo, boxplot iii) análisis estadísticos y modelación lluvia-escorrentamiento. A nivel diario se observó que CHIRPS no presenta buena semejanza frente a los datos históricos. A nivel mensual presenta coeficientes de determinación que varían entre 0.42 a 0.91 y coeficientes de predicción alcanzan de 0.24 a 0.9, se observó también un error medio absoluto de 22.15 mm, error absoluto medio relativo de 25.3mm, una eficiencia de predicción de 0.81 y un error de bias de 15.5mm.

Se calibro un modelo de transformación lluvia-caudal con los datos observados, posteriormente se evaluó el comportamiento de la información proporcionada por CHIRPS corregido y CHIRPS sin correcciones, los modelos muestran coeficientes de determinación de 0.84, 0.81 y 0.83, eficiencias de predicción de 0.84, 0.81 y 0.83. De los resultados se concluye que la información proporcionada por CHIRPS es aceptable para diferentes estudios hídricos a nivel mensual en región alto amazónica de Bolivia”.

### **Conclusiones**

Según el análisis estadístico realizado para niveles diarios los datos de SENAMHI y la información del satélite CHIRPS no guardan relación en magnitudes, presentan coeficientes de determinación muy bajos que varían entre 0.08 a 0.17. Para niveles mensuales son aceptables los coeficientes de determinación varían entre 0.42 a 0.91, para los acumulados en todo el periodo analizado alcanza un coeficiente de determinación de 0.86.



De los análisis estadísticos realizados se puede concluir que la información del satélite CHIRPS a niveles mensuales sobreestima a los datos observados y registrados por SENAMHI, cuenta con un error absoluto medio MAE que varía de 10.5 a 64.83 con una media de 24.8, un error absoluto medio relativo RMAE que varía de 23 a 64.1 con una media de 40.3, un coeficiente de determinación de que varía de 0.42 a 0.91 con una media de 0.72, raíz referencial del error medio cuadrático RRMSE que varía de 0.32 a 1.05 con una media de 0.6, la eficiencia de predicción varía de 0.24 a 0.9 con una media de 0.65, un error de BIAS que varía de -31.7 a 48.15 con una media de -0.83.

Fusionado la información del satélite y los datos observados se realizó correcciones a los datos del satélite CHIRPS, los cuales se realizó por intermedio de mapas de errores, estos mapas fueron generados para cada mes, interpolando el error de bias de cada estación, en sitios donde no se cuente con datos meteorológicos no se podrá contar con correcciones de ninguna índole.

Como respuesta del modelo calibrado, se tiene caudales medio simulado que alcanzan a 1569, 1641 y 1900m<sup>3</sup>/s para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente, el error medio absoluto 316, 362 y 388m<sup>3</sup>/s, coeficiente de determinación de 0.84, 0.81 y .83, para el escenario 1 se tiene una eficiencia de predicción de 0.82 para el escenario 2 se tiene una eficiencia de predicción de 0.81 y para el tercer escenario se tiene una eficiencia de predicción de 0.80.

Para los años hidrológicos entre el 2005-2006 y 2013-2014, los caudales diarios son atípicos, muestran caudales muy por encima de la media, donde el modelo de transformación lluvia – escorrentía, no podría ajustar dichos caudales con los datos de precipitación de SENAMHI. En controversia, con la información proporcionada por CHIRPS para estos mismos periodos se tiene un mejor ajuste para el modelo.

Se pudo constatar que la información proporcionada por el Satélite CHIRPS es confiable a partir de escalas mensuales, realizando correcciones a los datos del satélite CHIRPS con datos observados se puede obtener una mejor distribución de la precipitación y mejores resultados en un modelo de transformación lluvia caudal.

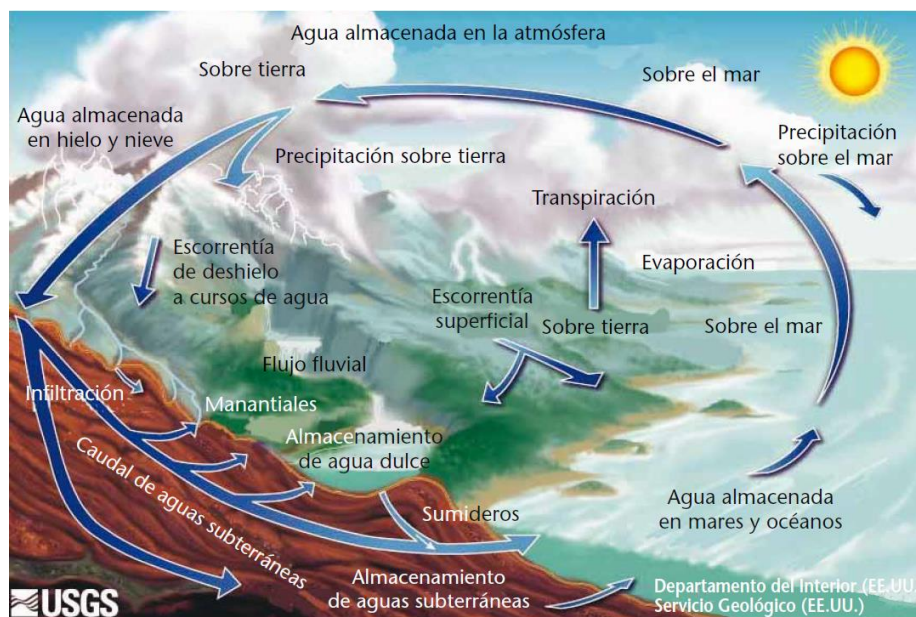
Utilizando la información del satélite CHIRPS, sin realizar correcciones de ninguna naturaleza, se puede obtener buenos resultados en un modelo de transformación lluvia escorrentía.



## 2.2. Aspectos Teóricos Pertinentes

### 2.2.1 Ciclo hidrológico

Chow, Maidment, & Mays, (1994, pág. 2) consideran que: El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. En el ciclo hidrológico el agua se evapora desde los océanos y superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo superficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emergen manantiales o se desliza hacia ríos para formar escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa.



**Figura 6.** Ciclo hidrológico.

Fuente: (OMM, Guía de Prácticas Hidrológicas OMM-N° 168, 2011).

### 2.2.2 Precipitación

La precipitación es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo; de acuerdo a esta definición la precipitación puede ser en forma de: lluvias, granizadas, garúas y nevadas (Villón, 2002, pág. 69).

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca (Chow, Maidment, & Mays, 1994, pág. 67).



### 2.2.2.1. Formas de precipitación

según Villón (2002) las formas de precipitación son las siguientes:

**llovizna**, pequeñas gotas de agua, cuyo diámetro varía entre 0.1 y 0.5 mm, las cuales tienen velocidades de caída muy bajas.

**Lluvia**, gotas de agua con diámetro mayor a 0.5 mm.

**Escarcha**, capa de hielo por lo general transparente y suave pero que usualmente contiene bolsas de aire.

**Nieve**, compuesta de cristales de hielo blanco translucido, principalmente de forma compleja.

**Granizo**, precipitación en forma de bolas o formas irregulares de hielo, que se producen por nubes convectivas, pueden ser esféricos, cónicos o de forma irregular, su diámetro varía entre 5 y 125 mm.

### 2.2.2.2. Clasificación de la precipitación

#### Precipitación de convección

Villón (2002, pág. 71) afirma que: En tiempo caluroso se produce una abundante evaporación a partir de la superficie del agua, formando grandes masas de vapor de agua, que, por estar más calientes, se elevan sufriendo un enfriamiento de acuerdo a adiabática seca o húmeda. En el curso de su ascenso, se enfría según el gradiente adiabático seco ( $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ), o saturado ( $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ).

Las masas de vapor se acumulan en los puntos llamados células de convección. A partir de este punto, estas masas pueden seguir elevándose hasta llegar a las grandes alturas, donde encuentran condiciones que provocan la condensación y la precipitación. Generalmente viene acompañada de rayos y truenos. Son precipitaciones propias de las regiones tropicales, donde las mañanas son muy calurosas, el viento es calmo y hay una predominancia de movimiento vertical del aire.

Segerer & Villodas (2006, pág. 2) indican: Este tipo de precipitación tiene origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. Estas diferencias de temperatura pueden ser el resultado de calentamientos diferenciales en superficie o en la parte superior de la capa de aire.



### **Precipitación orográfica**

Se producen cuando el vapor de agua que se forma sobre la superficie de agua es empujado por el viento hacia las montañas, aquí las nubes siguen por las laderas de las montañas, ascienden a grandes alturas, hasta encontrar condiciones para la condensación y la consiguiente precipitación (Villón, 2002, pág. 72)

Se denomina así a la precipitación que tiene origen en el ascenso de la masa de aire forzado por una barrera montañosa. Se presentan en forma de lluvia o nieve, siendo muy irregulares en importancia y localización. A veces, en casos de masas inestables, el efecto orográfico no supone más que el mecanismo de disparo de la inestabilidad convectiva (Segerer & Villodas, 2006, pág. 3).

### **Precipitación ciclónica**

Villón (2002, pág. 72) indica que: Se producen cuando hay un encuentro de dos masas de aire, con diferente temperatura y humedad, las nubes más calientes son violentamente impulsadas a las partes más altas, donde pueden producirse la condensación y precipitación.

Seegerer et al (2006, pág. 3) manifiestan que: Es la que resulta del levantamiento del aire que converge en un área de baja presión o centro ciclónico.

#### **2.2.2.3. Instrumentos de medición**

La precipitación se mide en términos de la altura de lámina de agua (hp), y se expresa comúnmente en milímetros. Esta altura de lámina de agua, indica la altura del agua que se acumularía en una superficie horizontal, si la precipitación permaneciera donde cayó. (Villón, 2002).

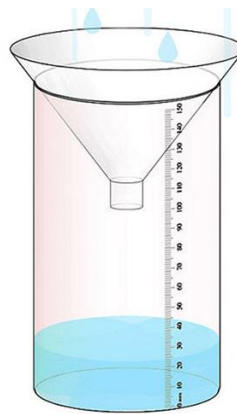
La cantidad total de precipitación que llega al suelo en determinado período se expresa en términos de profundidad vertical de agua (o equivalente en agua en el caso de formas sólidas) que cubriría una proyección horizontal de la superficie de la tierra (OMM, 2014, págs. 1.6-1).

En esta investigación las precipitaciones son registrados y procesados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), mediante su red de estaciones meteorológicas distribuida en todo el territorio peruano.

### 2.2.2.3.1. Pluviómetro

Para Villón (2002, pág. 73). Consiste en un recipiente cilíndrico de lámina, de aproximadamente 20 cm de diámetro y de 60 cm de alto. La tapa del cilindro es un embudo receptor, el cual se comunica con una probeta de sección 10 veces menor que la de la tapa. Esto permite medir la altura de lluvia en la probeta, con una aproximación hasta décimos de milímetro, ya que cada centímetro medido en la probeta, corresponde a un milímetro de altura de lluvia.

Cuando hay necesidad de conocer la pluviometría mensual o estacional de una zona de difícil acceso, donde solo se va unas pocas veces al año, se utilizan los pluviómetros totalizadores. Estos pluviómetros, acumulan el agua llovida durante un periodo de tiempo mas o menos largo.



**Figura 7.** Esquema de pluviómetro.

Fuente: [https://redsearch.org/images/p/pluviometro\\_animado#images-12](https://redsearch.org/images/p/pluviometro_animado#images-12).

#### **Hora de observación y día pluviométrico**

En nuestro país las observaciones de lluvia se realizan a las 07:00 y 19:00 horas, designándose por día pluviométrico las observaciones de las 19:00 horas del mismo día y las observaciones de las 07:00 horas del día siguiente.

#### **Red pluviométrica**

Para Segerer & Villodas (2006), los usos para los cuales se deba utilizar la información sobre la precipitación son los que determinan la densidad de una red. Para el estudio de grandes tormentas o para determinar los promedios de extensas áreas de llanura, debería ser suficiente una red de estaciones relativamente dispersas.

En cambio, se requiere una red bastante densa para determinar el patrón de lluvias de intensas tormentas de tipo convectivo, que presentan fuertes variaciones en la magnitud de las precipitaciones en distancias relativamente cortas (del orden de un par de kilómetros).

La probabilidad de que el centro de una tormenta quede registrado por un pluviómetro será función de la densidad de la red.

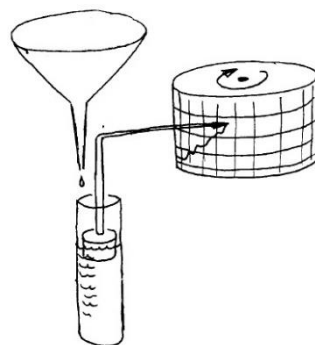
Según los párrafos anteriores, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda para propósitos hidrometeorológicos generales, las siguientes densidades mínimas:

- Para regiones de llanura en zonas tropicales, mediterráneas o templadas: 1 estación cada 600 a 900 km<sup>2</sup>.
- Para regiones montañosas en zonas tropicales, mediterráneas o templadas: 1 estación cada 100 a 250 km<sup>2</sup>.
- Para regiones montañosas pequeñas con precipitación irregular: 1 estación cada 25 km<sup>2</sup>
- Para zonas áridas y zonas polares: 1 estación cada 1500 a 10000 km<sup>2</sup>.

#### 2.2.2.3.2. Pluviógrafo

Según Villón (2002, pág. 75). Es un instrumento, que registra la altura de lluvia en función del tiempo, lo cual permite determinar la intensidad de la precipitación, dato importante para el diseño de estructuras hidráulicas.

Los pluviógrafos mas comunes son de forma cilíndrica, y el embudo receptor está ligado a un sistema de flotadores, que originan el movimiento de una aguja sobre el papel registrador, montado en un sistema de reloj. Como el papel registrador tiene un cierto rango en cuanto a la altura de registro, una vez que la aguja llega al borde superior, automáticamente regresa al borde inferior y sigue registrando.



**Figura 8.** Ilustración de pluviografo.

Fuente: <http://www.thehouseofblogs.com/articulo/581204.html>

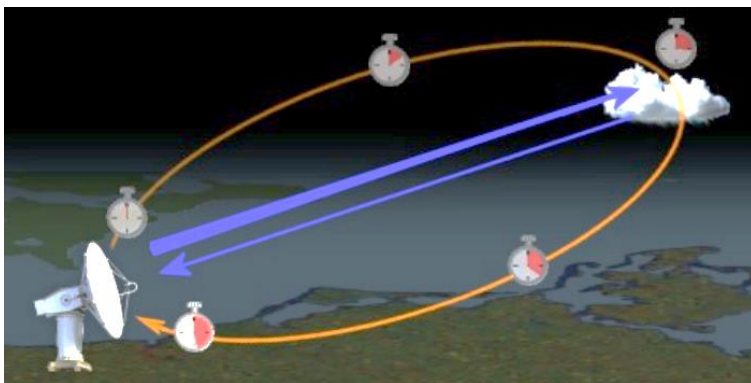
#### 2.2.2.4. Herramientas de percepción remota

Para caracterizar la precipitación es necesario contar con datos veraces observados en el terreno. Los pluviómetros cumplen con esta función y consisten en un instrumento de medición, una plataforma de recolección de datos, fuente de poder y unidad de manejo, así como de un dispositivo de comunicación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los pluviómetros son susceptibles a errores y no son capaces de representar espacialmente la precipitación. Por tanto, es necesaria la instalación de redes de pluviómetros que presten información tan precisa, confiable y oportuna como sea posible. Su importancia incluye la evaluación de amenazas y alertas tempranas, calibración de radares, corrección de imágenes satelitales y calibración de modelos numéricos de medición de precipitación (UCAR, 2012).

##### 2.2.2.4.1. El radar

Según Renom (2011), el Radar estima la concentración de gotas en la atmosfera a partir de la potencia de la señal recibida.

Se lo clasifica como sensor activo, ya que emite una onda electromagnética (en la región de las microondas, con longitud de onda entre 1mm y 1m) y recibe la energía electromagnética reflejada o disipada por un objeto en el espacio.



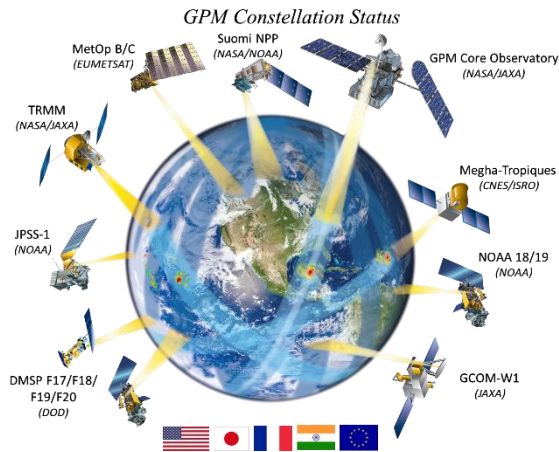
**Figura 9.** Medición de la precipitación mediante radar.

Fuente: (Renom, 2011).

##### 2.2.2.4.2. Satélites meteorológicos

Según la OMM (2011), la estimación de la precipitación de lluvia desde el espacio está basada en la medición de la cantidad de radiación reflejada y emitida a través de las cimas de las nubes. La mayor parte de la radiación no penetra profundamente en las regiones nubosas que contienen partículas de tamaño similar o superior al de la longitud de onda de la radiación.





**Figura 10.** Sistema de satélites geoestacionarios Meteorológicos Mundial.

Fuente: <https://pmm.nasa.gov/image-gallery/gpm-constellation>

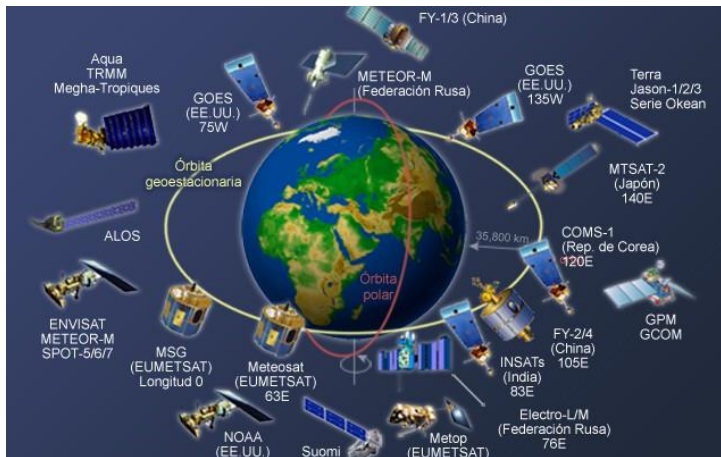
Según Saw (2005), el 1 de Abril de 1960, TIROS-1 (por sus siglas en inglés: Televisión and Infra-Red Observation Satellite), el primer satélite meteorológico mundial, fue lanzado por los Estados Unidos de Norteamérica (Rao, Holmes, Anderson, Winston, & Lehr, 1990). Nueve satélites adicionales fueron lanzados en la serie TIROS; el último (TIROS 10), fue lanzado el 2 de julio de 1965.

## Tipos de satélites meteorológicos

### a. Satélites operacionales geoestacionarios

Los satélites geoestacionarios operacionales orbitan alrededor de la Tierra a una altitud de aproximadamente 35800 kilómetros encima de la línea ecuatorial, a esta altura, la velocidad angular de la astronave es igual a la de la tierra (cada uno viaja 360°, o una órbita completa, en 24 horas). Como resultado, cada satélite permanece en el mismo punto de la Tierra a lo largo de toda su órbita.





**Figura 11.** Red global de satélites geostacionarios y de órbita polar.

Fuente: <https://www.mexicampo.com.mx/wp-content/uploads/2015/04/globalsys2-640x400.jpg>.

La principal ventaja de los satélites geostacionarios se encuentra en la alta resolución temporal de sus datos. Una imagen de toda la Tierra está disponible cada 30 minutos. En algunos satélites geostacionarios, el modo de escaneo se puede alterar para observar una pequeña zona seleccionada incluso con más frecuencia.

La principal desventaja de muchos satélites geostacionarios es su limitada resolución espacial, que es una consecuencia de su distancia de la Tierra. (Bader, Grant, Waters, & Forbes, 1995).

### **b. Satélites operacionales de órbita polar**

Los satélites de órbita polar viajan de Polo a Polo a una altura de alrededor 860 kilómetros, tal como se puede observar en la **Figura 11**. Satélites de órbita polar recorren alrededor de la Tierra en una trayectoria sincrónica al Sol: el plano de la órbita de un satélite de este tipo permanece estacionario con respecto al Sol.

Desde un punto fijo en la Tierra, un satélite de órbita polar siempre cruzará el Ecuador aproximadamente a la misma hora local con respecto al Sol. Cada órbita tiene un periodo de aproximadamente 102 minutos. Las franjas tienen por lo general alrededor de 2600 kilómetros de ancho y, completando 14 órbitas por día, un satélite puede proporcionar una cobertura completa del globo dos veces cada 24 horas (Conway, 1997).

Algunas de las ventajas de los satélites de órbita polar son que proporcionan mayor resolución de las imágenes, es decir, se pueden obtener imágenes detalladas en las regiones polares. Algunas de las desventajas de los satélites de órbita polar corresponden a que no se pueden



obtener animaciones de elementos en movimiento (movimiento de las nubes) y pueden tener algunas áreas perdidas cerca de las regiones ecuatoriales.

### **Técnicas de estimación de la precipitación**

Según información recopilada de Hessels (2015) sobre las técnicas utilizadas en la estimación de los productos satelitales.

#### **a. Técnicas para satélites geoestacionarios**

La ventaja de este tipo de satélite es la cobertura espacial y temporal del conjunto de datos. La desventaja es la precisión de la técnica debido a la gran distancia entre el satélite y la superficie de la Tierra, esto tiene un efecto sobre las frecuencias que se pueden utilizar (solamente el espectro visible - VIS, infrarrojo cercano - NIR o el infrarrojo - TIR). (Kidd, Levizzani, Turk, & Ferraro, 2009).

### **Técnicas de microondas pasivas**

Son técnicas que no envían señales, por el contrario, sólo las detectan en una frecuencia determinada. Estas señales se emiten desde la superficie de la Tierra o son reflejada desde la misma. La ventaja es que se necesita menos energía para obtener una medición, esto es especialmente ideal en el espacio en el que una pequeña cantidad de energía puede ser generada o almacenada.



### **b. Técnicas para satélite de órbita polar**

La estimación de la precipitación utilizando satélites de órbita Polar puede aumentar la exactitud en gran medida. La única desventaja es la cobertura espacial de los satélites. Toda la Tierra no puede ser cubierta por los éstos, resultando en lagunas o información faltante dentro de los datos que deben ser llenados con otros conjuntos de datos o técnicas de extrapolación.

#### **Microondas pasivas**

Los sensores pasivos de microondas también están situados en satélites en órbita baja. Mediante la detección de diferentes frecuencias, la estimación de la precipitación se puede llevar a cabo con el uso de un algoritmo de recuperación. Las técnicas de dispersión y emisión son las más importantes para recuperar la precipitación de los sensores pasivos de microondas.

### 2.2.3 Precipitaciones estimadas por satélite

Según investigación de Urrea, Ochoa, & Mesa, (2016), los principales satélites disponibles son los siguientes.

**Tabla 6.** Productos de precipitación disponibles.

Referencia	Producto	Resolución espacial	Resolución Temporal	Periodo	Extensión espacial	Datos intrínsecos	Instrumentos satelitales	Cobertura
(Funk <i>et al.</i> , 2015)	CHIRPS V2.0	0.05°	Diaria	1981 - presente	Lat [-50°, 50°] Lon [-180°, 180°]	Satélites Estaciones	Microonda Infrarrojo	Tierra
(Hurtado y Mesa, 2009)	MHN	0.083°	Mensual	1975 - 2006	Lat [-5°, 15°] Lon [-80°, -65°]	Satélites Estaciones	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra
(Okamoto, Ushio, Iguchi, Takahashi, y Iwanami, 2005)	GSMaP MVK (*)	0.1°	Horaria	2002 - presente	Lat [-60°, 60°] Lon [-180°, 180°]	Satélites	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra
(Huffman <i>et al.</i> , 2007)	TRMM 3B42 V7	0.25°	3 horas	1997 - 2015	Lat [-50°, 50°] Lon [-180°, 180°]	Satélites Estaciones	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra
(Joyce, Janowiak, Arkin, y Xie, 2004)	CMORPH	0.25°	3 horas	2002 - presente	Lat [-50°, 50°] Lon [-180°, 180°]	Satélites	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra
(Ashouri <i>et al.</i> , 2015)	PERSIANN CDR	0.25°	Diaria	1983 - presente	Lat [-60°, 60°] Lon [-180°, 180°]	Satélites Estaciones	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra
(Joseph <i>et al.</i> , 2009)	CHOMPS	0.25°	Diaria	1998 - 2007	Lat [-60°, 60°] Lon [-180°, 180°]	Satélites	Microonda	Océano Tierra
("The Climate Data Guide: SSM/I, SSMIS: Special Sensor Microwave/Imager and Sounder.", 2016)	SSM/I, SSMIS	0.25°	Diaria	1987 - 2015	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Satélites	Microonda	Océano Tierra
(Chen, Xie, Janowiak, y Arkin, 2002)	PREC/L	0.5	Mensual	1948 - presente	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Estaciones	-	Tierra
(Chen <i>et al.</i> , 2008)	CPC Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation	0.5°	Diaria	1979 - 2005	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Estaciones	-	Tierra
(Schneider <i>et al.</i> , 2015)	GPCC V7	0.5°	Mensual	1900 - 2010	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Estaciones	-	Tierra
(Harris, Jones, Osborn, y Lister, 2014)	CRU TS3.21 (**)	0.5°	Mensual	1901 - 2012	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Estaciones	-	Tierra
(Willmott y Matsuura, n.d.)	UD-ATP V3.01	0.5°	Mensual	1901 - 2010	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Estaciones	-	Tierra
(Dee <i>et al.</i> , 2011)	ERA-Interim (***)	0.75°	6 horas	1979 - presente	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Modelo paramétrico	-	Océano Tierra
(Huffman <i>et al.</i> , 2001)	GPCP1DD V1.2	1°	Diaria	1996 - presente	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Satélites Estaciones	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra
(Adler <i>et al.</i> , 2003)	GPCP V2.2	2.5°	Mensual	1979 - presente	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Satélites Estaciones	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra
(Xie y Arkin, 1997)	CMAP	2.5°	Mensual	1979 - 2011	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Satélites Estaciones	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra
(Rodell <i>et al.</i> , 2015)	NEWS_WEB_ACLIM.0 V1.0	Cuencas continentales y oceánicas	Mensual	1998 - 2010	Lat [-90°, 90°] Lon [-180°, 180°]	Satélites Estaciones	Microonda Infrarrojo	Océano Tierra

Restricciones de uso: (\*) Registro requerido. (\*\*) Registro requerido, uso académico. (\*\*\*) Accesible para los usuarios registrados en los estados miembros y cooperantes de *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* y para instituciones académicas o de investigación estadounidenses.

Fuente: (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016)

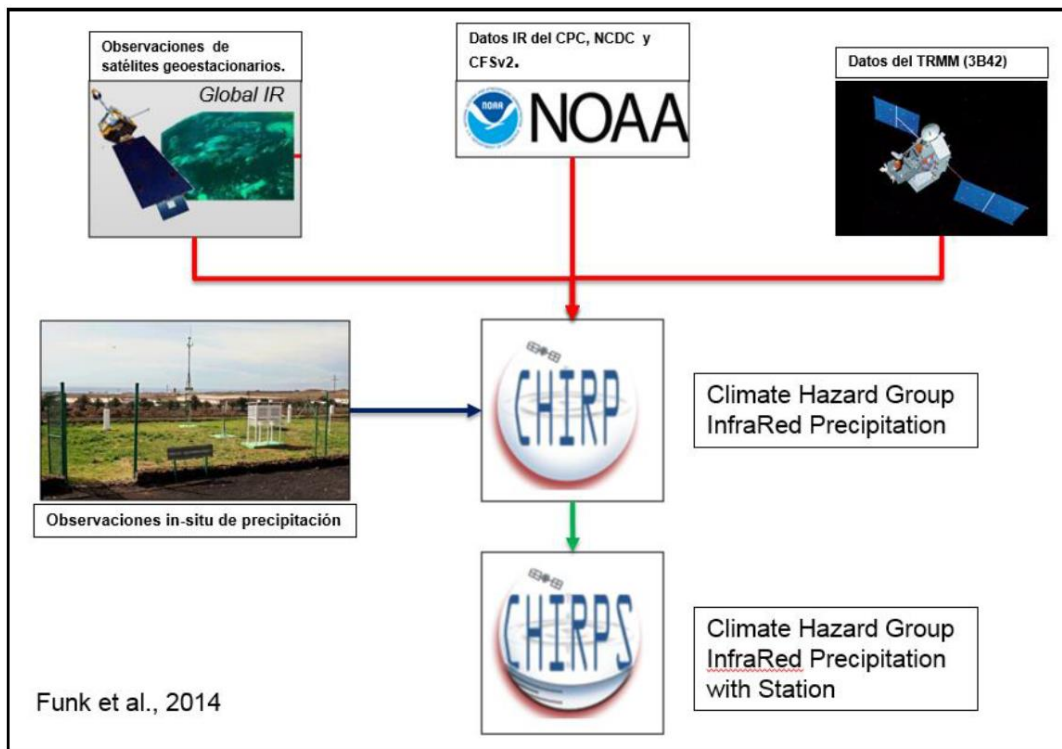
Como se puede observar en el cuadro anterior el producto CHIRPS V 2.0 tiene una resolución espacial de 0.05°, resolución temporal diaria y la disposición de datos por periodo desde el año 1981 hasta la presente; por lo que representa la mejor opción para la toma de datos de precipitación satelital.



### 2.2.3.1. CHIRPS

El producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) desarrollado por la USGS (U.S. Geological Survey) y el grupo de riesgos climáticos de la universidad de California, Santa Bárbara, es un producto nuevo puesto a la disposición desde 2014. En una primera etapa se genera el producto de la precipitación llamado CHIRP (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation); combinando datos de la climatología global de la precipitación ( $0.05^\circ$  de resolución), observaciones del satélite geoestacionario infrarrojo (IR) calibrados con datos de TRMM 3B42 y los campos de las precipitaciones del modelo atmosférico de la NOAA-CFSv2 (Climate Forecast System versión 2), en un segundo procedimiento. Combinando el CHIRP con la precipitación observada in situ se genera el producto CHIRPS a una resolución espacial de  $0.05^\circ$  cubriendo  $50^\circ\text{S}$ - $50^\circ\text{N}$  y resolución temporal mínima de diario que está disponible desde 1981 (Fernandez & SENAMHI, 2015). Las resoluciones temporales son días, pentadas, meses, décadas y años (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016).

Las fuentes de datos utilizadas en la creación de CHIRPS fueron: (1) CHPCLim (Climate Hazards Precipitation Climatology); (2) Infrarrojo (IR) térmico geoestacionario; (3) TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission); (4) Modelo atmosférico de campos de precipitación del sistema de predicción climático de la NOAA (CFSv2); y (5) Observaciones in situ de precipitación obtenidas de varias fuentes incluidos servicios meteorológicos estadounidenses y regionales. (Funk et al, 2015).



**Figura 12.** Esquema conceptual de la generación de datos CHIRPS.

Fuente: (Yupanqui & SENAMHI, 2015).

### 2.2.3.2. CHIRP

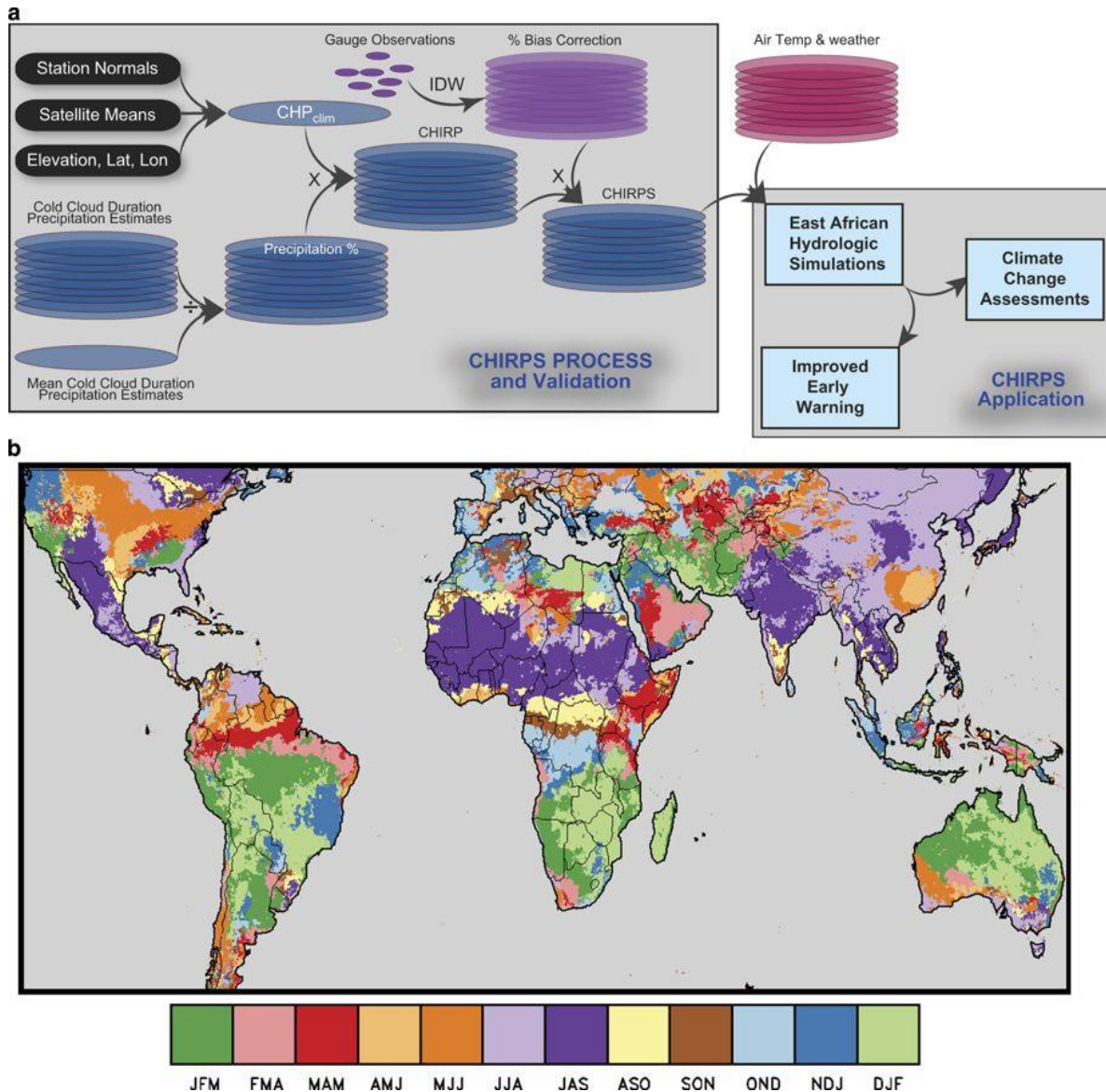
Según Aybar et al (2017) Debido a que la utilización de los datos observados en CHIRPS no presenta un control de calidad riguroso y este control solo se extiende hasta el 2010, PISCO es generado a partir de una modificación de CHIRP (no confundir con CHIRPS, CHIRP no utiliza para su generación los datos de pluviómetros).

Así, CHIRP es definida como:

$$CHIRP = (b_0 + b_1 * (CCD)) * CHP_{clim}$$

Donde  $b_0$  y  $b_1$  son los parámetros de la regresión lineal, CCD es “Cold Cloud Duration Percent” y  $CHP_{clim}$  es la climatología utilizada por CHIRP (Funk et al. 2016).





**Figura 13.** Esquema de producción y aplicación de CHIRPS (a), Mapa que muestra las temporadas de tres meses más húmedas basadas en CHPclim (b).

Fuente: (Funk et al, 2015).

Por otro lado, según Aybar et al (2019), Los productos CHIRP en el paso de tiempo mensual (CHIRPm) y diario (CHIRPd) se calculan inicialmente a partir del producto del paso de tiempo pentadas preliminar (CHIRPpentad).

### 2.2.3.3. CHIRPM

Según Aybar et al (2017), se comparan las climatologías de TRMM2A25 y CHPclim, observándose excesivos valores en la costa sur del país y la mala representación de "hotspot" de lluvias por parte del CHPclim. En este contexto, al no representar CHPclim correctamente las climatologías de precipitación en Perú, se optó por utilizar una climatología basada en



TRMM2A25, obteniéndose de este modo una modificación del CHIRP (CHIRPM) que fue llevada a cabo a paso diario (CHIRPMd) y mensual (CHIRPMm).

La ecuación de CHIRPM está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{CHIRPM} = (b_0 + b_1 * (\text{CCD})) * \text{CHP}_{\text{clim}} * (\text{TRMM2A25} + E) / (\text{CHP}_{\text{clim}} + E)$$

Donde CHIRPM es el CHIRP modificado utilizando las climatologías del TRMM2A25, y E es un artificio matemático para evitar grandes desviaciones (igual a 2.5).

Por otro lado según la investigación para la elaboración del producto PISCO 2.1 de (Aybar, y otros, 2019), indican lo siguiente: Para Perú, encontramos que  $\text{CHP}_{\text{clim}}$  sobreestima extremadamente la precipitación (> 500%) en la costa peruana entre 8 ° -18 ° S. Además, no representa adecuadamente los puntos calientes de precipitación orográfica sobre la transición entre los Andes y el Amazonas y considera los pluviómetros con poca fiabilidad. En base a esto,  $\text{CHP}_{\text{clim}}$  fue reemplazado por nuestro propio PISCO $_{\text{clim}}$  de climatología, lo que resultó en CHIRP modificado (CHIRPM):

$$\text{CHIRPM}_m = \text{CHIRP}_m * \frac{\text{PISCO}_{\text{clim}} + \varepsilon}{\text{CHP}_{\text{clim}} + \varepsilon}$$

$$\text{CHIRPM}_d = \text{CHIRP}_d * \frac{\text{PISCO}_{\text{clim}} + \varepsilon}{\text{CHP}_{\text{clim}} + \varepsilon}$$

Donde  $\varepsilon$  es un umbral definido como 0.5 en el denominador y el numerador para tratar con valores de cero o cerca de cero. Esta ecuación se aplica a las estimaciones mensuales y diarias de CHIRP que dan como resultado CHIRPMm y CHIRPMd, respectivamente. CHIRP se volvió a muestrear a una resolución espacial de 0.1 ° a través de interpolación spline cúbica.

#### 2.2.3.4. PISCO

Según Aybar et al (2017), El producto PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) de precipitación (PISCO $_{\text{p}}$ ) en su versión diaria y mensual es el resultado de la combinación de datos de estaciones terrenas con climatologías, reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial (~ 5\*5 km); los datos grillados abarcan una serie temporal que se inicia el 1ro de enero 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016, facilitando de

este modo mayor disponibilidad de los datos de precipitación para su uso en diferentes actividades ligadas al análisis hidrológico con sus limitaciones respectivas.

El producto de sensoramiento utilizado como covariable es el CHIRP (“Climate Hazards Group InfraRed Precipitation”) el cual presenta una resolución espacial de  $\sim 0.05^\circ$  (5 Km) y tiene un rango diario desde Enero de 1981. (Lavado-Casimiro, Aybar, Huerta, Sabino, & O., 2016).

### Versiones liberadas del producto PISCO

Aybar et al (2017), indican que, el producto PISCO de precipitación cuenta con 3 versiones anteriores a la descrita en este reporte, tal como se observa en la Tabla.

**Tabla 7.** Versiones de PISCO de precipitación anteriores y la versión de este reporte (2.0).

Versión	Covariable	Escala temporal	Método de Interpolación	Imputación	Observaciones	Cobertura temporal
1.0	CHIRPS	Mensual	KED	NO	Fuertes quiebres artificiales	1981-2014
1.1	CHIRPS	Mensual y diaria	KED, IDW y RIDW	NO	Fuertes quiebres artificiales	1981-2015
1.2	CHIRP	Mensual y diario	RIDW	SI	Quiebres Leves artificiales	1981-2016
2.0	CHIRP TRMM2A25	Mensual y diario	KED y RIDWO	SI	Quiebres leves artificiales	1981-2016

Fuente: (Aybar et al , 2017).

Las primeras versiones de PISCO precipitación (1.0 y 1.1) se caracterizan por la falta de completación de la serie de datos, lo cual repercute directamente en la generación de quiebres artificiales sobre todo a partir del 2010.

La versión 1.0 solo genera datos mensuales, los datos de pluviómetros no presentan completación por lo que se evidencia la formación de fuertes quiebres sobre todo a partir del 2010. Esto se debe también a que CHIRPS solo considera mediciones de pluviómetros para el periodo 1981-2010, este tipo de inconsistencia ha sido reportada por diversos usuarios sobre todo para los Andes y la Amazonia. Actualmente el producto PISCO v1.x no presenta soporte para su continuidad.

En la segunda versión de PISCO (descrita en este reporte) se generan datos mensuales y diarios, el principal cambio radica en que el control de calidad ha sido mucho más riguroso, además de completar los datos faltantes tanto para las series diarias como las mensuales la covariable cambia de CHIRPS a CHIRPM a fin de mejorar la predicción de las intensidades.

PISCOp v2.1

Presenta las siguientes modificaciones y mejoras

- Interpolación a paso mensual de KED a ROK (cambio de gstat a constrainedKriging).
- Nuevo método de ajuste del variograma teórico (Tratamiento de outliers).
- Nugget siempre será 0.
- Transformación a base logarítmica.
- Relajación de los umbrales para la completación por estaciones vecinas.
- Mejora del control de calidad automático (implausible detect function).
- Cambio de la completación diaria de IDW a CUTOFF(modificado).
- Cambio de la climatología TRMM2A25 por PISCOp climatología.
- Cambio del tamaño de grilla de 0.05 a 0.1 grados mediante cubic spline resampling.
- Cambio en la completación por Qm de CHIRP a CHIRPM.
- Automatización al 100% de todo el proceso de PISCOp.

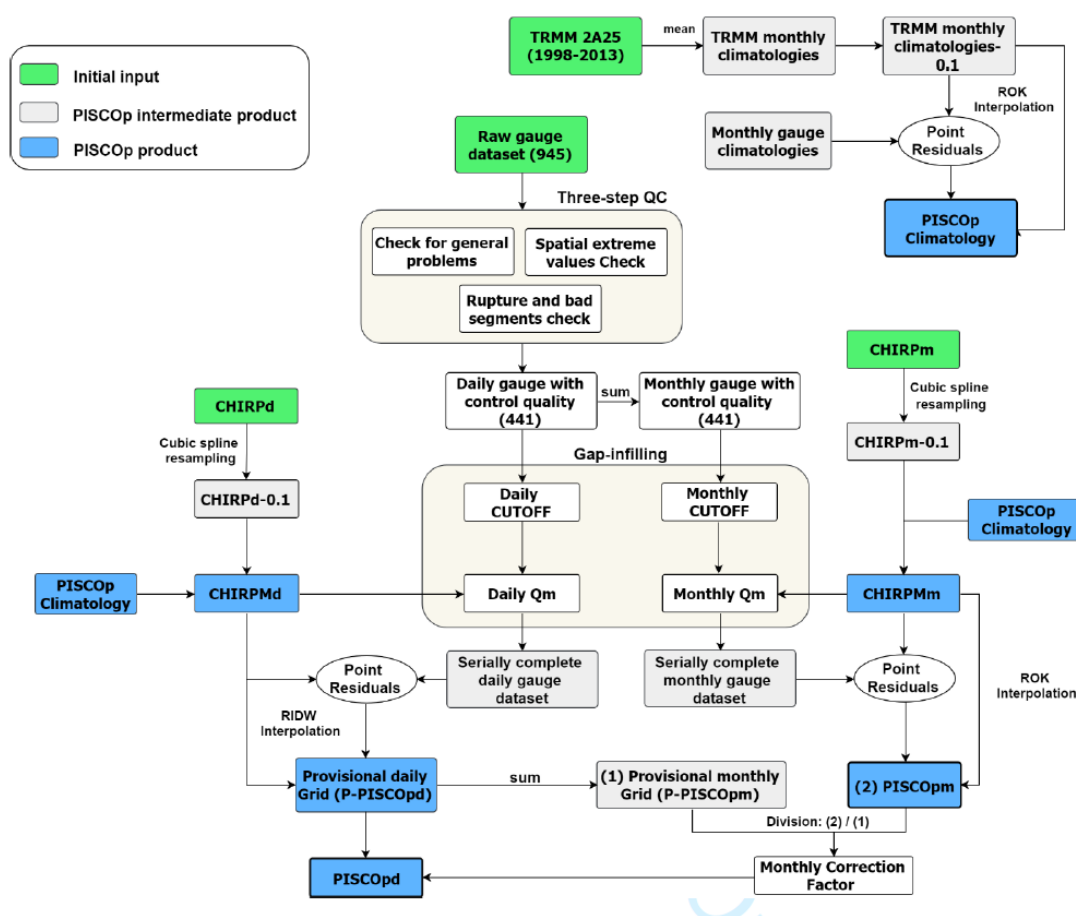


Figura 14. Esquema general del desarrollo de PISCOp. V2.1.

Fuente: (Aybar, y otros, 2019).



#### 2.2.4 Tratamiento de datos hidrometeorológicos

Aliaga Araujo (1983), indica que el tratamiento consiste en un ajuste de datos históricos a una condición homogénea que incluye la evaluación y corrección de posibles errores de medición, así como completar y extender datos.

Para la hidrología es muy importante tener disponible suficiente cantidad de datos en cantidad y calidad, de tal forma que se pueda evaluar de forma correcta.

En algunos casos se presentan problemas tales como:

- No hay la cantidad suficiente de datos para evaluar y generalizar.
- Existen diversas mediciones por muchas instituciones las cuales son incompatibles.

Para dichos problemas se examina las características y confiabilidad de los datos. En éste proceso se realiza el análisis de consistencia con criterios físicos y métodos estadísticos.

Todo lo vertido es muy importante previo al diseño de obras hidráulicas. En algunos casos en el registro se han tenido periodos donde la información no ha sido registrados por diversos motivos, para lo cual es necesario completar los datos, en otros el periodo de registro es muy corto para la evaluación que se está realizando, en éste caso es necesario extender los datos. Cuanto más prolongados y representativos sean los registros, mejor será el planeamiento, diseño y control de las estructuras hidráulicas.

El proceso a seguir es:

- Realizar el análisis de consistencia de la información.
- Completar los datos faltantes y extender los periodos de registros cortos.

##### 2.2.4.1. Análisis de consistencia

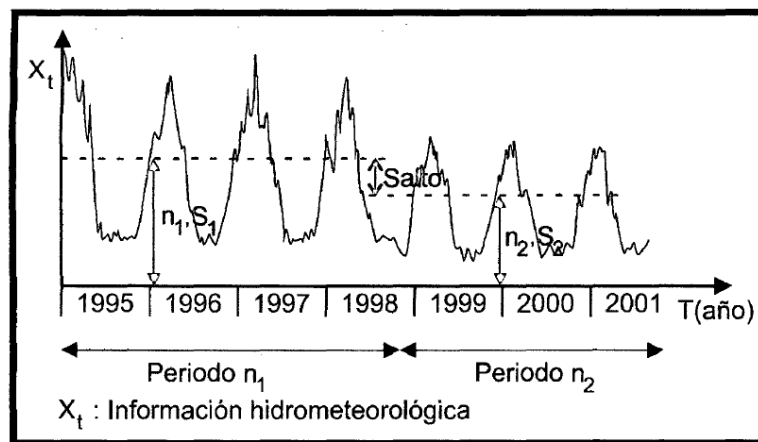
Según Aliaga Araujo (1983) dentro de la información hidrometeorológica un error significativo genera resultados altamente sesgados en futuros análisis. La inconsistencia puede ser generada por efectos de la naturaleza o intervención del hombre. En dicha inconsistencia se consideran saltos y tendencias que pueden ser generados por el incremento del uso del agua (tendencias) o la construcción de canales de riego (saltos). Los tipos de errores se clasifican en:

- a) **Sistemáticos:** Pueden ser naturales o artificiales, los cuales pueden ocasionar saltos y tendencias, como ejemplo se tiene: cuando las estaciones que registran son desplazadas, o también se pueden haber construido derivaciones (canales, bocatomas), que distorsionan las descargas.

- b) **Accidentales:** Éste tipo de errores son causados por inexactitud en las mediciones y observaciones. Por ejemplo: Lecturar mal el registro, inexactitud al medir por utilizar equipos descalibrados, errores de transcripción.

#### 2.2.4.1.1. Análisis de saltos

Son periodos de transición en la que una serie hidrológica pasa de un estado a otro debido a diversos motivos, algunos causados por la intervención del hombre (construcción de una derivación) y otros por cambios en la naturaleza (embalsamiento por deslizamientos).



**Figura 15.** Identificación de un salto en un hidrograma.

Fuente: (Aliaga Araujo, 1983).

En los hidrogramas de caudal vs. tiempo se podrá observar y distinguir los periodos, así como el salto, presentando su variación en la media, desviación estándar y otros parámetros. Para el presente estudio de caudales mensuales se tiene mayor representatividad para los parámetros (promedio y desviación estándar). Un salto puede ser ocasionado por el cambio brusco de las condiciones normales aguas arriba de la estación de control (caudales) o alrededor de la estación de medición (precipitación).

Procedimiento para la identificación de un salto:

- **Información de campo:** Es importante identificar las acciones o causas posibles que hayan ocasionado la presencia de saltos, ocasionados generalmente por traslados de la estación de medición, construcción de canales, regulación de los ríos.
- **Análisis de hidrogramas:** Una vez obtenida la información hidrológica disponible es necesario graficar los hidrogramas (tiempo vs. precipitación/caudal), realizando una



apreciación visual se podrá observar de forma evidente una variación significativa en el registro de datos.

Para analizar se distribuye en varios periodos tratando de identificar los saltos, sin confundir con periodos largos de sequía o humedad. O cuando la estación es trasladada a otro lugar.

Para identificar los posibles periodos que presentan información dudosa se tienen los siguientes criterios:

- Cuando se tienen estaciones vecinas se comparan los registros históricos y se evalúa el periodo en el que se observa variaciones notorias respecto al otro.
- Cuando se tiene precipitación y descargas se comparan sus hidrogramas, los cuales deben tener similar comportamiento, teniendo en cuenta que se debe evaluar los periodos incongruentes.

#### **a) Evaluación y cuantificación**

Según Aliaga Araujo (1983), la evaluación y cuantificación de errores detectados en forma de saltos se realiza mediante un análisis estadístico; a partir de las medias y desviación estándar se realizan las pruebas de T de Student y F de Fisher.

Después de haber verificado la existencia de posibles errores en campo, así como en el análisis de doble masa se determina los periodos para su análisis y posible corrección, antes se procede a calcular sus parámetros desviación estándar y media, para comprobar si sus valores se encuentran dentro del rango permisible según las pruebas estadísticas y un cierto nivel de significación.

#### **Consistencia en la media**

Mediante la prueba estadística T de Student se analiza si los valores promedios son estadísticamente iguales o diferentes. A continuación, se calcula los promedios y las desviaciones estándar para cada periodo según las ecuaciones.

$$\bar{X}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} X_i$$
$$S_1(x) = \sqrt{\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - \bar{X}_1)^2}$$
$$\bar{X}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} X_j$$
$$S_2(x) = \sqrt{\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_2} (X_j - \bar{X}_2)^2}$$

Donde:

$\bar{X}_1, \bar{X}_2$  : Media del periodo 1 y 2, respectivamente.

$X_i, X_j$  : Información de análisis en el periodo 1 y 2, respectivamente.

$S_1(x), S_2(x)$  : Desviación estándar del periodo 1 y 2, respectivamente.

$n_1, n_2$  : Número de datos de cada periodo.

$n$  : Tamaño total de la muestra ( $n = n_1 + n_2$ ).

El procedimiento a seguir es de la siguiente manera:

1. Se establecen las hipótesis y nivel de significación.

$H_p: \mu_1 = \mu_2$  (significa que existe igualdad o semejanza entre las medias poblacionales de los periodos 1 y 2).

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$  (no existe semejanza entre las medias poblacionales de los periodos 1 y 2).

$\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia del 5%).

2. Cálculo de las desviaciones estándar:

- De las diferencias de los promedios.

$$S_d = S_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

- Ponderada.

$$S_d = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$



3. Calculando el Tc (T calculado)

$$T_c = \frac{(\overline{X}_1 - \overline{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_d}$$

Asumiendo la semejanza:  $\mu_1 - \mu_2 = 0$  (Según planteamos en la hipótesis).

4. Calculando el Tc (T calculado)

si  $\frac{\alpha}{2} = 0.05$  la tabla es de una sola cola.

si  $\frac{\alpha}{2} = 0.0025$  la tabla es de dos colas.

$$G.L. = n_1 + n_2 - 2$$

Donde:

G.L. = Grados de libertad.

$\alpha$  = Nivel de significación.

5. Calculando el Tc (T calculado)

Si:  $|T_c| \leq |T_t|$  (95%) entonces  $\overline{X}_1 = \overline{X}_2$ , estadísticamente las medias son iguales.

Si:  $|T_c| > |T_t|$  (95%) entonces  $\overline{X}_1 \neq \overline{X}_2$ , estadísticamente las medias son diferentes (no hay semejanza) por lo tanto se define la existencia de salto.

### Consistencia en la desviación estándar

El análisis de consistencia en la desviación estandar se realiza con la prueba “F” de Fisher según el procedimiento:

- Se calcula la varianza en ambos periodos

$$S_1^2(x) = \left[ \frac{1}{n_1 - 1} \right] \cdot \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - \overline{X}_1)^2$$

$$S_2^2(x) = \left[ \frac{1}{n_2 - 1} \right] \cdot \sum_{j=1}^{n_2} (X_j - \overline{X}_2)^2$$

1. Planteando la hipótesis y el nivel de significancia:

$H_p: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$  (se considera varianzas poblacionales semejantes).

$H_p: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  (se considera varianzas poblacionales semejantes).



$\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia del 5%).

2. Calculando  $F_c$  (F calculado)

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

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

3. Encontrar el valor de  $F_t$  (F tabulado) según las tablas:

Para:  $\alpha = 0.05$

$$\left[ \begin{array}{l} GLN = n_1 - 1 \\ GLD = n_2 - 1 \end{array} \right] \text{ si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$$

$$\left[ \begin{array}{l} GLN = n_2 - 1 \\ GLD = n_1 - 1 \end{array} \right] \text{ si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

Donde:

$\alpha$  : Nivel de significación.

G.L.N : Grados de libertad del numerador.

G.L.D. : Grados de libertad del denominador.

4. Probabilidad a decidir:

Si:  $F_c \leq F_t$  (95%) entonces  $S_1(x) = S_2(x)$  se considera que las desviaciones estándar son iguales estadísticamente.

Si:  $F_c > F_t$  (95%) entonces  $S_1(x) \neq S_2(x)$ , las desviaciones estándar son diferentes estadísticamente por lo tanto se considera a que existe salto.

### b) Corrección de los datos

Cuando los promedios y desviaciones estándar resultan estadísticamente iguales, los datos ya no se corrigen por ser consistentes al 95% de probabilidad, a pesar que en algunos casos en el análisis doble masa se observen pequeños quiebres. En caso contrario se debe corregir y el procedimiento es mantener los datos del periodo más confiable y solo corregir los datos del periodo que se desconfía. Para corregir algún periodo se plantea las ecuaciones:

- Para corregir el primer periodo

$$X'_{(t)} = \left[ \frac{X_t - \overline{X_1}}{S_1(x)} \right] \cdot S_2(x) + \overline{X_2}$$

- Para corregir el segundo periodo

$$X'_{(t)} = \left[ \frac{X_t - \overline{X_2}}{S_2(x)} \right] \cdot S_1(x) + \overline{X_1}$$

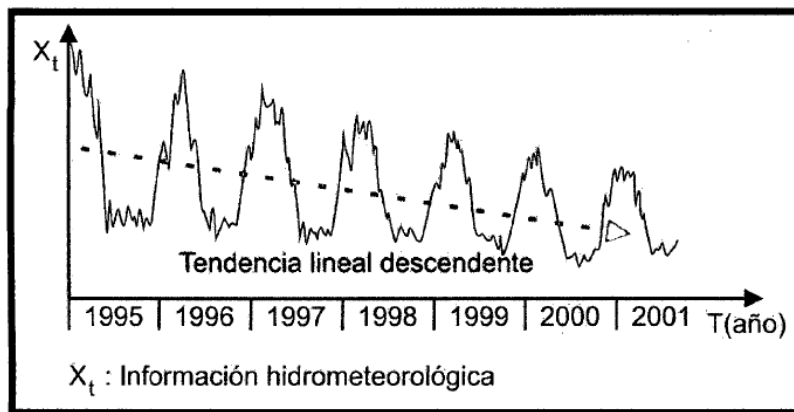
Donde:

$X'_{(t)}$  : Valor corregido de los datos

$X_t$  : Valor a corregir

#### 2.2.4.1.2. Análisis de tendencias

Para Aliaga Araujo (1983) son componentes determinísticos transitorios que se definen como un cambio sistemático y continuo del registro de datos hidrometeorológicos, que afecta la distribución y dependencia de las series. Generalmente las tendencias son originadas por la intervención del hombre.



**Figura 16.** Identificación de tendencia en un hidrograma

Fuente: (Aliaga Araujo, 1983)

- Las tendencias no son esperadas a repetirse por sí mismas en la misma forma y con las mismas propiedades.
- Una tendencia puede existir en cualquier parámetro de una serie: media, desviación estándar, coeficiente de correlación. Si los datos son anuales, generalmente se presenta la tendencia

en la media, mientras que para datos mensuales se presenta en la media y desviación estándar.

### 1. Procedimiento para el análisis de tendencia

De acuerdo a Hesel & Hirsch (2002, págs. 221-243) y la revisión de la investigación de Mosqueira (2016) se tiene.

- Establecer la hipótesis planteada y las alternativas posibles, así como el nivel de significancia.

$H_0: \beta_0=0$	(Pendiente de la ecuación de regresión lineal)
$H_1: \beta_1 \neq 0$	
$\alpha=0.05$	Nivel de significación

Donde:

$H_0$  : Hipótesis nula.

$H_1$  : Hipótesis alternativa.

$\alpha$  : Nivel de significación o error máximo.

- Cálculo del estadístico  $t_0$  para la prueba de hipótesis en regresión lineal simple

- Cálculo de la sumatoria de  $XX$ ,  $YY$  y  $XY$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Donde:

$x_i$  : Precipitación mensual.

$\bar{x}$  : Media aritmética del tiempo (meses).

$\bar{y}$  : Media aritmética de los datos de precipitación.

$n$  : Número de meses.

- Cálculo de la pendiente de la línea de tendencia

$$b_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

Donde :

$b_1$  : Pendiente de la recta de tendencia.

- Cálculo del error estándar de estimación.

$$S = \sqrt{\frac{S_{yy} - b_1 * S_{xy}}{n - 2}}$$

Donde:

$S$  : Error estándar de estimación.

- Calculo del estadístico  $t_o$  para la prueba de hipótesis en regresión lineal.

$$t_o = \frac{b}{S / \sqrt{S_{xx}}}$$

Donde:

$t_o$  : Estadístico para prueba de hipótesis en regresión lineal.

c. Calculo estadístico de prueba de hipótesis tabulado

Este valor se obtiene de la tabla de distribución “T”, la cual se encuentra en los anexos de este trabajo de investigación.

Para ubicar el valor T tabulado ( $T_t$ ) en la tabla, se requiere:

$$\alpha = 0.05$$

$$G.L = n_1 + n_2 - 2$$

Donde:

$\alpha$  : Nivel de significación.

$G.L$  : Grado de libertad.

$n_1, n_2$  : Número de elementos del periodo 1 y 2, respectivamente.

Conclusión

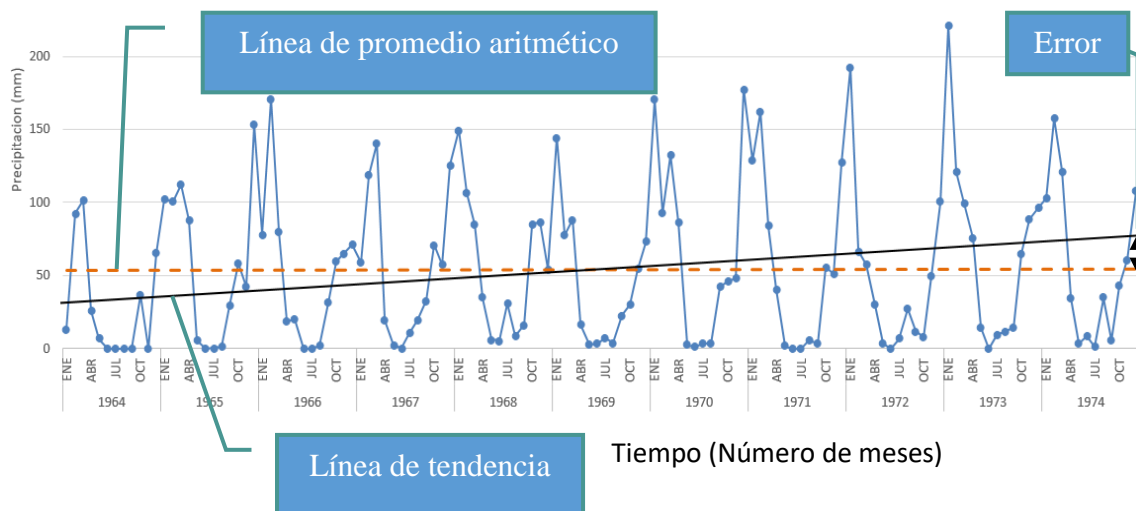
Si  $t_o \leq t_t$  entonces  $\beta_0 = 0$  (Estadísticamente), se acepta la hipótesis nula  $H_0$ .

Si  $t_o > t_t$  entonces  $\beta_0 \neq 0$  (Estadísticamente), se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ .

Por lo tanto, si se rechaza la hipótesis  $\beta_0$ , entonces los datos deben ser corregidos ya que significa que la pendiente de la línea de tendencia es significativa.

## 2. Segunda corrección de datos hidrometeorológicos

La segunda corrección de datos de precipitación se realiza cuando se concluye que la pendiente de la línea de tendencia es significativa.



**Figura 17.** Segunda corrección de datos hidrometeorológicos.

Fuente: acondicionado de (Mosqueira, 2016).

$$\text{Precipitación corregida} = \text{Precipitación con tendencia} \pm \text{Error}$$

Donde:

$$\tan \beta = \frac{\text{Tiempo}}{\text{Error}}, \text{ entonces } \text{Error} = \text{Tiempo} * \tan \beta$$

## 2.2.4.2. Completación de datos

Según información recopilada de la investigación de Galvez (2017), se tiene.

### 2.2.4.2.1. Método CUTOFF

El principio de este método es utilizar tanto la información temporal y espacial para la completación de datos. Para describir el procedimiento, supongamos que se tiene observaciones espacio-temporales mensuales incompletas en una matriz  $X$  de dimensión  $m \times n$  donde  $m$  es meses y  $n$  es estaciones. Sea  $x_{(i,j),k}$  la observación en el mes  $i$  en el año  $j$  en la estación  $k$ , para  $i = 1, 2, \dots, 12$ ;  $j = 1, 2, \dots, w$  y  $k = 1, 2, \dots, n$ ; y supongamos que una observación específica  $x_{(i^*,j^*),k^*}$  es dato faltante, siendo el mes  $i^*$  en el año  $j^*$  y en la estación  $k^*$  como el dato faltante (candidato) a completar. A continuación, se describe los pasos para completar el dato faltante:

- Se crea una lista de estaciones de referencia (denominado  $L_{k^*}$ ) conformado por estaciones que tienen alta correlación con la estación candidata  $k^*$ ; siendo los valores de correlación mayor que un valor de correlación definido por un umbral  $r$ .
- Sea  $J_{i,k}$  el conjunto de años de referencia que no incluye el año  $j^*$  para el cual  $x_{(i,j),k}$  no es dato perdido en el mes  $i$  y estación  $k$ .
- Se estima  $\bar{R}$  como el valor promedio de las observaciones en el mes  $i^*$  de todos los años ( $J_{i,k}$ ) y estaciones ( $L_{k^*}$ ) de referencia.  $\bar{C}$  como el valor promedio de las observaciones en el mes  $i^*$  de todos los años de referencia ( $J_{i,k}$ ) solo de la estación candidata  $k^*$ .  $R$  como el valor promedio de las observaciones en el mes  $i^*$  para el año  $j^*$  de las estaciones de referencia ( $L_{k^*}$ ).

$$\bar{R} = \frac{\sum_{k \in L_{k^*}} \sum_{j \in J_{i^*,k}} x_{(i^*,j),k}}{\sum_{k \in L_{k^*}} |J_{i^*,k}|}$$

$$\bar{C} = \frac{\sum_{j \in J_{i^*,k^*}} x_{(i^*,j),k^*}}{|J_{i^*,k^*}|}$$

$$R = \frac{\sum_{k \in L_{k^*}} x_{(i^*,j^*),k}}{|L_{k^*}|}$$

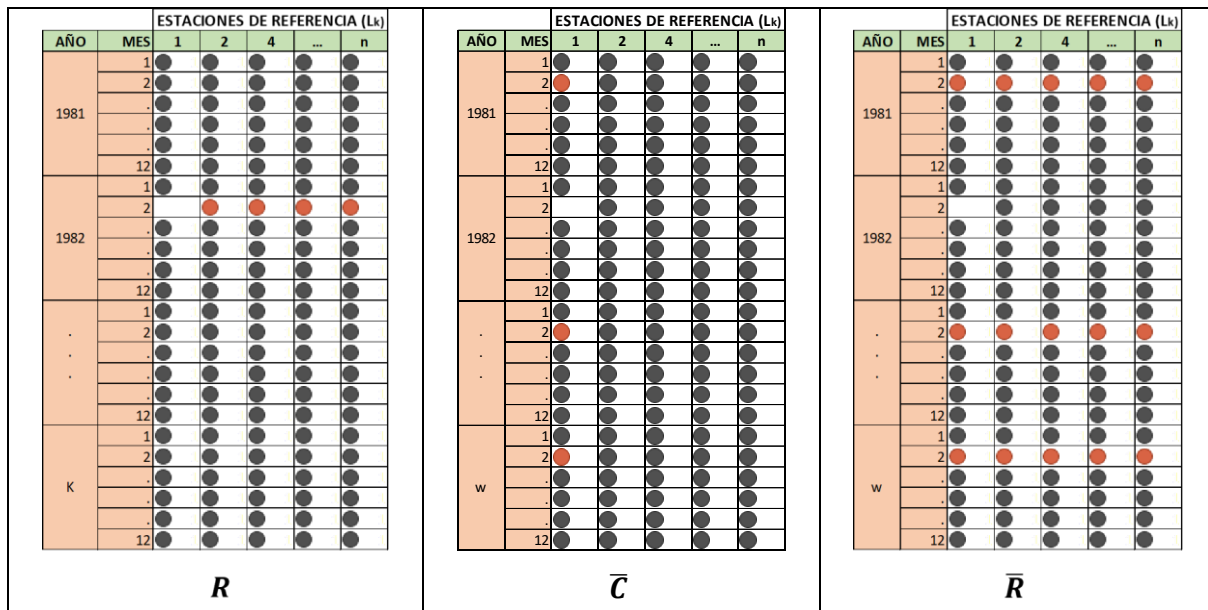
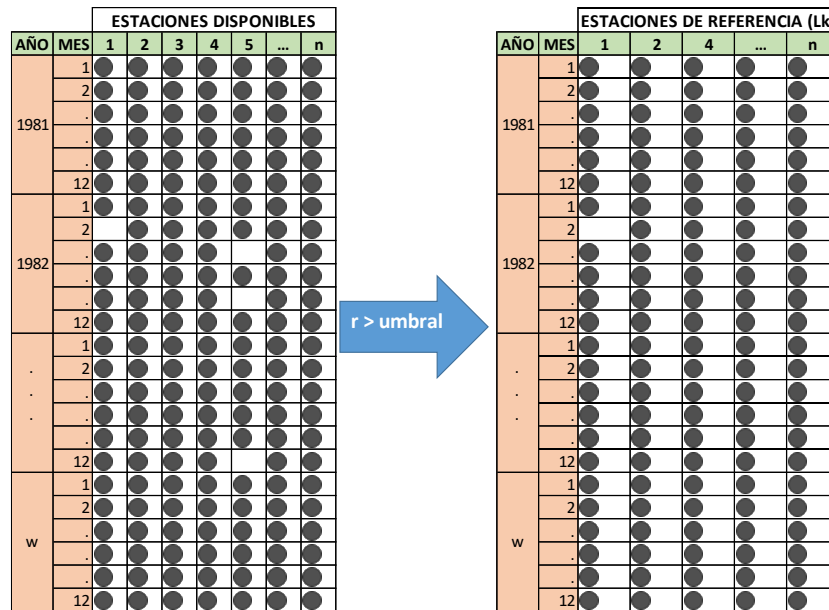
Finalmente, se calcula el valor a completar  $\hat{x}$  que corresponde a  $x_{(i^*,j^*),k^*}$  como:

$$\hat{x}/\bar{C} = R/\bar{R}$$

$$\hat{x} = R(\bar{C}/\bar{R})$$



Un valor del umbral  $r = 0.75$  para la formación del conjunto de estaciones que participan en la competición de datos faltantes de una estación específica es recomendado por (Feng, Nowak, O'Neill, & Welsh, 2014a).



$$\hat{x} = R(\bar{C}/\bar{R})$$

**Figura 18.** Representación esquemática del procedimiento de completación de datos faltantes método CUTOFF.

### 2.2.5 Red Neuronal Artificial

Una neurona artificial es un algoritmo cuyo diseño y funcionalidad están inspirados en la unidad computacional natural, es decir, la neurona biológica. Una red neuronal artificial (ANN) es un grupo interconectado de neuronas artificiales que puede aprender y exhibir un comportamiento



específico basado en la experiencia obtenida a través de procedimientos de entrenamiento similares a los del cerebro (Retalis, Tymvios, Katsanos, & Michaelides, 2017).

Redes Neuronales Artificiales (RNA) son modelos matemáticos que intentan reproducir el funcionamiento del sistema nervioso. Como todo modelo, realizan una simplificación del sistema real que simulan y toman las características principales del mismo para la resolución de una tarea determinada (Bertona, 2005).

Se denominan Redes Neuronales Artificiales a aquellos modelos nacidos con el fin de imitar el aprendizaje humano (Castellano, 2009).

### **2.2.5.1. Historia de las Redes Neuronales Artificiales**

Según información recopilada de la investigación de Ticona (2013) se tiene:

El desarrollo de las redes neuronales artificiales (RNA) se inició en la década de los 50 (McCulloch & Pitts, 1943), inspirado por el deseo de entender el cerebro humano y emular su funcionamiento. En 1969 Minsky-Papert publica un libro llamado "Perceptrons" en donde mostraba con pesimismo la teoría de redes neuronales, ocasionando un desinterés por el estudio de éstas.

Matemáticamente, una RNA es a menudo vista como un aproximador universal. Su capacidad de identificar una relación entre datos, hace posible que las RNA puedan ser útiles para resolver problemas complejos de gran escala tales como el reconocimiento de patrones, modelado no lineal, clasificación, asociación y etc.

A principios de los años 80, las Redes Neuronales experimentaron un resurgimiento debido al esfuerzo de Hopfield (1982). Un gran crecimiento en el interés de este mecanismo computacional se ha producido desde que Rumelhart et al. (1986) redescubrió un marco matemático riguroso para las redes neuronales, es decir, un nuevo algoritmo de propagación. En consecuencia, las RNA han encontrado aplicaciones en áreas tan diversas como la neurofisiología, la física, la ingeniería biomédica, ingeniería eléctrica, ciencias de la computación, la acústica, la cibernética, la robótica, el procesamiento de imágenes, financiamiento, entre otros.

Desde principios de los años 90, las RNA se han utilizado con éxito en las áreas relacionadas con la hidrología tales como el modelado de precipitación escurrentía, la previsión de flujo de corriente, el modelado de aguas subterráneas, calidad del agua, la política de gestión del agua, los pronósticos de precipitación, series hidrológicas de tiempo y operaciones de almacenamiento.



### Características de las redes neuronales

- **Adaptabilidad:** las redes neuronales pueden aprender de los datos que se les proporciona. Pueden llegar a soluciones por lo general basándose en lo que parece ser relaciones ocultas entre los datos y grupos de datos que hacen al problema de posible solución. Esta es la principal ventaja que tienen sobre los programas de cómputo comunes. Las redes neuronales no se rigen por reglas ya prescritas para dichos programas ya que elaboran sus propias reglas durante el proceso de aprendizaje.
- **Capacidad de generalizar:** las RNA tienen la capacidad de procesar datos no necesariamente parecidos a los datos que usó para el entrenamiento o aprendizaje. Además, pueden manejar datos incompletos y por lo tanto pueden manejar datos con distorsiones llamados ruidos.
- **No Linealidad:** Las RNA pueden captar problemas de relaciones muy complejas a partir de los datos de entrada. Los sistemas lineales relacionan de la forma que la salida depende proporcionalmente a los valores de entrada. En cambio, en los sistemas no lineales las salidas dependen de los valores de entrada y de las relaciones de interacción que se generan. Esto es muy parecido a lo que ocurre con frecuencia en la realidad.
- **Procesamiento en Paralelo:** Las RNA son altamente paralelas. Si se implantan los programas en sistemas con procesadores en paralelo, estos son compatibles con las redes neuronales e incrementan notablemente su rendimiento debido a la naturaleza paralela de las redes neuronales.
- **Modularidad:** Una vez que la red ha sido entrenada, su tamaño y su funcionalidad se reducen al valor y estructura de sus pesos. Esto hace que sean portables y puedan ser insertados en otros sistemas de mayor tamaño. Además, cuando la naturaleza del problema es similar, la red puede ser actualizada con nuevos datos y seguir manteniendo su modularidad.

### 2.2.5.2. Funcionamiento y Modelos de Redes Neuronales Artificiales

#### Red neuronal biológica

La neurona es la unidad fundamental del sistema nervioso y en particular del cerebro. Cada neurona es una simple unidad procesadora que recibe y combina señales desde y hacia otras neuronas.

De acuerdo a la recopilación de la investigación de Ticona (2013).

El cerebro puede considerarse un sistema altamente complejo. Su unidad básica, la neurona, está masivamente distribuida con conexiones entre ellas (se calcula que hay aproximadamente 10 billones de neuronas en la corteza cerebral y 60 trillones de conexiones neuronales).

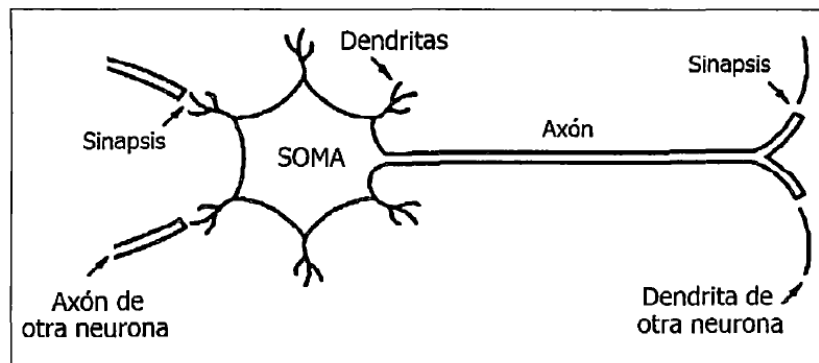
Una neurona natural esta conformada por:

**Soma o cuerpo celular:** corresponde a la parte más voluminosa de la neurona. Aquí se puede observar una estructura esférica llamada núcleo. Éste contiene la información que dirige la actividad de la neurona.

**Dendritas:** son prolongaciones cortas que se originan del soma neuronal. Su función es recibir impulsos de otras neuronas y enviarlas hasta el soma de la neurona.

**Axón:** es una prolongación única y larga. Encargada de transportar la señal eléctrica.

**Sinapsis:** es la conexión entre neuronas.



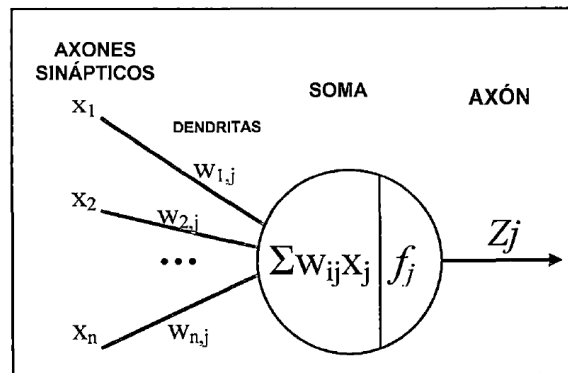
**Figura 19.** Modelo simplificado de una neurona biológica.

**Fuente:** (Ticona, 2013).

La función principal de las neuronas es la transmisión de los impulsos nerviosos. Estos viajan por toda la neurona comenzando por las dendritas hasta llegar a las terminaciones del axón, donde pasan a otra neurona por medio de la conexión sináptica.

Para Mateo (2012), lo que básicamente ocurre en una neurona biológica es lo siguiente: la neurona es estimulada o excitada a través de sus entradas (inputs) y cuando se alcanza un cierto umbral, la neurona se dispara o activa, pasando una señal hacia el axón.

De manera similar se tiene la neurona artificial.



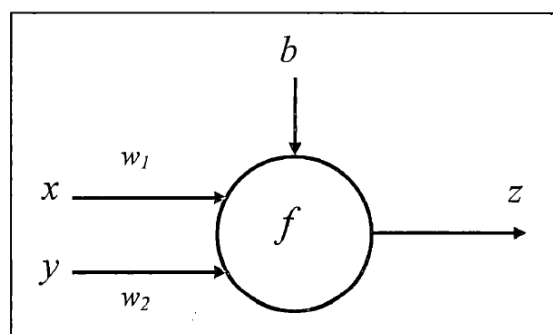
**Figura 20.** Neurona artificial.

Fuente: (Ticona, 2013).

### 2.2.5.3. Descripción del Modelo de Neurona Artificial

Según se indica en la investigación de Ticona (2013), el primer modelo matemático de una neurona artificial, creado con el fin de llevar a cabo tareas simples, fue presentado en el año 1943 en un trabajo conjunto entre el psiquiatra y neuroanatomía Warren McCulloch y el matemático Walter Pitts, consta de:

- Las entradas  $x$  e  $y$ , representan las señales que provienen de otras neuronas y que son capturadas por las dendritas.
- Los pesos sinápticos  $w_1$  y  $w_2$  son la intensidad de la sinapsis que conecta cada entrada.
- Un término aditivo  $b$ .
- Una función "f", de activación o umbral, que la neurona debe superar para activarse, la cual puede ser lineal o no lineal.
- Una salida  $z$ , que representa la salida del estímulo.



**Figura 21.** Modelo de red neuronal artificial.

Fuente: (Ticona, 2013).



La neurona se adapta al medio circundante y aprende de él modificando el valor de sus pesos sinápticos  $w_1$  y  $w_2$  y su término aditivo  $b$ .

Tanto  $x$ ,  $y$  y  $b$  son valores reales, y son conocidos como los parámetros libres del modelo, pues los mismos pueden ser modificados y adaptados para realizar una tarea determinada.

En este modelo, la salida neuronal  $Z$  está dada por:

$$z = f(w_1x + w_2y + b)$$

La función de activación o de transferencia "f" es seleccionada de acuerdo a la tarea realizada por la neurona.

### Niveles o capas de neuronas

De acuerdo a Hilera & Martínez (1995), la distribución dentro de la red se realiza formando niveles o capas de un número determinado de neuronas cada una. En base a su situación dentro de la red, se pueden distinguir tres tipos de capas.

**De entrada:** es la capa que recibe directamente la información proveniente de las fuentes externas a la red.

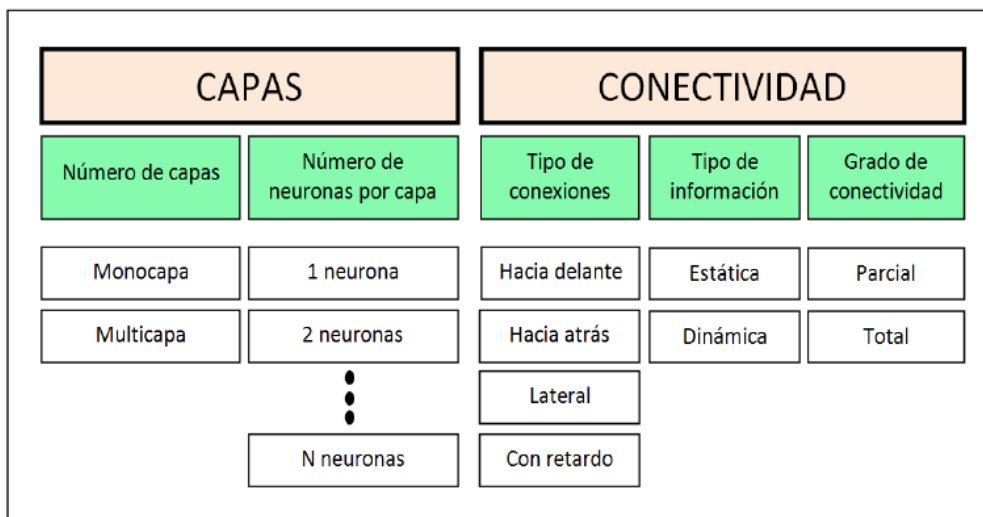
**Ocultas:** son internas a la red y no tienen contacto directo con el entorno exterior. El número de niveles ocultos puede estar entre cero y un número elevado. Las neuronas de las capas ocultas pueden estar interconectadas de distintas maneras, lo que determina junto con su número, las distintas tipologías de redes neuronales.

**De salida:** transfieren información de la red hacia el exterior.

#### 2.2.5.4. Clasificación de las Redes Neuronales

Según Hernández (2006), la organización de las neuronas y el tipo de conexiones que existen entre ellas es lo que se denomina arquitectura de las RNA. La elección de la arquitectura óptima para cada aplicación específica a la que se quiera aplicar las RNA es un tema clave para encontrar una solución satisfactoria al problema a tratar.

Un posible esquema de la clasificación de las RNA en función de dichos parámetros aparece en la Figura N° 22. Como se puede observar en la figura, los parámetros fundamentales que determina la arquitectura de la RNA son el número de capas y la conectividad que se establece entre las neuronas. Tanto la nomenclatura de cada una de las RNA, como las diferentes subdivisiones dentro de estos dos criterios generales, se trata a continuación.



**Figura 22.** Clasificación de las Redes neuronales artificiales.

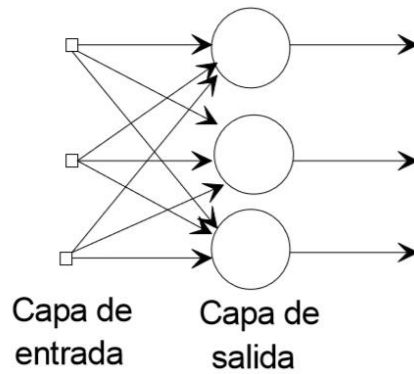
Fuente: (Hernández, 2006).

**Según el número de capas.**

##### **Redes monocapa**

La red más simple es un grupo de neuronas ordenadas en una capa. Los nodos circulares sólo son distribuidores de las entradas y no se consideran constituyentes de una capa.



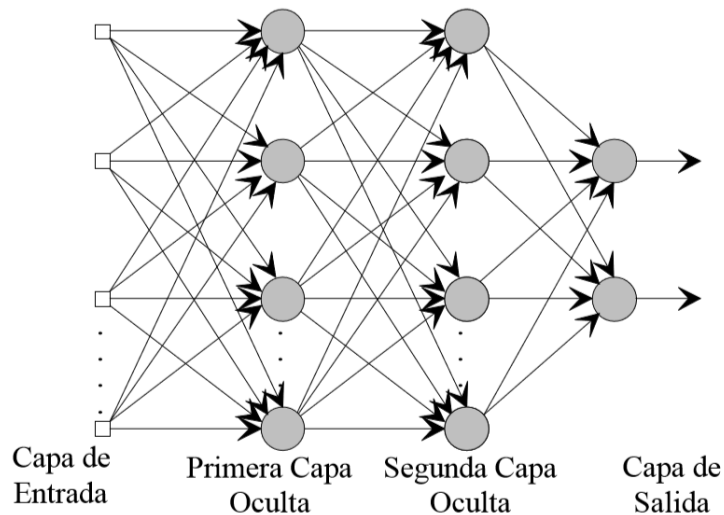


**Figura 23 .** Red monocapa

Fuente: (Serrano, Soria, & Martín, 2009)

### Redes multicapa

Para Hilera & Martínez (1995), las redes multicapa son aquellas que disponen de neuronas agrupadas en varios (2,3, etc) niveles o capas. En estos casos, una forma para distinguir la capa a la que pertenece una neurona, consistiría en fijarse en el origen de las señales que recibe a la entrada y el destino de la señal de salida.

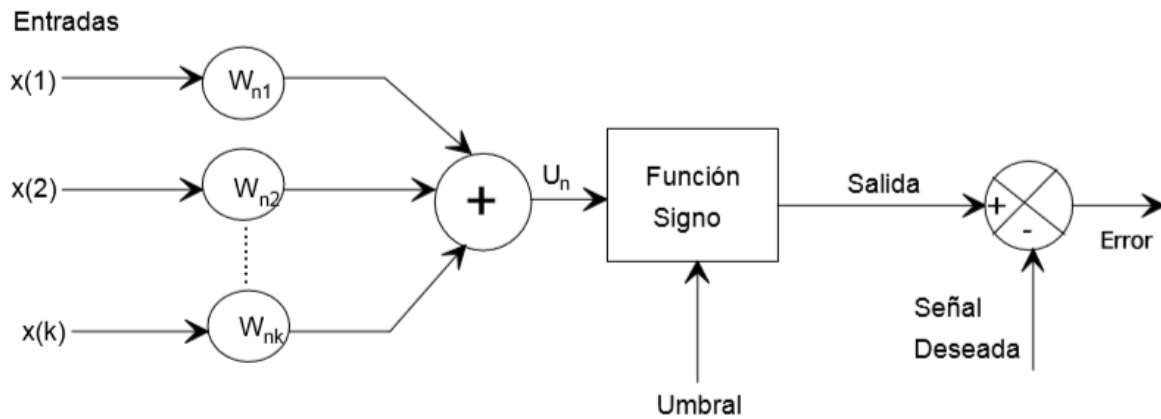


**Figura 24.** Red Multicapa

Fuente: (Serrano, Soria, & Martín, 2009)

### 2.2.5.5. Perceptron

Según Serrano, Soria, & Martín (2009), la primera estructura neuronal a estudiar es la mas sencilla y la que, desde un punto de vista historico, apareció la primera. Esta estructura se uso en problemas de clasificación y tiene el siguiente esquema.



**Figura 25.** Perceptron.

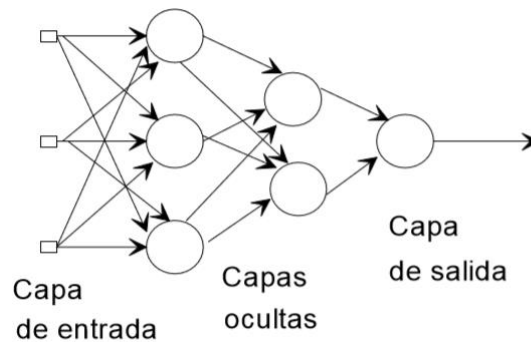
Fuente: (Serrano, Soria, & Martín, 2009).

El funcionamiento del perceptron es muy sencillo; se basa en comparar la salida del sistema con una señal deseada (que es la que debería dar el sistema). De la estructura, mas concretamente de la función de activación, se deduce que este elemento es un clasificador binario ya que puede determinar la pertenencia por parte del vector de entrada a dos clases diferentes.

El algoritmo que sigue este sistema es de tipo supervisado ya que necesitamos un elemento exterior que plantee la clase de pertenencia del elemento de entrada. El procedimiento de aprendizaje comienza por la inicialización aleatoria de los pesos, para, posteriormente, irlos ajustando conforme la red se equivoca en la asignación de clase al vector de entrada presente en ese momento.

### Perceptron multicapa

Según Serrano, Soria, & Martín (2009), el Perceptron multicapa (MultiLayer Perceptron, MLP), es una red formada por una capa de entrada, al menos una capa oculta y una capa de salida; su estructura es como sigue:



**Figura 26.** Perceptrón multicapa.

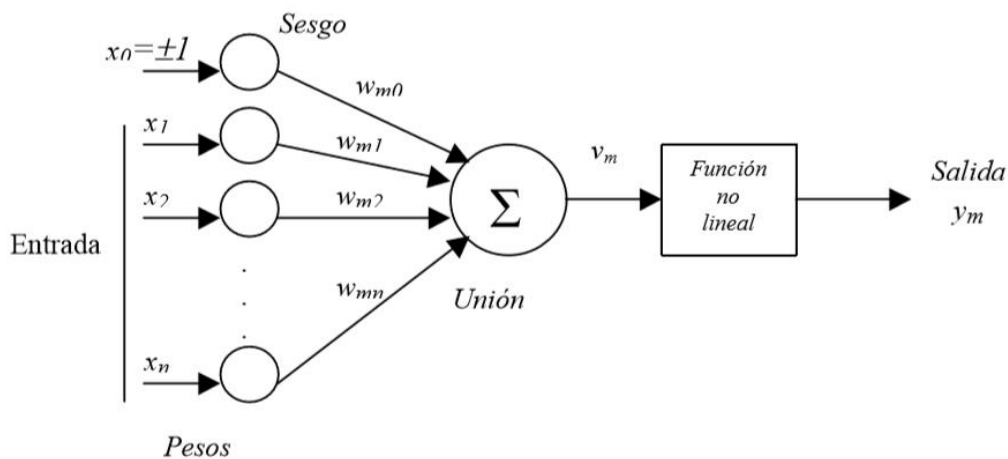
**Fuente:** (Serrano, Soria, & Martín, 2009).

Las cuatro características fundamentales de esta arquitectura son las siguientes:

1. Se trata de una estructura altamente no lineal.
2. Presenta tolerancia a fallos.
3. El sistema es capaz de establecer una relación entre dos conjuntos de datos.
4. Existe la posibilidad de realizar una implementación hardware.

Es una estructura formada por nodos o neuronas que propagan la señal hacia la salida.

La propagación se realiza de manera que cada neurona hace una combinación lineal de las señales procedentes de las neuronas de la capa anterior siendo los coeficientes de esta combinación los pesos sinápticos. A continuación, se aplica una función de activación no lineal. Estas neuronas se conocen como neuronas no lineales y aseguran la alta no linealidad en el MLP.



**Figura 27.** Elementos de una Red Neuronal Artificial.

**Fuente:** (Serrano, Soria, & Martín, 2009).

La función no lineal que se aplica a la salida de la neurona se conoce como función de activación y ha de cumplir únicamente dos condiciones, ser continua y diferenciable. Las tres funciones más utilizadas son: la Función Signo, Función Sigmoide, Función Tangente Hiperbólica.

El perceptron multicapa es un aproximador universal de funciones, cualquier función continua en el espacio tridimensional se puede aproximar mediante una red Perceptron Multicapa. Por ejemplo las series temporales (Álvarez, 2015).

### Tipos de función de transferencia

Para Bertona (2005), las más empleadas y conocidas son:

**Identidad:** también conocida como pureline.

**Escalón:** asociados a neuronas binarias, en redes de capacidad limitada.

**Lineal y mixta:** función bastante sencilla para neuronas análogas.

**Continua (Sigmoidea):** para redes análogas, se pueden utilizar reglas de aprendizaje definidas para la función escalón, que en muchas ocasiones utilizan derivadas y son definidas para toda la función. Esta función es una de las más utilizadas por proporcionar una respuesta no línea.

**Tabla 8.** Funciones de activación

FUNCIÓN	FÓRMULA	RANGO
IDENTIDAD	$y = x$	$[-\infty, \infty]$
ESCALÓN	$Y = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$[0, 1]$
	$Y = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$[-1, 1]$
LINEAL A TRAMOS	$Y = \begin{cases} x & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ +1 & \text{si } x > 1 \\ -1 & \text{si } x < -1 \end{cases}$	$[-1, 1]$
SIGMOIDEA	$Y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$[0, 1]$
	$Y = \tanh(x)$	$[-1, 1]$

**Fuente:** (Bertona, 2005)



### 2.2.5.6. Mecanismos de aprendizaje

Según Hilera & Martínez (1995), el aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen durante el proceso de aprendizaje se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas. En los sistemas biológicos existe una continua creación y destrucción de conexiones. En los modelos de redes neuronales artificiales la creación de una nueva conexión implica que el peso de la misma pasa a tener un valor distinto de cero. De la misma forma, una conexión se destruye cuando su peso pasa a ser cero.

Durante el proceso de aprendizaje los pesos de las conexiones de la red sufren modificaciones, por tanto, se puede afirmar que este proceso ha terminado (la red ha "aprendido") cuando los valores de los pesos permanecen estables.

Un aspecto importante respecto al aprendizaje en las redes neuronales es el conocer cómo se modifican los valores de los pesos, es decir, cuáles son los criterios que se siguen para cambiar el valor asignado a las conexiones cuando se pretende que la red "aprenda" una nueva información.

Estos criterios determinan lo que se conoce como la regla de aprendizaje de la red. De forma general se suelen considerar dos tipos de reglas: las que responden a lo que habitualmente se conoce como aprendizaje supervisado y las correspondientes a un aprendizaje no supervisado.

Es por ello por lo que una de las clasificaciones que se realizan de las redes neuronales obedece al tipo de aprendizaje utilizado por dichas redes. Así se pueden distinguir:

- Redes Neuronales con aprendizaje supervisado.
- Redes Neuronales con aprendizaje no supervisado.

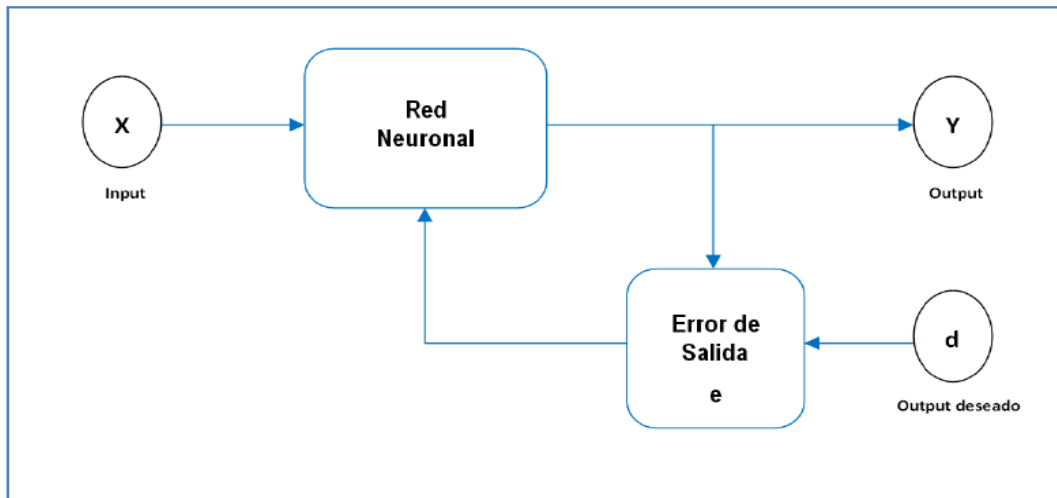
La diferencia fundamental entre ambos tipos estriba en la existencia o no de un agente externo ("supervisor") que controle el proceso de aprendizaje de la red.

#### 2.2.5.6.1. Redes con aprendizaje supervisado

De acuerdo a la recopilación de la investigación de Machaca (2016).

Para Flores & Fernández (2008), el aprendizaje supervisado se caracteriza por la presencia de un agente externo (supervisor o maestro) que controla el proceso de entrenamiento, estableciendo la respuesta de debería generar la red (output del sistema) a partir de una entrada determinada. De esta

forma, el supervisor comprueba la salida de la red, la compara con la salida deseada y, si existen diferencias, ajusta iterativamente los pesos hasta que su salida tiende a ser la deseada, utilizando para ello información detallada del error cometido en cada paso.



**Figura 28.** Ciclo del aprendizaje supervisado.

Fuente: (Torra & Monte, 2013).

Este tipo de aprendizaje permite distinguir tres tipos de aprendizaje supervisado: por corrección de error, por refuerzo o de tipo estocástico.

### Aprendizaje por corrección de error

Consiste en ajustar los pesos de las conexiones de la red en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos en la salida de la red; es decir, en función del error cometido en la salida.

$$\Delta W_{ji} = \alpha \cdot x_i(t_j - y_j)$$

Donde  $\Delta W_{ji}$ , es la activación del peso que va de la neurona  $i$  hasta la  $j$ ,  $\alpha$ , es el factor o tasa de aprendizaje que es mayor que cero,  $x_i$  es la salida de la neurona  $i$ ,  $t_j$  es el valor deseado de la salida  $j$  y  $y_j$  es valor obtenido por la red.

En este caso el ajuste de peso se realiza mediante el **algoritmo de propagación (Back Propagation)**, mecanismo por el cual se van modificando los parámetros de una red con la finalidad de encontrar los pesos óptimos que minimicen el error, donde la salida generada en la red sea lo más próxima a la salida deseada (Krose & Smagt, 1996).

### Aprendizaje por refuerzo

En el aprendizaje por refuerzo la función del supervisor se reduce a indicar mediante una señal de refuerzo si la salida obtenida en la red se ajusta a la deseada (éxito = +1 o fracaso = -1), y en función de ello se ajustan los pesos basándose en un mecanismo de probabilidades. Se podría decir que en este tipo de aprendizaje la función del supervisor se asemeja más a la de un crítico (que opina sobre la respuesta de la red) que a la de un maestro (que indica a la red la respuesta concreta que debe generar), como ocurría en el caso de supervisión por corrección del error.

### Aprendizaje estocástico

Consiste básicamente en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de las conexiones de la red y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de distribuciones de probabilidad. Según lo anterior, el aprendizaje consistiría en realizar un cambio aleatorio de los valores de los pesos y determinar la energía de la red. Si la energía es menor después del cambio; es decir, si el comportamiento de la red se acerca al deseado, se acepta el cambio. Si, por el contrario, la energía no es menor, se aceptaría el cambio en función de una determinada y preestablecida distribución de probabilidades.

**Tabla 9.** Tipos de redes con aprendizaje supervisado más conocidas

TIPO DE APRENDIZAJE SUPERVISADO		MODELO DE RED
APRENDIZAJE POR CORRECCION DE ERROR	OFF LINE	PERCEPTRON
		ADALINE/MADALINE
		BACK-PROPAGATION
		BRAIN-STATE-IN-A-BOX
		COUNTERPROPAGATION
APRENDIZAJE POR REFUERZO	ON LINE	LINEAR REWARD PENALTY
		ASSOCIATIVE REW. PENALTY
		ADAPTIVE HEURISTIC CRITIC
APRENDIZAJE ESTOCASTICO	OFF LINE	BOLTZMANN MACHINE
		CAUCHY MACHINE

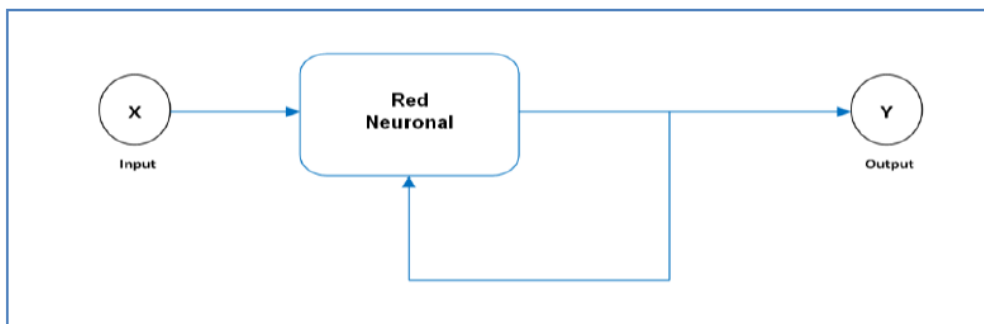
Fuente: (Hilera & Martínez, 1995)



### 2.2.5.6.2. Aprendizaje no supervisado

Las redes con aprendizaje no supervisado (o “Autosupervisado”) no requieren información externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas. En el aprendizaje no supervisado se presenta a la red un conjunto de patrones sin adjuntar la respuesta deseada por lo que la red, por medio de algoritmos de aprendizaje, estima la función de densidad probabilística que describe la distribución de patrones. Para ello, el sistema reconoce las peculiaridades, correlaciones o categorías presentes en el conjunto de entradas, extrayendo rasgos o agrupando patrones según su similitud.

En otros casos, la RNA podría realizar una clusterización o establecimiento de categorías, tal que el output indicaría la categoría a la que pertenece la información presentada a la entrada. Asimismo, la red puede realizar tareas de obtención de prototipos, obteniendo ejemplares representativos de las clases a las que pertenecen las informaciones de entrada. Este tipo de aprendizaje permite distinguir dos tipos de aprendizaje no supervisado: aprendizaje hebbiano, aprendizaje competitivo y cooperativo.



**Figura 29.** Ciclo del aprendizaje no supervisado.

Fuente: (Torra & Monte, 2013)

#### **Aprendizaje Hebbiano**

Consiste en el ajuste de los pesos de las conexiones de acuerdo con la correlación, así si las dos unidades son activas (positivas), se produce un reforzamiento de la conexión. Por el contrario, cuando una es activa y la otra pasiva (negativa), se produce un debilitamiento de la conexión.

#### **Aprendizaje competitivo y cooperativo**

Las neuronas compiten y cooperan unas con otras con el fin de llevar a cabo una tarea dada. Con este tipo de aprendizaje se pretende que cuando se presente a la red cierta información de

entrada, solo una de las neuronas de salida se active, por lo tanto, las neuronas compiten por activarse.

**Tabla 10.** Redes con aprendizaje no supervisado más conocidas.

TIPO DE APRENDIZAJE NO SUPERVISADO		MODELO DE RED
APRENDIZAJE HEBBIANO	Off line	HOPFIELD
		LEARNING MATRIX
		TEMPORAL ASSOC. MEMORY
		LINEAR ASSOCIATIVE MEMORY (LAM)
		OPTIMAL LAM
		DRIVE-REINFORCEMENT
	On line	FUZZY ASSOCIATIVE MEMORY
		ADDITIVE GROSSBERG
		SHUNTING GROSSBERG
		BIDIRECTIONAL ASSOCIATIVE MEMORY (BAM)
APRENDIZAJE COMPETITIVO Y COOPERATIVO	Off line	ADAPTIVE BAM
		LEARNING VECTOR QUANTIZER
		COGNITRON / NEOCOGNITRON
		TOPOLOGY PRESERVING MAP

Fuente: (Hilera & Martínez, 1995).

### 2.2.5.7. Modelamiento con Redes Neuronales Artificiales

Según Lujano & Felipe (2013), indica que para la aplicación del modelo de RNA's, en su etapa de entrenamiento y validación, se trabajó con el 70% y 30% del total de datos respectivamente.

#### Arquitectura

Se puede elegir en este paso entre dos enfoques según se trate de predecir un solo concepto (múltiples entradas y una sola unidad de salida), la arquitectura se refiere a la organización y disposición de neuronas en diferentes capas ocultas, así mismo contiene una función de activación para modificar la unidad de salida (Machaca, 2016).

#### Entrenamiento

El proceso de entrenamiento se realizará con el método de ensayo y error, considerado de igual forma en la investigación de Álvarez (2015).

**Nº óptimo de iteraciones:** se alcanza el número óptimo en el momento que el error sea mínimo, para el presente trabajo se emplea el Error Medio Cuadrático como parámetro que determina el error en la red.



**N° óptimo de neuronas en la capa oculta:** depende de la tasa de aprendizaje, el valor del momento.

Para el entrenamiento se puede utilizar diferentes algoritmos de aprendizaje entre ellos se presenta el aprendizaje supervisado y no supervisado, así mismo es necesario considerar el tipo de aprendizaje como también el algoritmo de entrenamiento como de backpropagation conocido como el algoritmo de propagación del error hacia atrás (Machaca, 2016).

### 2.2.6 Métricas estadísticas de desempeño

Las métricas utilizadas para evaluar la naturaleza estadística de las variables y la relación entre las precipitaciones observadas y las precipitaciones estimadas por satélite más utilizadas según Asurza (2017), en la “Comparación de los productos TRMM y GPM para el Modelamiento en la Cuenca del Río Huancane2, (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016) “Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el período 1981-2014” y (Collarani & Villazon, 2018) en la “Validación del satélite meteorológico CHIRPS en la Cuenca Rurrenabaque-Bolivia”. Se describen a continuación:

#### 2.2.6.1. Estadísticos de Validación Categórica

Se ha utilizado estadísticos categóricos a través de tablas de contingencia y predefinidos umbrales. Lo que permite tener en cuenta cuatro combinaciones:

- Acierto (A): número de sucesos con ocurrencia de la variable analizada y que están correctamente detectados por la simulación.
- Falsa alarma (B): número de sucesos con ocurrencia de la variable analizada y que no están correctamente detectados por la simulación.
- Perdida (C): número de sucesos sin ocurrencia de la variable analizada, pero que están detectados por la simulación.
- Sin evento (D): número de sucesos sin ocurrencia de la variable analizada y que tampoco están detectados por la simulación.

De los párrafos anteriores se puede deducir que, para los elementos de la serie de precipitación observada (PO) y estimada por satélite mayores o iguales al umbral predefinido, se cumple que  $A+B+C+D = 1$ .

**Tabla 11.** Estadísticas basadas en una tabla de contingencia.

	Observado $\geq$ umbral	Observado $<$ umbral
Satélite $\geq$ umbral	A (acierto)	B (falsa alarma)
Satélite $<$ umbral	C (pérdida)	D (no evento)

Fuente: (Fernandez & SENAMHI, 2016).

Los estadísticos calculados a partir de la tabla de contingencia de acuerdo a la investigación de (Castro, 2014) son:

#### 2.2.6.1.1. Probabilidad de Detección (POD – Probability of detection)

Es la fracción de precipitación que fue correctamente detectada.

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

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

#### 2.2.6.1.2. Ratio de Falsa Alarma (FAR – False alarm Rate)

Mide la fracción de detección de precipitación que en realidad fueron falsa alarma; es decir, que detectó el satélite, pero no los pluviómetros.

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

El índice varía entre 0 y 1, donde el valor de 0 es perfecto, pues indica que el satélite no emitió falsa alarma.

#### 2.2.6.1.3. Threat Score (Critical success index) (TS)

Es la fracción de evento de precipitación estimada correctamente por el satélite. (Índice de Detección Crítico).

$$TS = \frac{A}{A + B + C}$$

Una detección perfecta del satélite da un resultado de TS de 1

**Tabla 12.** Estadísticos de Validación Categórica.

Nombre	Fórmula	Score perfecto
Probabilidad de detección	$POD = A / (A + C)$	1
Ratio de falsa alarma	$FAR = B / (A + B)$	0
Threat score (Critical success index)	$TS = A / (A + B + C)$	1

Fuente: (Fernandez & SENAMHI, 2016).

Se puede encontrar más información sobre los índices mencionados anteriormente en Wilks (2006).

**2.2.6.2. Estadísticas de Comparación por Pares.**

**2.2.6.2.1. Error Absoluto Medio (MAE-Mean Absolute Error)**

Provee información de la magnitud promedio de la estimación del error en mm.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Si - Oi|$$

RMSE		
RANGO	UND	OPTIMO
0 - ∞	mm	0 (cero), indica un ajuste perfecto

Fuente: (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016).

**2.2.6.2.2. Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE-Root mean square error)**

Evalúa el error de las estimaciones del satélite en comparación con las de los pluviómetros con un énfasis en valores extremos (Castro, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}$$

Donde: Si, son las precipitaciones estimados por satélite y Oi son las precipitaciones observadas y n el número de datos.

RMSE		
RANGO	UND	OPTIMO
0 - ∞	mm	0 (cero), indica un ajuste perfecto

Fuente: (Méndez, 2016)

### 2.2.6.2.3. Sesgo Porcentual (PBIAS)

Para la presente investigación, así como indica Asurza (2017), la cuantificación del BIAS en porcentaje mide la tendencia de los valores simulados si son más grandes o más pequeños en función de los valores observados. Es no dimensional. El óptimo valor del porcentaje del BIAS es 0, valores negativos indican subestimación y valores positivos indica sobreestimación, donde la ecuación toma la forma:

$$BIAS (\%) \text{ o } PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)}{\sum_{i=1}^n Oi}$$

Donde: “Si” son los valores de la precipitación estimada por satélite y “Oi” son los valores de precipitación observadas.

**Tabla 13.** Rangos e interpretación del Sesgo Porcentual (PBIAS).

PBIAS	Interpretación Modelo
$PBIAS < \pm 10$	Muy bueno
$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	Bueno
$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	Satisfactorio
$PBIAS \geq \pm 25$	Insatisfactorio

Fuente: (Moriassi, Arnold, Van Liew, Bingner, & Harmel, 2007).

### 2.2.6.2.4. El criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Mide la relación de variabilidad de las observaciones. Si la simulación es perfecta,  $NSE = 1$ ; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces  $NSE = 0$ .

Para nuestro propósito y según Méndez (2016), puede tomar la forma:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2}$$

Dónde: “S” es la precipitación estimada por satélite y “O” es la precipitación observada

Por lo que NSE, también cuantifica la precisión de la estimación de la precipitación en relación con los datos de precipitación observados.

Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla

**Tabla 14.** Rangos e interpretación de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

NSE	Ajuste
$0.75 < NSE \leq 1.00$	Muy bueno
$0.65 < NSE \leq 0.75$	Bueno
$0.50 < NSE \leq 0.65$	Satisfactorio
$NSE \leq 0.50$	Insatisfactorio

Fuente: (Moriassi, Arnold, Van Liew, Bingner, & Harmel, 2007).

#### 2.2.6.2.5. Coeficiente de Correlación de Pearson (r)

De la investigación de Asencios (2016) Se recopila lo siguiente.

El coeficiente de correlación de Pearson (Fisher, 1915) (Wilks, 2006) es la medida más común de asociación entre dos variables. Específicamente, mide el grado de relación lineal y oscila entre valores de -1 a 1, donde el valor de  $r = 1$  denota una perfecta correlación positiva,  $r = -1$  una perfecta correlación negativa y si  $r = 0$  es porque no existe alguna correlación lineal, es decir las dos variables son linealmente independientes.

Esta medida estadística está en función de otras dos medidas: covarianza y desviación estándar, donde la primera de éstas denota el grado de variación conjunta entre ambas variables y la última es la medida de la dispersión de los datos con su media.

$$r_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{S_x S_y} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde:

$r_{xy}$ , es el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables x e y.

$Cov(x,y)$ , es la covarianza de las variables x e y.

$S_x$  y  $S_y$  son las desviaciones estándar de x e y.

$\bar{x}$  y  $\bar{y}$ , son los valores promedios de x e y.

n, es el número de datos.

El coeficiente de correlación de Pearson no es ni robusto ni resistente. No es robusto porque una fuerte relación no lineal entre las dos variables no puede ser reconocida y no es resistente



debido a que es extremadamente sensitivo a valores extremos o valores atípicos en la muestra de datos. Sin embargo, es frecuentemente usado en técnicas multivariadas más complejas.

**Tabla 15.** Rango e interpretación de la correlación de Pearson ( $r$ ).

<b>Coefficiente</b>	<b>Correlación</b>
$r = \pm 1$	Perfecta
$0.9 \leq r < 1$	Excelente
$0.8 \leq r < 0.9$	Buena
$0.6 \leq r < 0.8$	Regular
$0.3 \leq r < 0.6$	Mala
$0 \leq r < 0.3$	No hay correlación

Fuente. (Álvarez, 2015).

**Tabla 16.** Resumen de indicadores estadísticos.

<b>INDICADOR</b>	<b>RANGO</b>	<b>SCORE PERFECTO</b>
MAE	$[0, \infty)$	0
RMSE	$[0, \infty)$	0
PBIAS	$(-\infty, \infty)$	0
NSE	$(-\infty, 1]$	1
R	$[-1, 1]$	1

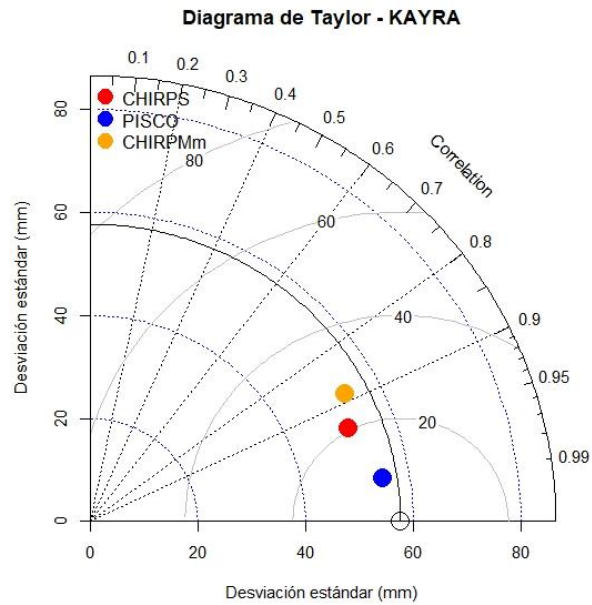
#### 2.2.6.2.6. Diagrama de Taylor

De la investigación de Asurza (2017) se recopila lo siguiente:

Una de las herramientas de mayor utilidad para evaluar el rendimiento de un modelo es el conocido como Diagrama de Taylor (**Figura 30**). Este diagrama utiliza la ley de cosenos para representar en una sola gráfica cómo varían simultáneamente los tres estadísticos más representativos del rendimiento de un modelo (Taylor, 2005), como son:

- La raíz del error medio cuadrático centrado, que matemáticamente es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los errores calculados, y que permite obtener una idea de la media del error detectado para el modelo, en la unidad de medida original, y sin tener en cuenta los efectos del signo del error, lo cual resulta muy útil para comprobar la precisión del modelo.

- La desviación estándar, que permite comprobar cuál es la variabilidad existente en ambas muestras de datos, pudiendo ver además si dicha variabilidad se conserva o varía en el modelo respecto a lo observado para los datos reales.
- El Coeficiente de Correlación de Pearson.



**Figura 30.** Diagrama de Taylor para la comparación del desempeño de los productos CHIRPS, PISCO Y CHIRPMm. Estación Kayra.



## 2.3. Hipótesis

### 2.3.1. Hipótesis General

La precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS con respecto a la precipitación observada por los pluviómetros, evaluada mediante Estadísticos de Validación Categórica (POD, FAR, TS), Estadísticos de Comparación por Pares (MAE, PBIAS, NSE, CORRELACION PEARSON) y en comparación con los productos CHIRPM y PISCO, antes y después de la corrección mediante el "Modelo de Redes Neuronales Artificiales (RNA)"; tendrá información de calidad en la Cuenca del río Vilcanota, para disponer datos con suficiente cobertura espacial y uniformidad temporal.

### 2.3.2. Sub hipótesis

- Habrá diferencias significativas que reduce la calidad de la información entre la precipitación diaria observada y estimada por satélite del producto CHIRPS, antes de la corrección mediante RNA.
- Los datos de precipitación mensual observada en las estaciones meteorológicas serán consistentes y completas.
- La información de la precipitación mensual estimada por satélite del producto CHIRPS sin corrección mediante RNA; tendrá información confiable.
- La información de la precipitación estacional y anual estimada por satélite del producto CHIRPS sin corrección mediante RNA; será de calidad.
- El "Modelo de Redes Neuronales Artificiales" hará posible la corrección de la precipitación estimada por satélite del producto CHIRPS.
- La calidad de la información de la precipitación mensual, estacional y anual estimada por satélite del producto CHIRPS corregido mediante RNA mejorará.

**2.4. Definición de Variables**

**2.4.1. Variables Independientes**

**X1. Precipitación diaria CHIRPS.** Precipitación pluvial diaria estimada por satélite CHIRPS medida en mm/día.

**X2. Precipitación mensual observado.** Precipitación pluvial mensual observada, medida en mm/mes.

**X3. Precipitación mensual CHIRPS.** Precipitación pluvial mensual estimada por satélite CHIRPS, medida en mm/mes.

**2.4.2. Variables Dependientes**

**Y1. Modelos de redes neuronales artificiales.** Arquitectura de los modelos de redes neuronales artificiales.

**Y2. Calidad de la información CHIRPS.** Calidad de la precipitación estimada por satélite CHIRPS.

**2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables**

**Tabla 17.** Operacionalización de variables.

TIPO DE VARIABLE	DENOMINACIÓN DE LA VARIABLE	DESCRIPCIÓN DE LA VARIABLE	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	INSTRUMENTOS
INDEPENDIENTE	X1: Precipitación diaria Observada.	Precipitación diaria observada.	Altura de columna de agua	mm/día	Software estadístico R, Ficha técnica
	X1: Precipitación diaria CHIRPS.	Precipitación diaria estimada por satélite del producto CHIRPS.	Altura de columna de agua	mm/día	Software estadístico R, Ficha técnica
	X2: Precipitación mensual observada.	Precipitación mensual observada.	Altura de columna de agua	mm/mes	Ficha técnica
	X2: Precipitación mensual CHIRPS.	Precipitación mensual estimada por satélite del producto CHIRPS.	Altura de columna de agua	mm/mes	Software estadístico R, Ficha técnica
DEPENDIENTES	Y1: Modelos de Redes Neuronales Artificiales	Arquitectura de los modelos de redes neuronales artificiales.	Número de neuronas en la capa de entrada y capa oculta		Hoja de cálculo, Software Alyuda NeuroIntelligence
	Y1: Calidad de la información CHIRPS	Calidad de la información estimada por satélite del producto CHIRPS	Probabilidad de detección (POD) Ratio de falsa alarma (FAR) Índice de detección crítico (TS) Error Absoluto Medio (MAE) Raíz del Error medio Cuadrático (RMSE) Sesgo porcentual (PBIAS) Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) Correlación de Pearson (r)	mm mm %	Hoja de cálculo, Software estadístico R, Mapas temáticos



## Capítulo III: Metodología

### 3.1. Metodología de la Investigación

#### 3.1.1. Enfoque de la investigación

El enfoque es **cuantitativo**, porque utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

#### 3.1.2. Nivel o alcance de la investigación

En nivel de investigación de la presente tesis es **descriptivo-correlacional**, porque se busca evaluar la precipitación estimada por satélite mediante indicadores estadísticos para validar con respecto a los datos de precipitación observadas en las estaciones meteorológicas e indicar cómo se relacionan éstas.

Según Hernández Sampieri et al (2010), con frecuencia la meta del investigador consiste en describir fenómenos, situaciones, contextos y sucesos; esto es, detallar cómo son y se manifiestan. Con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Con los estudios correlacionales Asocian conceptos o variables.

#### 3.1.3. Método de investigación

El método empleado en esta investigación es el **hipotético – deductivo**, debido que se plantea una hipótesis sobre las variables a estudiar, las cuales serán demostrados mediante una serie de pasos.

### 3.2. Diseño de la Investigación

#### 3.2.1. Diseño metodológico

##### No experimental - transversal

Porque se trata de estudios en los que no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables (**no experimental**) y se recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único (**transversal**) (Hernández Sampieri et al, 2010).

### 3.2.2. Diseño de Ingeniería

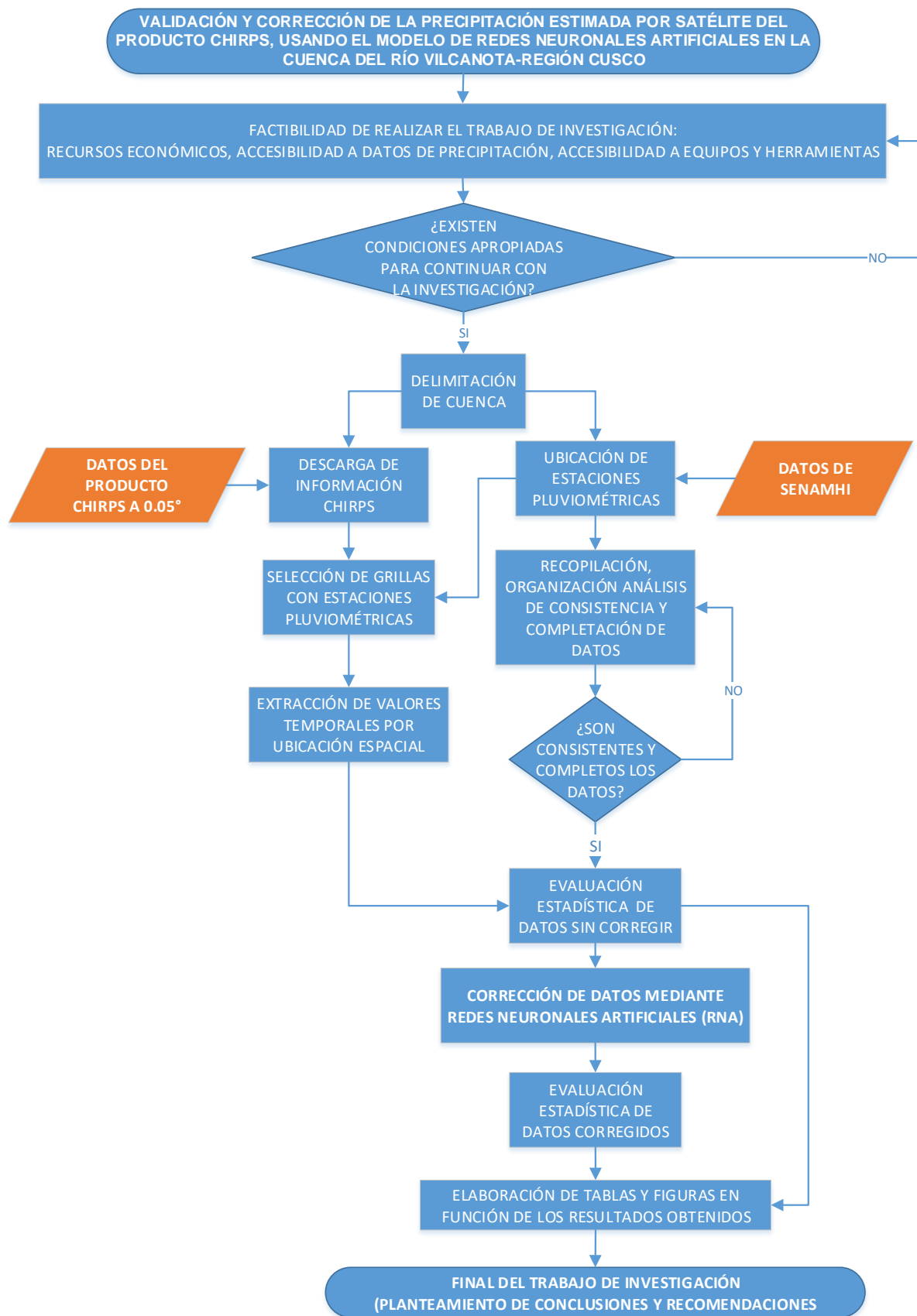


Figura 31. Flujograma del diseño de ingeniería.

### 3.3. Población y Muestra

#### 3.3.1. Población

##### 3.3.1.1. Descripción de la población

La población en esta investigación es la precipitación en la cuenca del río Vilcanota.

##### 3.3.1.2. Cuantificación de la población

La población consta de la precipitación observada y estimada por satélite en los 58 puntos establecidos por las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y alrededores de la cuenca del Río Vilcanota.

#### 3.3.2. Muestra

##### 3.3.2.1. Descripción de la muestra

La muestra la constituye la precipitación diaria y mensual.

##### 3.3.2.2. Cuantificación de la muestra

La muestra está conformada por la precipitación observada y estimada por satélite. 20 puntos de precipitación diaria y 31 de precipitación mensual, establecidos por las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y alrededores de la cuenca del Río Vilcanota. El detalle se muestra en la **Tabla 18**.

**Tabla 18.** Muestra de la precipitación diaria.

FUENTE DATOS	PERIODO (Fecha)		TIEMPO (Años)	TIEMPO (meses)	TIEMPO (días)	ESTACIONES (Und)	TOTAL DATOS (Und)
	(1)	(2)	(3)	(4)=(3)*12	(5)=(2)-(1)+1	(6)	(7)=(5)*(6)
SENAMHI	01/01/1981	31/12/2017	37	444	13514	20	270280
CHIRPS	01/01/1981	31/12/2017	37	444	13514	20	270280
CHIRPM	01/01/1981	31/12/2017	37	444	13514	20	270280
PISCO	01/01/1981	31/12/2016	36	432	13149	20	262980
						<b>TOTAL</b>	<b>1073820</b>



**Tabla 19.** Muestra de la precipitación mensual.

FUENTE DATOS	PERIODO (Fecha)		TIEMPO (Años)	TIEMPO (meses)	ESTACIONES (Und)	TOTAL DATOS (Und)
	(1)	(2)	(3)	(4)=(3)*12	(5)	(6)=(4)*(5)
<b>ANÁLISIS DE CONSISTENCIA Y COMPLETACIÓN DE DATOS</b>						
SENAMHI-UNSAAC	01/01/1964	31/12/2017	54	648	31	20088
					<b>TOTAL</b>	<b>20088</b>
<b>VALIDACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN</b>						
SENAMHI-UNSAAC	01/01/1981	31/12/2017	37	444	31	13764
CHIRPS	01/01/1981	31/12/2017	37	444	31	13764
CHIRPM	01/01/1981	31/12/2017	37	444	31	13764
PISCO	01/01/1981	31/12/2016	36	432	31	13392
					<b>TOTAL</b>	<b>54684</b>

**3.3.2.3. Método de muestreo**

La muestra fue seleccionada por un **Método de muestreo no probabilístico**; es decir, fue elegida a criterio del investigador según la disponibilidad espacial y temporal de los datos de precipitación observados y estimados por satélite.

**3.3.2.4. Criterios de evaluación de muestra**

Al ser la muestra no probabilística ésta no se seleccionó siguiendo un procedimiento mecánico o en base a fórmulas de probabilidad, sino que se eligió por decisión del investigador de acuerdo a las características de la investigación y la disponibilidad espacio-temporal de los datos de precipitación observados y estimados por satélite.

- Se considera 20 estaciones, según la disponibilidad de datos de precipitación diaria observados utilizados para la generación del producto PISCO.
- De 58 estaciones disponibles de precipitación mensual, dentro del periodo de estudio (1981-2017), se sigue los criterios definidos por Lavado et al (2015), cuya condición era que tengan al menos 10 años de registro (años con al menos 11 meses de datos), lográndose obtener 31 estaciones.
- El periodo de análisis de consistencia y completación de datos se considera el mayor periodo posible disponible, entre 1964-2017.
- Evaluación de la precipitación CHIRPS diario, mensual, estacional y anual entre 1981-2017.



### 3.3.3. Criterios de inclusión

#### Criterios de inclusión espacial

Se considera puntos de estaciones meteorológicas dentro y alrededores de la cuenca del río Vilcanota, para lograr representatividad, abarcando un amplio rango de altura y territorio.

Es así que se consideran las estaciones dentro y fuera de la cuenca Vilcanota pertenecientes al departamento Cusco, estaciones fuera de la cuenca Vilcanota de los departamentos de Apurímac y Puno.

#### Criterios de inclusión temporal

- Datos de precipitación estimada por satélite CHIRPS de la versión 2.0.
- Datos de precipitación estimada por el producto PISCO de la versión 2.1.
- Datos de precipitación estimada por el producto CHIRPM previa a la generación de PISCO v. 2.1.
- Datos de precipitación diarios observados y CHIRPS entre el periodo de estudio (1981-2017).
- El periodo de análisis de consistencia y completación de datos se considera el mayor periodo posible disponible, entre 1964-2017.
- Evaluación de la precipitación CHIRPS diario, mensual, estacional y anual entre 1981-2017.



### 3.4. Instrumentos

#### 3.4.1. Instrumentos Metodológicos o Instrumentos de Recolección de Datos

En la recolección de datos se utilizaron los siguientes formatos:

#### Precipitación diaria.



**Tabla 20.** Formato de recolección de datos de precipitación diaria.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL	
---	--	---

PRECIPITACIÓN DIARIA (mm)											
ESTACIÓN METEOROLÓGICA:											
N°	fecha	N°	1	2	3	4	5	6...	30	31	
		LONG									
		LAT									
		ALTURA									
ESTACIÓN	CUNYAC	COLQUEPATA	CHITAPAMP.	SAN GAB.	NUÑO A	QUILLAB.	...	CHUQUIBAMBILLA	CRUCERO		
1	01/01/1981										
2	02/01/1981										
3	03/01/1981										
4	04/01/1981										
5	05/01/1981										
6	06/01/1981										
7	07/01/1981										
8	08/01/1981										
9	09/01/1981										
10	10/01/1981										
11	11/01/1981										
12	12/01/1981										
13	13/01/1981										
14	14/01/1981										
15	15/01/1981										
16	16/01/1981										
17	17/01/1981										
18	18/01/1981										
19	19/01/1981										
20	20/01/1981										
21	21/01/1981										
...	...										
13500	17/12/2017										
13501	18/12/2017										
13502	19/12/2017										
13503	20/12/2017										
13504	21/12/2017										
13505	22/12/2017										
13506	23/12/2017										
13507	24/12/2017										
13508	25/12/2017										
13509	26/12/2017										
13510	27/12/2017										
13511	28/12/2017										
13512	29/12/2017										
13513	30/12/2017										
13514	31/12/2017										

**Precipitación mensual**

**Tabla 21.** Formato de recolección de datos de precipitación mensual.

	<p><b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b>  <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b></p>	
---	--	---

**PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)**

<b>LATITUD</b>			S
<b>LONGITUD</b>			W
<b>ALTITUD</b>			m.s.n.m.

<b>DEPARTAMENTO</b>	
<b>PROVINCIA</b>	
<b>DISTRITO</b>	

ESTACIÓN METEOROLÓGICA:													
N°	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	1964												
2	1965												
3	1966												
4	...												
5	1981												
6	1982												
7	1983												
8	....												
9	1989												
10	1990												
11	1991												
12	1992												
13	1993												
14	1994												
15	1995												
16	1996												
17	1997												
18	1998												
19	1999												
20	2000												
21	2001												
22	2002												
23	2003												
24	2004												
25	2005												
26	2006												
27	2007												
28	2008												
29	2009												
30	2010												
31	2011												
32	2012												
33	2013												
34	2014												
35	2015												
36	2016												
37	2017												

### 3.4.2. Instrumentos de Ingeniería

No se emplearon instrumentos de Ingeniería para la recolección de datos, debido a que no se tomaron mediciones directas, sino se obtuvo información de registros históricos.

### 3.4.3. Equipos y programas de cómputo

Equipos de escritorio:

- Computadora de escritorio.

Programas de cómputo:

- Microsoft Office 2016: Ms Word, Ms Excel y Ms PowerPoint.
- PTC Mathcad 4.0.
- Hydraccess.
- Lenguaje R versión 3.5.1.
- Alyuda NeuroIntelligence.
- ArcGis versión 10.5-Version de prueba.

**Tabla 22.** Información del uso de los programas de cómputo utilizados

Programa de cómputo	Uso
<ul style="list-style-type: none"><li>• Microsoft Office 2016: Ms Word, Ms Excel y Ms PowerPoint.</li></ul>	Editor de texto, hoja de cálculo y reportes gráficos.
<ul style="list-style-type: none"><li>• PTC Mathcad 4.0.</li></ul>	Entorno de documentación técnica con prestaciones de cálculo numérico y simbólico.
<ul style="list-style-type: none"><li>• Hydraccess.</li></ul>	Manejo de base de datos.
<ul style="list-style-type: none"><li>• Lenguaje R versión 3.5.1.</li></ul>	Análisis estadísticos, reportes gráficos y modelamiento numérico.
<ul style="list-style-type: none"><li>• Alyuda NeuroIntelligence.</li></ul>	Modelamiento de Redes Neuronales Artificiales.
<ul style="list-style-type: none"><li>• ArcGis versión 10.5-Version de prueba.</li></ul>	Edición de mapas y modelamiento espacial.

### 3.5. Procedimientos de Recolección de Datos

#### 3.5.1. Procedimiento de recolección de datos de la precipitación pluvial

##### 3.5.1.1. Precipitación diaria

##### 3.5.1.1.1. SENAMHI

De 441 estaciones meteorológicas del SENAMHI de precipitación diaria utilizadas para la construcción de la información grillada PISCO 2.1 completas, fueron obtenidos 20 estaciones. Datos procesados del SENAMHI según Aybar et al (2019).

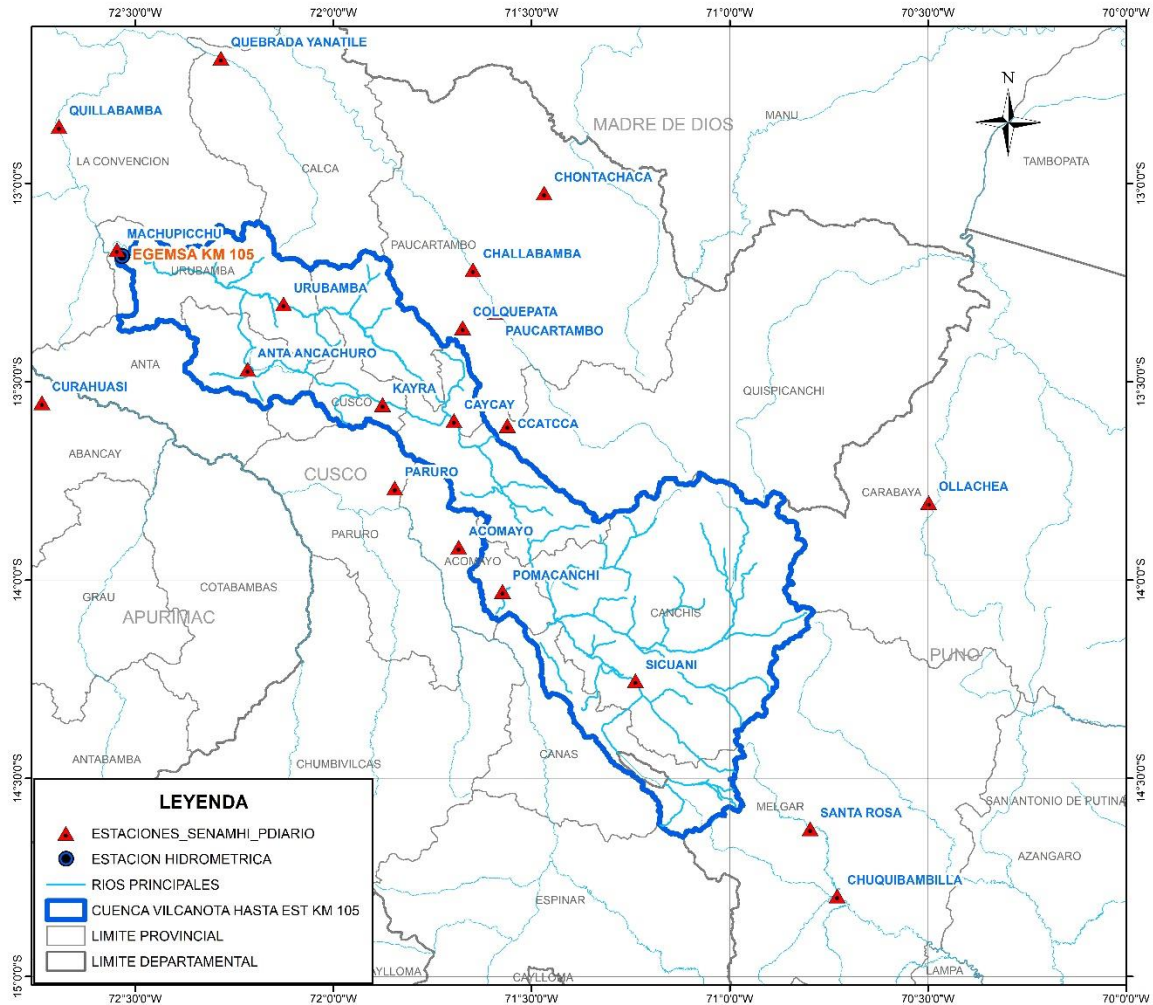
Se descarga los datos desde: <https://piscoprec.github.io/>.

**Tabla 23.** Estaciones meteorológicas del SENAMHI – Precipitación diaria.

N°	Código	Estación	Departamento	Provincia	Distrito	Longitud	Latitud	Altitud	N°_PISCO
1	156306	COLQUEPATA	CUSCO	PAUCARTAMBO	COLQUEPATA	-71.6733	-13.3633	3729	390
2	606	QUILLABAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	SANTA ANA	-72.6919	-12.8561	990	102
3	607	KAYRA	CUSCO	CUSCO	SAN JERÓNIMO	-71.8753	-13.5569	3219	103
4	654	QUEBRADA YANATILE	CUSCO	CALCA	YANATILE	-72.2836	-12.6836	1050	116
5	6670	CHALLABAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	-71.6472	-13.2175	2740	216
6	6671	CHONTACHACA	CUSCO	PAUCARTAMBO	KOSÑIPATA	-71.4678	-13.0239	982	217
7	677	CURAHUASI	APURIMAC	ABANCAY	CURAHUASI	-72.7350	-13.5525	2763	122
8	679	MACHUPICCHU	CUSCO	URUBAMBA	MACHUPICCHU	-72.5458	-13.1669	2548	123
9	683	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	URUBAMBA	-72.1252	-13.3036	2850	124
10	684	ANTA ANCAHURO	CUSCO	ANTA	ZURITE	-72.2158	-13.4683	3340	125
11	686	PARURO	CUSCO	PARURO	PARURO	-71.8447	-13.7675	3084	126
12	687	ACOMAYO	CUSCO	ACOMAYO	ACOMAYO	-71.6836	-13.9169	3160	127
13	689	PAUCARTAMBO	CUSCO	PAUCARTAMBO	PAUCARTAMBO	-71.5906	-13.3244	3042	128
14	690	CCATCCA	CUSCO	QUISPICANCI	CCATCCA	-71.5603	-13.6100	3729	129
15	695	OLLACHEA	PUNO	CARABAYA	OLLACHEA	-70.4975	-13.8042	2850	131
16	759	SICUANI	CUSCO	CANCHIS	SICUANI	-71.2372	-14.2536	3574	150
17	809	CAYCAY	CUSCO	PAUCARTAMBO	CAYCAY	-71.6955	-13.5978	3150	174
18	812	POMACANCI	CUSCO	ACOMAYO	POMACANCI	-71.5728	-14.0281	3200	176
19	823	SANTA ROSA	PUNO	MELGAR	SANTA ROSA	-70.7964	-14.6269	3986	181
20	764	CHUQUIBAMBILLA	PUNO	MELGAR	UMACHIRI	-70.7283	-14.7964	3971	155

Fuente: SENAMHI – Red de estaciones para PISCO 2.1. (Aybar, y otros, 2019).

La ubicación espacial de las estaciones con precipitación pluvial diaria consideradas para la presente investigación se muestra en la **Figura 32**, tanto dentro y fuera de la cuenca del río Vilcanota.



**Figura 32.** Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas – precipitación diaria.

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI.

### 3.5.1.1.2. CHIRPS

Para la presente investigación se utilizaron los datos CHIRPS de la versión 2.0 a  $0.05^\circ$  de resolución espacial a escala diaria y mensual comprendidos entre 1981-2017.

Se descargaron los datos de precipitación del CHIRPS diaria ([ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global\\_daily/](ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global_daily/)), disponibles con acceso libre.



## Índice de /pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global\_daily/netcdf/p05/

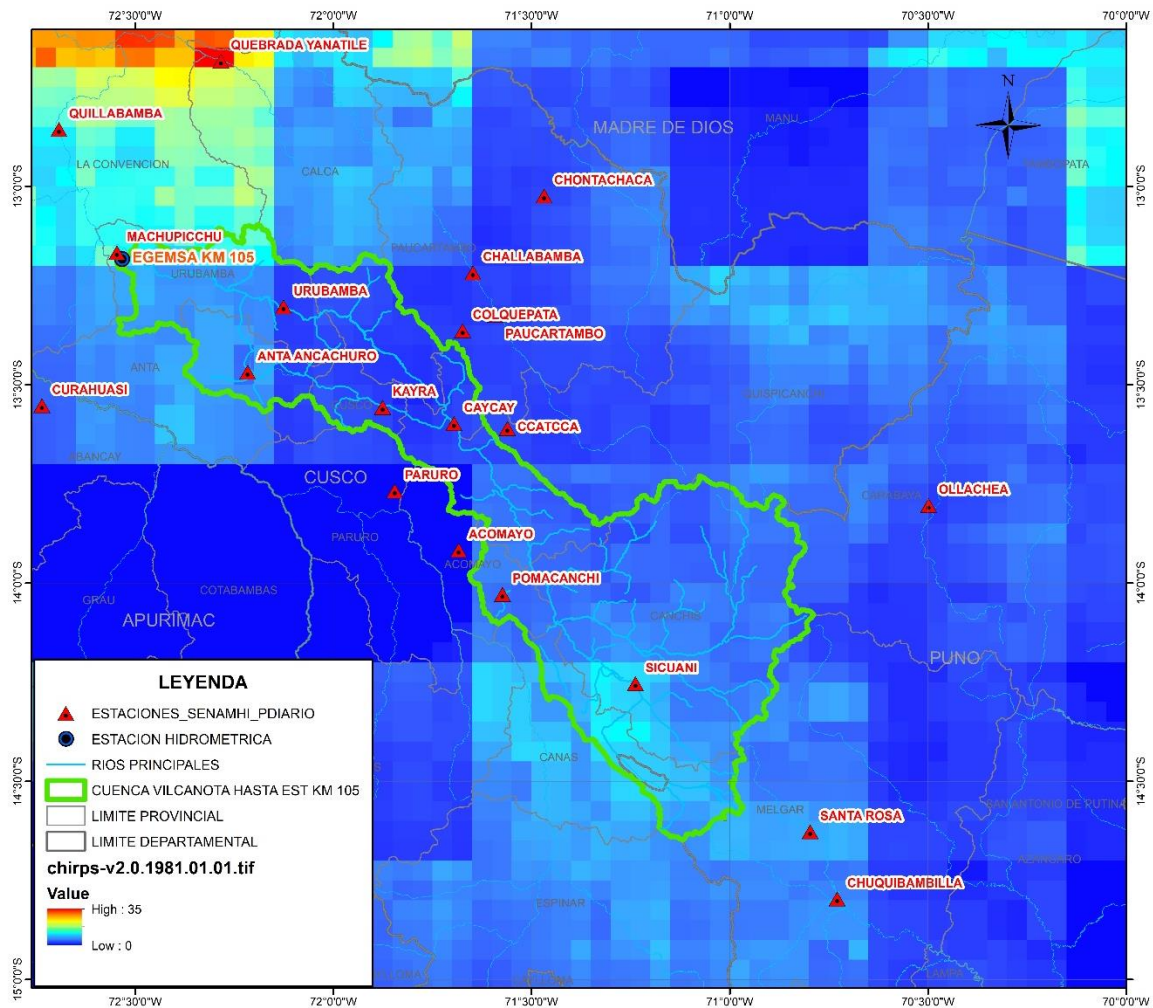
[directorio principal]

Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
by_month/		18/03/19 22:06:00
chirps-v2.0.1981.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1982.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1983.days_p05.nc	990 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1984.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1985.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1986.days_p05.nc	1000 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1987.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1988.days_p05.nc	1020 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1989.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1990.days_p05.nc	1011 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1991.days_p05.nc	1000 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1992.days_p05.nc	998 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1993.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1994.days_p05.nc	1018 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1995.days_p05.nc	1008 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1996.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1997.days_p05.nc	1005 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1998.days_p05.nc	1022 MB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.1999.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2000.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2001.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2002.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2003.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2004.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2005.days_p05.nc	1.0 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2006.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2007.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2008.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2009.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2010.days_p05.nc	1.1 GB	19/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2011.days_p05.nc	1.1 GB	22/12/15 19:00:00
chirps-v2.0.2012.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2013.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2014.days_p05.nc	1.1 GB	20/11/15 19:00:00
chirps-v2.0.2015.days_p05.nc	1.0 GB	19/01/16 19:00:00
chirps-v2.0.2016.days_p05.nc	1.1 GB	30/04/18 19:00:00
chirps-v2.0.2017.days_p05.nc	1.1 GB	17/01/18 19:00:00

**Figura 33.** Página web de acceso para la descarga de datos CHIRPS-PDIARIO.

Fuente: [ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global\\_daily/](http://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global_daily/).

Se consideraron las grillas del CHIRPS coincidentes con la ubicación de las estaciones pluviométricas, los cuales en adelante serán nombrados como estaciones CHIRPS.

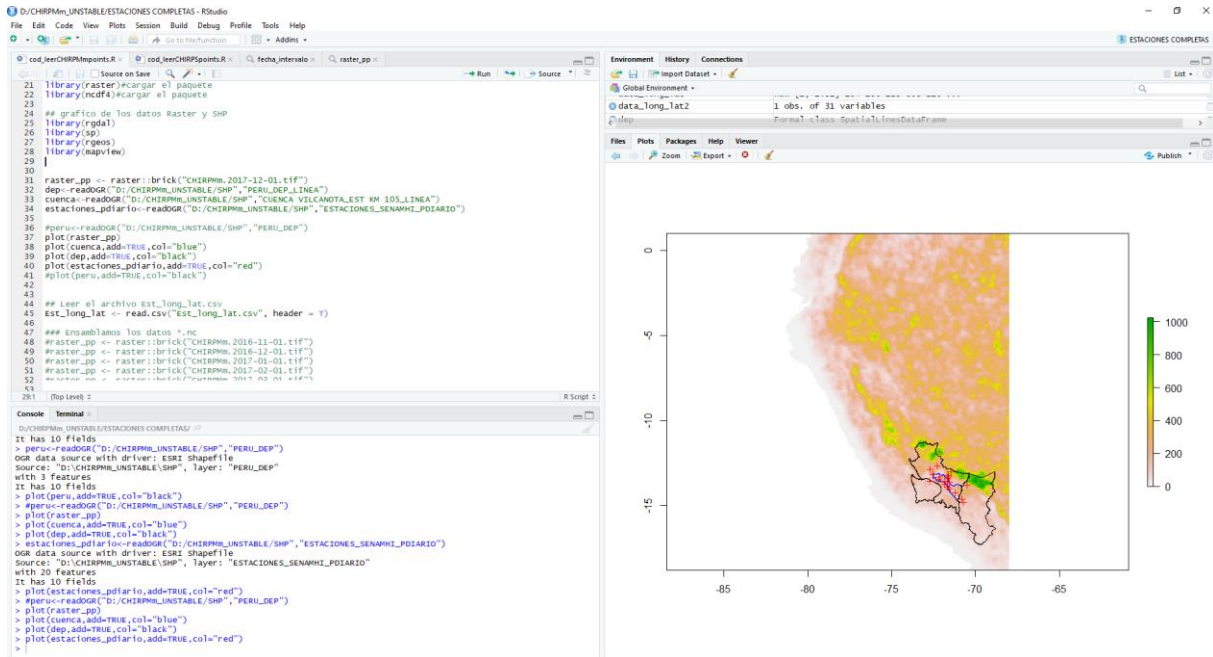


**Figura 34.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación CHIRPS.

FUENTE: elaboración propia en base a información satelital CHIRPS.

Cada pixel representa un área de la superficie terrestre y tiene como valor la precipitación diaria (mm/día). La resolución de cada pixel es de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ , (aproximadamente  $5.5 \times 5.5$  km).

Estos datos se encuentran comprimidos en formato NetCDF; luego mediante un código de programación en R se extrajeron los datos correspondientes.





**Figura 35.** Extracción de datos mediante código de programación en R.

**FUENTE:** Código Script elaborado en base a los Script de: Adrian Huerta & Waldo Lavado/Walter Bardales ([ftp://ftp.senamhi.gob.pe/PISCO\\_v2.0/Software/](ftp://ftp.senamhi.gob.pe/PISCO_v2.0/Software/)).

Finalmente, los datos de precipitación diaria estimados por satélite CHIRPS, se organizaron en hojas de cálculo según se muestra.

**Tabla 24.** Precipitación diaria CHIRPS organizada.

		 <b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b> 									
		<b>PRECIPITACIÓN DIARIA (mm) - CHIRPS_Pd</b>									
		<b>ESTACIÓN METEOROLÓGICA:</b>									
N°	fecha	N°	1	2	3	4	5	6	...	20	
		LONG	-71.6733	-72.6919	-71.8753	-72.2836	-71.6472	-71.4678			-70.7283
		LAT	-13.3633	-12.8561	-13.5569	-12.6836	-13.2175	-13.0239			-14.7964
		ALTURA	3729	990	3219	1050	2740	982			3971
		ESTACIÓN	COLQUEPATA	QUILLABAMBA	KAYRA	QUEBRAD	CHALLABAMBA	CHONTAC...	CHUQUIBAMBILLA		
1	01/01/1981		2.4	11.0	2.5	35.5	2.5	2.6		5.7	
2	02/01/1981		2.1	0.0	2.2	0.0	3.0	4.3		4.6	
3	03/01/1981		7.4	13.9	7.9	11.0	4.8	12.6		8.7	
4	04/01/1981		3.7	0.0	3.9	0.0	4.6	8.3		2.7	
5	05/01/1981		12.4	3.8	13.1	6.5	12.9	11.4		10.3	
6	06/01/1981		0.0	0.0	0.0	4.3	3.8	15.9		3.3	
7	07/01/1981		3.7	0.0	0.0	0.0	3.8	5.3		9.9	
8	08/01/1981		0.0	0.0	9.9	0.0	3.8	0.0		9.9	
9	09/01/1981		3.7	8.8	3.3	8.7	3.8	15.9		6.6	
10	10/01/1981		3.7	0.0	3.3	0.0	3.8	0.0		6.6	
11	11/01/1981		8.3	16.4	8.2	19.7	7.5	15.1		9.3	
12	12/01/1981		14.6	16.4	6.2	13.1	15.3	19.8		9.3	
13	13/01/1981		6.2	3.3	2.1	3.3	8.8	13.2		0.0	
14	14/01/1981		4.2	0.0	2.1	0.0	8.8	6.6		6.2	
15	15/01/1981		4.2	0.0	8.2	0.0	4.4	3.3		9.3	
16	16/01/1981		3.4	3.9	5.1	8.2	3.7	7.3		4.9	
17	17/01/1981		5.1	11.8	3.4	16.5	5.5	12.2		4.9	
18	18/01/1981		5.1	3.9	5.1	0.0	5.5	7.3		4.9	
19	19/01/1981		5.1	0.0	1.7	0.0	5.5	7.3		2.5	
20	20/01/1981		1.7	3.9	3.4	8.2	1.8	0.0		9.8	
21	21/01/1981		13.1	30.3	13.4	35.2	13.4	27.0		4.3	
...	...										
13500	17/12/2017		4.5	5.5	4.1	7.6	7.0	9.9		4.5	
13501	18/12/2017		3.0	11.0	6.1	10.1	4.6	9.9		4.5	
13502	19/12/2017		9.0	13.7	6.1	15.1	16.2	29.6		0.0	
13503	20/12/2017		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		1.5	
13504	21/12/2017		5.9	0.0	5.0	0.0	16.8	17.3		2.9	
13505	22/12/2017		5.9	7.4	5.0	6.0	8.4	17.3		2.9	
13506	23/12/2017		0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0		8.8	
13507	24/12/2017		5.9	7.4	5.0	6.0	0.0	0.0		8.8	
13508	25/12/2017		23.6	7.4	25.2	12.0	42.1	69.0		8.8	
13509	26/12/2017		7.6	15.3	5.3	28.1	15.9	32.7		3.6	
13510	27/12/2017		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		3.6	
13511	28/12/2017		7.6	3.8	10.7	7.0	10.6	16.3		1.8	
13512	29/12/2017		22.7	3.8	16.0	14.0	26.5	49.0		1.8	
13513	30/12/2017		3.8	3.8	0.0	14.0	15.9	32.7		1.8	
13514	31/12/2017		7.6	3.8	5.3	0.0	10.6	0.0		3.6	

Fuente: elaboración propia en base a datos descargados de la precipitación CHIRPS.

### 3.5.1.1.3. CHIRPMd

Las precipitaciones del producto CHIRPM (CHIRP modificado), disponibles libremente a escala espacial de  $0.1^\circ$  y escala temporal diaria, se obtienen de <https://piscoprec.github.io/>.

The screenshot shows the website <https://piscoprec.github.io/>. The navigation bar includes 'Inicio', 'Datos', 'Changelog', 'Descargar PISCOp', and 'Citar'. A dropdown menu for 'Presentación' is open, showing 'Introducción' and '¿Por qué usar PISCOp?'. A list of download options is displayed, including 'Descargar pluviómetros diarios', 'Descargar pluviómetros diarios completados', 'Descargar pluviómetros mensuales', 'Descargar pluviómetros mensuales completados', 'Descargar CHPclim', 'Descargar TRMM2A25', 'Descargar PISCOplim', 'Descargar CHIRPMm GEOTIFF', 'Descargar CHIRPMm NETCDF', 'Descargar PISCOpm GEOTIFF', 'Descargar PISCOpm NETCDF', 'Descargar CHIRPMd GEOTIFF', 'Descargar CHIRPMd NETCDF4', 'Descargar P-PISCOpd GEOTIFF', 'Descargar P-PISCOpd NETCDF', 'Descargar PISCOpd GEOTIFF', and 'Descargar PISCOpd NETCDF4'. A map titled 'Precipitación' shows the precipitation index for Peru, with a color scale from 0 to 100. Below the map, there is a description of the 'Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations: Precipitation product (PISCOp V2.1)' and a 'Presentación' section.

Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations: Precipitation product (PISCOp V2.1). PISCOp V2.1 es una nueva base de datos de precipitación disponible para todo Perú del 1981 a la actualidad a paso de tiempo diario y mensual, a una resolución espacial de  $0.1^\circ$  y con una latencia de subida de aproximadamente 8 semanas.

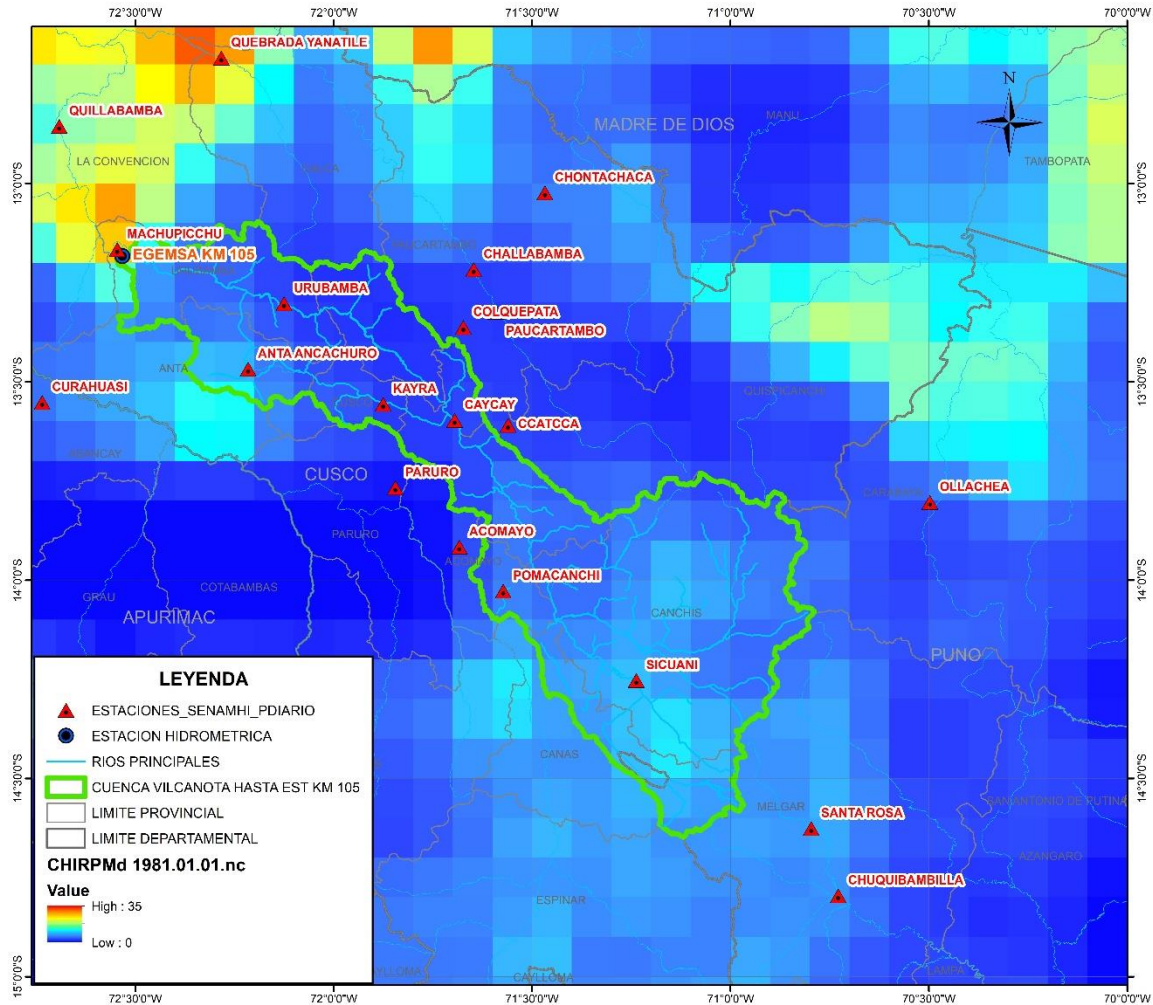
**Presentación**

Los estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico tienen el propósito de generar información sobre las características climáticas e hidrológicas que contribuyan a la comprensión de la hidroclimatología de las cuencas y la vigilancia de eventos extremos. La producción de estos productos demandan gran inversión de tiempo en el tratamiento y crítica de los datos para asegurar buena calidad, continuidad temporal de las series pluviométricas, homogeneidad, factores que son una limitante para atender con oportunidad diferentes demandas de información para diferentes usuarios; por otro lado la baja

**Figura 36.** Página web de acceso a la descarga de datos CHIRPM-PDIARIO. (CHIRPMd).

Fuente: <https://piscoprec.github.io/>.





**Figura 37.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación CHIRPMd.



FUENTE: Elaboración propia en base a información satelital CHIRPMd.

Cada pixel representa un área de la superficie terrestre y tiene como valor la precipitación diaria (mm/día). La resolución de cada pixel es de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , (aproximadamente 11 x 11 km).

Estos datos se encuentran comprimidos en formato NetCDF; luego mediante un código de programación en R se extrajeron los datos correspondientes, similar a la extracción de datos de precipitación diaria CHIRPS.

Finalmente, los datos de precipitación diaria estimados por satélite CHIRPMd, se organizaron en hojas de cálculo según se muestra.

**Tabla 25.** Precipitación diaria CHIRPMd organizada.

	<p><b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b>  <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b></p>	
---	--	---

		<b>PRECIPITACIÓN DIARIA (mm) - CHIRPMd</b>									
		<b>ESTACIÓN METEOROLÓGICA:</b>									
N°	fecha	N°	1	2	3	4	5	6	...	20	
		LONG	-71.6733	-72.6919	-71.8753	-72.2836	-71.6472	-71.4678			-70.7283
		LAT	-13.3633	-12.8561	-13.5569	-12.6836	-13.2175	-13.0239			-14.7964
		ALTURA	3729	990	3219	1050	2740	982			3971
		ESTACION	COLQUEPATA	QUILLABAMBA	KAYRA	QUEBRAD	CHALLABAMBA	CHONTAC...			CHUQUIBAMBILLA
1	01/01/1981		2.0	15.6	2.1	28.6	2.3	5.7		6.5	
2	02/01/1981		2.1	0.0	1.9	0.0	2.3	9.3		4.7	
3	03/01/1981		4.9	14.6	6.6	10.6	5.7	27.1		8.1	
4	04/01/1981		3.4	0.0	3.3	0.2	3.6	17.9		2.6	
5	05/01/1981		10.3	5.4	11.1	6.2	10.0	24.6		12.3	
6	06/01/1981		1.0	0.4	0.6	2.6	3.9	31.5		3.7	
7	07/01/1981		2.8	1.6	1.8	4.2	3.2	10.2		8.2	
8	08/01/1981		0.4	0.6	8.1	1.6	1.9	0.2		10.9	
9	09/01/1981		3.3	4.7	0.9	6.5	4.2	22.2		5.4	
10	10/01/1981		3.3	0.1	3.7	0.0	3.7	3.8		5.6	
11	11/01/1981		7.3	17.9	8.4	16.1	8.2	23.2		9.6	
12	12/01/1981		12.1	18.0	7.2	15.8	14.2	48.3		7.9	
13	13/01/1981		5.8	3.5	3.9	4.8	8.3	19.3		0.6	
14	14/01/1981		4.3	0.7	4.1	0.0	7.4	10.0		7.7	
15	15/01/1981		3.7	0.0	7.9	1.0	3.6	6.1		9.7	
16	16/01/1981		2.9	3.8	4.5	7.8	3.7	16.1		5.9	
17	17/01/1981		4.6	16.2	3.7	16.9	6.4	19.9		5.6	
18	18/01/1981		4.0	3.4	5.9	1.3	4.6	14.0		4.7	
19	19/01/1981		4.6	0.0	2.2	0.0	5.0	12.8		3.3	
20	20/01/1981		2.0	3.6	4.4	9.2	2.2	1.5		8.2	
21	21/01/1981		12.6	32.4	13.3	35.1	15.9	47.3		4.6	
...	...										
13135	17/12/2016		0.4	0.0	0.7	0.0	0.2	0.1		0.0	
13136	18/12/2016		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		2.9	
13137	19/12/2016		0.3	0.2	1.8	0.0	0.0	0.0		2.6	
13138	20/12/2016		2.5	1.2	2.1	4.8	3.6	12.6		0.1	
13139	21/12/2016		1.1	0.7	0.3	5.5	2.1	14.5		0.0	
13140	22/12/2016		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1		0.0	
13141	23/12/2016		2.8	3.4	2.4	4.5	3.5	17.0		3.2	
13142	24/12/2016		1.4	0.0	1.1	0.0	1.3	9.4		0.0	
13143	25/12/2016		0.1	4.0	1.8	2.6	0.0	1.6		0.0	
13144	26/12/2016		9.5	20.7	6.2	18.0	11.4	51.1		8.9	
13145	27/12/2016		0.1	3.4	1.8	0.1	0.0	0.0		0.0	
13146	28/12/2016		9.8	17.1	8.7	17.4	12.1	51.8		7.8	
13147	29/12/2016		0.1	0.0	0.0	0.0	0.7	3.5		2.7	
13148	30/12/2016		0.2	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0		1.4	
13149	31/12/2016		4.6	7.5	3.6	12.0	7.3	53.1		3.7	

Fuente: Elaboración propia en base a datos descargados de la precipitación CHIRPMd.



### 3.5.1.1.4. PISCO

El conjunto de datos de precipitación PISCO V2.1, disponible de acceso libre para el Perú, con resolución espacial de  $0.1^\circ$ , para el periodo de 1981-2016, descargado de <https://piscoprec.github.io/>.

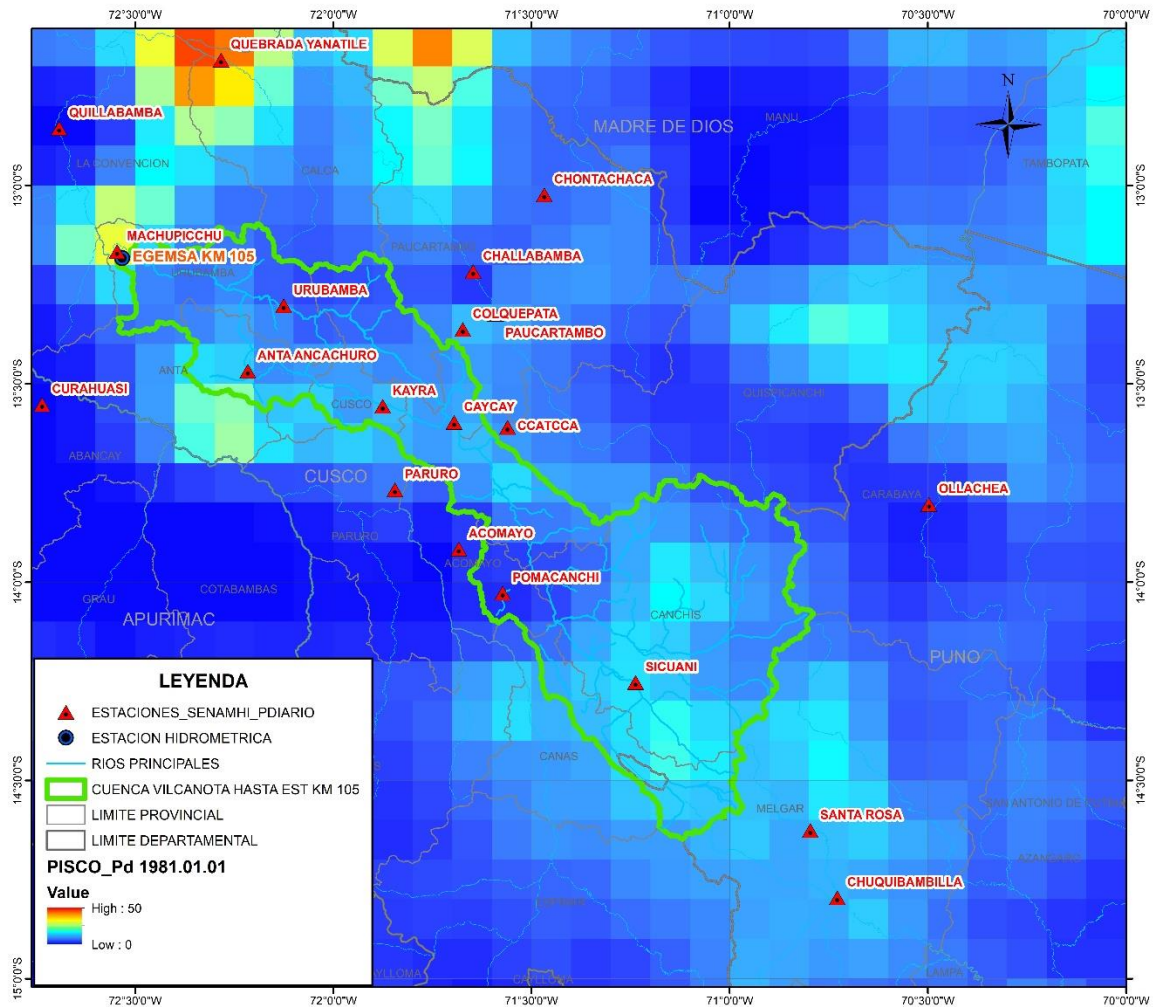
Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations: Precipitation product (PISCOp V2.1). PISCOp V2.1 es una nueva base de datos de precipitación disponible para todo Perú del 1981 a la actualidad a paso de tiempo diario y mensual, a una resolución espacial de  $0.1^\circ$  y con una latencia de subida de aproximadamente 8 semanas.

**Presentación**

Los estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico tienen el propósito de generar información sobre las características climáticas e hidrológicas que contribuyan a la comprensión de la hidroclimatología de las cuencas y la vigilancia de eventos extremos. La producción de estos productos demandan gran inversión de tiempo en el tratamiento y crítica de los datos para asegurar buena calidad, continuidad temporal de las series pluviométricas, homogeneidad, factores que son una limitante para atender con oportunidad diferentes demandas de información para diferentes usuarios; por otro lado la baja

**Figura 38.** Página web de acceso para la descarga de datos PISCO (PISCO\_Pd).

Fuente: <https://piscoprec.github.io/>.



**Figura 39.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación PISCO\_Pd.

**Fuente:** elaboración propia en base a información satelital PISCO\_Pd.

Cada pixel representa un área de la superficie terrestre y tiene como valor la precipitación diaria (mm/día). La resolución de cada pixel es de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , (aproximadamente 11 x 11 km).

Estos datos se encuentran comprimidos en formato NetCDF; luego mediante un código de programación en R se extrajeron los datos correspondientes, similar a la extracción de datos de precipitación diaria CHIRPS.

Finalmente, los datos de precipitación diaria estimados por satélite PISCO\_Pd, se organizaron en hojas de cálculo según se muestra.

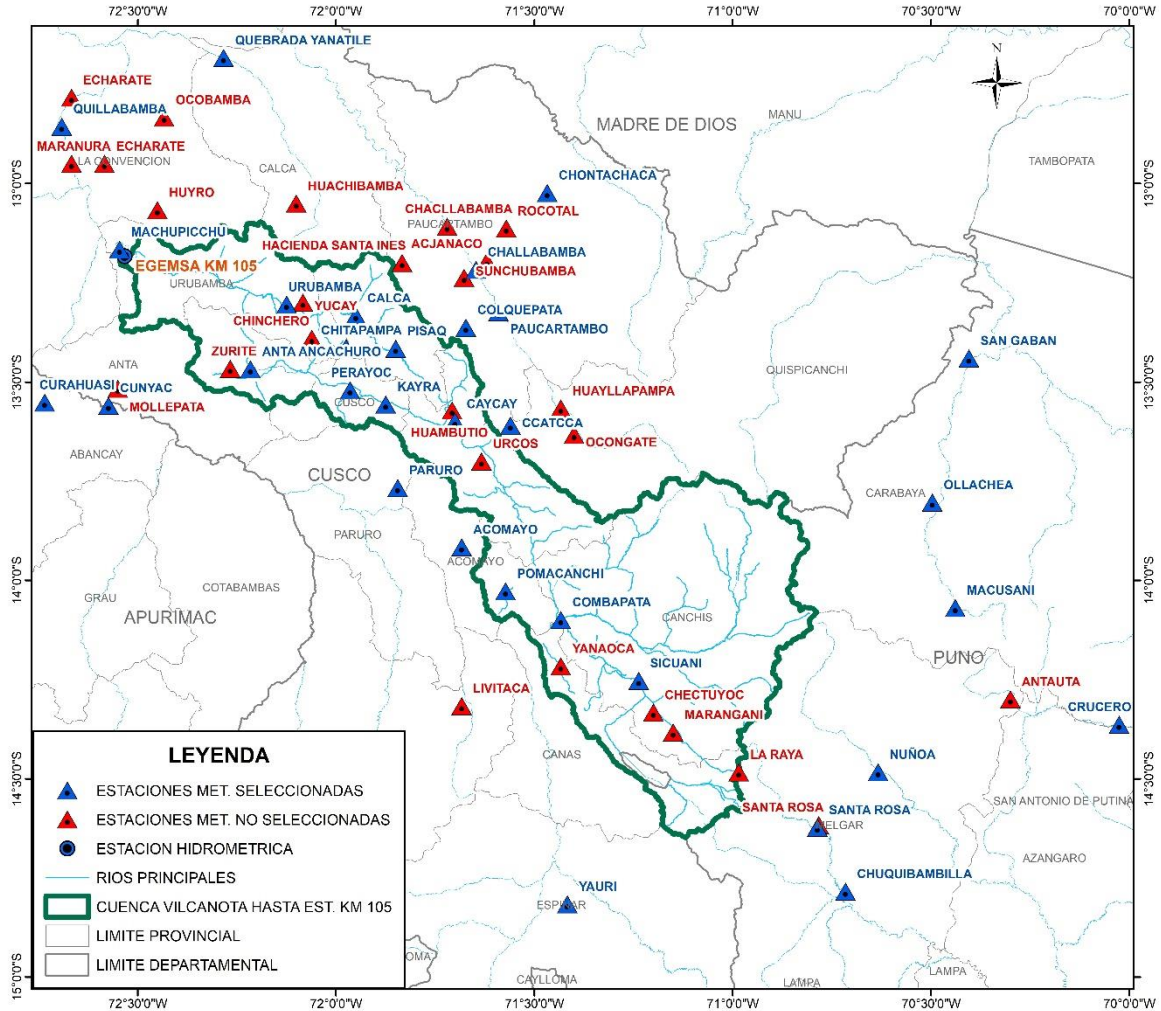
**Tabla 26.** Precipitación diaria PISCO\_Pd organizada.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO									
		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA									
		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL									
		PRECIPITACIÓN DIARIA (mm) - PISCO_Pd									
N°	fecha	ESTACIÓN METEOROLÓGICA:									
		N°	1	2	3	4	5	6	...	20	
		LONG	-71.6733	-72.6919	-71.8753	-72.2836	-71.6472	-71.4678			-70.7283
		LAT	-13.3633	-12.8561	-13.5569	-12.6836	-13.2175	-13.0239			-14.7964
		ALTURA	3729	990	3219	1050	2740	982			3971
		ESTACION	COLQUEPATA	QUILLABAMBA	KAYRA	QUEBRAD	CHALLABAMBA	CHONTAC...		CHUQUIBAMBILLA	
1	01/01/1981		12.3	0.1	12.1	43.6	2.7	6.8		11.3	
2	02/01/1981		1.7	28.7	2.1	0.0	2.7	9.0		1.4	
3	03/01/1981		7.2	15.1	7.1	10.2	6.2	28.9		12.6	
4	04/01/1981		30.7	1.9	27.0	0.0	6.8	18.3		6.8	
5	05/01/1981		2.0	5.7	3.8	4.5	14.2	24.2		9.7	
6	06/01/1981		1.4	3.3	2.9	2.6	4.0	38.6		1.0	
7	07/01/1981		2.9	0.0	5.1	0.0	3.8	10.8		0.4	
8	08/01/1981		1.1	8.0	3.4	0.1	3.6	0.0		2.5	
9	09/01/1981		6.1	0.0	10.8	7.2	4.0	38.2		2.9	
10	10/01/1981		18.4	22.0	9.4	0.0	6.2	0.2		2.5	
11	11/01/1981		1.9	5.6	1.8	19.7	8.5	33.0		0.8	
12	12/01/1981		13.0	2.9	12.7	13.0	27.9	51.7		10.0	
13	13/01/1981		6.1	1.2	5.8	2.0	13.2	30.3		5.9	
14	14/01/1981		4.3	6.3	8.5	0.0	11.4	13.9		28.1	
15	15/01/1981		5.4	0.0	4.4	0.0	5.4	7.3		12.8	
16	16/01/1981		1.0	3.4	0.1	6.7	3.7	15.4		4.4	
17	17/01/1981		17.7	5.9	21.9	17.9	8.3	27.8		2.5	
18	18/01/1981		2.2	0.2	2.0	0.1	6.3	15.4		1.2	
19	19/01/1981		3.8	9.7	1.7	0.0	7.1	15.3		7.2	
20	20/01/1981		7.4	11.8	17.5	7.0	1.6	0.1		2.2	
21	21/01/1981		11.1	17.4	9.7	41.5	23.6	69.4		9.4	
...	...										
13135	17/12/2016		0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8		0.1	
13136	18/12/2016		0.1	2.4	0.9	1.1	0.0	0.5		0.0	
13137	19/12/2016		0.0	1.7	0.6	0.0	0.0	15.4		0.1	
13138	20/12/2016		0.0	4.7	12.8	38.5	1.1	44.1		0.1	
13139	21/12/2016		0.0	0.0	0.0	5.5	0.1	0.1		0.0	
13140	22/12/2016		10.0	6.2	0.3	2.2	13.5	17.4		2.0	
13141	23/12/2016		0.0	1.8	0.1	0.3	0.7	0.3		1.5	
13142	24/12/2016		0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2		0.0	
13143	25/12/2016		0.0	10.2	0.1	2.3	0.0	8.0		0.0	
13144	26/12/2016		0.8	2.2	2.2	8.5	0.4	2.7		3.5	
13145	27/12/2016		2.0	1.8	0.5	8.4	2.9	31.6		2.5	
13146	28/12/2016		9.9	1.6	4.5	6.4	8.2	17.8		11.5	
13147	29/12/2016		0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0		5.3	
13148	30/12/2016		5.8	0.0	5.8	16.9	3.3	108.5		0.1	
13149	31/12/2016		0.0	4.9	0.7	5.8	5.2	1.6		2.5	

Fuente: Elaboración propia en base a datos descargados de la precipitación PISCO\_Pd.

### 3.5.1.2. Precipitación mensual

Se identifica 54 estaciones meteorológicas tanto dentro y fuera de la cuenca del río Vilcanota. Asi como se muestra en la **Figura 40**.



**Figura 40.** Distribución espacial de las estaciones con precipitación mensual identificadas y seleccionadas en el área de estudio.

**3.5.1.2.1. SENAMHI**

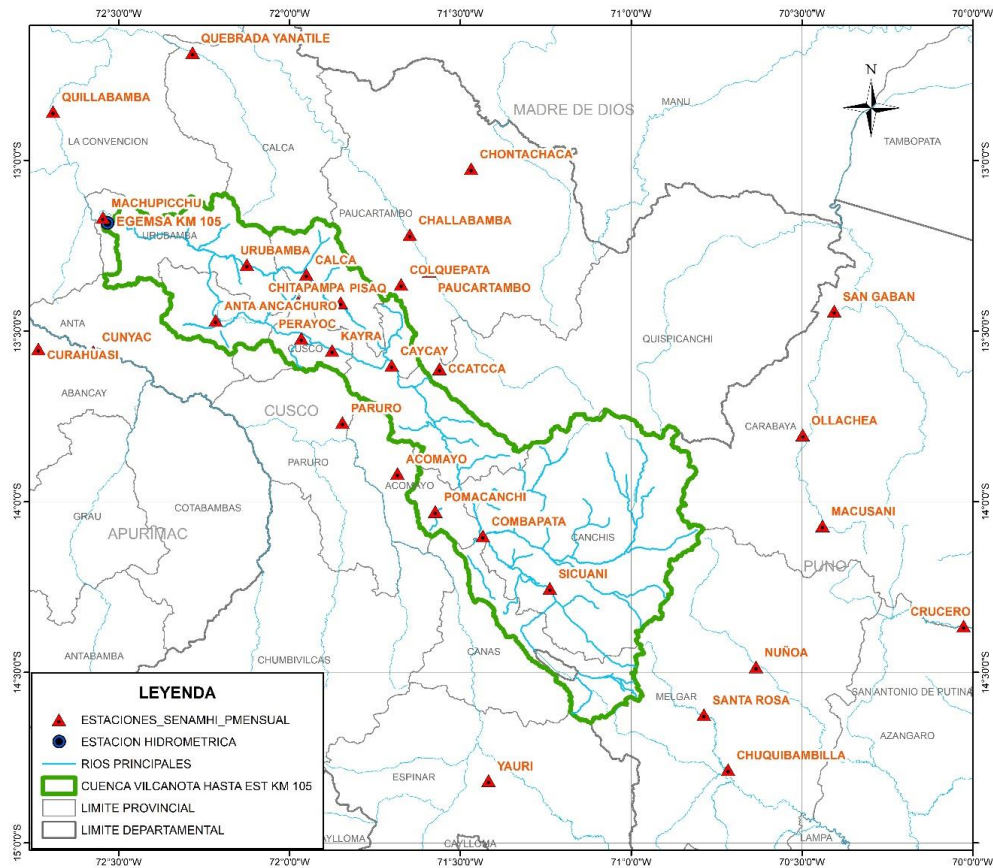
Los datos de precipitación pluvial mensuales, fueron obtenidos a solicitud del investigador de las estaciones meteorológicas administradas por SENAMHI, y 01 estación administrada por la UNSAAC (Est. Perayoc).

**Tabla 27.** Estaciones meteorológicas – Precipitación mensual.

N°	Código	Estación	Departamento	Provincia	Distrito	Longitud	Latitud	Altitud
1	156224	CUNYAC	APURIMAC	ABANCAY	CURAHUASI	-13.5600	-72.5739	2345
2	156306	COLQUEPATA	CUSCO	PAUCARTAMBO	COLQUEPATA	-13.3631	-71.6731	3729
3	156307	CHITAPAMPA	CUSCO	URUBAMBA	CHINCHERO	-13.4150	-71.9747	4306
4	156401	SAN GABAN	PUNO	CARABAYA	SAN GABAN	-13.4408	-70.4049	635
5	157404	NUÑO A	PUNO	MELGAR	NUÑO A	-14.4836	-70.6336	4013
6	606	QUILLABAMBA	CUSCO	LA CONVENCION	SANTA ANA	-12.8564	-72.6917	990
7	607	KAYRA	CUSCO	CUSCO	SAN JERÓNIMO	-13.5567	-71.8750	3219
8	654	QUEBRADA YANATILE	CUSCO	CALCA	YANATILE	-12.6836	-72.2836	1050
9	6670	CHALLABAMBA	CUSCO	PAUCARTAMBO	CHALLABAMBA	-13.2175	-71.6472	2740
10	6671	CHONTACHACA	CUSCO	PAUCARTAMBO	KOSÑIPATA	-13.0239	-71.4678	982
11	677	CURAHUASI	APURIMAC	ABANCAY	CURAHUASI	-13.5522	-72.7347	2763
12	679	MACHUPICCHU	CUSCO	URUBAMBA	MACHUPICCHU	-13.1669	-72.5459	2548
13	683	URUBAMBA	CUSCO	URUBAMBA	URUBAMBA	-13.3052	-72.1246	2850
14	684	ANTA ANCACHURO	CUSCO	ANTA	ZURITE	-13.4683	-72.2158	3340
15	685	CALCA	CUSCO	CALCA	CALCA	-13.3336	-71.9503	2926
16	686	PARURO	CUSCO	PARURO	PARURO	-13.7675	-71.8447	3084
17	687	ACOMAYO	CUSCO	ACOMAYO	ACOMAYO	-13.9169	-71.6836	3160
18	689	PAUCARTAMBO	CUSCO	PAUCARTAMBO	PAUCARTAMBO	-13.3244	-71.5906	3042
19	690	CCATCCA	CUSCO	QUISPICANCHI	CCATCCA	-13.6100	-71.5603	3729
20	695	OLLACHEA	PUNO	CARABAYA	OLLACHEA	-13.8039	-70.4971	2850
21	756	COMBAPATA	CUSCO	CANCHIS	COMBAPATA	-14.1000	-71.4333	3464
22	759	SICUANI	CUSCO	CANCHIS	SICUANI	-14.2536	-71.2372	3574
23	777	MACUSANI	PUNO	CARABAYA	MACUSANI	-14.0700	-70.4391	4345
24	809	CAYCAY	CUSCO	PAUCARTAMBO	CAYCAY	-13.6003	-71.7003	3150
25	812	POMACANCHI	CUSCO	ACOMAYO	POMACANCHI	-14.0281	-71.5728	3200
26	823	SANTA ROSA	PUNO	MELGAR	SANTA ROSA	-14.6238	-70.7865	3986
27	844	PISAQ	CUSCO	CALCA	PISAQ	-13.4161	-71.8497	2950
28	704	PERAYOC	CUSCO	CUSCO	CUSCO	-13.5211	-71.9647	3365
29	757	YAURI	CUSCO	ESPINAR	ESPINAR	-14.8169	-71.4169	3927
30	764	CHUQUIBAMBILLA	PUNO	MELGAR	UMACHIRI	-14.7847	-70.7158	3971
31	7415	CRUCERO	PUNO	CARABAYA	CRUCERO	-14.3642	-70.0259	4183

Fuente: SENAMHI –UNSAAC.





**Figura 41.** Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas – precipitación mensual.

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI.

### 3.5.1.2.2. CHIRPS

Para la presente investigación se utilizaron los datos CHIRPS de la versión 2.0 a 0.05° de resolución espacial mensual comprendidos entre 1981-2017.

Se descargaron los datos de precipitación del CHIRPS mensual, disponibles con acceso libre de ([ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global\\_monthly/](ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global_monthly/)).

← → ↻ ⓘ No seguro | [ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global\\_monthly/netcdf/](ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global_monthly/netcdf/)

## Índice de /pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global\_monthly/netcdf/

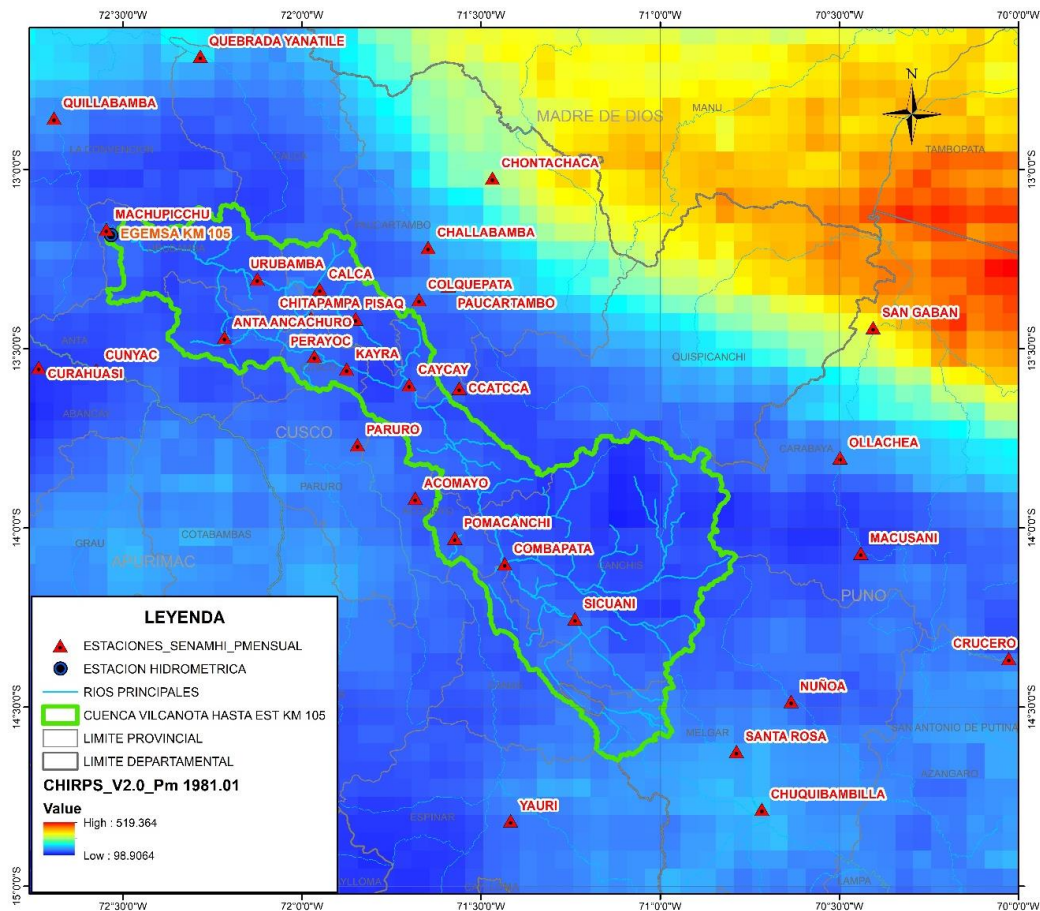
[directorio principal]

Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
<a href="#">chirps-v2.0.monthly.nc</a>	6.0 GB	18/03/19 17:57:00

**Figura 42.** Página web de acceso para la descarga de datos CHIRPS-PMENSUAL.

Fuente: [ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global\\_monthly/](ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global_monthly/).

Se consideraron las grillas del CHIRPS coincidentes con la ubicación de las estaciones pluviométricas, los cuales en adelante serán nombrados como estaciones CHIRPS.



**Figura 43.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación CHIRPS.

FUENTE: elaboración propia en base a información satelital CHIRPS.



Cada pixel representa un área de la superficie terrestre y tiene como valor la precipitación mensual (mm/día). La resolución de cada pixel es de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ , (aproximadamente 5.5 x 5.5 km).

Estos datos se encuentran comprimidos en formato NetCDF; luego mediante un código de programación en el lenguaje R se extrajeron los datos correspondientes, similar a la extracción de datos de precipitación diaria CHIRPS.

Finalmente, los datos de precipitación diaria estimados por satélite CHIRPS, se organizaron en hojas de cálculo según se muestra.



**Tabla 28.** Precipitación mensual CHIRPS organizada – Estación Kayra.

	<p><b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b>  <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b></p>	
---	--	---

**PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm) - CHIRPS**

<b>LATITUD</b>	13°	33'	24	S
<b>LONGITU</b>	71°	52'	30	W
<b>ALTITUD</b>	3219 m.s.n.m.			

<b>DEPARTAMEN</b>	CUSCO
<b>PROVINCIA</b>	CUSCO
<b>DISTRITO</b>	SAN JERÓNIMO

<b>ESTACIÓN METEOROLÓGICA: KAYRA</b>													
N°	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	1981	147.5	114.2	87.5	32.6	3.5	2.5	1.9	4.9	22.7	73.7	101.0	117.1
2	1982	145.1	101.4	117.7	22.8	3.4	3.2	2.3	4.6	13.4	37.0	104.2	51.9
3	1983	67.3	52.1	55.7	28.0	4.0	2.6	2.0	4.0	10.6	16.9	46.1	78.5
4	1984	182.7	179.7	73.7	46.7	5.9	3.4	3.4	5.7	9.5	48.3	78.4	74.2
5	1985	81.9	103.6	91.8	38.0	7.8	2.9	2.2	5.8	21.4	54.6	103.7	103.1
6	1986	96.3	88.9	84.9	43.1	4.0	2.4	1.9	5.6	10.4	22.0	39.6	56.7
7	1987	147.8	82.6	53.0	15.3	7.0	3.3	2.6	2.8	7.7	21.1	85.9	86.4
8	1988	103.6	91.2	124.8	36.1	3.8	2.2	1.4	2.7	10.4	18.3	38.5	94.8
9	1989	121.8	96.8	86.9	22.7	4.2	2.5	2.4	4.7	7.7	33.8	55.9	61.6
10	1990	92.3	69.8	52.3	38.4	4.0	5.3	1.8	3.7	12.7	55.3	97.1	88.0
11	1991	60.1	119.5	78.3	25.2	6.7	4.2	1.4	3.0	9.2	32.9	51.6	74.5
12	1992	94.8	76.2	47.0	25.9	2.7	4.9	1.7	8.2	6.9	38.2	66.5	67.9
13	1993	140.4	109.4	54.6	33.4	3.1	2.6	2.1	6.0	10.5	46.9	106.9	146.1
14	1994	145.3	132.0	119.3	38.9	5.6	2.3	2.2	2.9	14.6	50.9	46.3	129.5
15	1995	101.4	55.8	109.1	12.1	3.7	2.6	2.2	3.5	17.5	29.2	49.4	81.1
16	1996	142.9	102.8	65.2	39.5	6.0	2.2	1.5	6.2	8.0	44.1	54.6	126.0
17	1997	122.3	124.8	93.7	15.0	4.1	2.1	1.4	5.4	8.3	31.0	103.9	117.0
18	1998	70.6	102.4	60.4	10.3	2.5	2.8	1.5	3.2	8.8	31.8	66.5	75.6
19	1999	113.9	105.6	87.4	43.5	5.2	2.5	1.7	3.9	25.3	33.8	55.0	125.5
20	2000	138.0	113.0	101.8	23.0	3.8	3.6	1.9	4.5	12.4	53.4	41.9	92.8
21	2001	214.1	146.1	150.4	31.7	9.8	2.3	5.3	9.1	13.2	76.8	91.8	91.6
22	2002	107.3	188.0	109.2	41.8	4.4	3.2	5.2	4.7	16.7	61.7	87.4	135.1
23	2003	150.0	151.9	120.2	43.4	4.8	3.3	1.5	8.4	10.5	35.5	41.4	117.9
24	2004	156.3	106.3	81.3	26.1	3.7	5.1	5.4	7.6	16.5	38.8	67.8	102.8
25	2005	96.8	106.6	83.6	33.9	3.9	2.1	1.7	4.2	8.8	31.6	56.0	85.7
26	2006	164.9	123.6	99.8	46.7	2.7	4.5	2.4	5.8	9.8	62.4	84.0	127.5
27	2007	107.9	108.3	130.4	45.5	6.2	2.1	3.3	3.4	8.4	50.1	71.4	107.3
28	2008	140.7	141.9	72.0	21.8	5.2	4.6	1.6	4.8	15.4	57.5	67.2	139.2
29	2009	119.8	111.9	81.1	21.1	3.3	2.1	2.3	3.5	12.4	29.9	130.2	107.9
30	2010	233.8	122.0	124.9	16.4	4.0	2.6	2.0	4.3	13.0	68.0	44.2	182.1
31	2011	126.7	186.2	125.8	49.6	5.9	2.4	1.9	4.3	24.4	45.0	81.7	119.7
32	2012	116.2	156.3	122.1	53.6	4.2	2.9	2.0	3.1	28.3	25.8	110.4	185.1
33	2013	148.9	127.7	116.8	13.9	8.4	4.4	2.4	7.5	16.8	98.3	82.8	160.7
34	2014	166.5	124.9	72.6	41.4	9.9	2.8	2.3	5.9	22.2	62.3	34.7	118.1
35	2015	125.2	144.0	93.0	46.1	11.9	4.4	4.0	6.3	16.8	24.9	46.5	137.0
36	2016	97.1	97.0	100.1	41.4	7.5	2.8	4.4	20.3	30.3	75.4	30.9	134.0
37	2017	120.6	127.2	138.0	44.6	13.7	2.8	3.2	6.4	22.7	69.8	112.3	148.7

Fuente: Elaboración propia en base a datos descargados de la precipitación CHIRPS.

### 3.5.1.2.3. CHIRPM

Las precipitaciones del producto CHIRPM (CHIRP modificado), disponibles libremente a escala espacial de  $0.1^\circ$  y escala temporal mensual, se obtienen de <https://piscoprec.github.io/>. Con periodo de información entre los años 1981-2016.

The screenshot shows the website <https://piscoprec.github.io>. The navigation bar includes 'Inicio', 'Datos', 'Changelog', 'Descargar PISCOp', and 'Citar'. A sidebar menu on the left lists 'Presentación', 'Introducción', and '¿Por qué usar PISCOp?'. The main content area features a list of download options for various data formats and time scales, such as 'Descargar pluviómetros diarios', 'Descargar CHIRPMm GEOTIFF', and 'Descargar PISCOpd NETCDF4'. To the right, there is a map titled 'Precipitación' showing precipitation data for Peru, with a color scale on the right side. Below the map, there is a descriptive paragraph in Spanish and a 'Presentación' section.

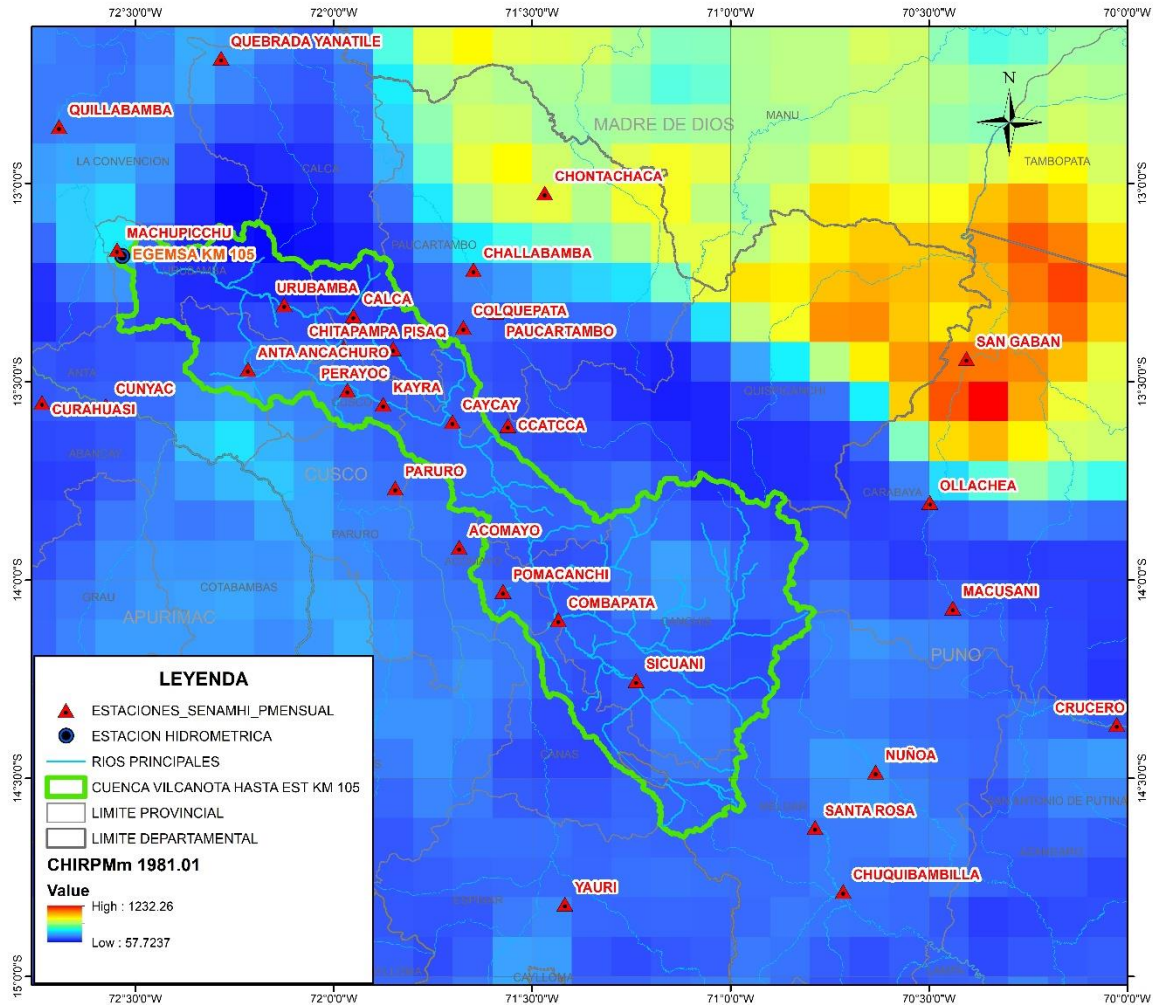
Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations: Precipitation product (PISCOp V2.1). PISCOp V2.1 es una nueva base de datos de precipitación disponible para todo Perú del 1981 a la actualidad a paso de tiempo diario y mensual, a una resolución espacial de  $0.1^\circ$  y con una latencia de subida de aproximadamente 8 semanas.

**Presentación**

Los estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico tienen el propósito de generar información sobre las características climáticas e hidrológicas que contribuyan a la comprensión de la hidroclimatología de las cuencas y la vigilancia de eventos extremos. La producción de estos productos demandan gran inversión de tiempo en el tratamiento y crítica de los datos para asegurar buena calidad, continuidad temporal de las series pluviométricas, homogeneidad, factores que son una limitante para atender con oportunidad diferentes demandas de información para diferentes usuarios; por otro lado la baja

**Figura 44.** Página web de acceso para la descarga de datos CHIRPM-PMENSUAL (CHIRPMm).

Fuente: <https://piscoprec.github.io/>.



**Figura 45.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación CHIRPMm.



Fuente: Elaboración propia en base a información satelital CHIRPMm.

Cada pixel representa un área de la superficie terrestre y tiene como valor la precipitación mensual (mm/mes). La resolución de cada pixel es de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , (aproximadamente 11 x 11 km).

Estos datos se encuentran comprimidos en formato NetCDF; luego mediante un código de programación en R se extrajeron los datos correspondientes, similar a la extracción de las precipitaciones diarias CHIRPS.

Finalmente, los datos de precipitación diaria estimados por satélite CHIRPMm, se organizaron en hojas de cálculo según se muestra.

**Tabla 29.** Precipitación diaria CHIRPMm organizada – Estación Kayra.

	<p><b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b>  <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b></p>	
---	--	---

**PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm) - CHIRPMm**

<b>LATITUD</b>	13°	33'	24	S
<b>LONGITU</b>	71°	52'	30	W
<b>ALTITUD</b>	3219 m.s.n.m.			

<b>DEPARTAMEN</b>	CUSCO
<b>PROVINCIA</b>	CUSCO
<b>DISTRITO</b>	SAN JERÓNIMO

<b>ESTACIÓN METEOROLÓGICA: KAYRA</b>													
N°	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	1981	190.5	105.5	98.8	26.4	6.9	4.5	2.5	6.2	17.9	61.9	122.2	121.9
2	1982	139.3	153.9	144.3	26.1	6.7	4.7	2.8	6.3	19.5	52.6	122.0	82.9
3	1983	149.9	94.4	109.9	39.3	7.2	4.7	2.5	6.4	15.6	27.3	72.8	106.1
4	1984	140.1	121.7	120.2	53.8	17.4	5.6	4.3	6.2	15.8	70.5	113.0	105.7
5	1985	179.2	102.7	116.1	50.9	9.3	4.7	3.7	12.7	25.6	51.1	74.9	93.2
6	1986	154.9	110.5	134.8	46.1	7.0	4.7	2.5	8.0	15.6	40.9	47.2	80.5
7	1987	142.5	108.3	116.4	22.2	14.7	4.7	2.5	6.2	12.7	34.5	80.7	103.2
8	1988	113.2	60.8	106.0	24.9	7.5	4.7	2.5	6.2	25.3	41.4	56.9	103.4
9	1989	150.8	108.0	143.6	27.5	6.1	4.7	4.3	7.3	19.6	40.5	80.5	110.1
10	1990	122.6	95.4	121.4	28.4	9.2	4.7	2.5	6.4	22.6	78.4	86.0	82.0
11	1991	145.4	115.9	124.3	31.6	9.0	5.0	2.5	6.2	14.9	49.0	61.1	78.0
12	1992	155.2	104.0	85.4	33.9	5.6	7.2	3.3	10.2	15.5	66.5	68.0	78.2
13	1993	146.8	126.4	100.4	51.4	5.5	4.7	2.5	6.1	19.3	59.5	87.2	129.4
14	1994	177.6	117.4	101.0	61.7	9.5	4.7	3.6	6.2	17.1	51.6	66.5	116.8
15	1995	139.8	76.3	149.4	26.4	9.5	5.2	3.3	7.2	26.1	37.8	75.1	74.3
16	1996	179.3	108.9	103.2	37.4	9.7	4.7	2.5	7.3	13.1	57.3	61.2	98.8
17	1997	167.3	144.3	79.9	22.2	6.8	4.7	2.5	6.3	13.0	49.4	79.4	119.0
18	1998	113.0	125.3	107.7	25.2	5.8	4.7	2.5	6.2	18.6	38.6	80.1	107.3
19	1999	130.8	116.0	138.9	44.5	10.3	6.3	2.5	6.7	28.7	45.5	81.1	129.9
20	2000	148.6	109.2	149.2	47.1	6.5	5.0	2.5	7.6	28.1	55.5	77.1	89.2
21	2001	176.8	119.1	128.4	38.3	13.3	5.4	4.2	8.0	27.3	64.6	84.9	80.6
22	2002	117.7	178.6	117.7	54.8	5.8	5.2	3.0	6.6	19.0	54.6	72.7	114.8
23	2003	185.8	136.9	132.0	30.7	9.4	4.7	2.5	6.3	14.9	51.7	57.0	98.4
24	2004	164.1	100.2	112.3	36.6	6.7	4.9	3.4	9.5	21.2	47.0	78.1	103.0
25	2005	146.0	71.9	114.6	37.2	9.5	4.7	2.7	6.3	17.3	48.1	70.0	105.8
26	2006	150.3	133.1	138.2	53.7	6.3	5.4	4.3	7.8	21.9	53.2	80.9	101.3
27	2007	140.1	151.6	155.5	51.6	9.0	4.7	4.7	6.2	22.2	65.3	61.3	118.2
28	2008	204.6	136.5	113.3	47.2	6.8	6.5	2.5	6.9	18.7	44.8	63.0	122.4
29	2009	140.8	122.4	125.8	25.1	6.3	4.7	2.7	6.2	22.3	59.1	106.8	117.2
30	2010	197.6	120.3	125.8	31.4	6.8	4.8	2.5	7.0	28.3	76.4	69.0	153.8
31	2011	183.7	170.5	122.6	53.3	12.2	4.7	2.9	9.0	15.7	51.6	71.6	101.6
32	2012	147.3	142.8	111.2	42.5	5.8	4.7	2.5	5.8	40.1	54.0	96.5	121.5
33	2013	132.4	111.9	117.6	21.7	13.0	6.1	3.0	9.6	21.3	85.6	82.7	117.6
34	2014	166.4	162.4	134.2	44.3	12.3	5.8	3.3	8.8	22.2	55.0	76.8	101.5
35	2015	125.9	131.7	124.9	52.1	13.7	6.1	4.1	7.6	18.9	29.1	62.0	79.2
36	2016	134.3	63.7	113.3	21.8	6.9	5.8	3.8	11.0	21.5	45.2	45.5	109.7
37	2017												

Fuente: Elaboración propia en base a datos descargados de la precipitación CHIRPMm.

### 3.5.1.2.4. PISCO

El conjunto de datos de precipitación PISCO V2.1, disponible de acceso libre para el Perú, con resolución espacial de  $0.1^\circ$ , para el periodo de 1981-2016, descargado de <https://piscoprec.github.io/>.

Presentación

- Introducción
- ¿Porqué usar PISCO?

Descargar pluviómetros diarios

Descargar pluviómetros diarios completados

Descargar pluviómetros mensuales

Descargar pluviómetros mensuales completados

Descargar CHPclim

Descargar TRMM2A25

Descargar PISCOplim

Descargar CHIRPMm GEOTIFF

Descargar CHIRPMm NETCDF

Descargar PISCOpm GEOTIFF

Descargar PISCOpm NETCDF

Descargar CHIRPMd GEOTIFF

Descargar CHIRPMd NETCDF4

Descargar P-PISCOpd GEOTIFF

Descargar P-PISCOpd NETCDF

Descargar PISCOpd GEOTIFF

Descargar PISCOpd NETCDF4

Precipitación

Índice de Precipitación Normal en % (1980 a Meses Febrero 2017)

Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations: Precipitation product (PISCOp V2.1). PISCOp V2.1 es una nueva base de datos de precipitación disponible para todo Perú del 1981 a la actualidad a paso de tiempo diario y mensual, a una resolución espacial de  $0.1^\circ$  y con una latencia de subida de aproximadamente 8 semanas.

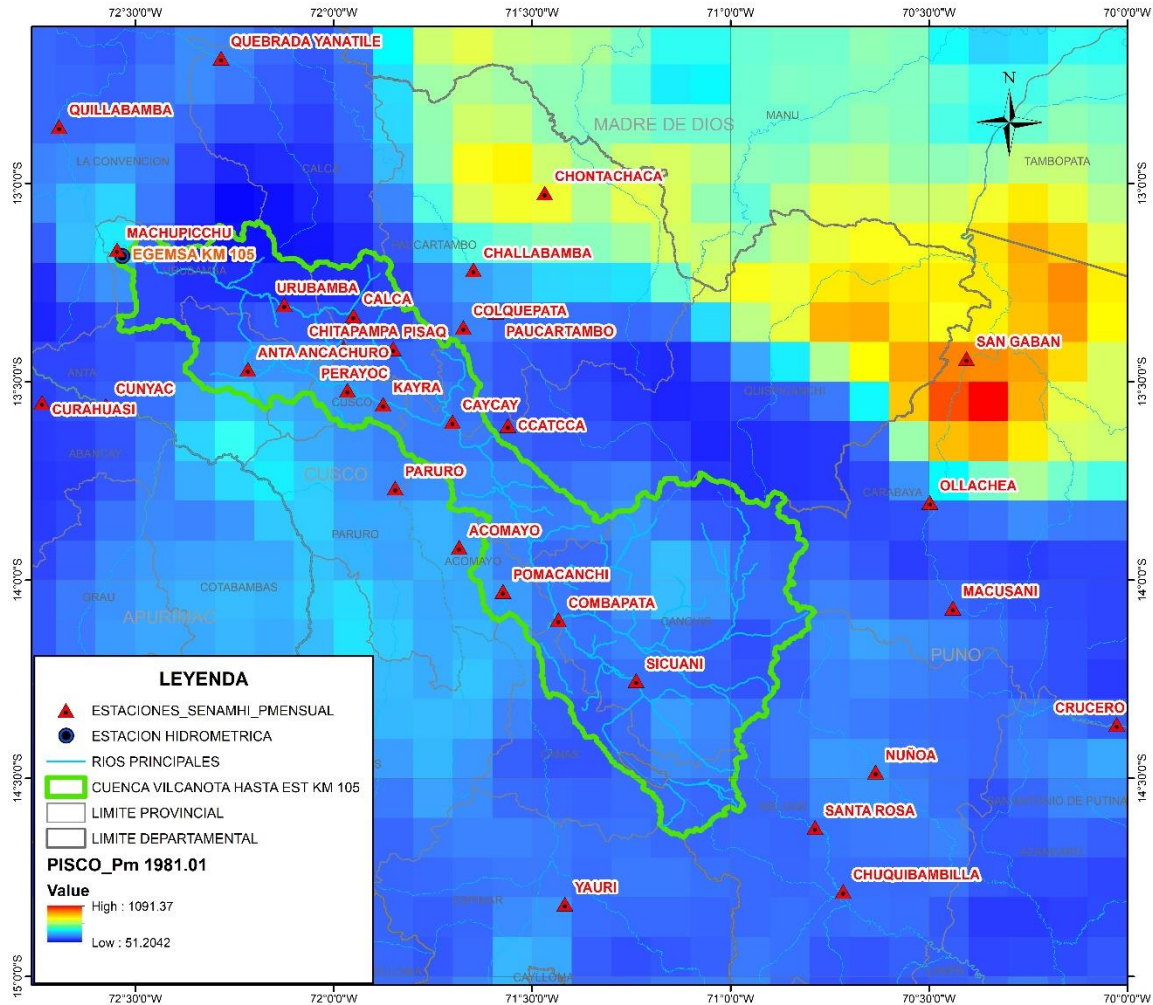
#### Presentación

Los estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico tienen el propósito de generar información sobre las características climáticas e hidrológicas que contribuyan a la comprensión de la hidroclimatología de las cuencas y la vigilancia de eventos extremos. La producción de estos productos demandan gran inversión de tiempo en el tratamiento y crítica de los datos para asegurar buena calidad, continuidad temporal de las series pluviométricas, homogeneidad, factores que son una limitante para atender con oportunidad diferentes demandas de información para diferentes usuarios; por otro lado la baja

**Figura 46.** Página web de acceso para la descarga de datos PISCO (PISCO\_Pm).

Fuente: <https://piscoprec.github.io/>.





**Figura 47.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pixeles de la precipitación PISCO\_Pm.



Fuente: Elaboración propia en base a información satelital PISCO\_Pm.

Cada pixel representa un área de la superficie terrestre y tiene como valor la precipitación mensual (mm/mes). La resolución de cada pixel es de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , (aproximadamente 11 x 11 km).

Estos datos se encuentran comprimidos en formato NetCDF; luego mediante un código de programación en R se extrajeron los datos correspondientes, similar a la extracción de datos de precipitación diaria CHIRPS.

Finalmente, los datos de precipitación diaria estimados por satélite PISCO\_Pm, se organizaron en hojas de cálculo según se muestra.

**Tabla 30.** Precipitación diaria PISCO\_Pm organizada – Estación Kayra.

	<p><b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b>  <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b></p>	
---	--	---

**PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm) - PISCO\_Pm**

<b>LATITUD</b>	13°	33'	24	S
<b>LONGITU</b>	71°	52'	30	W
<b>ALTITUD</b>	3219 m.s.n.m.			

<b>DEPARTAMEN</b>	CUSCO
<b>PROVINCIA</b>	CUSCO
<b>DISTRITO</b>	SAN JERONIMO

<b>ESTACIÓN METEOROLÓGICA: KAYRA</b>													
N°	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	1981	220.2	84.9	126.6	55.0	2.1	2.7	0.0	8.9	33.8	74.2	116.3	140.6
2	1982	167.6	111.6	141.5	47.7	0.4	5.7	1.3	5.1	17.3	45.0	117.2	85.8
3	1983	117.3	79.0	55.0	27.6	4.8	4.6	0.0	1.6	5.0	24.9	42.2	92.7
4	1984	189.2	150.9	72.3	70.8	0.3	2.0	1.3	11.6	4.0	105.5	67.0	103.1
5	1985	125.4	117.1	77.0	36.9	17.3	10.9	1.0	0.0	42.7	65.5	112.5	133.4
6	1986	85.7	89.0	128.7	60.2	5.8	0.0	2.4	3.7	8.9	22.4	64.0	89.4
7	1987	174.7	91.5	51.4	15.3	2.6	1.7	11.2	0.0	12.1	33.0	92.7	104.1
8	1988	152.1	86.5	162.5	98.4	5.8	0.0	0.0	0.3	11.7	35.6	49.5	102.0
9	1989	142.3	127.3	118.3	43.6	6.8	5.6	0.0	6.3	25.0	38.9	63.4	76.5
10	1990	143.1	89.0	60.8	51.5	6.8	29.9	0.0	5.3	12.6	71.3	92.5	71.2
11	1991	93.3	131.6	71.9	38.3	9.7	6.6	1.1	0.0	20.8	44.6	78.3	94.0
12	1992	107.7	103.5	88.9	15.3	0.4	8.0	0.0	18.8	7.9	54.4	110.3	61.8
13	1993	179.6	106.9	83.0	27.1	1.0	0.2	1.9	8.8	15.9	47.3	94.6	134.0
14	1994	140.6	154.4	147.9	46.1	10.8	0.0	0.0	0.1	20.9	45.4	46.3	119.4
15	1995	123.7	95.9	101.9	21.0	0.4	0.0	1.2	1.4	26.5	27.1	68.8	101.7
16	1996	139.8	101.2	69.6	34.4	8.5	0.0	0.0	9.4	20.0	58.9	57.8	108.2
17	1997	127.8	132.5	114.4	28.5	5.6	0.0	0.0	7.7	12.5	40.8	112.7	154.1
18	1998	114.5	146.6	28.1	26.4	1.0	2.3	0.0	1.1	4.4	50.6	46.1	62.5
19	1999	99.5	100.7	94.6	49.1	1.8	2.2	0.8	0.2	43.1	21.8	40.5	120.2
20	2000	193.1	135.0	117.4	14.0	3.5	5.9	2.1	5.2	9.3	58.0	27.3	83.6
21	2001	246.2	172.8	142.3	36.8	12.8	0.2	14.4	12.8	19.8	54.9	90.7	87.5
22	2002	125.6	179.5	116.9	23.3	11.3	2.0	22.3	3.6	14.4	71.1	93.3	126.4
23	2003	164.0	141.6	155.1	28.4	3.2	6.0	0.0	18.5	4.9	33.3	25.5	122.9
24	2004	174.2	119.7	70.7	22.4	5.2	19.5	14.4	9.0	24.1	32.4	66.1	83.4
25	2005	130.9	116.8	107.7	34.2	3.0	0.1	1.1	3.9	5.6	36.1	61.0	102.0
26	2006	203.5	111.4	141.6	45.0	0.2	4.3	0.0	9.7	7.7	71.4	75.1	132.9
27	2007	144.4	70.2	114.6	83.3	5.2	0.0	3.4	0.2	1.3	49.2	72.6	86.1
28	2008	122.8	113.0	60.0	11.9	9.4	3.3	0.0	3.9	13.6	53.8	88.6	136.8
29	2009	119.6	106.9	76.0	22.7	5.3	0.0	3.6	1.1	14.1	9.2	100.2	90.4
30	2010	240.0	138.9	123.4	13.7	1.4	0.2	1.4	4.8	8.2	63.6	39.4	159.3
31	2011	114.2	181.6	131.5	65.9	3.4	3.6	4.4	0.2	38.7	43.0	59.2	113.9
32	2012	86.4	138.3	40.2	37.6	4.0	1.4	0.1	0.3	18.4	17.8	124.7	171.5
33	2013	182.7	140.5	80.6	16.4	12.3	5.5	2.2	11.8	7.3	108.0	80.9	152.3
34	2014	167.3	116.7	55.8	43.2	9.5	0.1	2.4	4.8	12.3	73.0	35.5	134.0
35	2015	159.2	135.8	68.6	78.4	15.3	1.7	8.3	6.1	10.2	20.7	55.7	121.1
36	2016	99.8	144.8	53.8	25.7	4.3	0.4	4.6	0.2	10.4	70.7	29.4	80.0
37	2017												

Fuente: Elaboración propia en base a datos descargados de la precipitación PISCO\_Pm.



### 3.6. Procedimientos de Análisis de datos

La cuenca se considera la unidad territorial adecuada para la gestión integrada del agua porque es la principal forma terrestre dentro del ciclo hidrológico que capta y concentra la oferta del agua proveniente de la precipitación. Además de esta condición física y biológica básica, en la cuenca se genera una interrelación e interdependencia (externalidades) entre los usos y usuarios de agua. (Fernandez & SENAMHI, 2016).

Se delimita la cuenca en referencia.

#### 3.6.1. Descripción general de la cuenca

##### 3.6.1.1. Ubicación geográfica y política

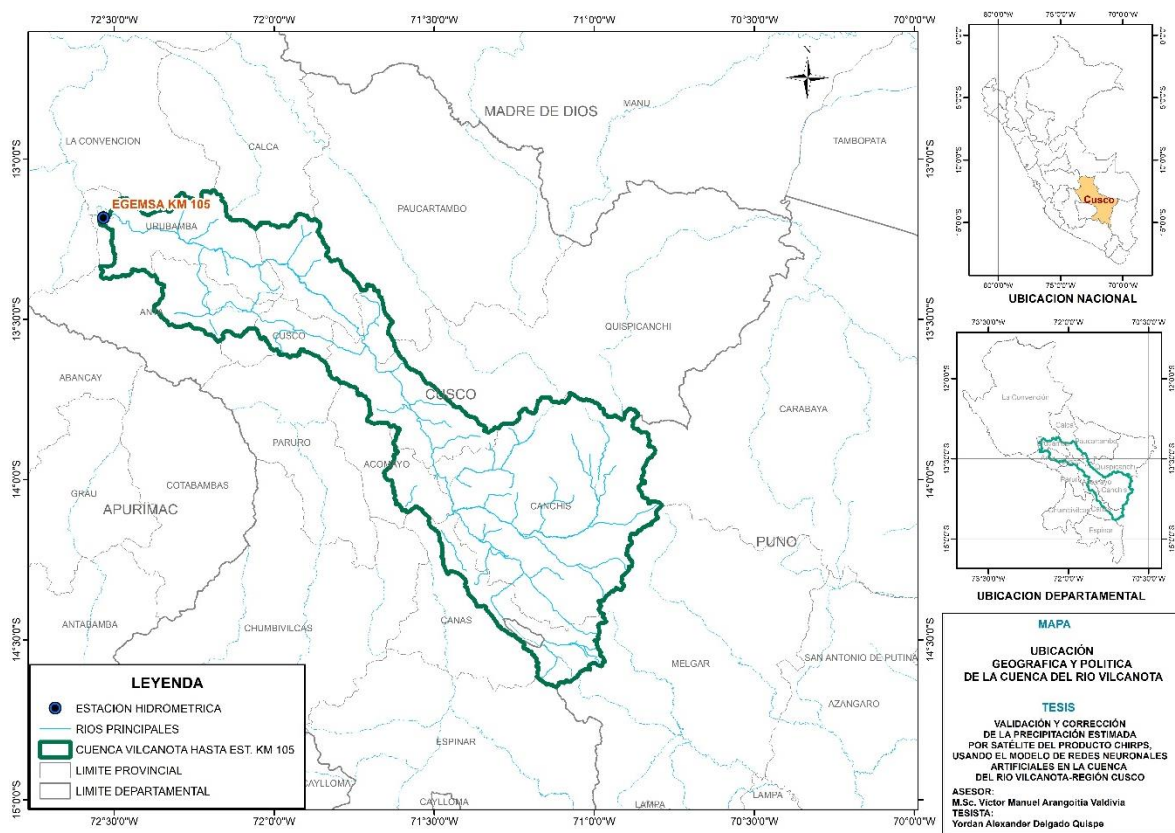


Figura 48. Ubicación geográfica y política de la cuenca del río Vilcanota.

Tabla 31. Provincias y distritos de la cuenca del Vilcanota .

Provincia	Distritos							
<b>Canchis</b>	Sicuani	Combapata	Checacupe	Marangani	Pitumarca	San Pablo	San Pedro	Tinta
<b>Canas</b>	Langui	Layo	Pampamarca	Tupac Amaru	Yanaoca			
<b>Acomayo</b>	Acopia	Mosocllacta	Pomacanchi	Sangarará				
<b>Quispicanchis</b>	Urcos	Andahuaylillas	Cusipata	Huaro	Lucre	Oropesa	Quiquijana	
<b>Cusco</b>	Cusco	Poroy	San Jeronimo	San Sebastian	Santiago	Saylla		
<b>Paucartambo</b>	Colquepata	Huancarani	Caycay					
<b>Anta</b>	Ancahuasi	Zurite	Anta	Huarocondo	Pucyura	Cachimayo		
<b>Calca</b>	Calca	Lamay	Coya	Pisac	Taray	San Salvador		
<b>Urubamba</b>	Chinchero	Huayllabamba	Yucay	Maras	Urubamba	Ollantaytambo	Machupicchu	

### 3.6.1.2. Ubicación hidrográfica

El río Vilcanota tiene sus nacientes en el abra La Raya a una altitud aproximada de 4,320 m.s.n.m. discurrendo sus aguas en dirección Noroeste, hasta su curso medio paralelo entre los ríos Apurímac y Paucartambo. El río Vilcanota a la altura de la localidad de Urubamba adopta el nombre del río Urubamba, aguas abajo se convierte en río Ucayali, el cual con este nombre desemboca en la vertiente del Amazonas (PN-PMI, 1979).

### 3.6.1.3. Codificación de la cuenca – Metodo Pfastetter

La cuenca del río Vilcanota que forma parte de la vertiente del Amazonas forma parte de las unidades Hidrográficas las cuales fueron identificadas y delimitadas de acuerdo a la clasificación Pfastetter como sigue:

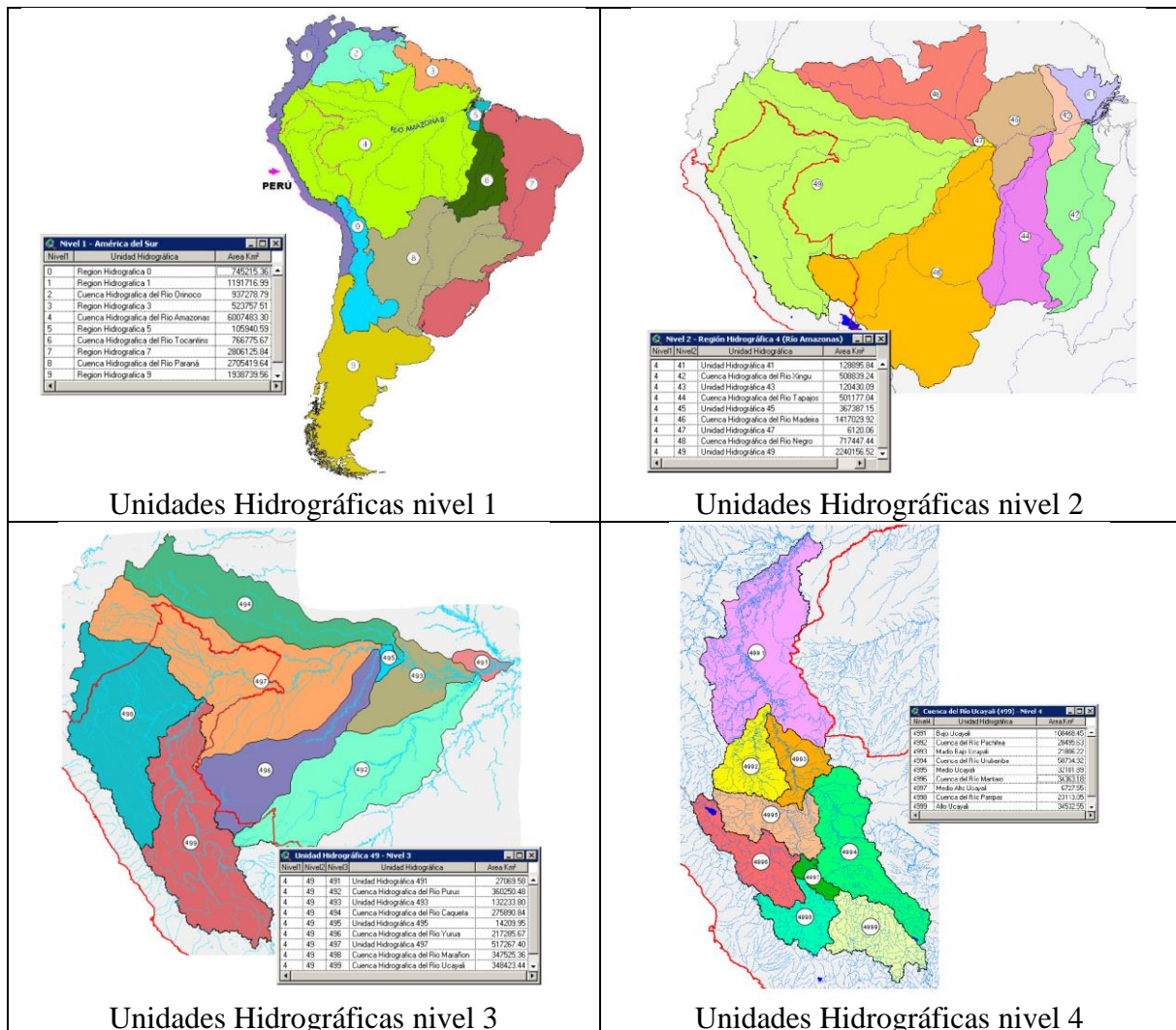
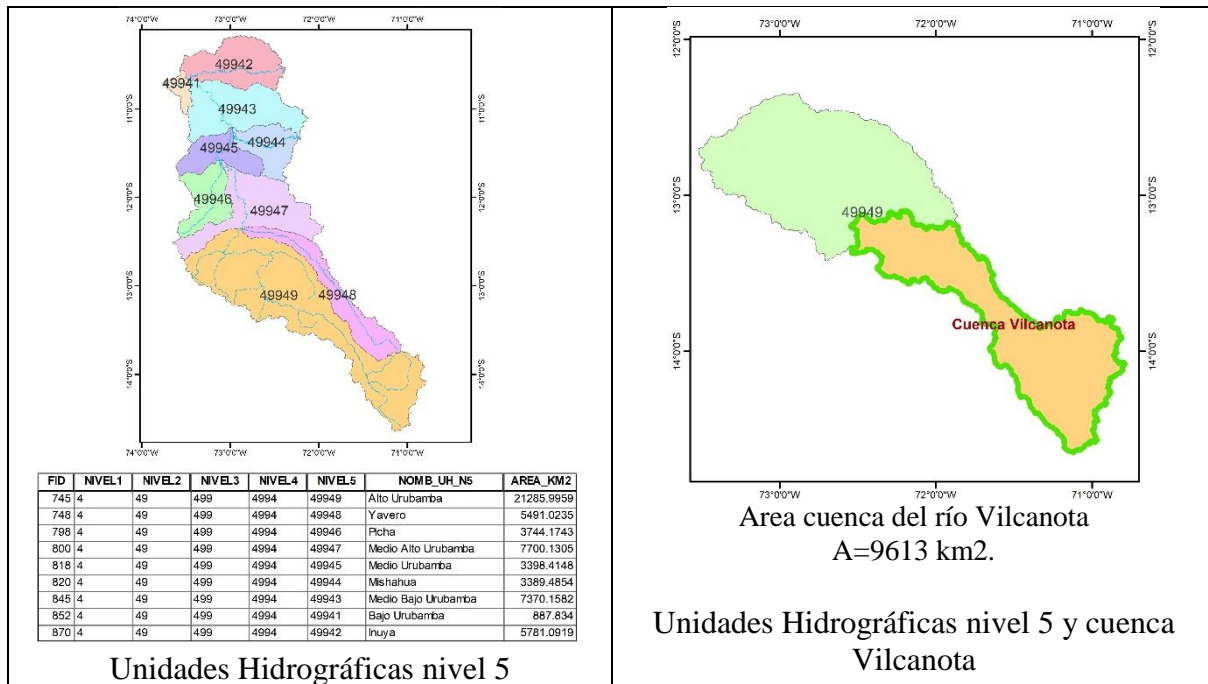


Figura 49. Unidades Hidrográficas nivel 1 hasta nivel 4.

Fuente: ((ANA), 2012).



**Figura 50.** Unidades Hidrográficas nivel 5 y ubicación de cuenca Vilcanota.

### 3.6.1.4. Características de la cuenca

Según se recopila de la investigación de Fernandez & SENAMHI (2016), El área de la cuenca del Vilcanota es de 9613 km<sup>2</sup>, lo cual se caracteriza por la presencia de pequeños glaciares, terrenos con pendientes pronunciadas y de gran altitud con un rango de elevación entre 2124 y 6309 m.s.n.m. ecosistemas como páramos y punas.

Según el Modelo Digital de Elevación (MDE), con resolución de 30 m, descargado de <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>, mostrada de manera general en la **Figura 51**, ubicando la zona de estudio de la presente investigación y la **Figura 52**, donde se indica la variación de la elevación en toda la cuenca del río Vilcanota desde un mínimo de 2117 m.s.n.m. hasta un máximo de 6324 m.s.n.m.



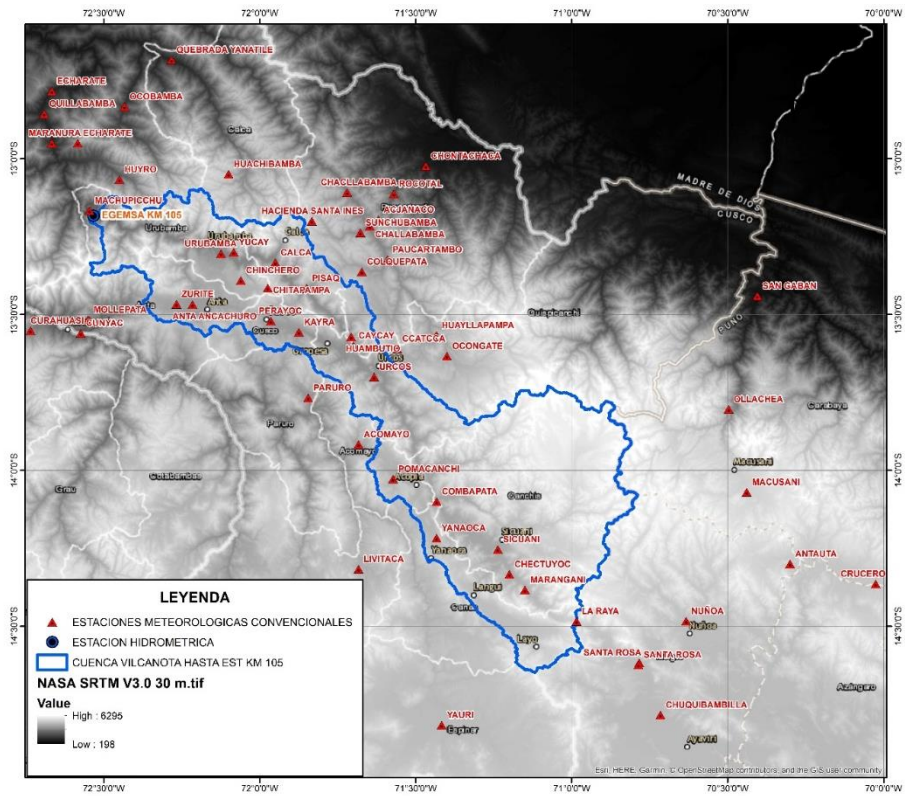


Figura 51. Ubicación de la zona de estudio según el Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

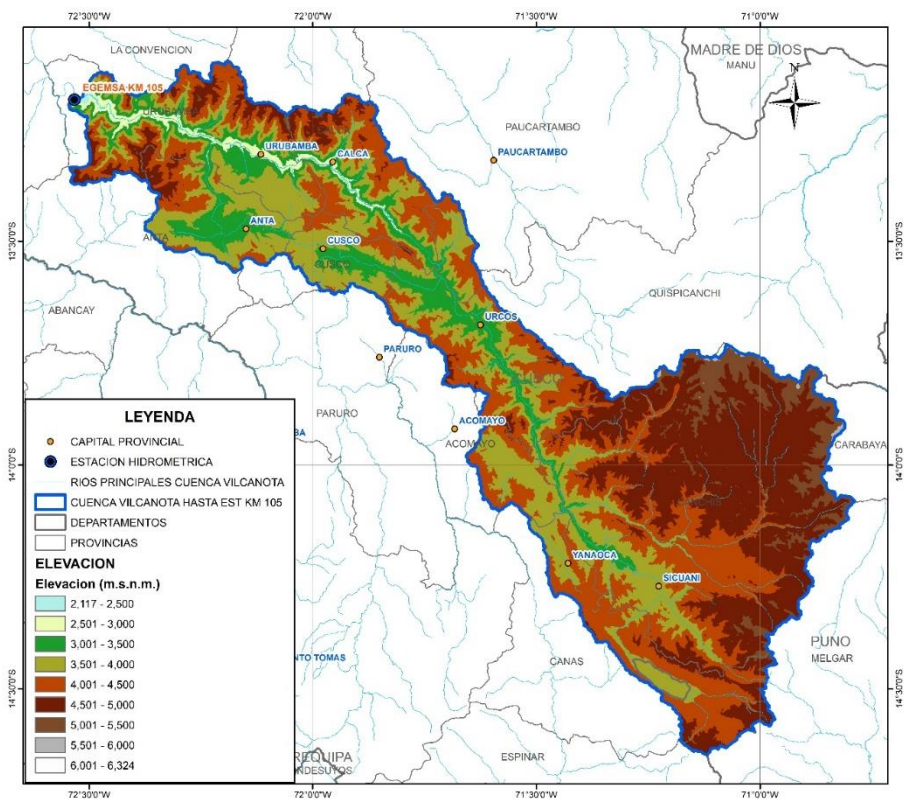


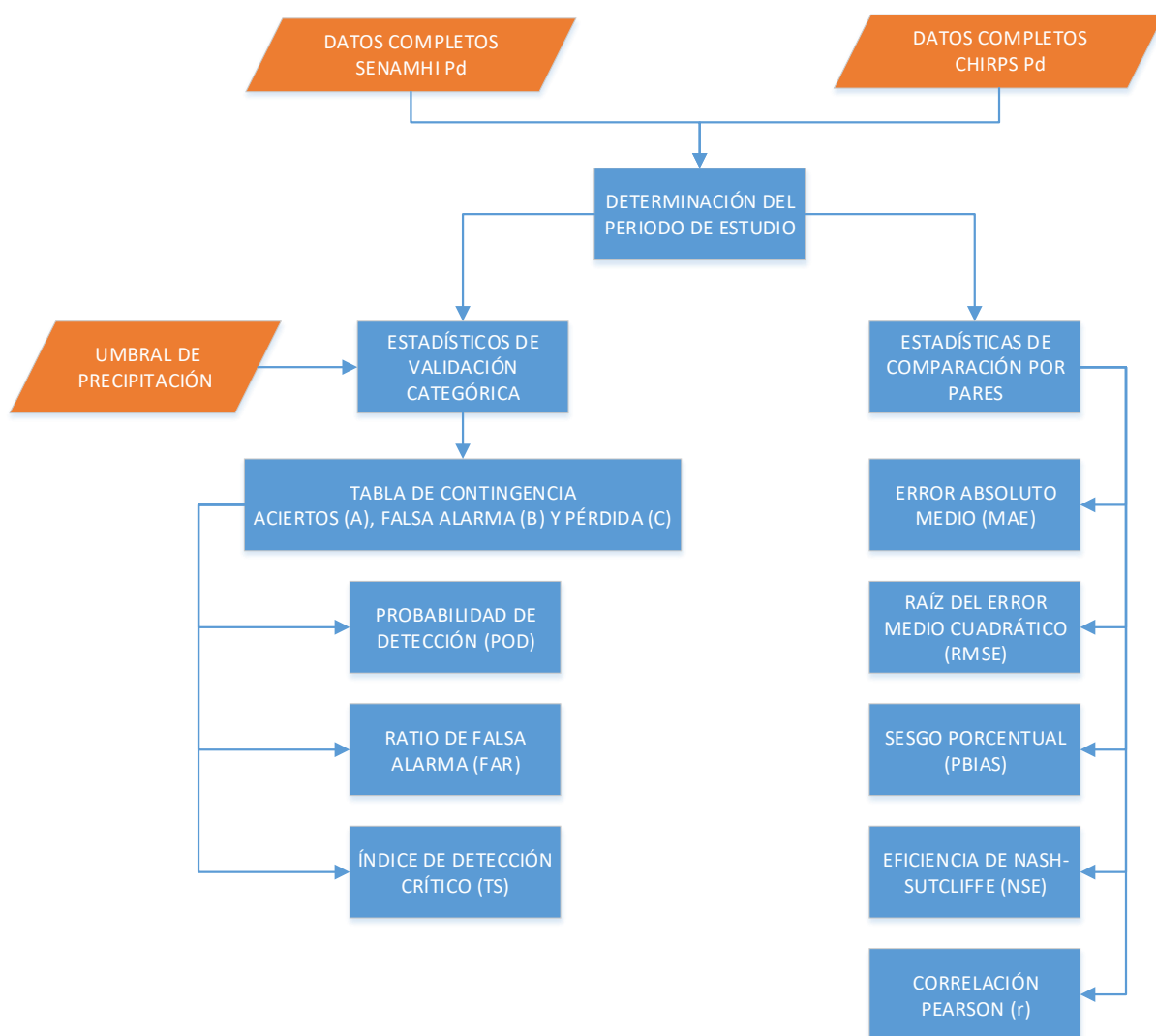
Figura 52. Variación de la elevación dentro del área de la cuenca del río Vilcanota.

Esta investigación considera como datos de estudio: la precipitación diaria, mensual, estacional y anual; según se detalla a continuación.

### 3.6.2. Precipitación Diaria

Para la validación de la precipitación diaria estimada por satélite CHIRPS se sigue de acuerdo al siguiente flujograma.

#### 3.6.2.1. Diagrama de flujo



**Figura 53.** Diagrama de flujo de validación de la precipitación diaria estimada por satélite CHIRPS.

### 3.6.2.2. Estadísticos de validación categórica

Considerando el umbral de 0.8 mm se calcula los aciertos (A), Falsa Alarma (B) y Pérdida (c) para cada pixel de información de CHIRPS de la precipitación diaria (Pd), que se corresponde a cada estación meteorológica.

**Tabla 32.** Aciertos (A), Falsa Alarma (B) y Pérdida (C) para umbral = 0.8 mm en Pd.

N	ESTACION	A	B	C
1	COLQUEPATA	2385	1815	2235
2	QUILLABAMBA	2842	1185	1668
3	KAYRA	2222	1888	1835
4	QUEBRADA	3589	794	1400
5	CHALLABAMBA	3105	1372	1227
6	CHONTACHACA	4659	522	1994
7	CURAHUASI	1993	1688	1803
8	MACHUPICCHU	3347	711	2495
9	URUBAMBA	1898	2046	1847
10	ANTA	2332	1678	2046
11	PARURO	2836	1642	2001
12	ACOMAYO	2896	1777	1537
13	PAUCARTAMBO	2235	2162	1551
14	CCATCCA	2110	2297	1538
15	OLLACHEA	3633	1120	1122
16	SICUANI	3366	1746	952
17	CAYCAY	2163	1987	1722
18	POMACANCHI	3127	1725	1668
19	SANTA ROSA	3099	1759	1448
20	CHUQUIBAMBILLA	2749	1964	1281

Para el análisis detallado se considera a la estación Kayra por ser la estación con datos mas completos.

De la **Tabla 32** para la estación Kayra se tiene.

**Tabla 33.** Tabla de contingencia para el umbral de 0.8mm/día.

	Observado $\geq$ umbral	Observado $<$ umbral	Total
Satélite $\geq$ umbral	2222	1888	<b>4110</b>
Satélite $<$ umbral	1835		
<b>Total</b>	<b>4057</b>		

$$A_{1mm} := ResA(3, 6) = 2222.00$$

$$B_{1mm} := ResB(3, 6) = 1888.00$$

$$C_{1mm} := ResC(3, 6) = 1835.00$$

$$A_{1mm} = 2222.00$$

$$B_{1mm} = 1888.00$$

$$C_{1mm} = 1835.00$$

$$POD := \frac{A_{1mm}}{A_{1mm} + C_{1mm}} \rightarrow \frac{2222}{4057} = 0.55$$

$$FAR := \frac{B_{1mm}}{A_{1mm} + B_{1mm}} \rightarrow \frac{944}{2055} = 0.46$$

$$TS := \frac{A_{1mm}}{A_{1mm} + B_{1mm} + C_{1mm}} \rightarrow \frac{2222}{5945} = 0.37$$

De la misma manera se calcula los estadísticos de validación Categórica para el umbral de 0.8 mm de precipitación y para pixel de información CHIRPS que se corresponde a cada estación meteorológica.

**Tabla 34.** Indicadores estadísticos de validación Categórica para umbral = 0.8 mm.

N	ESTACION	A	B	C	OBS=A+C	CHIRPS=A+B	A+B+C	POD	FAR	TS
1	COLQUEPATA	2385	1815	2235	4620	4200	6435	0.52	0.43	0.37
2	QUILLABAMBA	2842	1185	1668	4510	4027	5695	0.63	0.29	0.50
3	KAYRA	2222	1888	1835	4057	4110	5945	0.55	0.46	0.37
4	QUEBRADA	3589	794	1400	4989	4383	5783	0.72	0.18	0.62
5	CHALLABAMBA	3105	1372	1227	4332	4477	5704	0.72	0.31	0.54
6	CHONTACHACA	4659	522	1994	6653	5181	7175	0.70	0.10	0.65
7	CURAHUASI	1993	1688	1803	3796	3681	5484	0.53	0.46	0.36
8	MACHUPICCHU	3347	711	2495	5842	4058	6553	0.57	0.18	0.51
9	URUBAMBA	1898	2046	1847	3745	3944	5791	0.51	0.52	0.33
10	ANTA	2332	1678	2046	4378	4010	6056	0.53	0.42	0.39
11	PARURO	2836	1642	2001	4837	4478	6479	0.59	0.37	0.44
12	ACOMAYO	2896	1777	1537	4433	4673	6210	0.65	0.38	0.47
13	PAUCARTAMBO	2235	2162	1551	3786	4397	5948	0.59	0.49	0.38
14	CCATCCA	2110	2297	1538	3648	4407	5945	0.58	0.52	0.35
15	OLLACHEA	3633	1120	1122	4755	4753	5875	0.76	0.24	0.62
16	SICUANI	3366	1746	952	4318	5112	6064	0.78	0.34	0.56
17	CAYCAY	2163	1987	1722	3885	4150	5872	0.56	0.48	0.37
18	POMACANCHI	3127	1725	1668	4795	4852	6520	0.65	0.36	0.48
19	SANTA ROSA	3099	1759	1448	4547	4858	6306	0.68	0.36	0.49
20	CHUQUIBAMBILLA	2749	1964	1281	4030	4713	5994	0.68	0.42	0.46



A continuación, se muestra los resultados de aciertos (A) de la estimación de la precipitación CHIRPS por cada valor de umbral y para cada estación.

**Tabla 35.** Resultados de aciertos (A) para los umbrales de precipitación.

n	ESTACIONES	UMBRALES DE PRECIPITACION (mm)										
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	4	6	8	10
1	COLQUEPATA	2881	2814	2678	2508	2385	2262	1684	821	415	183	92
2	QUILLABAMBA	3003	2997	2945	2892	2842	2744	2297	1609	1169	820	603
3	KAYRA	2664	2650	2506	2353	2222	2102	1550	781	409	188	99
4	QUEBRADA	3852	3806	3729	3650	3589	3525	3047	2222	1623	1223	955
5	CHALLABAMBA	3465	3439	3345	3216	3105	2993	2481	1630	1084	693	492
6	CHONTACHACA	4751	4739	4704	4680	4659	4633	4479	3956	3314	2737	2264
7	CURAHUASI	2224	2219	2141	2066	1993	1924	1514	981	586	357	186
8	MACHUPICCHU	3519	3511	3451	3402	3347	3305	3027	2275	1612	1122	802
9	URUBAMBA	2531	2401	2187	2008	1898	1793	1331	645	300	125	60
10	ANTA	2619	2592	2492	2400	2332	2218	1871	1158	668	400	259
11	PARURO	3181	3136	3055	2943	2836	2726	2126	1067	566	271	133
12	ACOMAYO	2957	2949	2935	2920	2896	2862	2297	1227	622	296	153
13	PAUCARTAMBO	2423	2410	2381	2297	2235	2131	1687	947	536	316	189
14	CCATCCA	2181	2178	2167	2136	2110	2076	1632	828	381	162	73
15	OLLACHEA	3860	3848	3809	3775	3633	3512	3004	2102	1461	1049	791
16	SICUANI	3987	3931	3730	3531	3366	3218	2513	1408	758	429	224
17	CAYCAY	2583	2520	2389	2278	2163	2063	1541	725	341	154	79
18	POMACANCHI	3638	3577	3423	3271	3127	3033	2384	1281	653	349	188
19	SANTA ROSA	3361	3320	3233	3165	3099	3009	2466	1294	634	324	163
20	CHUQUIBAMBILLA	2922	2909	2851	2793	2749	2701	2183	1079	498	249	111

A continuación, se muestra los resultados de Falsa Alarma (B) de la estimación de la precipitación CHIRPS por cada valor de umbral y para cada estación. A medida que aumenta el umbral disminuye la falsa alarma.

**Tabla 36.** Resultados de falsa alarma (B) para los umbrales de precipitación.

n	ESTACIONES	UMBRALES DE PRECIPITACION (mm)										
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	4	6	8	10
1	COLQUEPATA	1366	1433	1560	1721	1815	1895	1899	1478	1006	657	477
2	QUILLABAMBA	1025	1031	1083	1136	1185	1277	1594	1608	1268	1000	769
3	KAYRA	1490	1500	1639	1784	1888	1969	1994	1430	971	670	430
4	QUEBRADA	539	585	660	737	794	857	1264	1531	1368	1063	843
5	CHALLABAMBA	1046	1069	1159	1283	1372	1464	1693	1498	1163	928	657
6	CHONTACHACA	436	448	482	504	522	544	658	776	756	740	683
7	CURAHUASI	1472	1475	1546	1620	1688	1742	1976	1730	1358	1000	743
8	MACHUPICCHU	548	556	611	660	711	751	907	1021	871	720	563
9	URUBAMBA	1430	1557	1768	1943	2046	2122	2269	1943	1364	965	689
10	ANTA	1395	1422	1522	1614	1678	1781	1918	1629	1186	842	638
11	PARURO	1331	1373	1451	1557	1642	1701	1785	1396	982	673	467
12	ACOMAYO	1738	1746	1758	1763	1777	1777	1838	1384	989	660	463
13	PAUCARTAMBO	1983	1996	2025	2108	2162	2250	2430	2138	1658	1268	941
14	CCATCCA	2247	2250	2260	2284	2297	2293	2181	1558	1046	690	482
15	OLLACHEA	907	917	950	983	1120	1233	1658	1886	1704	1439	1193
16	SICUANI	1170	1223	1416	1603	1746	1871	2069	1533	1022	632	403
17	CAYCAY	1621	1682	1808	1908	1987	2025	1883	1318	872	587	370
18	POMACANCHI	1239	1300	1450	1596	1725	1789	1953	1485	1032	666	417
19	SANTA ROSA	1540	1575	1651	1710	1759	1805	1888	1447	1003	661	383
20	CHUQUIBAMBILLA	1849	1858	1906	1944	1964	1966	1946	1441	965	600	380

**Tabla 37.** Resultados de Pérdida (C) para los umbrales de precipitación.

n	ESTACIONES	UMBRALES DE PRECIPITACION (mm)										
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	4	6	8	10
1	COLQUEPATA	2950	2838	2619	2398	2235	2097	1714	1437	1104	851	595
2	QUILLABAMBA	1910	1905	1812	1745	1668	1604	1338	1089	940	822	706
3	KAYRA	2354	2324	2124	1965	1835	1729	1457	1267	1026	861	673
4	QUEBRADA	1789	1710	1593	1482	1400	1320	1087	867	777	699	620
5	CHALLABAMBA	1465	1441	1354	1270	1227	1170	973	827	731	622	519
6	CHONTACHACA	2132	2122	2072	2024	1994	1944	1791	1850	1968	2069	2100
7	CURAHUASI	2141	2132	2004	1874	1803	1722	1369	1105	943	803	645
8	MACHUPICCHU	2927	2914	2767	2619	2495	2385	2072	1935	1787	1629	1459
9	URUBAMBA	2706	2504	2224	2012	1847	1734	1348	1031	803	591	413
10	ANTA	2457	2400	2248	2122	2046	1924	1610	1478	1376	1200	1028
11	PARURO	2483	2398	2245	2119	2001	1911	1630	1485	1274	1005	797
12	ACOMAYO	1605	1598	1571	1551	1537	1536	1406	1378	1229	1019	795
13	PAUCARTAMBO	1680	1675	1648	1594	1551	1490	1214	1009	841	649	479
14	CCATCCA	1621	1611	1593	1563	1538	1522	1434	1332	1090	869	641
15	OLLACHEA	1255	1236	1191	1151	1122	1098	922	725	622	520	418
16	SICUANI	1153	1141	1082	1018	952	900	798	834	734	574	487
17	CAYCAY	2245	2146	1966	1854	1722	1633	1443	1282	997	751	535
18	POMACANCHI	1995	1947	1846	1762	1668	1603	1429	1417	1246	1019	787
19	SANTA ROSA	1695	1666	1567	1501	1448	1394	1267	1331	1224	1030	822
20	CHUQUIBAMBILLA	1432	1413	1364	1313	1281	1259	1124	1259	1150	966	785

Y finalmente se presentan en capítulo resultados: **Tabla 141**, **Tabla 142** y **Tabla 143**. Con el resultado de los estadísticos de validación Categórica POD, FAR y TS respectivamente por cada valor de umbral y para cada estación meteorológica.

### 3.6.2.3. Estadísticas de comparación por pares.

Se calcula las estadísticas de comparación por pares de: Error absoluto medio (MAE), Raíz del error medio cuadrático (RMSE), Porcentaje bias (PBIAS), Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y Coeficiente de correlación de Pearson (r).

- **Error absoluto medio**

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Si - Oi|$$

n=13514 ,

$$\sum_{i=1}^n |Si - Oi| = 30584.727$$

$$MAE = \frac{30584.727}{13514}$$

$$MAE = 2.263 \text{ mm}$$

- **Raíz del error medio cuadrático**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}$$

n=13514 ,

$$\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2 = 294525.202$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{294525.202}{13514}}$$

$$RMSE = 4.668 \text{ mm}$$

- **Sesgo porcentual**

$$BIAS (\%) \text{ o } PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)}{\sum_{i=1}^n Oi}$$

$$\sum_{i=1}^n (Si - Oi) = -1853.117$$

$$\sum_{i=1}^n (O_i) = 24847.712$$

$$BIAS (\%) \text{ o } PBIAS = 100 * \frac{-1853.117}{24847.712}$$

$$BIAS (\%) \text{ o } PBIAS == -7.5$$

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

$$\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 = 294525.202$$

$$\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 = 237175.257$$

$$NSE = 1 - \frac{294525.202}{237175.257}$$

$$NSE = -0.242$$

- Coeficiente de correlación de Pearson (r)

$$r_x = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$$n=13514$$

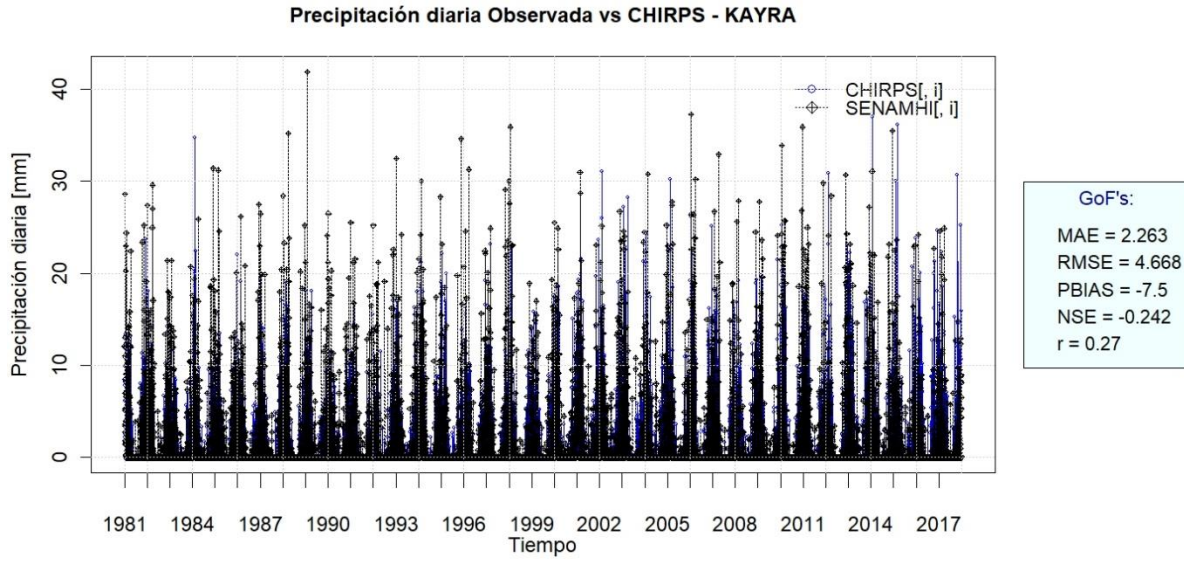
$$\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})] = 53041.086$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 237175.257$$

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 163178.006$$

$$r_x = \frac{\frac{1}{13514-1} 53041.086}{\sqrt{\frac{1}{13514-1} 237175.257} * \sqrt{\frac{1}{13514-1} 163178.006}} = \frac{3.925}{8.189 * 3.475}$$

$$r_x = 0.270$$



**Figura 54.** Serie de tiempo de la precipitación diaria e indicadores estadísticos de comparación por pares – Kayra.

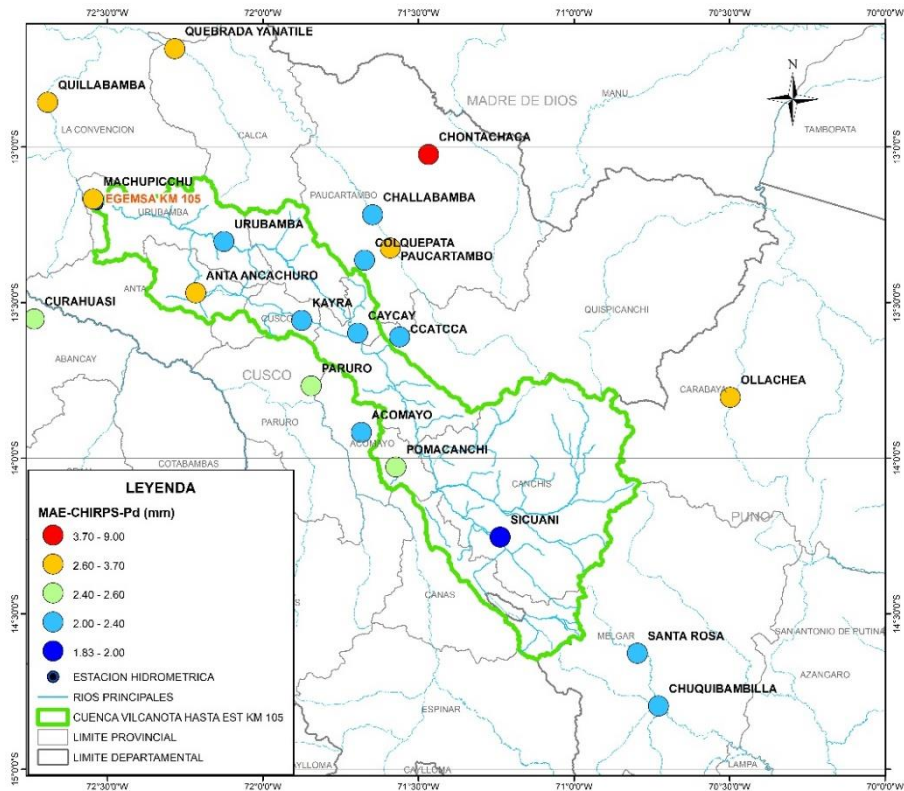
Finalmente se resume el calculo de los indicadores estadísticos de comparación por pares.

**Tabla 38.** Resumen de indicadores de la estadística de comparación por pares.

N	ESTACIONES	MAE_CHIRPS	RMSE_CHIRPS	BIAS_CHIRPS	NSE_CHIRPS	Pearson_CHIRPS
1	COLQUEPATA	2.321	4.565	-9.200	-0.307	0.280
2	QUILLABAMBA	2.738	6.312	2.100	-0.064	0.441
3	KAYRA	2.263	4.668	-7.500	-0.242	0.270
4	QUEBRADA	2.811	6.922	2.500	0.142	0.540
5	CHALLABAMBA	2.229	5.291	11.600	-0.005	0.487
6	CHONTACHACA	8.778	17.853	-50.400	0.222	0.555
7	CURAHUASI	2.557	5.526	17.200	-0.636	0.267
8	MACHUPICCHU	3.673	7.700	-37.900	0.124	0.473
9	URUBAMBA	2.372	4.866	39.600	-1.196	0.205
10	ANTA	3.007	6.166	-16.800	-0.169	0.289
11	PARURO	2.434	4.877	-16.500	-0.134	0.322
12	ACOMAYO	2.371	4.867	-12.600	-0.051	0.352
13	PAUCARTAMBO	2.749	5.713	51.500	-1.024	0.272
14	CCATCCA	2.323	4.698	2.800	-0.305	0.252
15	OLLACHEA	2.808	6.043	48.000	-0.310	0.595
16	SICUANI	1.838	3.966	13.100	0.050	0.485
17	CAYCAY	2.040	4.160	-5.100	-0.228	0.302
18	POMACANCHI	2.425	4.886	-14.100	-0.012	0.374
19	SANTA ROSA	2.351	4.804	-13.200	0.019	0.381
20	CHUQUIBAMBILLA	2.214	4.550	-9.400	-0.013	0.357

### 3.6.2.3.1. Variación espacial de los estadísticos de comparación por pares

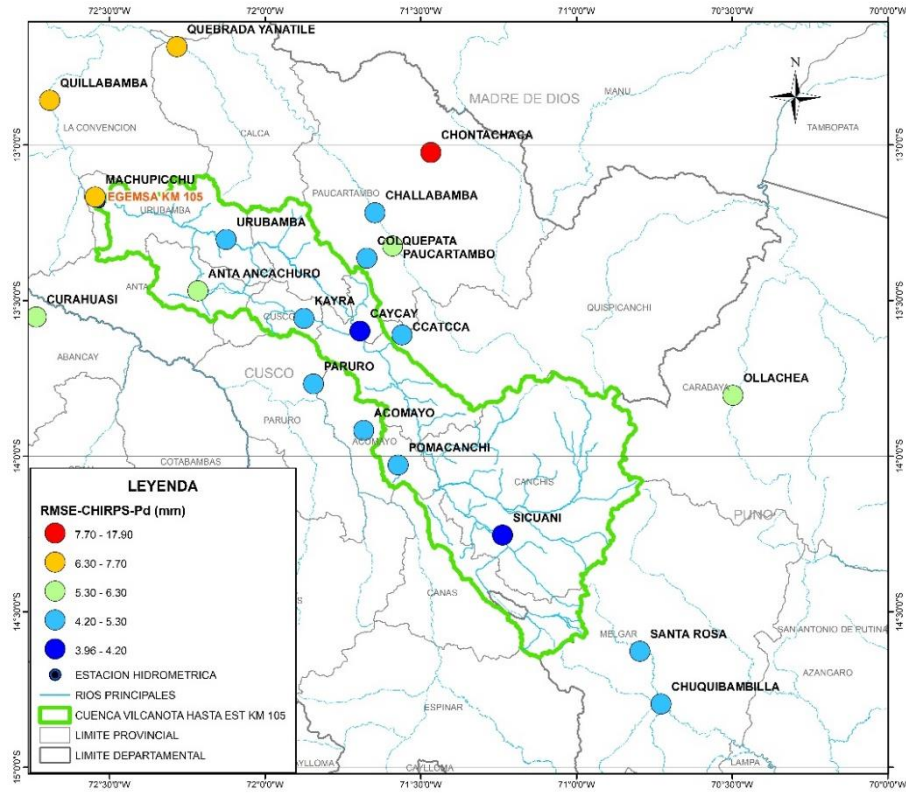
En la **Figura 55**, se muestra la variación del MAE de cada una de las estaciones de precipitación diaria. Se puede resaltar que, la estación Chontachaca con  $3.7 < \text{MAE} < 9$  mm muestra el valor máximo de error y la estación Sicuani con  $1.83 < \text{MAE} < 2.0$  mm siendo el valor mínimo.



**Figura 55.** Variación espacial del error absoluto medio (MAE) precipitación diaria.

Según la **Figura 56**, podemos observar la variación de la RMSE de la precipitación diaria en cada estación considerada, del cual se puede resaltar a la estación Chontachaca con  $7.7 < \text{RMSE} < 17.9$  mm con el RMSE mas alto y las estaciones Caycay y Sicuani con  $3.96 < \text{RMSE} < 4.2$  mm con el RMSE mas bajo de todas las estaciones.





**Figura 56.** Variación espacial de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) de la precipitación diaria.

El óptimo valor del porcentaje del BIAS es 0, valores negativos indican subestimación y valores positivos indica sobreestimación. De acuerdo al sesgo porcentual con respecto a la precipitación diaria observada y según la **Figura 57**, las estaciones de Chontachaca y Machupicchu muestran una subestimación de la precipitación con PBIAS menores a -25 estando dentro de los criterios de evaluación como insatisfactoria, por otro lado las estaciones de Urubamba, Paucartambo y Ollachea muestran sobreestimación de la precipitación con PBIAS mayores a 25, las estaciones Quebrada, Quillabamba, Colquepata, Kayra, Caycay, Ccatcca y Chuquibambilla con PBIAS entre -10 a 10, son considerados como sesgo muy bueno, el resto de las estaciones está dentro del rango de subestimación y sobreestimación de la precipitación diaria.