



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

**“Análisis espacio-temporal meteorológico en una cuenca andina tropical del sur de Ecuador”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

**Autores:**

Henry Paúl Cárdenas Campoverde

CI: 0104905781

henrypaulcc@hotmail.com

Cindy Carolina Urgilés Ávila

CI: 0150106128

cindyurgiles1996@gmail.com

**Director:**

Ing. Alex Manuel Avilés Añazco, PhD.

CI: 0102247186

**Asesor:**

Ing. Mario Xavier Gualpa Gualpa, MSc.

CI: 0302224068

**Cuenca, Ecuador**

17-noviembre-2020



## RESUMEN

El presente proyecto de investigación se enfocó en la búsqueda de patrones y análisis de interrelaciones entre variables meteorológicas (precipitación, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar global, velocidad del viento y dirección del viento) a escala espacial y temporal en una cuenca andina del austro ecuatoriano, así como, evaluar productos meteorológicos satelitales actuales del Centro Europeo para Predicciones de Clima de Medio Alcance (ECMWF) a escala horaria, diaria y mensual. Se dispuso de datos a escala horaria registrados en treinta estaciones meteorológicas de dos redes: la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA-EP) y la Universidad Politécnica Salesiana (UPS). En principio, se realizó la evaluación de calidad de datos y Análisis Exploratorio de Datos (EDA), continuando con relleno de datos faltantes mediante Imputación Múltiple por Ecuaciones Encadenadas (MICE). Se aplicó clasificación no supervisada mediante *clustering* para análisis espacial de datos meteorológicos. Con el conjunto de datos meteorológicos se determinó las variaciones altitudinales de cada variable meteorológica. En cuanto al análisis temporal se construyeron y analizaron perfiles temporales a diferentes escalas; además, se identificaron eventos extremos de temperatura y precipitación. Mediante los resultados obtenidos se logró determinar el comportamiento y asociaciones de las variables meteorológicas en espacio y tiempo. Finalmente, se encontraron prometedores desempeños de los productos meteorológicos satelitales ERA5 y ERA5-Land respecto a observaciones de estaciones meteorológicas.

**Palabras claves:** Análisis espacio-temporal meteorológico. Imputación Múltiple por Ecuaciones Encadenadas (MICE). *Clustering*. Variaciones meteorológicas altitudinales. Eventos extremos. ERA5. ERA5-Land. Cuenca andina tropical.



## ABSTRACT

This research project focused on the search for patterns and analysis of interrelationships between meteorological variables (precipitation, air temperature, relative humidity, atmospheric pressure, global solar radiation, wind speed and wind direction) on a spatial and temporal scale in an Andean basin in southern Ecuador. Moreover, the performance of meteorological satellite products from the European Centre for Medium-Range Weather and Forecasting (ECMWF) on hourly, daily, and monthly scale for each variable was determined. Hourly data was available recorded in thirty weather stations from two networks: Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable y Saneamiento (ETAPA-EP), and Universidad Politécnica Salesiana (UPS). First, data quality assessment and Exploratory Data Analysis (EDA) were developed. Filling missing data was conducted using Multiple Imputation by Chained Equations (MICE). Unsupervised classification was applied through clustering for spatial analysis of meteorological data. Using the meteorological datasets, altitudinal variations of each meteorological variable were determined. Regarding temporal analysis, time series profiles for different scales were constructed and analyzed, also, extreme events of temperature and precipitation were identified. Results demonstrated the behavior and associations of meteorological variables in space and time. Finally, hopeful performances of ERA5 and ERA5-Land satellite meteorological products were found compared to weather station observations.

**Keywords:** Spatiotemporal meteorological analysis. Multiple Imputation by Chained Equations (MICE). Clustering. Altitudinal meteorological variations. Extreme events. ERA5. ERA5-Land. Tropical Andean basin.



## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN .....   | 2  |
| ABSTRACT .....  | 3  |
| AGRADECIMIENTOS .....   | 15 |
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 16 |
| 1.1. Planteamiento del problema .....                           | 16 |
| 1.2. Justificación .....  | 16 |
| 1.3. Objetivos.....   | 17 |
| 1.3.1. Objetivo General .....                                   | 17 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....                              | 17 |
| 2. MARCO TEÓRICO.....   | 18 |
| 2.1. Meteorología .....   | 18 |
| 2.2. Importancia de la meteorología .....                       | 18 |
| 2.3. Variables meteorológicas .....                             | 18 |
| 2.3.1. Temperatura .....  | 18 |
| 2.3.2. Precipitación.....                                       | 19 |
| 2.3.3. Humedad .....  | 19 |
| 2.3.4. Radiación solar.....                                     | 19 |
| 2.3.5. Presión atmosférica .....                                | 20 |
| 2.3.6. Viento.....  | 20 |
| 2.4. Relación entre variables meteorológicas .....              | 21 |
| 2.4.1. Temperatura y Radiación .....                            | 21 |
| 2.4.2. Temperatura y Humedad relativa .....                     | 21 |
| 2.4.3. Viento, Temperatura del aire y Presión atmosférica ..... | 21 |
| 2.4.4. Variables meteorológicas con la altitud.....             | 22 |
| 2.5. Tratamiento de variables meteorológicas .....              | 23 |
| 2.5.1. Patrones de datos faltantes .....                        | 23 |
| 2.5.2. Imputación de datos faltantes .....                      | 23 |
| 2.5.3. Imputación Múltiple.....                                 | 24 |
| 2.5.3.1. Comparación predictiva media (PMM) .....               | 24 |
| 2.5.3.2. Media Ponderada Predictiva.....                        | 25 |
| 2.5.3.3. Árboles de clasificación y regresión (CART).....       | 25 |



|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.5.3.4. | Bosques Aleatorios (RF) .....  | 25 |
| 2.6.     | Análisis Exploratorio de Datos (EDA).....                            | 26 |
| 2.7.     | Análisis espacial.....   | 26 |
| 2.7.1.   | Clasificación no supervisada: <i>Clustering</i> .....                | 27 |
| 2.7.1.1. | <i>Clusters</i> para análisis espacial de datos meteorológicos ..... | 27 |
| 2.7.1.2. | Métodos de análisis <i>cluster</i> .....                             | 27 |
| 2.8.     | Análisis temporal .....  | 28 |
| 2.9.     | Productos satelitales meteorológicos de reanálisis .....             | 28 |
| 2.9.1.   | ERA5 .....   | 29 |
| 2.9.2.   | ERA5-Land .....  | 29 |
| 2.9.3.   | Antecedentes de evaluación de ERA5 .....                             | 29 |
| 3.       | METODOLOGÍA .....  | 31 |
| 3.1.     | Área de estudio .....  | 31 |
| 3.2.     | Análisis y evaluación de datos recopilados .....                     | 33 |
| 3.2.1.   | Recopilación de datos meteorológicos .....                           | 33 |
| 3.2.2.   | Variables en estudio .....   | 34 |
| 3.2.3.   | Procesamiento de datos .....   | 34 |
| 3.2.4.   | Evaluación de la calidad de los datos .....                          | 34 |
| 3.2.5.   | Análisis de períodos de tiempo.....                                  | 37 |
| 3.3.     | Imputación de datos faltantes .....                                  | 38 |
| 3.3.1.   | Métodos de imputación de datos faltantes .....                       | 39 |
| 3.3.1.1. | Comparación predictiva media (PMM) .....                             | 39 |
| 3.3.1.2. | Media predictiva ponderada (MT).....                                 | 39 |
| 3.3.1.3. | Árboles de clasificación y regresión (CART).....                     | 40 |
| 3.3.1.4. | Bosques aleatorios (RF) .....  | 40 |
| 3.3.2.   | Validación de la imputación de datos faltantes.....                  | 40 |
| 3.3.2.1. | Error medio ( <i>ME</i> ).....                                       | 41 |
| 3.3.2.2. | Error medio absoluto ( <i>MAE</i> ) .....                            | 41 |
| 3.3.2.3. | Raíz del error cuadrático medio ( <i>RMSE</i> ).....                 | 42 |
| 3.3.2.4. | Porcentaje de Desviación ( <i>PBIAS</i> ) .....                      | 42 |
| 3.3.2.5. | Coefficiente de correlación de Pearson ( <i>r</i> ).....             | 43 |
| 3.3.2.6. | Coefficiente de eficiencia de Kling Gupta ( <i>KGE</i> ).....        | 44 |
| 3.4.     | Análisis Exploratorio de Datos (EDA).....                            | 45 |



|          |   |    |
|----------|---|----|
| 3.4.1.   | Medidas estadísticas descriptivas .....   | 45 |
| 3.4.2.   | Correlación entre variables meteorológicas .....                                    | 45 |
| 3.4.3.   | Pruebas de Normalidad .....   | 46 |
| 3.5.     | Análisis Espacial .....   | 46 |
| 3.5.1.   | Análisis espacial mediante <i>Clustering</i> .....                                  | 46 |
| 3.5.1.1. | Evaluación de la tendencia <i>Clustering</i> .....                                  | 46 |
| 3.5.1.2. | Estadísticos de validación para seleccionar el mejor algoritmo <i>cluster</i> ..... | 47 |
| 3.5.1.3. | Medidas de distancia <i>cluster</i> .....   | 49 |
| 3.5.1.4. | Cálculo del <i>valor-p</i> para métodos jerárquicos .....                           | 50 |
| 3.5.2.   | Análisis de variación altitudinal de las variables meteorológicas .....             | 50 |
| 3.6.     | Análisis Temporal .....   | 50 |
| 3.6.1.   | Perfiles temporales .....   | 50 |
| 3.6.2.   | Variaciones diarias .....   | 51 |
| 3.6.3.   | Identificación de eventos extremos .....  | 51 |
| 3.7.     | Evaluación de productos meteorológicos de reanálisis .....                          | 52 |
| 3.7.1.   | Estadísticos de validación para los productos satelitales .....                     | 54 |
| 4.       | RESULTADOS Y DISCUSIONES .....  | 57 |
| 4.1.     | Análisis y evaluación de datos recopilados .....                                    | 57 |
| 4.2.     | Análisis del relleno de datos faltantes .....                                       | 61 |
| 4.2.1.   | Temperatura .....   | 61 |
| 4.2.2.   | Precipitación.....  | 62 |
| 4.2.3.   | Humedad Relativa .....  | 63 |
| 4.2.4.   | Radiación .....   | 64 |
| 4.2.5.   | Presión .....   | 65 |
| 4.2.6.   | Viento.....   | 66 |
| 4.3.     | Análisis Exploratorio de Datos.....   | 68 |
| 4.3.1.   | Medidas estadísticas descriptivas .....   | 68 |
| 4.3.2.   | Pruebas de Normalidad .....   | 70 |
| 4.3.3.   | Correlación entre variables meteorológicas.....                                     | 71 |
| 4.4.     | Resultados de análisis espacial.....  | 74 |
| 4.4.1.   | Tendencia <i>clustering</i> .....   | 74 |
| 4.4.2.   | Mejores algoritmos <i>cluster</i> y <i>valor-p</i> para métodos jerárquicos.....    | 74 |
| 4.4.3.   | Resultados de la variación altitudinal de las variables meteorológicas .....        | 86 |



|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 4.5.     | Resultados de análisis temporal .....   | 88  |
| 4.5.1.   | Análisis de perfiles temporales.....  | 88  |
| 4.5.2.   | Variaciones diarias respecto al promedio .....  | 97  |
| 4.5.3.   | Resultados de eventos meteorológicos extremos.....  | 106 |
| 4.6.     | Resultados de evaluación de productos meteorológicos satelitales .....  | 115 |
| 4.6.1.   | Evaluación de Temperatura del aire .....  | 115 |
| 4.6.1.1. | Evaluación horaria.....   | 115 |
| 4.6.1.2. | Evaluación diaria.....  | 115 |
| 4.6.1.3. | Evaluación mensual.....   | 116 |
| 4.6.2.   | Evaluación de Precipitación .....   | 116 |
| 4.6.2.1. | Evaluación horaria.....   | 116 |
| 4.6.2.2. | Evaluación diaria.....  | 116 |
| 4.6.2.3. | Evaluación mensual.....   | 117 |
| 4.6.3.   | Evaluación de Humedad Relativa.....   | 117 |
| 4.6.4.   | Evaluación de Radiación Solar Global .....  | 118 |
| 4.6.5.   | Evaluación de Presión Atmosférica.....  | 118 |
| 4.6.6.   | Evaluación de Viento .....  | 118 |
| 4.7.     | Discusiones para las evaluaciones de productos meteorológicos .....   | 119 |
| 5.       | CONCLUSIONES .....  | 130 |
| 6.       | RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES .....  | 132 |
| 7.       | REFERENCIAS.....  | 134 |
| 8.       | APÉNDICES .....   | 151 |
|          | Apéndice A. Captura de pantalla de un ejemplo de la aplicación web interactiva para evaluación de calidad de datos..... | 151 |
|          | Apéndice B. Ejemplos gráficos del proceso de evaluación y relleno de datos .....  | 152 |
|          | Apéndice C. Sumarios estadísticos posterior al tratamiento de datos e imputación por estación .....                     | 159 |
|          | Apéndice D. Resultados de las pruebas de Normalidad Lilliefors y Kolmogorov-Smirnov .....                               | 162 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Información de las estaciones meteorológicas disponibles.....  | 33 |
| <b>Tabla 2.</b> Variables meteorológicas en estudio .....  | 34 |
| <b>Tabla 3.</b> Información de los sensores de la UPS .....  | 36 |
| <b>Tabla 4.</b> Información de los sensores de ETAPA EP .....  | 37 |
| <b>Tabla 5.</b> Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.....  | 44 |
| <b>Tabla 6.</b> Estadísticos calculados para las diferentes variables meteorológicas .....                               | 45 |
| <b>Tabla 7.</b> Descripción de los índices de eventos extremos para temperatura y precipitación .....                    | 51 |
| <b>Tabla 8.</b> Variables de productos satelitales meteorológicos evaluados.....   | 52 |
| <b>Tabla 9.</b> Parámetros para las medidas de contingencia.....   | 56 |
| <b>Tabla 10.</b> Medidas circunstanciales para la evaluación de productos satelitales meteorológicos .....               | 56 |
| <b>Tabla 11.</b> Porcentaje de disponibilidad de datos crudos y evaluados .....  | 58 |
| <b>Tabla 12.</b> Porcentaje de disponibilidad de datos en el período junio 2015 - diciembre 2018 por estación .....      | 60 |
| <b>Tabla 13.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de temperatura horaria ..             | 62 |
| <b>Tabla 14.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de precipitación horaria ..           | 63 |
| <b>Tabla 15.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de precipitación diaria ..            | 63 |
| <b>Tabla 16.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de humedad horaria .....              | 64 |
| <b>Tabla 17.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de radiación horaria .....            | 64 |
| <b>Tabla 18.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de presión horaria .....              | 65 |
| <b>Tabla 19.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de velocidad del viento horario ..... | 67 |
| <b>Tabla 20.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de velocidad del viento diario.....   | 67 |
| <b>Tabla 21.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de dirección del viento horario ..... | 67 |
| <b>Tabla 22.</b> Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de dirección del viento diario.....   | 68 |
| <b>Tabla 23.</b> Resumen estadístico a escala temporal horaria de las estaciones meteorológicas seleccionadas .....      | 70 |
| <b>Tabla 24.</b> Resumen estadístico a escala temporal diaria para las estaciones meteorológicas seleccionadas .....     | 70 |
| <b>Tabla 25.</b> Resumen estadístico a escala temporal mensual para las estaciones meteorológicas seleccionadas .....    | 70 |
| <b>Tabla 26.</b> Resultados de las pruebas de normalidad .....   | 71 |
| <b>Tabla 27.</b> Resultados del estadístico Hopkins por variable .....   | 74 |
| <b>Tabla 28.</b> Mejores resultados de análisis cluster para cada variable .....   | 75 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 1.</b> Ubicación del área de estudio y distribución espacial de las estaciones meteorológicas.....                | 32  |
| <b>Figura 2.</b> Flujo de trabajo para la selección del período de tiempo de análisis.....                                  | 38  |
| <b>Figura 3.</b> Metodología del análisis cluster basado en distancias para datos meteorológicos. ....                      | 48  |
| <b>Figura 4.</b> Resolución espacial de ERA5 y ERA5-Land en la CARP.....  | 53  |
| <b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo de la evaluación de productos satelitales.....   | 54  |
| <b>Figura 6.</b> Disponibilidad de variables meteorológicas del período enero 2014 - julio 2019 por estación.....           | 59  |
| <b>Figura 7.</b> Disponibilidad de las variables meteorológicas del periodo junio 2015 - diciembre 2018 por estación.....   | 60  |
| <b>Figura 8.</b> Correlaciones de Pearson entre variables meteorológicas.....   | 73  |
| <b>Figura 9.</b> Dendrograma con valores de significancia (%) para temperatura del aire.....                                | 75  |
| <b>Figura 10.</b> Dendrograma con valores de significancia (%) para precipitación.....                                      | 76  |
| <b>Figura 11.</b> Dendrograma con valores de significancia (%) para humedad relativa.....                                   | 76  |
| <b>Figura 12.</b> Dendrograma con valores de significancia (%) para radiación solar global.....                             | 77  |
| <b>Figura 13.</b> Dendrograma con valores de significancia (%) para la presión atmosférica.....                             | 77  |
| <b>Figura 14.</b> Dendrograma con valores de significancia (%) para velocidad del viento.....                               | 78  |
| <b>Figura 15.</b> Dendrograma con valores de significancia (%) para dirección de viento.....                                | 78  |
| <b>Figura 16.</b> Dendrograma con valores de significancia (%) para todas las variables meteorológicas simultáneamente..... | 79  |
| <b>Figura 17.</b> Clusters de las estaciones meteorológicas por variable.....   | 82  |
| <b>Figura 18.</b> Clusters de las estaciones meteorológicas por variable.....   | 83  |
| <b>Figura 19.</b> Diagramas de caja de los diferentes clusters por variable meteorológica.....                              | 84  |
| <b>Figura 20.</b> Diagramas de caja de los diferentes clusters por variable meteorológica.....                              | 85  |
| <b>Figura 21.</b> Gradientes altitudinales de las variables meteorológicas.....   | 87  |
| <b>Figura 22.</b> Perfiles diurnos de las variables meteorológicas.....   | 90  |
| <b>Figura 23.</b> Perfiles semanales de las variables meteorológicas.....   | 91  |
| <b>Figura 24.</b> Perfiles mensuales de las variables meteorológicas.....   | 92  |
| <b>Figura 25.</b> Perfil diurno de precipitación que incluye frecuencia, cantidad e intensidad.....                         | 93  |
| <b>Figura 26.</b> Frecuencia de la dirección de viento a escala mensual.....  | 93  |
| <b>Figura 27.</b> Comportamiento de las variables meteorológicas en el período de estudio.....                              | 96  |
| <b>Figura 28.</b> Variaciones diarias de temperatura por estación meteorológica.....  | 99  |
| <b>Figura 29.</b> Variaciones diarias de precipitación por estación meteorológica.....                                      | 100 |
| <b>Figura 30.</b> Variaciones diarias de humedad relativa por estación meteorológica.....                                   | 101 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 31.</b> Variaciones diarias de radiación solar global por estación meteorológica .....                                 | 102 |
| <b>Figura 32.</b> Variaciones diarias de presión atmosférica por estación meteorológica .....                                    | 103 |
| <b>Figura 33.</b> Variaciones diarias de velocidad del viento por estación meteorológica .....                                   | 104 |
| <b>Figura 34.</b> Variaciones diarias de dirección del viento por estación meteorológica .....                                   | 105 |
| <b>Figura 35.</b> Índice HWN y HWD .....   | 108 |
| <b>Figura 36.</b> Índices CWN_ECF y CWD_ECF.....   | 109 |
| <b>Figura 37.</b> Índice CDD.....  | 110 |
| <b>Figura 38.</b> Índice CWD.....  | 111 |
| <b>Figura 39.</b> Índice TX90p.....  | 112 |
| <b>Figura 40.</b> Índice TX10 p.....   | 113 |
| <b>Figura 41.</b> Índice R95pTOT.....  | 114 |
| <b>Figura 42.</b> Diagramas de caja de las métricas de evaluación para temperatura del aire .....                                | 121 |
| <b>Figura 43.</b> Diagramas de caja de las métricas de evaluación para precipitación .....                                       | 122 |
| <b>Figura 44.</b> Diagramas de caja de las métricas de evaluación para humedad relativa.....                                     | 123 |
| <b>Figura 45.</b> Diagramas de caja de las métricas de evaluación para radiación solar global.....                               | 124 |
| <b>Figura 46.</b> Diagramas de caja de las métricas de evaluación para presión atmosférica .....                                 | 125 |
| <b>Figura 47.</b> Diagramas de caja de las métricas de evaluación para velocidad del viento .....                                | 126 |
| <b>Figura 48.</b> Diagramas de caja de las métricas de evaluación para dirección del viento.....                                 | 127 |
| <b>Figura 49.</b> Comparación de los patrones horarios de la estación meteorológica vs el producto satelital meteorológico ..... | 128 |
| <b>Figura 50.</b> Comparación de los patrones diarios de la estación meteorológica vs el producto satelital meteorológico .....  | 129 |



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Henry Paúl Cárdenas Campoverde en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis espacio-temporal meteorológico en una cuenca andina tropical del sur de Ecuador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de noviembre de 2020

---

Henry Paúl Cárdenas Campoverde

C.I: 0104905781



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Cindy Carolina Urgilés Ávila en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis espacio-temporal meteorológico en una cuenca andina tropical del sur de Ecuador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de noviembre de 2020

---

Cindy Carolina Urgilés Ávila

C.I: 0150106128



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Henry Paúl Cárdenas Campoverde autor/a del trabajo de titulación "Análisis espacio-temporal meteorológico en una cuenca andina tropical del sur de Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 17 de noviembre de 2020

---

Henry Paúl Cárdenas Campoverde

C.I: 0104905781



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Cindy Carolina Urgilés Ávila autor/a del trabajo de titulación "Análisis espacio-temporal meteorológico en una cuenca andina tropical del sur de Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 17 de noviembre de 2020



Cindy Carolina Urgilés Ávila

C.I: 0150106128



## AGRADECIMIENTOS

Henry Cárdenas Campoverde:

A Dios, mis papás y hermano por brindarme siempre su apoyo en mi camino y sembrar en mí la curiosidad e interés por la ciencia y educación. A Cindy por ayudarme a ser cada día mejor.

Cindy Urgilés Ávila:

Agradezco profundamente a todos quienes hicieron posible la culminación de mis estudios académicos, a mis padres Inés y Pedro por enseñarme el valor del estudio a pesar de no haber tenido la oportunidad de culminarlos. A mis hermanos Lady, Paúl, Xavier y a mis queridos sobrinos Emily, Danna, Annie y Antony. A Henry por motivarme y enseñarme a confiar en mí mismo.

A todos aquellos que me ayudaron en mi vida universitaria, a mis queridos maestros, compañeros y amigos; en especial a mis amigas Eri, Kristy y Karen. A mis mejores amigas Marty y Male gracias por estar siempre para mí.

Finalmente, agradezco a la Universidad de Cuenca por los incentivos y otorgarme una beca universitaria sin los cuales no hubiese sido posible la finalización de mis estudios universitarios.

A todos ustedes muchas gracias.

Agradecimiento conjunto:

A la Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable y Saneamiento (ETAPA-EP), a la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) y la Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y la Academia (CEDIA) por su colaboración. A nuestro director Ing. Álex Avilés y en especial a nuestro asesor Ing. Mario Guallpa por su apoyo.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

La ausencia de análisis de diversas variables meteorológicas impide comprender procesos naturales relacionados a ciclos hidrológicos y flujos de energía. Ello constituye un reto puesto que la región andina presenta una gran variabilidad meteorológica debido a su complejidad orográfica (Condom et al., 2020). La cuenca alta del Río Paute (CARP) durante décadas ha contado únicamente con estaciones pluviográficas, por lo que la variabilidad de la precipitación en nuestra área de estudio ha sido ampliamente estudiada por diversos autores (Buytaert, Celleri, Willems, Bièvre, & Wyseure, 2006; Célleri, Willems, Buytaert, & Feyen, 2007; Guallpa, Orellana-Alvear, & Bendix, 2019; Mora, Campozano, Cisneros, Wyseure, & Willems, 2014; Orellana-Alvear, Célleri, Rollenbeck, & Bendix, 2017; Padrón, Wilcox, Crespo, & Célleri, 2015; Rollenbeck & Bendix, 2011). A pesar que diferentes investigadores han abordado aspectos importantes en la CARP para temperatura del aire (Córdova et al., 2016; Mora & Willems, 2012), para humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, velocidad y dirección del viento, no se han estudiado ni determinado patrones espacio-temporales de estas variables; por consiguiente existe una brecha de conocimiento meteorológico acerca del comportamiento de variables meteorológicas y relaciones que presentan entre sí.

Por otra parte, los datos meteorológicos obtenidos en superficie son puntuales, desconociendo así los valores en los espacios existentes entre estaciones meteorológicas. Además, existe una buena densidad de estaciones en zonas urbanas y una pobre en zonas alejadas a las mismas. Por ello, es importante contar con alternativas como lo son los productos meteorológicos satelitales, ya que determinan valores de variables meteorológicas a diferentes resoluciones espaciales y temporales, permitiendo la obtención de datos desde cualquier ubicación del mundo de forma gratuita, convirtiéndose en herramientas de gran utilidad, principalmente en zonas con datos escasos. De esta forma, para utilizar dichos productos en una zona determinada, primero se deben evaluar los registros satelitales con datos de estaciones meteorológicas instalados en la superficie.

### 1.2. Justificación

El estudio de variables meteorológicas tiene un gran impacto en la comunidad científica por su influencia en los sistemas naturales y actividades humanas (Caloiero, Buttafuoco, Coscarelli, & Ferrari, 2015). Los registros que ofrecen las estaciones meteorológicas son de gran ayuda para



realizar múltiples estudios de investigación, desde modelos de predicción de clima (Rohm, Yuan, Biadeglne, Zhang, & Marshall, 2014) hasta relacionarlas con estudios epidemiológicos (Pani, Lin, & RavindraBabu, 2020). Lyra, Oliveira-Júnior, & Zeri (2014) destacan la influencia de los sistemas meteorológicos sobre diversas áreas, puesto que contribuyen en la planificación de sistemas de irrigación, drenaje, detección de riesgos climáticos e investigación de sus relaciones con procesos de contaminación atmosférica. Asimismo, la caracterización de patrones espacio-temporales de las variables meteorológicas puede ser aplicada en programas de conservación ambiental permitiendo una adecuada distribución de especies vegetales y planes de manejo ambiental. Para conocer patrones de dichas variables, es necesario contar con una red de estaciones meteorológicas distribuidas espacialmente en un área geográfica determinada; es así que desde el año 2014 la CARP dispone de un considerable número de estaciones meteorológicas para poder realizar un estudio detallado. Sin embargo, hasta la actualidad, no han sido utilizadas para comprender las interrelaciones y comportamientos de todas las variables meteorológicas en estudio, en la CARP.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Analizar espacial y temporalmente la meteorología en la cuenca alta del Río Paute.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- I. Evaluar, imputar y realizar un Análisis Exploratorio de Datos (EDA) de los registros de las estaciones meteorológicas.
- II. Analizar las relaciones espaciales de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, velocidad del viento, dirección del viento y altura).
- III. Analizar las relaciones temporales de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, velocidad del viento y dirección del viento).
- IV. Evaluar productos satelitales meteorológicos con datos de las diferentes variables meteorológicas registradas en la superficie.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Meteorología**

Meteorología es la ciencia que se dedica al estudio de la atmósfera y los fenómenos que se desarrollan en la misma (Coleman & Law, 2015), relacionados con una escala temporal corta (tiempo) y escala temporal larga (clima) (Holton & Staley, 1973).

### **2.2. Importancia de la meteorología**

A nivel mundial, el estudio de las diferentes variables meteorológicas por medio de estaciones establecidas se remonta hace un siglo atrás (Kuleshov et al., 2016). En la actualidad, la mayoría de localidades en el mundo cuentan con estaciones meteorológicas, puesto que es la mejor manera de obtener información confiable acerca de los cambios que se producen en la atmósfera y consecuentemente analizar sus efectos (Raspe et al., 2013). El objetivo de la recolección de variables meteorológicas es proporcionar un análisis y relacionarlas a diferentes escalas espaciales y temporales, permitiendo investigar la influencia de las condiciones meteorológicas en diferentes sucesos como la ocurrencia de eventos extremos en diferentes ecosistemas y asociarlos a aspectos importantes como disponibilidad, adaptabilidad de flora y fauna, ciclos de nutrientes y por supuesto, con las actividades antropogénicas (Raspe et al., 2013).

### **2.3. Variables meteorológicas**

#### **2.3.1. Temperatura**

La temperatura se refiere a la energía cinética de las partículas presentes en la materia, por lo tanto, a mayor agitación de partículas presentes en la materia la temperatura es mayor. Esta magnitud es uno de los principales parámetros que permiten comprender el estado en el que se encuentran las partículas que constituyen la atmósfera (Rodríguez Jiménez, Benito Capa, & Portela Lozano, 2004). Específicamente cuando nos referimos a temperatura del aire la entendemos como una medida que indica su promedio de energía cinética (velocidad promedio de los átomos y las moléculas), es así que temperaturas más altas corresponden a velocidades promedio más rápidas (Ahrens, 2001). Los cambios temporales de temperatura cerca de la superficie de la Tierra son causados por el cambio de estacionalidad y alteración del día y la noche, que a su vez depende de la latitud, elevación, topografía y su proximidad con océanos o lagos (Petterssen, 1941). La presencia de viento que provoca que las masas de aire estén en constante movimiento es otro de los factores que afectan la temperatura del aire (Rodríguez Jiménez et al., 2004).



### **2.3.2. Precipitación**

Se define como el resultado inmediato del proceso de condensación, el cual se entiende por la formación de nubes o nieblas formadas por numerosas gotas de aguas microscópicas. Existe una variedad de formas de precipitación como la llovizna, la lluvia o precipitación de agua en estado líquido, nieve o precipitación de agua en estado sólido, mezcla de nieve y lluvia, granizo, glaseado o lluvia helada, agujas de hielo entre otras (Petterssen, 1941).

### **2.3.3. Humedad**

Es el vapor de agua o agua condensada presente en la atmósfera. La humedad se expresa en términos de presión parcial de vapor de agua; sin embargo, existen otras formas más convenientes de expresarla, entre ellas tenemos al término de humedad relativa, la cual es expresada como la relación entre el contenido real de vapor en el aire y el contenido de vapor en el aire saturado (máxima presión de vapor de agua presente en la atmósfera) a cierta temperatura. La humedad relativa se denota en porcentajes (Willett & Sanders, 1959). Es necesario indicar que la humedad relativa es la forma más utilizada para expresar el contenido de vapor de agua dentro de una caracterización meteorológica (Whiteman, 2000) e indica la cercanía del aire de estar saturado; por el contrario, la humedad indica únicamente el contenido de vapor de agua en el aire (Ahrens, 2001).

### **2.3.4. Radiación solar**

La energía radiante es aquella que viaja a través del espacio, transferida por el sol hacia nuestro planeta en forma de ondas que poseen propiedades eléctricas y magnéticas. La radiación emitida por el sol es conocida como de onda corta, por lo contrario, la radiación terrestre (emitida por la Tierra) se le denomina como radiación de onda larga (Ahrens, 2008; Rodríguez Jiménez et al., 2004).

Al llegar esta energía radiante a la cima de nuestra atmósfera incide de tal forma que se transfiere a las capas más bajas donde se desarrollan procesos de absorción. Dicha absorción en la atmósfera ocurre en su mayoría por gases como: vapor de agua, oxígeno, ozono, dióxido de carbono. Adicionalmente, una menor cantidad del proceso de absorción sucede por la contribución de nubes. Otro proceso por el cual atraviesa antes de ser absorbida por la superficie de la Tierra es la reflexión por la dispersión de moléculas en la atmósfera (Bierly, Mitchell, Gerhardt, Baum, & Newton, 1972; Pearce, 2002).



Las formas en las que la radiación solar alcanza la superficie de la Tierra son las siguientes: la primera se constituye por la radiación solar directa, mientras que la segunda corresponde a la radiación solar difusa, y por último la radiación solar reflejada (Sarbu & Sebarchievici, 2017). La radiación solar que llega hasta la superficie de la Tierra está influenciado por factores tales como; la altitud solar, la transparencia de la atmósfera, latitud geográfica, día del año, hora del día, nubosidad, contenido de aerosol de la atmósfera, pendiente y orientación de la superficie, sombreado por el entorno del terreno, albedo superficial (o reflexión), duración de la luz solar y por último la elevación (Wang, 2019; Whiteman, 2000).

La suma de la radiación solar directa y la dispersa recibida en una superficie horizontal dentro de un ángulo sólido de  $2\pi$  es lo que se conoce como radiación solar global (Wang, 2019).

La radiación saliente sufre pequeñas variaciones entre latitudes. La radiación entrante llega a ser más pequeña que la radiación saliente en latitudes comprendidas entre  $40^\circ$  y  $90^\circ$ , mientras que en el caso de latitudes inferiores a los  $35^\circ$  de latitud la radiación entrante es mayor a la saliente (Haurwitz, 1941).

### **2.3.5. Presión atmosférica**

Es una magnitud que se refiere a la fuerza que ejerce una columna de aire por unidad de superficie (Rodríguez Jiménez et al., 2004). Se entiende por presión de aire al peso de aire sobre un plano horizontal dividido por el área del plano. A la misma se le conoce como presión hidrostática y no se considera que se produzca una aceleración vertical (Jacobson, 2005).

### **2.3.6. Viento**

Este término se utiliza para definir al aire en movimiento. Para un análisis meteorológico principalmente se observa dirección y velocidad de viento (Willett & Sanders, 1959). La dirección del viento indica el punto de referencia de la brújula desde la cual sopla una gran masa de aire (viento), la cual es expresada en grados (Ahrens, 2001; Willett & Sanders, 1959). La velocidad del viento puede ser medida en diversas magnitudes, tales como; nudos, millas náuticas por hora, metros por segundo o kilómetros por hora. Los vientos superficiales suelen ser inestables por lo que para registrar una observación la velocidad y dirección del viento son generalmente promediadas en un intervalo de tiempo (Willett & Sanders, 1959).

Ciertamente, los sistemas de viento son factores claves para entender el comportamiento de las demás variables meteorológicas en un ecosistema, con énfasis en zonas de montaña, y están



vinculadas al desarrollo de la nubosidad y precipitación en la zona (Whiteman, 2000). El viento se asocia principalmente a una fuerza de gradiente de presión, pues permite que la masa de aire fluya desde el gradiente con mayor presión hasta uno de baja presión. Mientras la diferencia de presiones sea mayor, la velocidad del viento aumentará (Mcgregor, 1999).

## **2.4. Relación entre variables meteorológicas**

### **2.4.1. Temperatura y Radiación**

Durante el día, la radiación solar atraviesa sin muchos impedimentos la atmósfera, incide en el suelo y se convierte a flujo de calor sensible, que calienta el aire adyacente a la superficie. Por lo tanto, la atmósfera de la Tierra no se calienta directamente por la radiación solar sino desde abajo por flujo de calor sensible, conociéndose a este fenómeno como convección (Whiteman, 2000). Cuando un objeto absorbe más energía de la que emite se calienta; por ejemplo, este proceso sucede en un día soleado ya que la superficie de la Tierra absorbe más energía solar. Sin embargo, por la noche la radiación de onda corta del sol y la radiación del cielo disperso están ausentes. La radiación emitida por el suelo es, por regla general, mayor que la radiación recibida de la atmósfera y como consecuencia la superficie terrestre se enfría y el aire por encima de ésta también se enfriará. No obstante, la temperatura puede permanecer constante cuando un objeto emite y absorbe energía a velocidades iguales (Ahrens, 2001; Haurwitz, 1941).

### **2.4.2. Temperatura y Humedad relativa**

La temperatura tiene una relación inversa no lineal con la humedad relativa. Cuando la temperatura aumenta, el aire incrementa su capacidad para almacenar humedad; por tanto, la máxima cantidad de vapor de agua que podrá contener el aire (aire saturado) aumentará. Por consiguiente, la humedad relativa disminuirá puesto que estará más lejos de alcanzar la saturación (Llambí et al., 2012). Cuando la temperatura del aire incrementa en 10 °C, la humedad relativa disminuye hasta aproximadamente la mitad de su valor inicial (antes del incremento de 10 °C) (Willett & Sanders, 1959).

### **2.4.3. Viento, Temperatura del aire y Presión atmosférica**

Cuando el aire incrementa su temperatura, éste se eleva debido a que su densidad es menor respecto a un aire frío. Dicho movimiento provoca una diferencia de presión en el aire lo que induce que los vientos se generen. La dirección del viento se da desde una región de mayor presión hacia otra de menor presión (Spellman, 2013).



Cuando la diferencia de presión o el gradiente de presión son fuertes, la velocidad del viento es alta y viceversa. La fuerza del viento es proporcional a la diferencia de presión entre las dos regiones (Whiteman, 2000). La presión atmosférica influye en los vientos subsiguientes y la probabilidad de precipitación (Spellman, 2013).

#### **2.4.4. Variables meteorológicas con la altitud**

Variables como la temperatura del aire, velocidad del viento y la radiación solar que alcanzan la superficie, varían según la altura (Whiteman, 2000).

La temperatura varía con la altura. En la tropósfera a medida que la altura incrementa la temperatura disminuye, por lo general la temperatura disminuye  $0.6^{\circ} C$  por  $100 m$  (Petterssen, 1941). Aunque, esto es lo habitual, ciertos datos de temperatura denotan que existen capas en donde la temperatura es constante con la altura (isotermas), mientras que hay capas en la cual la temperatura incrementa con la altura (inversión) (Whiteman, 2000).

La presión disminuye continuamente con la altura puesto que el peso de aire sobre un punto se vuelve menor al ascender de altura. Los cambios de presión se ven afectados por la temperatura y la densidad del aire, pero la regla general utilizada por muchos meteorólogos indica que un cambio de  $10 m$  en la altura equivale a un cambio de  $1 hPa$ . La presión cambia mucho más rápido con la altura que con las distancias horizontales (Whiteman, 2000). Además es necesario precisar que la diferencia de presión entre puntos en el mismo nivel está relacionada con la dirección y la velocidad del viento (Willett & Sanders, 1959).

La velocidad del viento presenta variaciones con la altura entre la superficie del suelo y la parte superior de la capa turbulenta superficial. Debido a la fricción superficial del suelo la velocidad real del viento a lado del suelo corresponde al valor mínimo hasta una altura más elevada en donde no se transmite el predominio de la fricción superficial. No solo la velocidad del viento varía con la altura puesto que la dirección también cambia de manera proporcional a la velocidad con respecto a la altura, esta variación se desarrolla desde un ángulo de unos  $40^{\circ}$  o  $45^{\circ}$  a través de las isobaras en un nivel (Willett & Sanders, 1959).

Para que la radiación solar incida en la superficie terrestre debe atravesar varias barreras en la atmósfera de la Tierra, como se explicó en la sección 2.3.4, por lo que a una elevación superior la



radiación solar que alcance dicha superficie será mayor que a menores altitudes. Por consiguiente la relación entre la radiación solar incrementará con la altitud (Whiteman, 2000).

## **2.5. Tratamiento de variables meteorológicas**

Para el éxito de la caracterización meteorológica se debe contar con una buena calidad de datos. El control de calidad inicia con la visualización de la serie de tiempo para realizar análisis básicos como cálculo de medias y detectar la presencia de valores atípicos (Mbogo, Rakitin, & Visheratin, 2017). Es necesario evaluar datos imperfectos o la existencia de vacíos debido a fallas técnicas en la toma de datos en un tiempo determinado (Davey, Redmond, & Simeral, 2007). Según WMO (2011) no se debe partir del supuesto que los datos crudos son erróneos y los datos procesados son de alta calidad, ya que esto dependerá del correcto manejo y procesamiento de las estaciones meteorológicas. De esta manera es recomendable que para mantener la calidad de los datos se eviten cambios en la recolección, manejo, transmisión y procesamiento en el conjunto de datos. Además, se tienen que registrar todo el proceso de tratamiento de la información en caso de ser necesarios, puesto que cambios en ubicaciones geográficas de las estaciones, cobertura de suelo, sensores de medición, entre otras circunstancias no relacionadas a factores climáticos pueden ocasionar desviaciones graduales o discontinuidad en los datos.

### **2.5.1. Patrones de datos faltantes**

Las causas que provocan los datos perdidos en un conjunto de datos son importantes al momento de hacer inferencias sobre los mismos. En primer lugar, existen datos Perdidos al Azar (MAR), en los cuales los datos disponibles son de tipo representativos para la población de datos con la que contamos. En segundo lugar, se encuentran los datos Perdidos Completamente al Azar (MCAR) cuando la probabilidad de estar perdidos es la misma para todos los datos, lo que significa que los datos no están relacionados. Finalmente los datos Perdidos No al Azar (MNAR) que implica que las razones por la que dichos valores están perdidos son variadas y desconocidas (Rubin, 1976; Shtiliyanova et al., 2017).

### **2.5.2. Imputación de datos faltantes**

La existencia de vacíos en un conjunto de datos es muy frecuente y puede invalidar resultados de estudios en diferentes grados. Ante la presencia de estos vacíos se puede recurrir a dos opciones principales. La primera consiste en eliminar los casos con valores perdidos, mientras que la segunda se refiere a sustituir dichos valores perdidos por otros valores razonables o aproximados



a la realidad; es decir, imputar datos (Kabacoff, 2011). El porcentaje aceptable de datos faltantes utilizados en la literatura varía. Para el relleno de datos de precipitación y temperatura se ha demostrado su efectividad para un 26 % de datos faltantes a escala diaria (Campozano, Sanchez, Aviles, & Samaniego, 2014). Sin embargo, debido a que los métodos de imputación suelen disminuir su efectividad cuando el porcentaje de datos faltantes va en aumento (García Reinoso, 2015) otros estudios prefirieron utilizar un menor porcentaje de datos faltantes. Afrifa-Yamoah, Mueller, Taylor, & Fisher (2020) trabajaron con un conjunto de datos del 10 % de observaciones perdidas para el relleno de series de velocidad de viento, humedad y temperatura, sobre todo al tratarse de escala horaria puesto que su variabilidad es mayor.

### **2.5.3. Imputación Múltiple**

La imputación múltiple (IM) es una técnica estadística aplicada con métodos de inteligencia artificial y su uso se ha incrementado en los últimos años en el área de climatología para datos de radiación solar global (Turrado Crespo et al., 2014), velocidad del viento (Wesonga, 2015) e imputación de datos de precipitación diaria (Aguilera, Guardiola-albert, & Serrano-hidalgo, 2020; Ruy et al., 2017). El enfoque de este método se basa en simulaciones repetidas asumiendo una función  $y = f(x)$ ; en donde  $f$  es la función desconocida que se desea estimar. A partir del conjunto de datos de entrenamiento ( $x$ ) se obtendrá  $\hat{y} = \hat{f}(x)$ , la cual se entiende como una primera simulación. En las diferentes simulaciones se utilizan métodos de Monte Carlo, de esta forma los datos se combinan para proporcionar estimaciones de los resultados tomando en cuenta los intervalos de confianza e incertidumbre interpuesta por los valores perdidos. Por ello se dice que su uso está asociado a problemas complejos de valores perdidos, en donde interviene la probabilidad y aleatoriedad. La IM crea en general de 3 a 10 conjuntos de datos completos a partir de la base de datos con valores perdidos. Los métodos de IM están disponibles en el software R a través de diferentes paquetes: Amelia, MI y MICE (Kabacoff, 2011). Para que la inferencia estadística de los resultados obtenidos del relleno de datos mediante la imputación múltiple sea válida se asume que contamos con datos MAR (Aieb, Madani, Scarpa, Bonacorso, & Lefsih, 2019). Kabacoff (2011) menciona que también se puede partir de datos MCAR para llegar a estimaciones válidas con IM.

#### **2.5.3.1. Comparación predictiva media (PMM)**

Este método es conocido como PMM (Predictive Mean Matching) por sus siglas en inglés. Es un método iterativo y consiste en imputar valores plausibles a partir de valores observados. Es similar



a una regresión lineal, aunque los valores perdidos son reemplazados por medio de una estación donadora vecina cercana. Se asume que la distribución de los datos perdidos sigue el mismo modelo de regresión que los datos observados en las estaciones cercanas (Bertsimas, Pawlowski, & Zhuo, 2018; Blair & Lacy, 1993; Copas & Malley, 2008; Jinubala & Lawrence, 2016; Vink, Frank, Pannekoek, & van Buuren, 2014). Una ventaja principal que presenta el método es que los datos imputados se pueden considerar más ajustados debido a que los valores predichos empatan con valores observados en el conjunto de datos; por lo que, no existirán datos fuera del rango de valores observados, además el método es capaz de preservar relaciones no lineales (Castro Cacabelos, Gude Samp Pedro, & Pérez González, 2014).

### **2.5.3.2. Media Ponderada Predictiva**

El método es similar al anterior, con la diferencia que para seleccionar el valor imputado se utiliza pesos ponderados para componer el grupo de estaciones donadoras combinada con una nueva función de distancia. Este método se basa en un Bootstrap Bayesiano (Salfrán Vaquero, 2018).

### **2.5.3.3. Árboles de clasificación y regresión (CART)**

Los árboles de clasificación y regresión también son conocidos como CART (Classification And Regression Trees) por sus siglas en inglés. El método se basa en particiones recursivas del conjunto de datos en submuestras homogéneas, en las cuales se utiliza un ajuste de un modelo de predicción simple. Al contrario de otros métodos, CART no desarrolla una ecuación en específico para la predicción de los datos perdidos, ya que utiliza submuestras de las variables dependientes que pueden ser representados a través de un árbol de decisión, cuyo uso es útil para predecir los datos faltantes en base a nuevas observaciones. La variable a la cual aplicaremos el modelo puede ser discreta o continua, en el primer caso se aplicará árbol de clasificación y en el segundo árbol de regresión (Loh, 2011; Salfrán Vaquero, 2018).

### **2.5.3.4. Bosques Aleatorios (RF)**

Este método es conocido como RF (Random Forest) por sus siglas en inglés. Al igual que el método anterior, *RF* utiliza como base los árboles de decisiones y se fundamenta en la división binaria de árboles hasta alcanzar su objetivo, el cual consiste en encontrar una función predictora para cada uno de los árboles que a su vez están dependiendo de variables aleatorias. Posterior a ello, se combinan las predicciones de los árboles para reducir el riesgo de sobreajuste y así obtener una precisión más elevada (Cutler, Cutler, & Stevens, 2012; Deng, Chang, Ido, & Long, 2016).



## 2.6. Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

El EDA se define como el proceso aplicado a un conjunto de datos para comprender su estructura, describir patrones, tendencias y relaciones entre variables (Andrienko & Andrienko, 2006; Pearson, 2018).

El EDA incluye objetivos iniciales de acuerdo a los intereses de los investigadores, tales como verificar problemas en el conjunto de datos, errores de medición o datos faltantes, entre otros. A través del mismo se verifica evidencia que contradiga hipótesis anteriormente establecidas (Andrienko & Andrienko, 2006; Peng, 2016). Aunque en el EDA se utiliza técnicas cuantitativas, en su mayoría está asociada a representaciones gráficas de los datos, debido a que los analistas se apoyan en dichas herramientas para comprender su estructura y capacidades para reconocer patrones (Andrienko & Andrienko, 2006).

## 2.7. Análisis espacial

Los datos espaciales son datos georreferenciados. Poseen dos componentes principales, el primero se refiere a un atributo o información atribuida a una coordenada como la medida que describe el fenómeno que está siendo analizado, mientras que el componente espacial describe la ubicación espacial de las medidas; además, puede incorporar información de relaciones espaciales con otros datos (Plant, 2012). En el campo de los sistemas de información geográfica se suele utilizar ampliamente el término de análisis espacial. Los resultados de este análisis presentan las estructuras espaciales de los sistemas que están bajo una investigación, obteniendo representaciones cartográficas de las mismas en mapas (Haining, 2004).

La distribución espacial de los mapas y su precisión dependen en gran medida de la densidad de estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio. Las condiciones meteorológicas pueden tener una variabilidad considerable incluso a distancias cortas dentro de la región sur en los Andes ecuatorianos; esto debido a su compleja topografía puesto que las montañas que la rodean actúan como una barrera natural (Oñate-Valdivieso et al., 2018). Para explicar similitudes de patrones espaciales entre variables meteorológicas de diferentes estaciones es posible aplicar métodos de clasificación no supervisada: *clustering*.



### 2.7.1. Clasificación no supervisada: *Clustering*

Este análisis consiste en el agrupamiento de un conjunto de datos formado por  $n$  observaciones en  $k$  grupos. El *clustering* se logra al aplicar algoritmos basados en métodos no supervisados que toman como base de referencia el grado de similitud o criterios similares (García-Días, Vieira, López Pinaya, & Mechelli, 2020).

#### 2.7.1.1. *Clusters* para análisis espacial de datos meteorológicos

Son varios los autores que exploran los datos obtenidos de diferentes redes meteorológicas mediante análisis espacial con *clusters*. Castro, Carvajal, & Ávila (2012) emplearon análisis con *clusters* para la precipitación a escala mensual de 150 estaciones en el Valle del Cauca, Colombia encontrando 60 *clusters*. Tiwari, Kumar Jha, & Sivakumar (2019) utilizaron este análisis como paso previo a interpolación para reconstruir datos de precipitación diaria en una cuenca hidrográfica de Australia. En la misma línea, Goyal & Gupta (2014) aplicaron el método para identificar los regímenes de lluvia homogénea en India. Lyra, Oliveira-Júnior, & Zeri (2014) aplicaron análisis *cluster* para encontrar patrones espaciales y temporales en la lluvia mensual en el estado de Alagoas en Brasil, en el que lograron determinar 5 grupos homogéneos. Además, se han utilizado diferentes técnicas de análisis por *clusters* para encontrar similitudes en la meteorología de diferentes lugares. Autores como Arroyo, Tricio, Corchado, & Herrero (2015) utilizaron para encontrar patrones climáticos similares en cuatro estaciones ubicadas en diferentes localizaciones de España; asimismo, Huth, Nemesova, & Klimperová (1993) lo aplicaron para caracterización diaria de días con condiciones meteorológicas similares utilizando temperatura del aire, humedad relativa y velocidad de viento.

#### 2.7.1.2. Métodos de análisis *cluster*

Son diversos los métodos utilizados para este tipo de análisis; sin embargo, los métodos más utilizados son aquellos que se basan en distancias. Existen los métodos por partición, entre ellos se encuentran k-medias y k-medoides; dichos métodos se fundamentan en centroides, los mismos pueden ser la media o medoides<sup>1</sup> de los objetos asignados a cada grupo y requiere de un número de grupos para empezar. Entre los métodos k-medoides se encuentran las técnicas de particionamiento alrededor de medoides (PAM) y agrupación de aplicaciones grandes (CLARA);

---

<sup>1</sup> Término que se refiere a los objetos representativos dentro de un grupo cuya disimilitud es mínima (Kassambara, 2017).



mientras que PAM explora los medoides que mejor funcionan del conjunto de datos, CLARA únicamente explora los medoides de los objetos seleccionados (Han, Kamber, & Pei, 2011).

Uno de los más conocidos en el área de meteorología es el método de clasificación jerárquica. El método, a diferencia de otros anteriores, no divide al conjunto de datos en un número particular de clases, al contrario, se trata de divisiones de series en diferentes niveles. Dicho método a su vez se subdivide en clasificación jerárquica por aglomerados y clasificación jerárquica por división (Everitt, Landau, Leese, & Stahl, 2011). La primera considera a cada variable de entrada como un conglomerado en solitario, posteriormente se agrupan de acuerdo a sus similitudes hasta constituir un único conglomerado con todas las observaciones. Por el contrario, la clasificación jerárquica por división realiza un proceso similar pero parte de un gran conglomerado con todas las observaciones hasta obtener pequeños conglomerados, cada uno con una única observación de entrada (Everitt et al., 2011; Kassambara, 2017).

## **2.8. Análisis temporal**

Este tipo de análisis relaciona la presencia de un fenómeno estudiado en diferentes momentos o escalas de tiempo (Andrienko & Andrienko, 2006).

Una serie de tiempo se refiere a un conjunto de observaciones de una variable en estudio, cuyos datos se encuentran orientados en orden cronológico o que obedecen una secuencia temporal. Por lo general, para modelos de series de tiempo se emplean parámetros estadísticos de datos históricos de determinada variable con la finalidad de representar su comportamiento a través del tiempo (Montgomery, Jennings, & Kulahci, 1983). La importancia del análisis de series de tiempo radica en la revelación de relaciones entre variables en estudio, la evolución que presentan a través del tiempo o los cambios cuantitativos que presentan (Perpiñán, 2014).

## **2.9. Productos satelitales meteorológicos de reanálisis**

Los productos satelitales de reanálisis son aquellos que proveen datos de distintas variables meteorológicas en extensas áreas y amplios períodos de tiempo, caracterizándose por ser homogéneos, continuos y confiables. Además, con el objetivo de estimar de mejor manera el estado de la atmósfera y presentarlos sobre cuadrículas y en diferentes intervalos temporales, los productos combinan tanto modelos con información de observaciones de varias fuentes como radiosondas, observaciones satelitales y terrestres. Estos productos son utilizados en investigación



climática, incluyendo el monitoreo y comparación de las condiciones climáticas actuales con las pasadas (Ghodichore, Dhanya, & Vinnarasi, 2017; Greybush, Gillespie, & Wilson, 2019; Hu et al., 2019).

### **2.9.1. ERA5**

ERA5 es la quinta generación de productos satelitales meteorológicos del Centro Europeo para Predicciones de Clima de Medio Alcance (ECMWF), y presenta una resolución espacial de 31 *km*, 137 niveles verticales, y una resolución temporal de 1 hora. ERA5 presenta datos a escala horaria y mensual tanto a diferentes niveles de presión como a un único nivel (Urraca, Huld, Lindfors, et al., 2018). Los productos satelitales meteorológicos, a pesar de su gran utilidad en la investigación climática, pueden presentar incertidumbre respecto a diferentes observaciones, por ello es importante evaluarlos respecto a una zona geográfica determinada previo a su uso.

### **2.9.2. ERA5-Land**

La diferencia principal que presenta en comparación con ERA5 es la mejora en la resolución espacial a la que se encuentra, de tal modo ERA5-Land presenta 9 *km* de grilla, con datos de la superficie terrestre, desde una profundidad de suelo de 289 *cm* hasta 2 *m* sobre el nivel superficial. Una mejora adicional interesante son correcciones para las variables de humedad, presión y temperatura de aire involucrando las diferencias de altitudes. Por otro lado, los dos satélites comparten resolución temporal, por lo que al igual que ERA5 la información está disponible a escala horaria y a promedios mensuales. Los datos climáticos están disponibles desde 1981 hasta la actualidad; sin embargo, se espera la disponibilidad de datos desde 1950. ERA5-Land es el más novedoso de los productos satelitales, puesto que sus datos fueron publicados en julio de 2019 (ECMWF, 2019).

### **2.9.3. Antecedentes de evaluación de ERA5**

Existen varios estudios que evalúan el rendimiento de ERA5 en diferentes partes del mundo, por ejemplo en Nueva Zelanda se evaluó la temperatura del aire a distintas presiones (Tradowsky, Bodeker, Querel, Bultjes, & Fischer, 2018); en Europa, Australia, Océano Atlántico Tropical y a nivel global se lo valoró respecto a radiación solar (J. Huang, Rikus, Qin, & Katzfey, 2018; Urraca, Huld, Gracia-Amillo, et al., 2018; Urraca, Huld, Lindfors, et al., 2018; Walawender, Boilley, Blanc, Wald, & Antipolis, 2017); en la Península Ibérica con respecto a precipitación (Hénin,



Liberato, Ramos, & Gouveia, 2018); y en la costa de Bélgica, Noruega, Alemania, Dinamarca, Francia, oeste de África y Letonia con respecto a condiciones del viento (Allaerts, Broucke, Van Lipzig, & Meyers, 2018; Aniskevich, Bezrukovs, Zandovskis, & Bezrukovs, 2017; Olauson, 2018; Rüfenacht et al., 2018; Sterl, Liersch, Koch, Lipzig, & Thiery, 2018). Baudouin, Herzog, & A Petrie (2020) evaluaron el rendimiento de datos de reanálisis para precipitación en una zona montañosa al sur de Asia, en el mismo compararon el rendimiento de ERA5 con productos satelitales provistos por la NASA, como MERRA 2, los resultados reportaron una mejor estimación a las observaciones en tierra por parte de ERA5. Al sur de la península antártica se validó datos de reanálisis desde ERA5 y ERA Interim para las siguientes variables; temperatura a dos metros, velocidad del viento, dirección de viento y precipitación (Tetzner, Thomas, & Allen, 2019). Finalmente, para la variable de precipitación y temperatura del aire, Nogueira (2020) realizó una comparación de las estimaciones de lluvia mensual de ERA5 con una versión anterior (ERA Interim) y GPCP (Proyecto Global Climatológico de Precipitación). Su análisis se enfocó principalmente en las zonas de los trópicos.

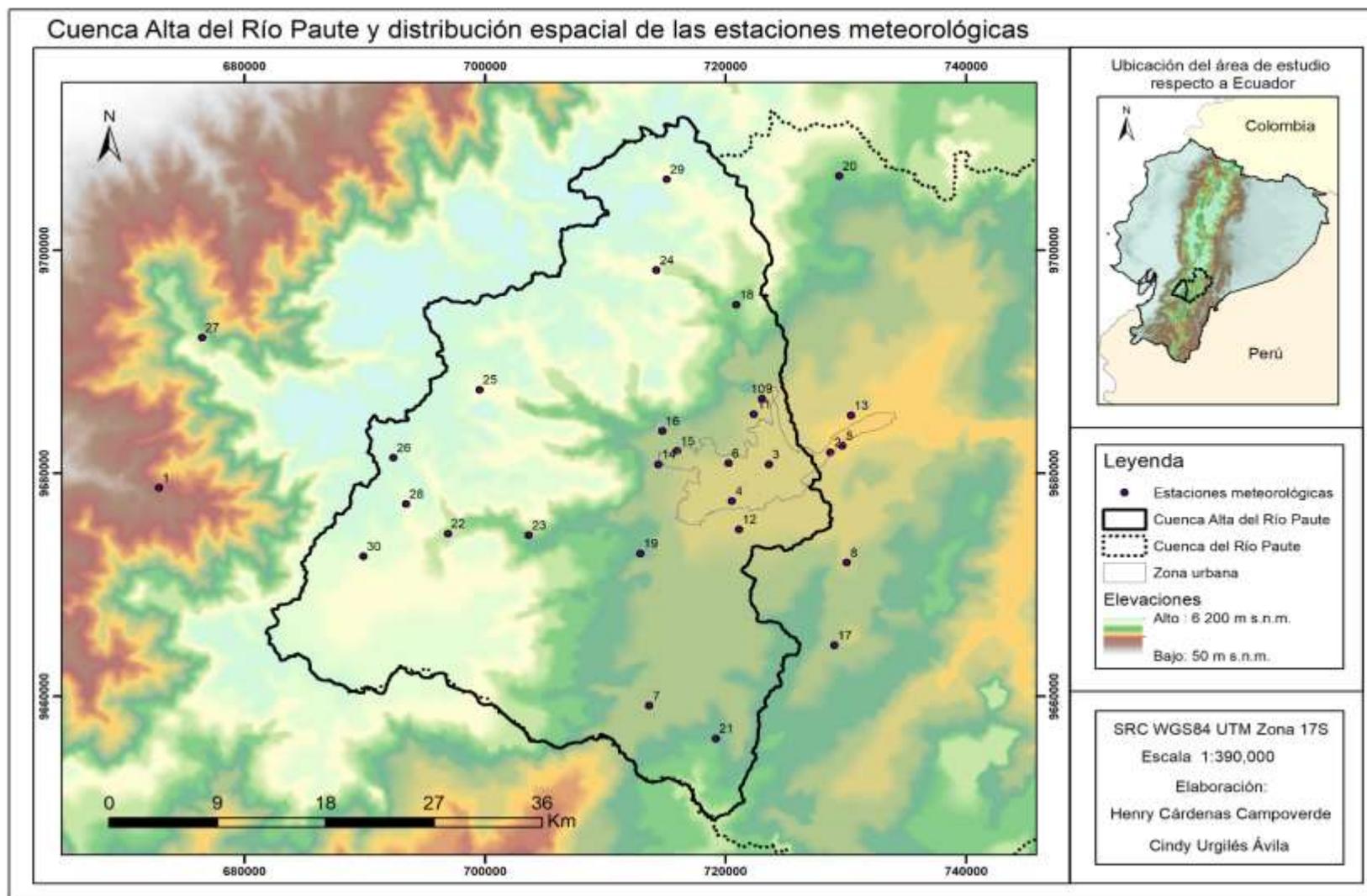


### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Área de estudio

La cuenca del Río Paute está localizada al sur de Ecuador en la depresión interandina de la cordillera de los Andes. La extensión del área es de aproximadamente  $5066 \text{ km}^2$ , con un amplio rango altitudinal desde  $1840 \text{ m s.n.m.}$  hasta los  $4680 \text{ m s.n.m.}$  (Mora et al., 2014). Su importancia radica en los beneficios ambientales y socioeconómicos que representan para la región; de esta manera, uno de los servicios más notables es el uso de la cuenca como una fuente para la producción de electricidad a través de hidroeléctricas y constituye un importante afluente para la cuenca del Río Amazonas (Campozano, Tenelanda, Sanchez, Samaniego, & Feyen, 2016). Respecto al clima, varios han sido los estudios sobre la precipitación y temperatura, que son las más monitoreadas dentro de dicha área. Los estudios han demostrado que la cuenca consta de una gran variabilidad espacial y temporal en cuanto a precipitación, mientras los regímenes de temperatura varían desde clima tropical frío hasta clima tropical cálido (Mora et al., 2014; Vanacker, Molina, Govers, Poesen, & Deckers, 2007). El clima montañoso de la región está influenciado por masas de aire provenientes del este por la cuenca del Amazonas y del oeste por el océano Pacífico (Guallpa et al., 2019; Oñate-Valdivieso et al., 2018). Esta investigación se enfocó en la parte alta de la cuenca del Río Paute que se encuentra al occidente e incluye a la ciudad de Cuenca; la extensión que presenta es de  $1625 \text{ km}^2$  como se puede observar en la *Figura 1*.

**Figura 1.** Ubicación del área de estudio y distribución espacial de las estaciones meteorológicas



**Nota.** Los identificadores de las estaciones meteorológicas se presentan en la *Tabla 1*, columna *ID*.

## 3.2. Análisis y evaluación de datos recopilados

### 3.2.1. Recopilación de datos meteorológicos

La *Tabla 1* presenta las treinta estaciones recopiladas inicialmente para el estudio (cuenca alta del Río Paute), de las cuales trece estaciones meteorológicas pertenecen a la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP) y diecisiete a la Universidad Politécnica Salesiana (UPS). La escala temporal a la cual se encuentran los datos meteorológicos crudos es horaria; cada estación contiene información disponible en un período de tiempo diferente, en general desde enero de 2014 hasta julio de 2019.

**Tabla 1.** Información de las estaciones meteorológicas disponibles

| ID | Nombre de la estación | Institución | Coordenada X | Coordenada Y | Altitud (m s.n.m.) |
|----|-----------------------|-------------|--------------|--------------|--------------------|
| 1  | Chaucha               | UPS         | 672859       | 9678693      | 2050               |
| 2  | Ucubamba*             | ETAPA       | 728722       | 9681876      | 2425               |
| 3  | UPS*                  | UPS         | 723581       | 9680795      | 2530               |
| 4  | CTS*                  | UPS         | 720507       | 9677512      | 2540               |
| 5  | Nulti*                | UPS         | 729705       | 9682457      | 2631               |
| 6  | Cebollar*             | ETAPA       | 720230       | 9680898      | 2652               |
| 7  | Irquis*               | UPS         | 713642       | 9659185      | 2667               |
| 8  | Santa Ana*            | UPS         | 730084       | 9672005      | 2680               |
| 9  | Tixán*                | ETAPA       | 723026       | 9686691      | 2708               |
| 10 | Tixán*                | UPS         | 723020       | 9686680      | 2717               |
| 11 | Sinincay*             | UPS         | 722340       | 9685287      | 2722               |
| 12 | Turi*                 | UPS         | 721102       | 9674967      | 2766               |
| 13 | Llacao*               | UPS         | 730419       | 9685182      | 2768               |
| 14 | San Joaquín*          | UPS         | 714404       | 9680809      | 2774               |
| 15 | Sayausí               | UPS         | 715966       | 9682000      | 2799               |
| 16 | Sayausí PTAP*         | ETAPA       | 714719       | 9683783      | 2847               |
| 17 | Quingeo*              | UPS         | 729054       | 9664604      | 2890               |
| 18 | Machángara DJ Chulco* | ETAPA       | 720890       | 9695100      | 2979               |
| 19 | Baños*                | UPS         | 712899       | 9672814      | 3076               |
| 20 | Esmeralda*            | ETAPA       | 729429       | 9706623      | 3171               |
| 21 | Cumbe*                | UPS         | 719176       | 9656245      | 3193               |
| 22 | Soldados*             | ETAPA       | 696891       | 9674608      | 3269               |
| 23 | Yanuncay en Pucán*    | ETAPA       | 703600       | 9674444      | 3320               |
| 24 | El Labrado*           | ETAPA       | 714224       | 9698186      | 3434               |
| 25 | Mamamag*              | ETAPA       | 699520       | 9687482      | 3592               |
| 26 | Ventanas*             | ETAPA       | 692346       | 9681395      | 3592               |
| 27 | Molleturo*            | UPS         | 676437       | 9692153      | 3705               |
| 28 | Izhcayrrumi*          | ETAPA       | 693422       | 9677234      | 3748               |
| 29 | Chanlud*              | ETAPA       | 715089       | 9706315      | 3851               |
| 30 | Soldados              | UPS         | 689859       | 9672550      | ND                 |

**Nota.** ND= No Disponible. El signo (\*) indica las estaciones meteorológicas utilizadas para la evaluación de productos meteorológicos en las secciones 3.7, 4.6 Fuente: Adaptado de la base de datos meteorológica de ETAPA EP y UPS.



### 3.2.2. Variables en estudio

Las variables meteorológicas en estudio junto con sus unidades se muestran en la *Tabla 2*. Debido a la procedencia de datos desde dos diferentes bases, es preciso asegurar que las variables meteorológicas se encuentren en las mismas unidades. Únicamente en el caso de la presión atmosférica se presenta diferente nomenclatura, siendo *hPa* en el caso de la UPS, mientras que *mb* en ETAPA EP; sin embargo, ambos son equivalentes por lo que se trabajó con la nomenclatura de *hPa*.

**Tabla 2.** *Variables meteorológicas en estudio*

| <b>Variabes meteorológicas</b> | <b>Unidades</b>                       |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Temperatura del aire           | $^{\circ} C$                          |
| Precipitación                  | <i>mm</i>                             |
| Humedad relativa               | %                                     |
| Radiación Solar Global         | $W.m^{-2}$                            |
| Presión atmosférica            | <i>hPa</i>                            |
| Velocidad de viento            | $m.s^{-1}$                            |
| Dirección de viento            | <i>Grados (<math>^{\circ}</math>)</i> |

### 3.2.3. Procesamiento de datos

Debido a que los datos meteorológicos de las diferentes estaciones utilizadas para este estudio no se encontraban estructurados con un mismo formato y presentaban períodos de datos faltantes, se realizó un tratamiento inicial puesto que estas diferencias afectan los resultados de investigaciones (Tsinko, Bakhshaii, Johnson, & Martin, 2018).

### 3.2.4. Evaluación de la calidad de los datos

En el Manual de control de datos hidrometeorológicos elaborado por Guallpa, 2014 se dicta una serie de pasos para el control de la calidad de los datos desde la medición hasta la descarga de los mismos. La evaluación se enfocó en la calidad de los datos crudos, para lo cual se automatizaron los procesos con el software R. Se inició con un análisis de datos meteorológicos obtenidos por las diferentes estaciones meteorológicas. Al contar con bases de datos de diferentes instituciones, fue preciso unificar el formato de fechas y horas de las diferentes observaciones, así como revisar la continuidad de las observaciones a escala horaria. Se aplicó un sumario estadístico en el cual se presenta el número de observaciones, vacíos existentes, valores máximos, mínimos, media, mediana y cuartiles. Esto se realizó en diferentes etapas del procesamiento de datos: para la base de datos originales, para la base de datos aplicada el formato de fechas continuas que permite



contabilizar el número verdadero de observaciones y para la base evaluada con los pasos detallados a continuación:

1. Se verificó que las mediciones de cada variable se encuentren dentro del rango de medición de los sensores de acuerdo a la *Tabla 3* y *Tabla 4*.
2. Se identificó y eliminaron valores imposibles o improbables.
3. Se analizaron valores atípicos mediante gráficos interactivos.
4. Se revisó la continuidad de datos en un cierto período de tiempo, ya que suelen ser indicativos de mala digitación o falta de valores en el registro.
5. Se revisaron valores de ceros improbables comparando espacial y temporalmente los datos de una estación con otras cercanas.
6. Se graficaron series de tiempo para identificar si existen desfases temporales especialmente en datos de presión, velocidad y dirección del viento, para posteriormente aplicar soluciones mencionadas en Guallpa (2014).

Los análisis anteriores fueron complementados a través de la construcción de una aplicación web (*.html*) con gráficos interactivos (*Apéndice A*. Captura de pantalla de un ejemplo de la aplicación web interactiva para evaluación de calidad de datos) de las diferentes series de tiempo en escala temporal horaria, diaria y mensual. En la aplicación web fue posible comparar el comportamiento de cada variable entre estaciones del área en estudio.

**Tabla 3.** Información de los sensores de la UPS

| Variable               | Nombre del sensor                                | Unidad    | Mínimo | Máximo | Precisión  | Resolución |
|------------------------|--|-----------|--------|--------|--|------------|
| Temperatura            | Pt 100 RTD 1/3 Clase B IEC 751                   | °C        | -80    | 60     | -80 +20°C +/- (0.226 - 0.0028 x temperatura)°C<br>+20 +60°C +/- (0.055+0.0057 x temperatura)°C |            |
| Precipitación          | Tipping Bucket Rain Gages Model T525             |           |        |        | 1.0% hasta 50 mm/h   | 1 tip      |
| Humedad relativa       | Sonda de humedad HMP155 con sensor HUMICAP 180R© | %         | 0      | 100    |  |            |
| Radiación Solar Global | Mukseflux SR11                                   | $Wm^{-2}$ | 0      | 2000   | Rango de temperatura -40 + 60°C<br>Dependencia de temperatura < 0.1 %/°C                       |            |
| Presión Barométrica    | Vaisala BAROCAP Baro-1                           | hPa       | 500    | 1100   | Rango de temperatura de operación: -40 + 60°C<br>Precisión total +/- 0,25 hPa                  | 0.10 hPa   |
| Velocidad del viento   | YOUNG-Ultrasonic Anemometer Model 85000          | m/s       | 0      | 70     | (30 m/s) +/- 2% o 0.1 m/s<br>(70 m/s) +/- 3%   | 0.10 m/s   |
| Dirección de viento    | YOUNG Ultrasonic Anemometer Model 85000          | Grados    | 0      | 360    | +/- 2 grados   |            |

**Nota.** Fuente: Adaptado de guía del usuario de sensores meteorológicos de UPS

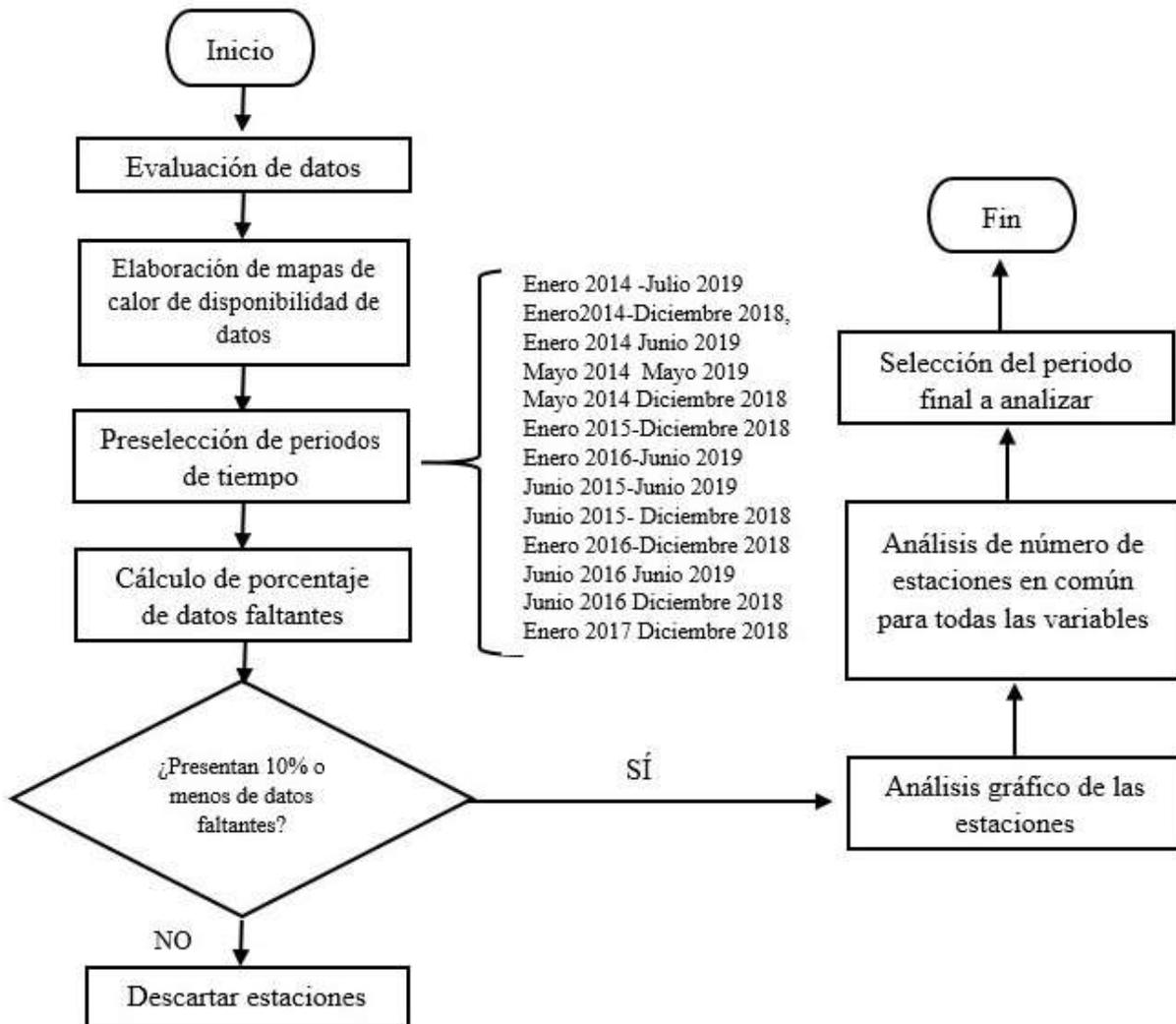
**Tabla 4.** Información de los sensores de ETAPA EP

| Variable               | Nombre del sensor                              | Unidad    | Mínimo | Máximo | Precisión   | Resolución    |
|------------------------|--|-----------|--------|--------|---|---------------|
| Temperatura            | CS215<br>Temperature                           | ° C       | -40    | 70     | +/- 0.3 °C en 25 °C<br>+/- 0.4 °C sobre 5 a 40 °C<br>+/- 0.9 °C sobre -40 a 70 °C   |               |
| Precipitación          | Tipping Bucket<br>Rain Gages<br>Model TE525    |           |        |        | 1.0% hasta 50 mm/h  | 1 tip         |
| Humedad relativa       | Relative Humidity<br>Probe                     | %         | 0      | 100    | Precisión a 25° C<br>+/-2 % sobre 10 a 90%<br>+/-4 % sobre 0 a 100%   |               |
| Radiación Solar Global | CS300<br>Pyranometer                           | $Wm^{-2}$ | 0      | 2000   | ±5% para radiación total<br>Rango de temperatura<br>-40 + 70°C  |               |
| Presión Barométrica    | CS105/CS105MD<br>Barometric<br>Pressure Sensor | mb        | 600    | 1060   | +/-0.5 mb a +20 °C<br>+/-2 mb a 0 °C -40 °C<br>+/-4 mb a -20 °C -45 °C<br>+/-6 mb a -40 °C- 60 °C                                   |               |
| Velocidad del viento   | Met One 034B<br>Windset                        | m/s       | 0      | 75     | (+/- 0.12 m/s) para<br>velocidad del viento<br><10.10 m/s<br>(+/- 1.10 m/s) de lectura<br>para velocidades de<br>viento > 10.10 m/s | 0.7998<br>m/s |
| Dirección de viento    | Met One 034B<br>Windset                        | Grados    | 0      | 360    | +/- 4 grados  | 0.5 °         |

**Nota.** Fuente: Adaptado de guía del usuario de sensores meteorológicos de ETAPA EP

### 3.2.5. Análisis de períodos de tiempo

Una vez realizada la evaluación de los datos, y puesto que las estaciones meteorológicas presentan vacíos de datos en diferentes períodos, fue necesario determinar el período de tiempo más idóneo para el estudio. Se decidió seleccionar estaciones con máximo 10 % de datos faltantes (Afrifa-Yamoah et al., 2020). La *Figura 2*. Flujo de trabajo para la selección del período de tiempo de análisis indica el proceso realizado para la selección de dicho período.

**Figura 2.** Flujo de trabajo para la selección del período de tiempo de análisis

### 3.3. Imputación de datos faltantes

Para la aplicación de los diferentes métodos de imputación se construyeron bases de datos de una misma variable meteorológica. En dichas bases de datos las variables son constituidas por cada estación meteorológica, mientras que las observaciones corresponden a los registros de cada una de ellas. Por ejemplo, para imputar datos de temperatura del aire de una determinada estación se utilizaron como sus predictores a las variables de temperatura de las demás estaciones meteorológicas.

Debido a las condiciones topográficas en las cuales se ubica nuestra área de estudio, es un reto predecir la dirección y velocidad del viento puesto que el flujo que siguen los vientos es altamente

variado y no depende precisamente del comportamiento de estaciones meteorológicas cercanas. Como consecuencia de lo anterior, se decidió realizar extensivas pruebas de relleno de datos a la velocidad y dirección del viento, en las mismas se incluyeron las dos variables por separado y en conjunto, con el fin de analizar cual ofrece un mejor desempeño.

Para imputar datos faltantes se aplicó IM, que utiliza simultáneamente múltiples variables, mediante el paquete MICE del software R. Los métodos utilizados fueron comparación predictiva media (PMM), media predictiva ponderada (MT), árboles de clasificación y regresión (CART) y bosques aleatorios (RF).

### 3.3.1. Métodos de imputación de datos faltantes

#### 3.3.1.1. Comparación predictiva media (PMM)

El algoritmo PMM inicia por aplicar una regresión ordinaria de mínimos cuadrados a partir de los valores observados del predictor ( $X_{obs}$ ) dado los valores de la variable que se desea imputar ( $Y_{obs}$ ), la ecuación que se ajusta al modelo es  $Y_{obs} = X_{obs}\beta + \varepsilon$ , en donde  $\varepsilon$  es el error aleatorio normalmente distribuido con varianza  $\sigma^2$  y expectativa 0, mientras  $\beta$  es el coeficiente de regresión correspondiente. Este ajuste se realiza con el fin de estimar los coeficientes de regresión, obteniendo  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{\sigma}$  y  $\hat{\varepsilon}$ , posterior a ello se dibuja de forma aleatoria desde una distribución predictiva posterior y consecuentemente estimará un nuevo conjunto de parámetros, los cuales son  $\sigma^{2*}$  y  $\beta^*$ , donde  $\sigma^{2*} = \frac{\hat{\varepsilon}^T \hat{\varepsilon}}{A}$  y A es un valor variante de  $x^2 = n_{obs} - r$  donde  $n_{obs}$  es el número de muestras con valores observados de Y y r es el número de coeficientes de regresión, mientras que  $\beta^*$  se extrae de una distribución normal centrada  $\hat{\beta}$  con matriz de  $\sigma^{2*}(X_{obs}^T X_{obs})^{-1}$ .

Como paso siguiente se deduce los siguientes valores;  $\hat{Y}_{obs} = X_{obs}\hat{\beta}$  y  $\hat{Y}_{mis} = X_{mis}\beta^*$ ; en donde  $X_{mis}$  representa los valores perdidos del predictor. Se encuentra el error absoluto ( $\Delta = |\hat{Y}_{obs} - \hat{Y}_{mis,j}|$ ) para cada  $\hat{Y}_{mis}$ . muestra de forma aleatoria de  $(\Delta^{(1)}, \Delta^{(2)}, \Delta^{(3)})$  en donde  $\Delta^{(1)}, \Delta^{(2)}$  y  $\Delta^{(3)}$  son los elementos más pequeños en  $\Delta$  de manera respectiva y toman los correspondientes  $Y_{obs,i}$  como la imputación. Por último, el proceso se repite m veces para obtener m conjuntos de datos completos (Copas & Malley, 2008; Gómez, Pacheco, & López Herrero, 2017; Vink et al., 2014).

#### 3.3.1.2. Media predictiva ponderada (MT)

El algoritmo actúa de forma similar a la media ponderada; sin embargo, en la selección de estaciones donantes opta por incluir la *Ecuación 1*, la cual indica la probabilidad de ser usada como un valor imputado, para cada estación donadora (Salfrán Vaquero, 2018).



$$P(Y_{ij}^* = Y_{ij}) = \frac{v_i d_{i,i}^{-k}}{\sum_{i'=1}^{n_{obs}} (v_{i'} d_{i',i'}^{-k})}$$

**Ecuación 1**

En donde,

$v$  = pesos de arranque negativos de los donantes

$k$  = Parámetro de ajuste de “cercanía” de la importancia de la distancia

$d$  = Función de distancia usada

**3.3.1.3. Árboles de clasificación y regresión (CART)**

El método es similar a PMM; aunque, en lugar de obtenerlo por un modelo de regresión se obtiene mediante árboles de decisión. El algoritmo empieza por dibujar una muestra de *bootstrap*, el cual es un método estadístico no paramétrico de remuestreo (Kreiss & Lahiri, 2012), de los datos observados de tamaño  $n_{obs}$ , ajusta  $Y_{obs}$  restringido a por un modelo de árbol  $f(x)$ . Predice los nodos del terminal de las muestra de valores perdidos  $n_{mis}$  desde  $Y_{mis}$ . El algoritmo especifica el conjunto de donantes mediante todas las observaciones para calcular las imputaciones en base a ellos (Loh, 2011; Salfrán Vaquero, 2018).

**3.3.1.4. Bosques aleatorios (RF)**

Inicia de una construcción desde un número y ajuste de  $k$  número de árboles y la unión de  $k$  estaciones donde los valores imputados son seleccionados de manera aleatoria (Salfrán Vaquero, 2018).

**3.3.2. Validación de la imputación de datos faltantes**

Para evaluar los métodos de imputación se utilizó una muestra aleatoria de 10% de los datos disponibles, mientras que el 90% de datos aleatorios restantes fue utilizado para entrenar los modelos. Se calculó el error medio ( $ME$ ), el error medio absoluto ( $MAE$ ), la raíz del error cuadrático medio ( $RMSE$ ), el porcentaje de desviación ( $PBIAS$ ), el coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $r$ ), y el coeficiente de eficiencia Kling Gupta ( $KGE$ ). En base a estos estadísticos se seleccionaron los métodos con mejor desempeño y posterior a ello se imputaron datos faltantes (Araya-López, 2014; Campozano et al., 2014; Ferrari & Ozaki, 2014; Jimenez & Rodriguez, 2014; Liu, Wei, & Zhang, 2018; Turrado Crespo et al., 2014).



### 3.3.2.1. Error medio (ME)

Como se observa en la *Ecuación 2*, al tomar en cuenta el signo de los errores, esta métrica ayuda a medir si los valores predichos sobreestiman (+) o subestiman (-) los valores reales. Como los valores negativos y positivos se compensan, un valor de cero no precisamente indica un predicción perfecta, pero mientras los valores sean más cercanos a cero el método funciona mejor (Camarillo-Peñaranda, Saavedra-Montes, & Ramos-Paja, 2013).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{sim} - Y_{obs})$$

**Ecuación 2**

En donde:

$Y_i^{obs}$  = Se refiere al valor observado

$Y_i^{sim}$  = Es el valor simulado o imputado

$n$  = total de número de observaciones

### 3.3.2.2. Error medio absoluto (MAE)

Mide la diferencia absoluta entre valores reales y los valores predichos por un modelo. Está dado por la *Ecuación 3* (Cichosz, 2015).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_{sim} - Y_{obs}|$$

**Ecuación 3**

En donde:

$Y_i^{obs}$  = Se refiere al valor observado

$Y_i^{sim}$  = Es el valor simulado o imputado

$n$  = total de número de observaciones



### 3.3.2.3. Raíz del error cuadrático medio (*RMSE*)

Debido a que la interpretación del error cuadrático medio (*MSE*) dado por la *Ecuación 4* presenta dificultades por el cambio de escala, la raíz del error medio cuadrático es más práctico, tal como se observa en la *Ecuación 5* y su uso es más popular. El *MSE* es calculado para un modelo, en donde se calcula la diferencia entre el valor real y el valor predicho por el modelo. Posterior a ello se suman dichos valores elevados al cuadrado para evitar trabajar con números negativos, por último, dicho valor es dividido para el número de muestras. Este estadístico ayuda a identificar el desempeño de diferentes métodos, mientras más bajo sea su valor indicará un mejor rendimiento, los valores de *RMSE* pueden variar de acuerdo a muchos factores, como la variable para la cual se utiliza y la escala temporal (Cichosz, 2015).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{sim} - Y_{obs})^2$$

**Ecuación 4**

En donde:

$Y_i^{obs}$  = Se refiere al valor observado

$Y_i^{sim}$  = Es el valor simulado o imputado

$n$  = total de número de observaciones

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

**Ecuación 5**

Las unidades de las medidas de error (*MAE*, *ME* y *RMSE*) serán las mismas que el conjunto de datos para las que se apliquen.

### 3.3.2.4. Porcentaje de Desviación (*PBIAS*)

Su nomenclatura es *PBIAS* y mide la tendencia promedio del modelo creado por la simulación de los datos y se expresa en porcentajes. Observa qué tan pequeño o grande es la desviación de los datos simulados con respecto a los observados, por lo que un valor de cero indica un valor óptimo,



mientras que más alejado sea de este valor puede indicar a un modelo “pobre” y está expresado por la *Ecuación 6* (Moriassi et al., 2007).

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

### Ecuación 6

En donde:

$Y_i^{obs}$  = Se refiere al valor observado

$Y_i^{sim}$  = Es el valor simulado o imputado

$n$  = total de número de observaciones

#### 3.3.2.5. Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ )

Es un estadístico útil para datos muestrales, en donde mide la correlación lineal entre pares ordenados de datos. En este caso, el coeficiente permite identificar el grado en que los datos imputados por un modelo mantienen la tendencia general de los datos observados (Field, Miles, & Field, 2012; Triola, 2018). El cálculo de  $r$  está dado por la *Ecuación 7*.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}}$$

### Ecuación 7

En donde:

$n$  = es el número de pares ordenados

$x, y$  = los pares ordenados

Sus valores se encuentran entre -1 y 1. Un valor de cero indica la inexistencia de una relación lineal. Un valor de 1 y -1 se interpreta como una relación lineal perfecta, mientras que el signo positivo indica que una variable incrementa su valor a la vez que la otra también lo hace. El signo



negativo indica que mientras una variable incrementa la otra disminuye (Ratner, 2009). La interpretación de este coeficiente puede ser observado en la *Tabla 5*.

**Tabla 5.** Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson

| Correlación       | Interpretación                        |
|-------------------|---------------------------------------|
| +/- (0 – 0.20)    | Relación lineal muy débil o inestable |
| +/- (0.20– 0.40)  | Relación lineal débil                 |
| +/- (0.40 – 0.60) | Relación lineal moderada              |
| +/- (0.60 – 0.80) | Relación lineal fuerte                |
| +/- (0.80 – 1)    | Relación lineal muy fuerte            |

**Nota.** Fuente: Recuperado de “Interpreting Assessment Data: Statistical Techniques You Can Use”, Christmann & Badgett, 2008, p. 98, Arlington, Virginia: NSTApress.

### 3.3.2.6. Coeficiente de eficiencia de Kling Gupta (*KGE*)

*KGE* es una derivación del coeficiente de *NASH* pues lo corrige para evitar la subestimación de la variabilidad de la función de ajuste. En la *Ecuación 8* incluye la desviación estándar de simulaciones y observaciones (Tarek, Brissette, & Arsenault, 2019). Al interpretar el valor de coeficiente debemos tomar en cuenta que es un índice de evaluación de carácter adimensional, en donde 1 indica que la simulación es *perfecta* y mientras más cercano a ese valor el rendimiento del modelo de imputación es mejor. Valores de  $0.5 > KGE > 0$  indican que el rendimiento del modelo es *pobre*, los valores de cero o menores indican que la eficiencia de un modelo es inaceptable (Knoben, Freer, & Woods, 2019).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$$

**Ecuación 8**

En donde:

$\sigma_{obs}$  = es la desviación estándar en las observaciones

$\sigma_{sim}$  = la desviación estándar en las simulaciones



$\mu_{sim}$  = la media de las simulaciones

$\mu_{obs}$  = la media de los datos observados

### 3.4. Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

En la sección anterior se mencionó la metodología utilizada para el tratamiento de las variables meteorológicas, tanto para la evaluación como para el procesamiento de datos perdidos; dichos procesos forman parte del EDA. En esta sección nos enfocamos en análisis estadísticos del conjunto de datos completo.

#### 3.4.1. Medidas estadísticas descriptivas

Se procedió a examinar desde el punto de vista descriptivo las variables en estudio. En la *Tabla 6* se presenta los estadísticos calculados para las diferentes variables.

**Tabla 6.** Estadísticos calculados para las diferentes variables meteorológicas

|                        | Promedio | Mínimo | Máximo | 1er.Q | Mediana | 3er.Q | Rango | Rango<br>IQ | Desviación<br>Estándar |
|------------------------|----------|--------|--------|-------|---------|-------|-------|-------------|------------------------|
| Temperatura            | X        | X      | X      | X     | X       | X     | X     | X           | X                      |
| Precipitación          | X        | X      | X      | X     | X       | X     | X     | X           | X                      |
| Humedad                | X        | X      | X      | X     | X       | X     | X     | X           | X                      |
| Radiación              | X        | X      | X      | X     | X       | X     | X     | X           | X                      |
| Presión                | X        | X      | X      | X     | X       | X     | X     | X           | X                      |
| Velocidad<br>de viento | X        | X      | X      | X     | X       | X     | X     | X           | X                      |
| Dirección<br>de viento | X        | X      | X      | X     | X       | X     | X     | X           | X                      |

**Nota.** 1er. Q =Primer Cuartil, 3er. Q = Tercer Cuartil, Rango IQ= Rango Intercuartílico.

#### 3.4.2. Correlación entre variables meteorológicas

Se calculó el coeficiente de correlación lineal de Pearson, dado por la *Ecuación 7* entre diferentes pares de variables meteorológicas. El proceso se aplicó para las tres escalas temporales: horarias, diarias y mensuales.



### 3.4.3. Pruebas de Normalidad

Para identificar si un conjunto de datos observados es consistente con un concepto formulado (hipótesis nula=  $H_0$ ) se realizan pruebas estadísticas (Storch & Zwiers, 1999). En nuestro caso la  $H_0$  indica que el conjunto de datos sigue una distribución normal. Dos fueron las pruebas aplicadas, la prueba Kolmogorov-Smirnov y posterior a ella se aplicó la prueba Lilliefors, esta última es una más robusta y una variación de la primera, propuesta por Lilliefors (1967).

El nivel de significancia  $p$  (probabilidad de riesgo controlada por el usuario) utilizada fue de 0.05. Cuando el *valor p* es menor a 0.05 la hipótesis nula se rechaza y por tanto la distribución no es normal, mientras que cuando el valor es mayor a 0.05 la hipótesis nula se acepta, por tanto se trata de una distribución normal (Storch & Zwiers, 1999).

Una vez obtenido los resultados se resumieron para análisis posteriores e interpretar resultados.

## 3.5. Análisis Espacial

En esta sección se presenta la metodología utilizada para encontrar similitudes de patrones espaciales meteorológicos entre estaciones en el periodo junio 2015 a diciembre de 2018. Para ello se decidió aplicar *clustering*. Por otra parte, se incluye la metodología para analizar la relación entre la altitud y las variables meteorológicas.

### 3.5.1. Análisis espacial mediante *Clustering*

El análisis *clustering* constó de dos partes esenciales. La primera implica un análisis que permite conocer si la base de datos puede ser clasificada por estos métodos, así como el procesamiento de los datos de entrada. La segunda parte del análisis incluye la selección del método más adecuado para encontrar similitudes en el comportamiento de variables meteorológicas y la validación del mismo. Los procesos aplicados se analizan a profundidad en los siguientes párrafos.

#### 3.5.1.1. Evaluación de la tendencia *Clustering*

Se calculó el estadístico *Hopkins*, el cual aplica la *Ecuación 9* para evaluar la tendencia de los datos a ser agrupados. Cuando el valor es menor o igual a 0.5 significa que las observaciones están distribuidas uniformemente; es decir, no es fácilmente agrupable, mientras que más cercano sea el valor a 0 la hipótesis nula (el conjunto de datos está uniformemente distribuido) es rechazada y la muestra puede ser agrupada mediante este análisis. Este paso resulta importante puesto que



aplicar el algoritmo siempre desencadenará como resultado grupos, aunque se traten de datos completamente aleatorios sin ningún tipo de relación entre sí (Kassambara, 2017).

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i}$$

### Ecuación 9

En donde:

$x_i$  = Distancia entre los puntos del conjunto real de datos

$y_i$  = Distancia entre los puntos del conjunto simulado de datos con la misma variación que el conjunto real de datos.

$n$  = Número de datos

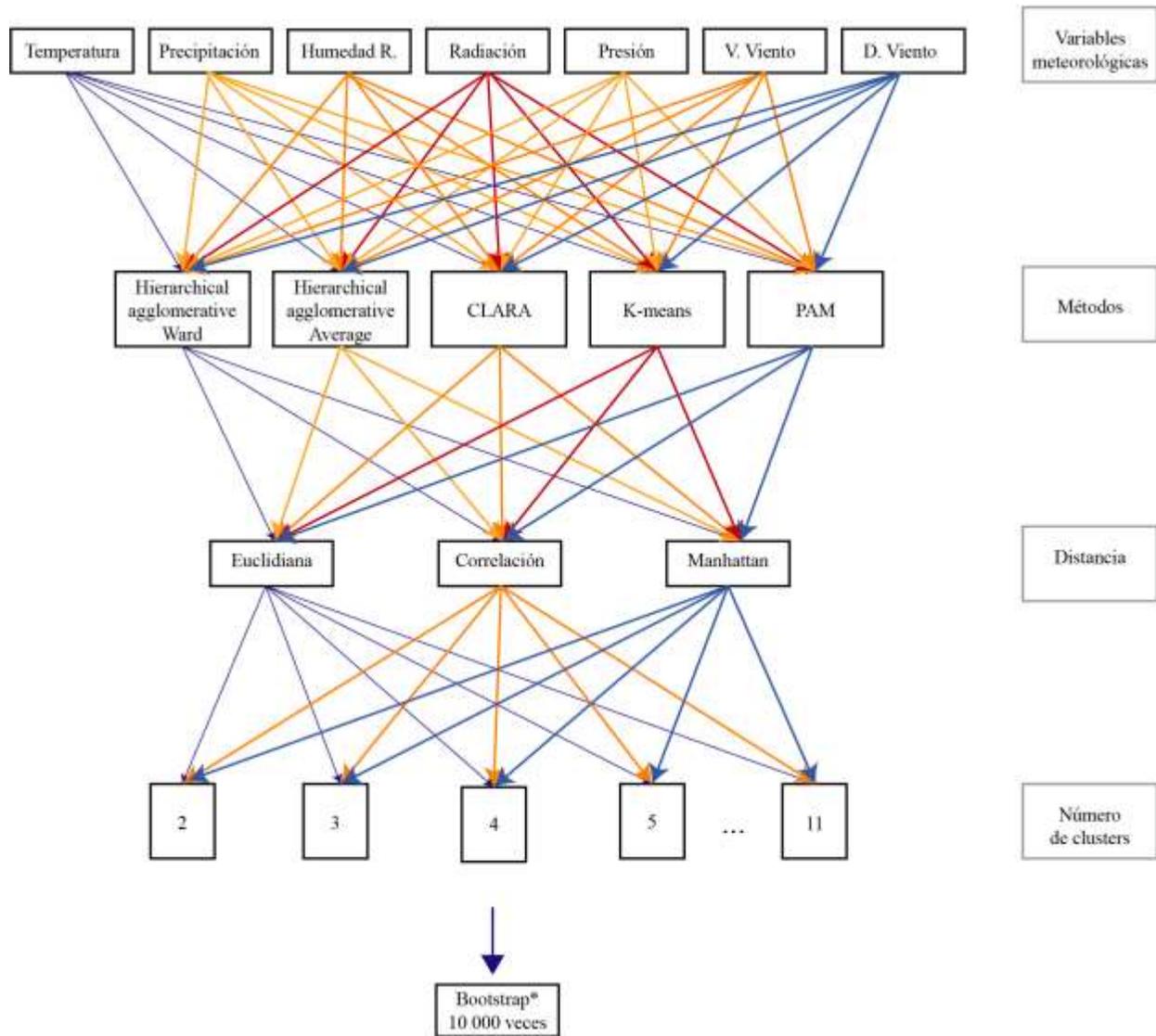
El análisis por conglomerados se desarrolló a escala temporal diaria. Al realizar este análisis partimos de la preparación de los datos, los mismos no contaron con datos perdidos, puesto que se estimaron mediante el procedimiento detallado en la sección 3.3. El análisis realizado para cada variable meteorológica no requirió de una estandarización debido a que se encuentran en las mismas unidades establecidas en la *Tabla 2*.

#### 3.5.1.2. Estadísticos de validación para seleccionar el mejor algoritmo *cluster*

Con la finalidad de validar las técnicas utilizadas y elegir el mejor método basado en distancias mostradas en la *Figura 3*, se procedió a aplicar medidas estadísticas de validación interna (coeficiente de silueta, índice Dunn e índice de conectividad). Estos estadísticos nos permitieron conocer si en cada grupo los objetos pertenecientes a los mismos tienen similitud entre ellos y diferencias distinguibles entre distintos grupos. Por una parte, el coeficiente de silueta (*Ecuación 10*) nos indica qué tan cerca está un objeto de pertenecer al grupo correcto; su valor óptimo es 1, mientras que un valor negativo significa que dicho objeto no debería estar dentro de ese grupo. Si los valores son cercanos a cero indican que el objeto podría estar en medio de dos grupos. Por otra parte, el índice *Dunn* representado por la *Ecuación 11* mide la relación entre la distancia de separación y diámetro de cada grupo, por lo que es mejor mientras mayor es el valor. Finalmente, el índice de conectividad mide la cercanía de un objeto a sus vecinos cercanos, se encuentra entre

0 y puede tener valores hasta el infinito, pero su valor debe ser mínimo (Kassambara, 2017; Shobha & Asha, 2017).

**Figura 3.** Metodología del análisis cluster basado en distancias para datos meteorológicos.



$$S_i = \frac{b_i - a_i}{\max(b_i - a_i)}$$

**Ecuación 10**

En donde:



$b_i$  = Diferencia mínima entre una observación  $i$  de un grupo y el grupo más cercano al que no pertenece.

$a_i$  = Promedio de disimilitud entre una observación  $i$  y otros puntos del grupo.

$$D = \frac{\text{min. separación}}{\text{max. diámetro}}$$

**Ecuación 11**

En donde:

*min. separación* = Mínima distancia para pares entre grupos.

*max. diámetro* = Promedio de disimilitud entre una observación  $i$  y otros puntos del grupo.

### 3.5.1.3. Medidas de distancia *cluster*

Son diversos los tipos de distancia para lograr encontrar el grado de disimilitud entre un par de observaciones; sin embargo, en este estudio se compararon tres tipos de distancia, la distancia Euclidiana (*Ecuación 12*), distancia Manhattan (*Ecuación 13*), distancia de correlación de Pearson (*Ecuación 14*). Para los métodos de clasificación jerárquica por aglomerados se eligen otros parámetros, como lo son las medidas de encadenamiento, en este caso se aplicó el método Ward y método de encadenamiento medio. Mientras el método Ward permite disminuir la varianza dentro de cada aglomerado; el método de encadenamiento medio define a las distancias entre objetos de diferentes grupos como la distancia promedio (Han et al., 2011; Kassambara, 2017).

$$d_{euc}(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

**Ecuación 12**

$$d_{man}(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

**Ecuación 13**



$$d_{cor}(x, y) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

#### Ecuación 14

En donde  $x, y$  son dos vectores,  $\bar{y}$  es el promedio de  $y$ , e  $i$  representan a las observaciones.

#### 3.5.1.4. Cálculo del *valor-p* para métodos jerárquicos

Para los métodos jerárquicos se realizó un remuestreo con *bootstrap* de 10 000 veces; esto para asegurarse que los grupos formados sean significativos y que un objeto no se encuentre dentro de un grupo por error o debido a ruido (Kassambara, 2017).

#### 3.5.2. Análisis de variación altitudinal de las variables meteorológicas

Se aplicó una regresión lineal simple entre altitud de las estaciones y los promedios mensuales de las variables meteorológicas. Además, se evaluó el ajuste mediante el coeficiente de determinación  $R^2$  (Córdova et al., 2016). Esta medida de rendimiento se calcula al elevar al cuadrado la correlación lineal de Pearson dada por la *Ecuación 7*. Si el valor obtenido es 1 se interpreta como un modelo cercano a la *perfección* (Cichosz, 2015). Finalmente, se determinó el *valor-p*, con un nivel de significancia de 5 %, para determinar si la correlación entre la altitud y una variable fue significativa.

### 3.6. Análisis Temporal

#### 3.6.1. Perfiles temporales

Los datos originalmente se encontraban a escala horaria, por lo cual fue necesario transformarlos a escala diaria, semanal, mensual y anual. Estas conversiones se realizaron en el software R. Se construyeron diferentes perfiles para evaluar su comportamiento a través del tiempo, además, se identificaron valores máximos y mínimos de cada variable reportados en el período de estudio. Se utilizaron parámetros estadísticos globales que permiten resumir el conjunto de datos de todas las estaciones; es por ello que medidas de referencia como la mediana y promedio fueron utilizadas. Cazorla & Tamayo (2014) mencionan que una herramienta adecuada para demostrar tendencias principalmente en datos meteorológicos a escala horaria es la mediana, ya que permite graficar series de tiempo e identificar su tendencia de manera efectiva al filtrar datos que provocan sesgos.

### 3.6.2. Variaciones diarias

Para presentar series de tiempo múltiples con las siete variables se utilizó la gráfica de horizonte puesto que permite visualizar incrementos o reducciones a través del tiempo con respecto al promedio diario de todas las estaciones por variable (Perpiñán, 2014). La gráfica se representa en una escala horizontal por días del año.

### 3.6.3. Identificación de eventos extremos

Los eventos extremos identificados en el presente estudio corresponden a temperatura del aire y precipitación. Los índices que se muestran en la *Tabla 7*. Descripción de los índices de eventos extremos para temperatura y precipitación fueron obtenidos en ClimPACT2 versión 1.2, desarrollado por el Equipo Experto de Detección e Índices en Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés). Climact2 es un paquete disponible en el software R.

**Tabla 7.** Descripción de los índices de eventos extremos para temperatura y precipitación

| Índices   | Nomenclatura | Unidades | Observaciones   |
|---|--------------|----------|---|
| Número de olas de calor                                   | HWN          | Eventos  | Se considera una ola de calor cuando 3 o más días consecutivos presentan TX > percentil 90 de TX o cuando TN > percentil 90 de TN |
| Duración máxima de las olas de calor anuales              | HWD          | Días     | La duración de la ola de calor más larga  |
| Número de olas de frío                                    | CWN          | Eventos  | Se considera una ola de frío cuando 3 o más días consecutivos presentan TX < percentil 10 de TX o cuando TN < percentil 10 de TN. |
| Duración máxima de las olas de frío anuales               | CWD          | Días     | La duración de la ola de frío más larga   |
| Días Consecutivos Secos                                   | CDD          | Días     | Máximo número anual de días consecutivos con precipitación acumulada diaria < 1 mm  |
| Días Consecutivos Húmedos                                 | CWD          | Días     | Máximo número anual de días consecutivos con precipitación $\geq 1$ mm.   |
| Cantidad de días cálidos                                  | TX90p        | %        | Porcentaje anual de días cuando TX > percentil 90 de TX   |
| Cantidad de días fríos                                    | TX10p        | %        | Porcentaje anual de días cuando TX < percentil 10 de TX   |
| Contribución de lluvia total anual desde días muy húmedos | R95pTOT      | %        | $100 * r95p / PRCPTOT$  |

**Nota.** TX= Temperatura máxima diaria; TN= Temperatura mínima diaria; r95p= Suma anual de precipitación diaria > percentil 95; PRCPTOT = suma de precipitación diaria  $\geq 1.0$  mm. Fuente: Adaptado de Alexander & Herold (2016)

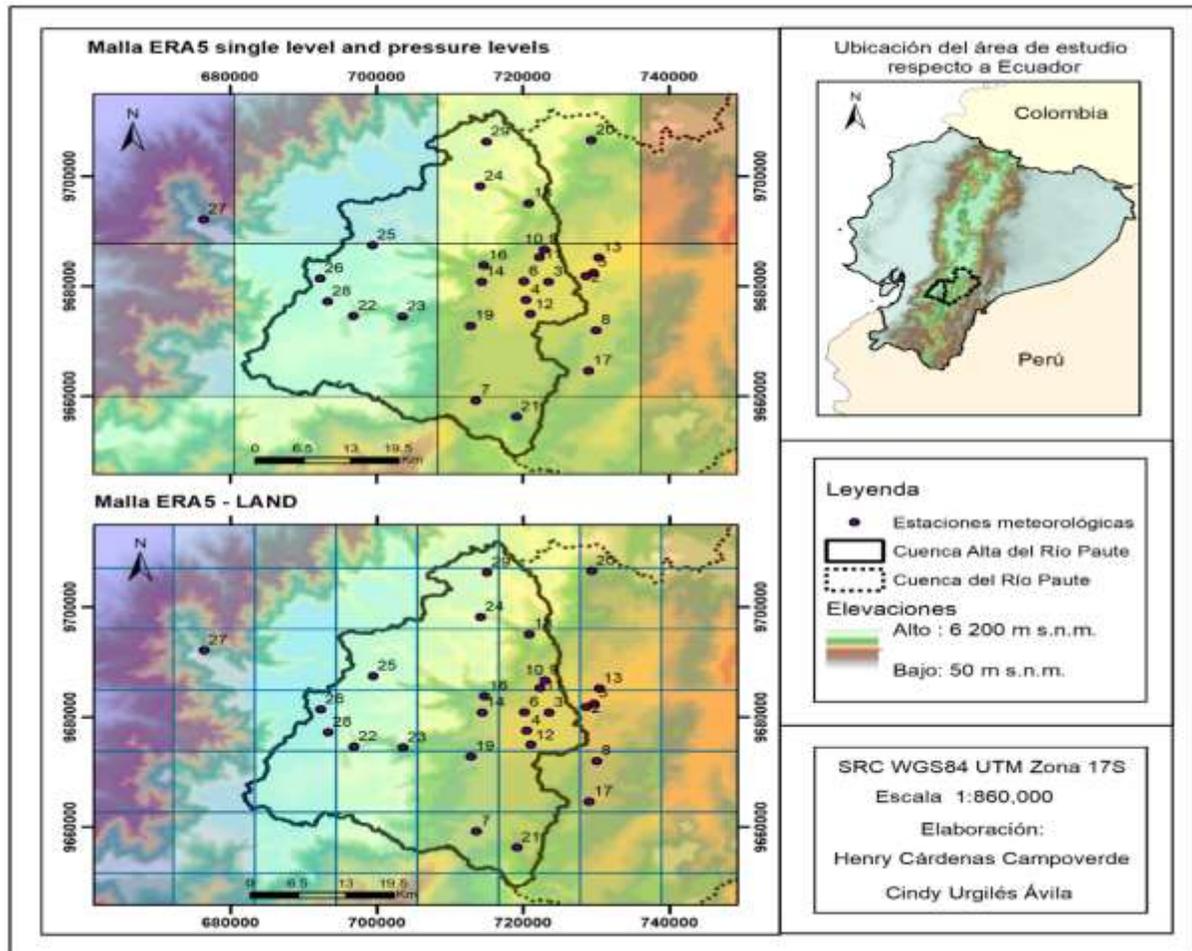
### 3.7. Evaluación de productos meteorológicos de reanálisis

En esta parte del estudio se utilizaron 27 estaciones meteorológicas señaladas con asterisco en la *Tabla 1* distribuidas a lo largo del área de estudio; la densidad de los pixeles para ERA5 y ERA5 Land se muestra en la *Figura 4*. Se evaluó para cada variable meteorológica el desempeño de los productos satelitales meteorológicos de reanálisis ERA5 y ERA5 Land a escala temporal horaria, diaria y mensual. Los datos de reanálisis fueron obtenidos en formato NetCDF desde <https://cds.climate.copernicus.eu/> y procesados en el software R. Las variables en estudio se presentan en la *Tabla 8*. Variables de productos satelitales meteorológicos de acuerdo a las especificaciones de cada variable de los datos de reanálisis. Para ser comparables con la base de datos de las estaciones meteorológicas fue necesario realizar un pre procesamiento de las mismas. Para datos a escala temporal horaria se modificó la zona horaria de UTC (*Universal Time Coordinated*) a la zona horaria local (UTC-5). Por otra parte, se realizó una conversión de unidades de los datos de reanálisis a los utilizados en nuestro estudio (*Tabla 2*), en base a la documentación oficial de los productos meteorológicos satelitales proporcionada por ECMWF. Este proceso fue necesario para todas las variables, excepto para los componentes de viento. En el caso de viento se aplicaron las siguientes fórmulas;  $V_{viento} = \sqrt{U^2 + V^2}$  y  $D_{viento} = \arctan(V, U) * 180 * \pi^{-1} + 180^\circ$  para obtener la velocidad y dirección del viento respectivamente (Tetzner et al., 2019). Una vez concluido el pre procesamiento se requirió consolidar la base datos de reanálisis en base a nuestro conjunto de datos de las estaciones en estudio. Para ello se emparejaron las observaciones con los datos de reanálisis, por tanto, se eliminaron registros con datos perdidos en las estaciones para que sean datos comparables al momento de aplicar estadísticos de validación. Sin embargo, en el caso de precipitación y radiación solar a escala temporal mensual de los productos meteorológicos, representan el promedio diario de determinado mes. El proceso de evaluación de ERA5 y ERA5-Land fue sintetizado y representado mediante la *Figura 5*.

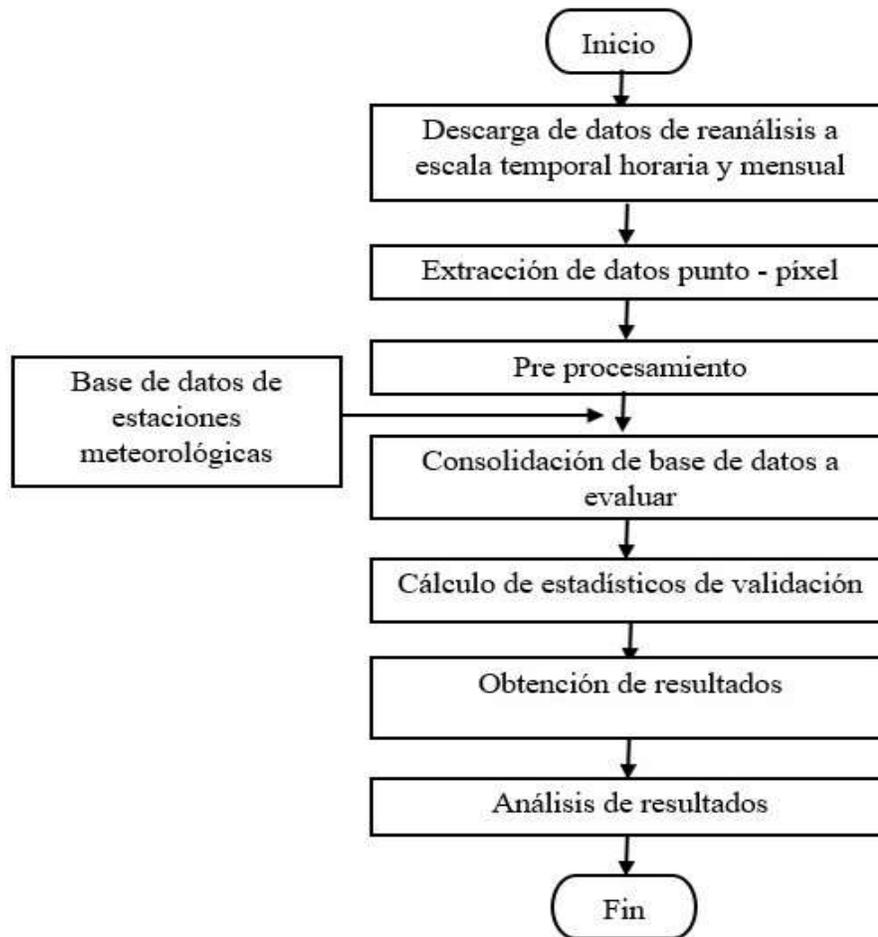
**Tabla 8.** Variables de productos satelitales meteorológicos evaluados

| Variables                               | ERA5 pressure levels<br>(600, 650, 700, 750, 775) hPa | ERA5 single level | ERA5 Land |
|---|---|-------------------|-----------|
| Temperatura a 2 metros                  | X   | X                 |           |
| Precipitación total                     | X   | X                 |           |
| Radiación solar superficial hacia abajo | X   | X                 |           |
| Presión superficial                     | X   | X                 |           |
| Componente U del viento a 10 m          | X   | X                 |           |
| Componente V del viento a 10 m          | X   | X                 |           |
| Temperatura                             |   |                   | x         |
| Humedad relativa                        |   |                   | x         |
| Componente U del viento                 |   |                   | x         |
| Componente V del viento                 |   |                   | x         |

**Figura 4.** Resolución espacial de ERA5 y ERA5-Land en la CARP



**Nota.** Los identificadores de las estaciones meteorológicas utilizadas se encuentran con asterisco (\*) en la *Tabla 1*

**Figura 5.** Diagrama de flujo de la evaluación de productos satelitales

### 3.7.1. Estadísticos de validación para los productos satelitales

La evaluación del desempeño de los productos satelitales meteorológicos fue realizada mediante índices estadísticos al compararlos frente a las observaciones de la red de estaciones meteorológicas de forma punto pixel (Jiang et al., 2018). De esta manera, para las distintas variables meteorológicas se calcularon tres tipos de medidas: error, correlación y circunstanciales. Las medidas de error y correlación presentan, respectivamente, los errores y la consistencia de las estimaciones de los satélites frente a las observaciones de las estaciones meteorológicas; mientras que las medidas de contingencia indican la capacidad de los satélites para detectar diferentes eventos, como en el caso de la precipitación (W.-R. Huang, Chang & Liu, 2018; Palomino-Ángel, Anaya-Acevedo & Botero, 2019).



Estudios similares han utilizado estadísticos de validación como *MAE*, *PBIAS* y *RMSE* para medir el rendimiento de los productos meteorológicos con respecto a las observaciones en superficie para variables como temperatura del aire y velocidad de viento, pero normalizadas, es decir con respecto al promedio de dichas observaciones (Tetzner et al., 2019). Autores como Ssenyunzi et al. (2020) utilizaron el *RMSE* y promedio de desviación para evaluar temperatura del aire y presión superficial. En cuanto a la radiación solar se utilizaron métrica como error de desviación promedio, *MAE* y *RMSE* (Sianturi, Marjuki, & Sartika, 2020; Tahir et al., 2020). Finalmente, para la precipitación no sólo es habitual el uso de métricas de error como *ME*, *MAE*, *RMSE* y *PBIAS*; pues también añaden otros tipos de medida de contingencia como; probabilidad de detección (POD) y relación de falsa alarma (FAR) (Cavalcante et al., 2020; Paredes-Trejo, Alves Barbosa, Venkata Lakshmi Kumar, Kumar Thakur, & de Oliveira Buriti, 2020; Rivera, Marianetti, & Hinrichs, 2018; Xu et al., 2019). Otros autores prefieren utilizar el índice crítico de éxito (CSI) que relaciona POD y FAR (Freitas et al., 2020; Tang, Clark, Papalexiou, Ma, & Hong, 2020; Yang, Liu, Chen, Chen, & Xia, 2020). Además, en todos los estudios mencionados en este párrafo, los autores utilizaron la correlación lineal de Pearson.

Para la evaluación de productos meteorológicos se decidió utilizar los siguientes estadísticos: *ME* (3.3.2.1), *RMSE* (3.3.2.33.2.3), *PBIAS* (3.3.2.4) y *r* (3.3.2.5). La correlación lineal de Pearson se usó para valorar la relación entre los datos de los productos meteorológicos y los datos de las estaciones. Sin embargo, una buena relación no implica que las observaciones compartan un mismo valor numérico, por tanto los estadísticos de error se utilizaron para medir la precisión de datos observados y simulados. Finalmente, para precipitación se incluyeron las medidas de contingencia puesto que esto ayudó a evaluar si los productos satelitales son capaces de detectar eventos de lluvia y eventos con ausencia de lluvia reportados en la superficie. Las ecuaciones de las medidas de contingencia están esquematizadas en la *Tabla 10*, mientras que los parámetros para obtenerlas se describen en la *Tabla 9*.

**Tabla 9.** *Parámetros para las medidas de contingencia*

|                                  | Dato de la estación<br>meteorológico $\geq$ Umbral | Dato de la estación<br>meteorológico $<$ Umbral |
|----------------------------------|--|---|
| Producto Satelital $\geq$ Umbral | A  | B   |
| Producto Satelital $<$ Umbral    | C  | D   |

**Nota.** El umbral para la evaluación a escala horaria fue de 0.1 mm; mientras que, a escala diaria fue de 1 mm y para la escala mensual se consideró el 20 % del promedio diario mensual de cada estación. Fuente: Recuperado de "Assessment of the CHIRPS-Based Satellite Precipitation Estimates", Paredes-Trejo et al. (2020).

**Tabla 10.** *Medidas circunstanciales para la evaluación de productos satelitales meteorológicos*

| Estadísticos de validación | Ecuación  | Rango de valores | Valor óptimo |
|----------------------------|---|------------------|--------------|
| Probabilidad de Detección  | $POD = \frac{A}{A + C}$                             | 0 a 1            | 1            |
| Tasa de falsa alarma       | $FAR = \frac{B}{A + B}$                             | 0 a 1            | 0            |
| Índice crítico de éxito    | $CSI = \frac{1}{\frac{1}{1-FAR} + \frac{1}{POD-1}}$ | 0 a 1            | 1            |

**Nota.** Nomenclatura: A, B y C están dados por la *Tabla 9* y describe aciertos, falsa alarma y fallas respectivamente. Fuente: Adaptado de Paredes-Trejo et al. (2020); Tang et al. (2020); Xu et al. (2019)



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Análisis y evaluación de datos recopilados

Realizada la evaluación de calidad de datos se presenta la disponibilidad de los datos evaluados y datos crudos en la *Tabla II*. Los porcentajes se encuentran con respecto al período más antiguo recolectado hasta el más reciente (enero 2014 – julio 2019); en ella es posible observar en algunos casos la disminución del porcentaje de datos disponibles con respecto a los datos crudos. Esto debido a que ciertos valores fueron eliminados del conjunto de datos, puesto que se presentaron problemas durante la evaluación. En principio, se detectaron datos duplicados en las estaciones de CTS, Cumbe, Iquis, San Joaquín, Santana, Sayausí, Sinincay, Soldados, Tixán y Turi, todas pertenecientes a la institución UPS. A pesar que dichos datos fueron eliminados, el porcentaje de datos duplicados con respecto al número total de observaciones es muy bajo (menor a 1 %).

Por un lado, valores constantes en temperatura en largos períodos de tiempo fueron ubicados en las estaciones de Molleturo, Soldados PTAP, Machángara Chulco y Chaucha. En esta última se encontraron problemas adicionales como datos atípicos imposibles, entendiéndose por ello datos con mayor valor numérico que el rango de medición detallado en la *Tabla 3* y *Tabla 4*. Por otro lado, se encontraron comportamientos inusuales en Tixán UPS y CTS UPS que fueron eliminados.

Dada la alta variabilidad de la precipitación se realizó la menor cantidad de modificaciones al conjunto original de datos; sin embargo, cuando se trató de errores evidentes como valores de precipitación horarios mayores a  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , se eliminaron dichos datos. Este fue el caso de la estación Chaucha, en donde se registraron valores improbables; puesto que, se encontraron datos consecutivos de aproximadamente  $99 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  durante largos periodos de tiempo.

Para la humedad relativa se registraron datos consecutivos de ceros por largos períodos de tiempo en las siguientes estaciones; Molleturo UPS, Soldados ETAPA, UPS y Chaucha UPS. Además, en la estación Machángara DJ Chulco se registró en el año 2016 un desfase de datos, con respecto a su comportamiento habitual.

En cuanto a radiación los problemas más frecuentes fueron datos mayores a  $2000 \text{ Wm}^{-2}$  generalmente durante el mediodía, estos problemas existieron tanto para estaciones de ETAPA EP (Ventanas, Mamamag) y en Chaucha UPS. En estas mismas estaciones, al revisar los datos meteorológicos mediante los gráficos interactivos se observaron valores improbables, como datos

de radiación solar global por encima de  $1350 Wm^{-2}$ . Además se registraron datos atípicos como valores altos de radiación solar global en la madrugada en la estación de Soldados UPS; por otra parte, se registró una atenuación de picos o comportamiento inusual de la radiación en la estación Cebollar en el periodo abril 2018 a diciembre 2018.

Con respecto a presión atmosférica se identificaron datos por debajo del rango de medición del sensor en la estación Esmeralda ETAPA, Machángara Chulco y Chaucha UPS. Además, se encontraron valores constantes de datos en estaciones de ETAPA EP como Machángara DJ Chulco, Yanuncay en Pucán, los mismo fueron eliminados. Se encontraron datos erróneos en el año 2018 en Sinincay UPS, datos desfasados entre diciembre 2015 a enero de 2016 de Santa Ana UPS, de igual forma este problema fue hallado en Baños UPS en los últimos meses del año 2018, dichos datos fueron corregidos.

Finalmente, en velocidad de viento y dirección de viento se registraron problemas relacionados con datos consecutivos de ceros y valores de  $360^\circ$  por largos plazos. Las estaciones en las cuales se detectaron estos problemas fueron: Soldados, Sayausí, Tixán, Sinincay, Cumbe, San Joaquín, Turi, Nulti, Santana, CTS, Irquis de la UPS y Soldados y Ucubamba de ETAPA.

**Tabla 11.** Porcentaje de disponibilidad de datos crudos y evaluados

| ID | Estaciones              |       | Temperatura |       | Precipitación |       | Humedad R. |       | Radiación |       | Presión |       | V. Viento |       | D.Viento |       |
|----|-------------------------|-------|-------------|-------|---------------|-------|------------|-------|-----------|-------|---------|-------|-----------|-------|----------|-------|
|    |                         |       | DC          | DE    | DC            | DE    | DC         | DE    | DC        | DE    | DC      | DE    | DC        | DE    | DC       | DE    |
| 1  | Chaucha                 | UPS   | 88.64       | 80.19 | 88.64         | 88.26 | 88.64      | 45.55 | 88.64     | 88.46 | 88.64   | 88.26 | 88.46     | 88.46 | 88.46    | 88.46 |
| 2  | Ucubamba                | ETAPA | 93.20       | 93.20 | 93.20         | 93.20 | 93.20      | 93.20 | 93.20     | 93.20 | 93.20   | 93.20 | 93.20     | 88.30 | 93.20    | 93.20 |
| 3  | UPS                     | UPS   | 97.67       | 97.67 | 97.67         | 97.67 | 97.67      | 97.61 | 97.67     | 97.67 | 97.67   | 97.67 | 97.54     | 97.54 | 97.54    | 97.54 |
| 4  | CTS                     | UPS   | 96.92       | 96.33 | 96.92         | 96.92 | 96.92      | 96.92 | 96.91     | 96.46 | 96.92   | 96.08 | 96.39     | 86.10 | 96.39    | 86.10 |
| 5  | Nulti                   | UPS   | 94.19       | 94.19 | 94.20         | 94.20 | 94.19      | 94.19 | 94.20     | 94.20 | 94.19   | 93.59 | 77.39     | 60.62 | 77.39    | 60.62 |
| 6  | Cebollar                | ETAPA | 93.52       | 93.52 | 93.52         | 93.52 | 93.52      | 93.52 | 93.52     | 92.98 | 93.52   | 91.33 | 93.52     | 93.32 | 93.52    | 93.45 |
| 7  | Irquis                  | UPS   | 98.82       | 98.82 | 98.82         | 98.82 | 98.82      | 98.82 | 98.82     | 98.82 | 98.82   | 98.82 | 98.82     | 68.75 | 63.93    | 68.75 |
| 8  | Santa Ana               | UPS   | 98.89       | 98.89 | 98.89         | 98.89 | 98.89      | 98.89 | 98.89     | 98.89 | 98.89   | 98.89 | 98.89     | 63.69 | 61.38    | 63.69 |
| 9  | Tixán                   | ETAPA | 92.87       | 92.87 | 92.87         | 89.41 | 92.87      | 92.87 | 92.87     | 92.87 | 92.87   | 92.87 | 92.87     | 92.87 | 92.87    | 92.87 |
| 10 | Tixán                   | UPS   | 98.79       | 95.12 | 98.79         | 98.24 | 98.79      | 97.75 | 98.79     | 98.12 | 98.79   | 96.42 | 98.10     | 96.39 | 98.10    | 97.33 |
| 11 | Sinincay                | UPS   | 75.94       | 75.94 | 75.94         | 75.94 | 75.94      | 75.94 | 75.94     | 65.86 | 75.94   | 58.12 | 75.78     | 64.34 | 75.78    | 64.34 |
| 12 | Turi                    | UPS   | 98.81       | 98.81 | 98.81         | 98.81 | 98.81      | 98.81 | 98.81     | 98.81 | 98.81   | 98.81 | 85.51     | 80.69 | 85.51    | 80.69 |
| 13 | Llacao                  | UPS   | 91.00       | 91.00 | 91.00         | 91.00 | 91.00      | 91.00 | 91.00     | 91.00 | 91.00   | 91.00 | 90.73     | 90.73 | 90.73    | 90.73 |
| 14 | San Joaquín             | UPS   | 94.69       | 94.69 | 94.69         | 94.69 | 94.69      | 94.69 | 94.69     | 94.69 | 94.69   | 94.69 | 81.70     | 64.93 | 81.70    | 64.93 |
| 15 | Sayausí                 | UPS   | 96.74       | 96.74 | 96.73         | 96.73 | 96.66      | 96.65 | 96.74     | 96.74 | 96.74   | 96.74 | 74.34     | 62.09 | 74.34    | 62.10 |
| 16 | Sayausí<br>PTAP         | ETAPA | 93.44       | 93.44 | 93.44         | 93.44 | 93.44      | 93.44 | 93.44     | 86.34 | 93.44   | 92.30 | 93.44     | 93.33 | 93.44    | 93.44 |
| 17 | Quingeo                 | UPS   | 96.79       | 96.79 | 96.79         | 96.79 | 96.79      | 96.79 | 96.79     | 96.79 | 96.79   | 96.13 | 96.76     | 96.61 | 96.76    | 96.76 |
| 18 | Machángara<br>DJ Chulco | ETAPA | 69.01       | 60.65 | 69.90         | 69.90 | 69.01      | 60.76 | 69.90     | 69.29 | 69.90   | 60.58 | 69.90     | 69.81 | 69.90    | 69.88 |
| 19 | Baños                   | UPS   | 84.86       | 84.86 | 84.86         | 84.86 | 84.86      | 84.86 | 84.86     | 84.86 | 84.86   | 84.86 | 84.86     | 74.51 | 94.57    | 69.76 |
| 20 | Esmeralda               | ETAPA | 63.66       | 63.66 | 63.66         | 63.66 | 63.66      | 63.66 | 63.66     | 63.65 | 63.66   | 0.00  | 63.66     | 63.66 | 63.66    | 63.66 |
| 21 | Cumbe                   | UPS   | 99.49       | 99.49 | 99.49         | 99.49 | 99.49      | 99.49 | 99.49     | 99.49 | 99.49   | 99.49 | 98.99     | 90.13 | 98.99    | 90.05 |
| 22 | Soldados                | ETAPA | 68.67       | 63.89 | 68.90         | 68.90 | 68.67      | 64.16 | 68.84     | 68.84 | 65.47   | 60.07 | 68.90     | 68.84 | 68.90    | 68.84 |
| 23 | Yanuncay<br>en Pucán    | ETAPA | 60.69       | 60.69 | 60.69         | 60.69 | 60.69      | 60.69 | 60.69     | 60.69 | 60.69   | 0.00  | 60.69     | 60.58 | 60.69    | 60.69 |
| 24 | El Labrado              | ETAPA | 75.70       | 75.70 | 75.70         | 75.70 | 75.70      | 75.70 | 75.70     | 75.70 | 75.70   | 75.70 | 75.70     | 75.70 | 75.70    | 75.70 |

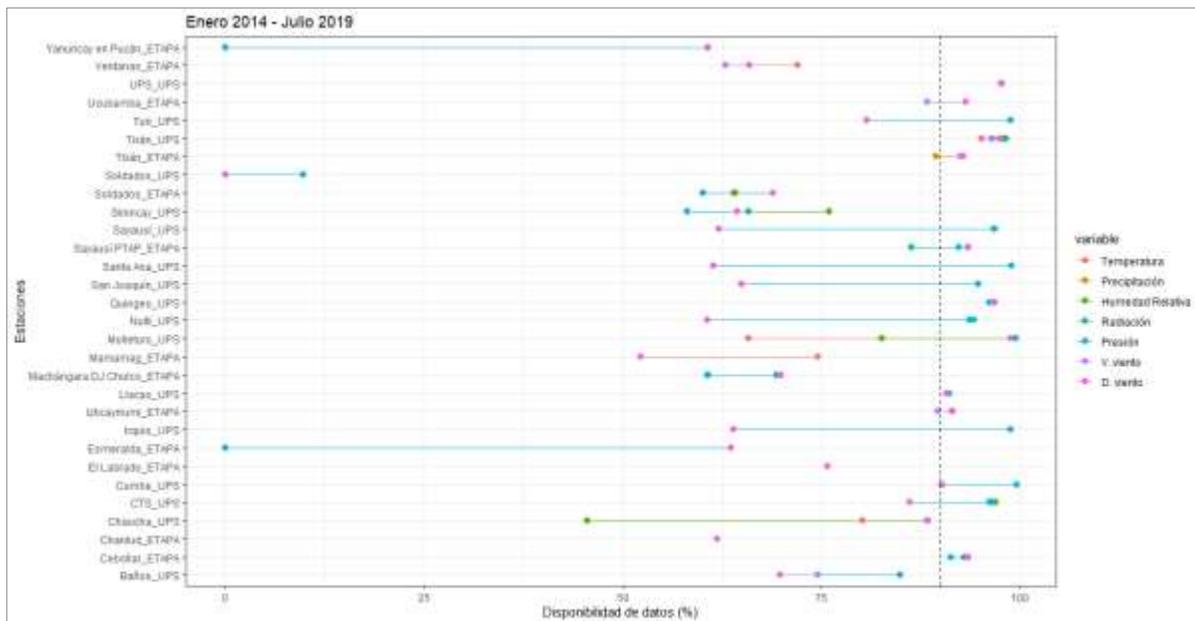


|    |            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25 | Mamamag    | ETAPA | 74.49 | 74.49 | 52.21 | 52.21 | 52.21 | 52.21 | 52.21 | 52.19 | 52.21 | 52.21 | 52.21 | 52.21 | 52.21 |
| 26 | Ventanas   | ETAPA | 72.01 | 72.01 | 65.91 | 65.91 | 65.91 | 65.91 | 65.91 | 65.89 | 65.91 | 65.90 | 65.91 | 62.94 | 65.91 |
| 27 | Molleturo  | UPS   | 99.40 | 65.77 | 99.40 | 99.40 | 99.40 | 99.40 | 82.61 | 99.40 | 99.40 | 99.40 | 98.74 | 98.74 | 98.74 |
| 28 | Izhcayrumi | ETAPA | 91.46 | 91.46 | 91.34 | 91.34 | 91.34 | 91.34 | 91.34 | 91.34 | 91.34 | 91.34 | 91.34 | 89.62 | 91.34 |
| 29 | Chanlud    | ETAPA | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 | 61.87 |
| 30 | Soldados   | UPS   | 9.77  | 9.77  | 9.77  | 9.77  | 9.77  | 9.77  | 9.77  | 0.00  | 9.77  | 9.77  | 9.77  | 0.00  | 9.77  |

**Nota.** DC= Datos Crudos, DE = Datos Evaluados. Valores sombreados indican las variables que cambiaron de porcentaje de disponibilidad posterior a la evaluación.

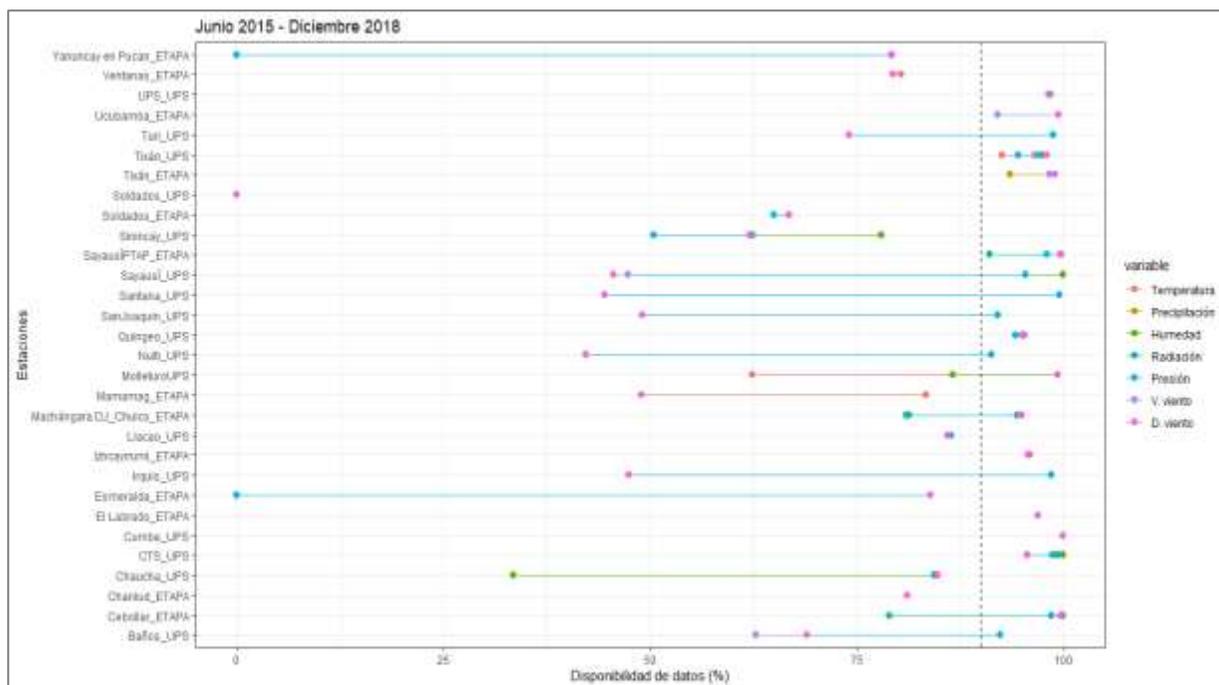
En la *Figura 6* se observa el análisis gráfico del porcentaje de datos disponibles para el período de tiempo más extenso enero 2014 – julio 2019, con un número de ocho estaciones superiores al 90 % de datos disponibles para todas las variables. En contraste, en la *Figura 7* se observa el período junio 2015 - diciembre 2018, el cual se determinó como el mejor período debido a la existencia de 10 estaciones meteorológicas con más del 90 % de datos disponibles para todas las variables. Se decidió incluir dos estaciones meteorológicas más; Cebollar ETAPA y Machángara DJ Chulco, las cuales presentan más del 90 % de datos disponibles para la mayoría de variables a excepción de radiación solar en la primera estación y temperatura, humedad relativa y presión atmosférica para la última.

**Figura 6.** Disponibilidad de variables meteorológicas del período enero 2014 - julio 2019 por estación



**Nota.** La línea negra entrecortada representa el 90 % de disponibilidad de datos. Mientras que las líneas horizontales de colores representan el porcentaje de disponibilidad de datos de cada variable en cada estación.

**Figura 7.** Disponibilidad de las variables meteorológicas del periodo junio 2015 - diciembre 2018 por estación



**Nota.** La línea negra entrecortada representa el 90 % de disponibilidad de datos. Mientras que las líneas horizontales de colores representan el porcentaje de disponibilidad de datos de cada variable en cada estación.

De treinta estaciones meteorológicas recopiladas en la primera fase de este estudio, doce fueron seleccionadas, pertenecientes al periodo junio 2015 – diciembre 2018. Dichas estaciones se presentan en la *Tabla 12* junto a la disponibilidad de datos por variable, en el período seleccionado.

**Tabla 12.** Porcentaje de disponibilidad de datos en el período junio 2015 - diciembre 2018 por estación

| Estaciones           | Institución | Temperatura | Precipitación | Humedad | Radiación | Presión | V. Viento | D. Viento |
|----------------------|-------------|-------------|---------------|---------|-----------|---------|-----------|-----------|
| Ucubamba             | ETAPA       | 99.40       | 99.40         | 99.40   | 99.40     | 99.40   | 92.02     | 99.4      |
| UPS                  | UPS         | 98.44       | 98.44         | 98.44   | 98.44     | 98.44   | 98.25     | 98.25     |
| CTS                  | UPS         | 99.98       | 99.98         | 99.98   | 99.98     | 98.69   | 95.63     | 95.63     |
| Cebollar             | ETAPA       | 99.89       | 99.89         | 99.89   | 99.88     | 98.57   | 99.57     | 99.77     |
| Tixán                | ETAPA       | 98.95       | 93.60         | 98.95   | 98.95     | 98.95   | 98.27     | 98.95     |
| Tixán                | UPS         | 98.20       | 97.36         | 96.60   | 98.21     | 94.55   | 96.52     | 97.97     |
| Sayausí PTAP         | ETAPA       | 99.77       | 99.77         | 99.77   | 91.11     | 98.01   | 99.60     | 99.77     |
| Quíngo               | UPS         | 95.23       | 95.23         | 95.23   | 95.23     | 94.24   | 94.97     | 95.19     |
| Machángara DJ Chulco | ETAPA       | 81.22       | 94.95         | 81.26   | 94.45     | 81.00   | 94.81     | 94.92     |
| Cumbe                | UPS         | 99.97       | 99.97         | 99.97   | 99.97     | 99.97   | 99.97     | 99.97     |
| El Labrado           | ETAPA       | 96.93       | 96.93         | 96.93   | 96.93     | 96.93   | 96.93     | 96.93     |
| Izhcayrumi           | ETAPA       | 95.94       | 95.76         | 95.76   | 95.76     | 95.76   | 95.76     | 95.76     |



## 4.2. Análisis del relleno de datos faltantes

La evaluación de los métodos de relleno de datos faltantes se presenta de manera cuantitativa a través de medidas estadísticas en la presente sección. A pesar de comparar cuatro métodos de imputación múltiple, en esta sección se presentan tablas de medidas estadísticas para los métodos de relleno de datos que presentaron mejor rendimiento. En el *Apéndice B*. Ejemplos gráficos del proceso de evaluación y relleno de datos se observa ejemplos gráficos del proceso de evaluación y relleno de datos para cada variable meteorológica.

### 4.2.1. Temperatura

En las métricas de evaluación presentadas en la *El* buen funcionamiento de los métodos para esta variable se asoció a la similitud en los patrones meteorológicos de diferentes estaciones. Mientras que PMM es el método que mejor funcionó para la mayoría de estaciones meteorológicas, CART funcionó mejor para las estaciones ubicadas a mayor altitud.

**Tabla 13** El buen funcionamiento de los métodos para esta variable se asoció a la similitud en los patrones meteorológicos de diferentes estaciones. Mientras que PMM es el método que mejor funcionó para la mayoría de estaciones meteorológicas, CART funcionó mejor para las estaciones ubicadas a mayor altitud.

**Tabla 13**, se observó que los valores de *ME* y *PBIAS* no presentaron variaciones notorias entre los métodos de relleno, puesto que todos son muy cercanos a cero, lo cual significa que errores positivos se compensan con los negativos. Por otro lado, valores de *RMSE* se encontraron en el rango de (0.59-1.44) °C. Para interpretar el comportamiento de los datos imputados frente a los observados, se pueden observar en la *El* buen funcionamiento de los métodos para esta variable se asoció a la similitud en los patrones meteorológicos de diferentes estaciones. Mientras que PMM es el método que mejor funcionó para la mayoría de estaciones meteorológicas, CART funcionó mejor para las estaciones ubicadas a mayor altitud.

**Tabla 13** valores de correlación de Pearson muy cercanos a 1, lo cual indicó una relación lineal positiva muy fuerte entre datos observados y simulados (Ewen, 1976). Por último, valores de *KGE* son positivos y cercanos a uno, reflejando una aproximación *buen*a de los métodos (Knoben et al., 2019). El buen funcionamiento de los métodos para esta variable se asoció a la similitud en los patrones meteorológicos de diferentes estaciones. Mientras que PMM es el método que mejor

funcionó para la mayoría de estaciones meteorológicas, CART funcionó mejor para las estaciones ubicadas a mayor altitud.

**Tabla 13.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de temperatura horaria

| Estaciones              | Métodos | ME    | MAE  | RMSE | PBIAS | r    | KGE  |
|-------------------------|---------|-------|------|------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA          | PMM     | 0.02  | 0.83 | 1.08 | 0.10  | 0.96 | 0.96 |
| UPS UPS                 | PMM     | 0.00  | 0.45 | 0.59 | 0.00  | 0.98 | 0.98 |
| CTS UPS                 | PMM     | 0.01  | 0.55 | 0.80 | 0.10  | 0.97 | 0.97 |
| Cebollar ETAPA          | PMM     | 0.00  | 0.47 | 0.64 | 0.00  | 0.99 | 0.98 |
| Tixán ETAPA             | PMM     | -0.01 | 0.55 | 0.75 | 0.00  | 0.98 | 0.98 |
| Tixán UPS               | PMM     | 0.00  | 0.53 | 0.71 | 0.00  | 0.98 | 0.98 |
| Sayausí PTAP ETAPA      | PMM     | 0.01  | 0.8  | 1.12 | 0.00  | 0.96 | 0.96 |
| Quingeo UPS             | PMM     | 0.01  | 0.78 | 1.05 | 0.10  | 0.95 | 0.95 |
| Machángara Chulco ETAPA | CART    | -0.01 | 0.84 | 1.13 | -0.10 | 0.96 | 0.96 |
| Cumbe UPS               | CART    | 0.00  | 0.90 | 1.23 | 0.00  | 0.92 | 0.92 |
| El Labrado ETAPA        | CART    | -0.01 | 0.76 | 1.06 | -0.10 | 0.93 | 0.93 |
| Izhcayrrumi ETAPA       | CART    | 0.01  | 1.01 | 1.44 | 0.10  | 0.86 | 0.86 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en °C, *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

#### 4.2.2. Precipitación

La dificultad de imputación a escala horaria se produjo debido a la gran variabilidad existente entre estaciones con períodos de ceros y otras de lluvia, lo que resultó en que las estaciones meteorológicas en su mayoría presentaron una correlación positiva débil a moderada como se observa en la *Tabla 14*. Al ser una variable semi continua con un gran porcentaje de ceros a escala horaria, el relleno de datos se vuelve más complicado (Aguilera et al., 2020). Valores de *KGE* menores a 0.5 para ocho estaciones demostraron un funcionamiento *pobre* del método. Por lo antes mencionado, se realizó el relleno de datos de precipitación a escala temporal diaria. Los estadísticos de error como *ME*, *MAE* y *RMSE* cambiaron con la escala, puesto que se trata de precipitación acumulada en el día, por lo que evidentemente son mayores que a escala horaria. Una mejora significativa de los métodos de imputación múltiple se presenta en la *Tabla 15*, en donde se observa que todos los valores de *KGE* para precipitación diaria fueron superiores a 0.62, lo que indicó un rendimiento aceptable de los métodos. La imputación múltiple funcionó mejor para estaciones como Tixán ETAPA, Tixán UPS, Cebollar, Machángara Chulco, El Labrado, UPS, puesto que presentaron rangos estadísticos más cercanos a sus valores óptimos tal como se presenta en la *Tabla 15*. Esto puede deberse a diversos factores como el aporte de la información de las estaciones ubicadas dentro de la misma cuenca (predictores). Para Izhcayrrumi y Quingeo

los métodos siguieron siendo aceptables de acuerdo a los estadísticos, aunque su rendimiento es menor. En el caso de estaciones como Cebollar, Sayausí, Ucubamba, CTS y Cumbe de acuerdo a la *Tabla 12* presentaron más de 99.40 % de datos disponibles, por lo que fueron útiles como predictores para el relleno de datos de las demás estaciones.

**Tabla 14.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de precipitación horaria

| Estaciones              | Métodos | ME    | MAE  | RMSE | PBIAS | r    | KGE  |
|-------------------------|---------|-------|------|------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA          | PMM     | -0.01 | 0.14 | 1.12 | -9.60 | 0.53 | 0.46 |
| UPS UPS                 | CART    | 0.00  | 0.07 | 0.50 | 1.50  | 0.79 | 0.68 |
| CTS UPS                 | CART    | -0.03 | 0.10 | 0.68 | -28.1 | 0.41 | 0.27 |
| Cebollar ETAPA          | CART    | 0.00  | 0.07 | 0.40 | 3.10  | 0.75 | 0.74 |
| Tixán ETAPA             | PMM     | 0.01  | 0.05 | 0.36 | 7.70  | 0.88 | 0.85 |
| Tixán UPS               | CART    | -0.01 | 0.05 | 0.52 | -10.5 | 0.86 | 0.68 |
| Sayausí PTAP ETAPA      | CART    | 0.02  | 0.12 | 0.77 | 18.10 | 0.50 | 0.30 |
| Quíngo UPS              | CART    | -0.02 | 0.10 | 0.60 | -23.3 | 0.23 | 0.08 |
| Machángara Chulco ETAPA | CART    | 0.01  | 0.18 | 0.94 | 6.00  | 0.32 | 0.30 |
| Cumbe UPS               | CART    | 0.00  | 0.13 | 0.58 | 2.3   | 0.28 | 0.28 |
| El Labrado ETAPA        | CART    | 0.00  | 0.18 | 0.62 | 0.90  | 0.38 | 0.38 |
| Izhcayrumi ETAPA        | PMM     | 0.02  | 0.13 | 0.44 | 26.3  | 0.35 | 0.25 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en  $mm \cdot h^{-1}$ , *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

**Tabla 15.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de precipitación diaria

| Estaciones              | Métodos | Iteraciones | ME    | MAE  | RMSE | PBIAS  | r    | KGE  |
|-------------------------|---------|-------------|-------|------|------|--------|------|------|
| Ucubamba ETAPA          | MT      | 5           | -0.43 | 2.41 | 5.80 | -13.80 | 0.72 | 0.64 |
| UPS UPS                 | PMM     | 15          | 0.01  | 1.29 | 2.77 | 0.40   | 0.84 | 0.82 |
| CTS UPS                 | PMM     | 10          | 0.17  | 1.48 | 2.68 | 8.00   | 0.74 | 0.73 |
| Cebollar ETAPA          | MT      | 10          | -0.14 | 0.96 | 2.21 | -6.80  | 0.88 | 0.86 |
| Tixán ETAPA             | PMM     | 15          | 0.09  | 0.73 | 1.56 | 4.10   | 0.94 | 0.93 |
| Tixán UPS               | CART    | 5           | -0.15 | 0.70 | 1.56 | -6.70  | 0.94 | 0.90 |
| Sayausí PTAP ETAPA      | CART    | 15          | 0.06  | 1.99 | 3.86 | 1.70   | 0.76 | 0.74 |
| Quíngo UPS              | MT      | 10          | -0.22 | 1.58 | 3.41 | -11.00 | 0.67 | 0.64 |
| Machángara Chulco ETAPA | CART    | 10          | 0.02  | 1.74 | 2.96 | 0.40   | 0.86 | 0.86 |
| Cumbe UPS               | MT      | 10          | -0.12 | 2.05 | 3.36 | -4.60  | 0.65 | 0.64 |
| El Labrado ETAPA        | MT      | 15          | -0.21 | 1.87 | 3.14 | -7.00  | 0.73 | 0.71 |
| Izhcayrumi ETAPA        | MT      | 10          | -0.19 | 1.68 | 2.88 | -8.60  | 0.67 | 0.62 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en  $mm \cdot día^{-1}$ , *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

### 4.2.3. Humedad Relativa

La *Tabla 16* representa los valores estadísticos para *ME*, *MAE*, *RMSE*, *r* y *KGE* para las diferentes estaciones seleccionadas. En general los resultados estadísticos son similares para las estaciones meteorológicas. Los estadísticos muestran un buen ajuste entre valores predichos y observados; por ejemplo, la métrica de correlación indica una relación lineal muy fuerte en todos los casos.

Los valores de humedad relativa en la CARP presentan un promedio horario de 81.81 % (Tabla 23); por lo que, las métricas de error presentadas en la Tabla 16 presentan un error bajo en los valores imputados.

**Tabla 16.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de humedad horaria

| Estaciones              | Métodos | ME    | MAE  | RMSE | PBIAS | r    | KGE  |
|-------------------------|---------|-------|------|------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA          | CART    | -0.13 | 4.28 | 5.99 | -0.20 | 0.94 | 0.94 |
| UPS UPS                 | PMM     | -0.05 | 3.73 | 5.08 | -0.30 | 0.96 | 0.96 |
| CTS UPS                 | PMM     | -0.17 | 4.73 | 6.75 | -0.10 | 0.94 | 0.94 |
| Cebollar ETAPA          | PMM     | 0.03  | 2.75 | 3.73 | -0.10 | 0.98 | 0.98 |
| Tixán ETAPA             | PMM     | -0.08 | 1.94 | 2.84 | 0.00  | 0.98 | 0.98 |
| Tixán UPS               | PMM     | 0.05  | 2.12 | 3.53 | -0.10 | 0.98 | 0.98 |
| Sayausí PTAP ETAPA      | PMM     | 0.05  | 3.87 | 5.55 | 0.10  | 0.94 | 0.94 |
| Quingeo UPS             | PMM     | -0.01 | 4.99 | 6.80 | -0.20 | 0.91 | 0.91 |
| Machángara Chulco ETAPA | CART    | 0.01  | 3.48 | 5.64 | 0.10  | 0.93 | 0.93 |
| Cumbe UPS               | CART    | 0.13  | 4.95 | 7.27 | 0.10  | 0.85 | 0.85 |
| El Labrado ETAPA        | PMM     | -0.03 | 3.82 | 5.84 | 0.00  | 0.90 | 0.90 |
| Izhcayrumi ETAPA        | CART    | -0.04 | 4.90 | 7.37 | -0.20 | 0.82 | 0.82 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en %, *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

#### 4.2.4. Radiación

En la Tabla 17 se observan valores de correlación de Pearson muy fuertes entre datos observados y simulados de acuerdo a la Tabla 5; mientras que los valores de *KGE* indicaron que el rendimiento de los métodos de imputación fue aceptable y cercano al modelo perfecto. Por su parte, *ME* y *PBIAS* revelaron que para la mayoría de estaciones los métodos de imputación tendieron a subestimar los valores predichos. Las métricas de error como *MAE* y *RMSE* se encontraron en los rangos de (20.27 – 68.42)  $Wm^{-2}$  y (53.04 -137.37)  $Wm^{-2}$ , esto se asocia a que la radiación solar global horaria en el periodo en estudio tuvo una mayor dispersión de los datos, puesto que, su distribución se encuentra entre 0  $Wm^{-2}$  hasta 1300  $Wm^{-2}$  (Tabla 23). Las métricas de error *MAE* y *RMSE* fueron mayores y por lo tanto tuvieron menor rendimiento para estaciones ubicadas a mayor altitud, asimismo, para estas estaciones los valores de correlación y *KGE* disminuyen ligeramente. Esto puede asociarse a la lejanía de estas estaciones o a las condiciones atmosféricas en estaciones de alta montaña.

**Tabla 17.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de radiación horaria

| Estaciones     | Métodos | ME   | MAE   | RMSE  | PBIAS | r    | KGE  |
|----------------|---------|------|-------|-------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA | PMM     | 0.16 | 43.50 | 91.41 | 0.10  | 0.94 | 0.94 |



|                            |      |       |       |        |       |      |      |
|----------------------------|------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| UPS_UPS                    | PMM  | -0.97 | 37.57 | 79.67  | -0.50 | 0.96 | 0.96 |
| CTS UPS                    | CART | -2.05 | 45.08 | 96.93  | -1.20 | 0.94 | 0.93 |
| Cebollar ETAPA             | PMM  | 0.30  | 33.03 | 69.17  | 0.20  | 0.96 | 0.96 |
| Tixán ETAPA                | RF   | -0.26 | 20.27 | 53.04  | -0.20 | 0.98 | 0.98 |
| Tixán UPS                  | CART | -0.14 | 20.52 | 53.31  | -0.10 | 0.98 | 0.98 |
| Sayausí PTAP ETAPA         | CART | -1.25 | 54.66 | 122.54 | -0.80 | 0.88 | 0.88 |
| Quingeo UPS                | PMM  | 0.65  | 62.26 | 128.42 | 0.40  | 0.88 | 0.88 |
| Machángara DJ Chulco ETAPA | CART | -2.16 | 46.18 | 100.32 | -1.50 | 0.90 | 0.90 |
| Cumbe UPS                  | CART | 1.80  | 68.42 | 137.37 | 1.00  | 0.85 | 0.85 |
| El Labrado ETAPA           | CART | -1.48 | 49.21 | 107.63 | -1.10 | 0.87 | 0.87 |
| Izhcayrumi ETAPA           | PMM  | 0.59  | 54.18 | 116.73 | 0.40  | 0.87 | 0.87 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en  $Wm^{-2}$ , *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

#### 4.2.5. Presión

Para la presión los resultados mostrados en la *Tabla 18* indicaron valores de *ME*, *MAE* y *RMSE* muy cercanos a cero, lo cual indicó errores bajos en los modelos de imputación. Además, se muestran porcentajes de desviación de 0% para todas las estaciones y valores de correlación de Pearson y *KGE* en el rango de 0.96 a 1, siendo buenos indicadores del ajuste y rendimiento de los métodos de relleno. Tomando en cuenta que en el conjunto de datos las variaciones de presión no son drásticas, se explica el buen funcionamiento de los diferentes métodos de imputación. Los resultados estadísticos nos indican que el conjunto de datos utilizados para entrenar los métodos de imputación múltiple describió de manera óptima el comportamiento de la variable a través del periodo en estudio.

**Tabla 18.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de presión horaria

| Estaciones              | Métodos | ME    | MAE  | RMSE | PBIAS | r    | KGE  |
|-------------------------|---------|-------|------|------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA          | PMM     | 0.00  | 0.21 | 0.27 | 0.00  | 0.99 | 0.99 |
| UPS UPS                 | PMM     | 0.00  | 0.18 | 0.24 | 0.00  | 0.99 | 0.99 |
| CTS UPS                 | PMM     | 0.01  | 0.20 | 0.28 | 0.00  | 0.99 | 0.98 |
| Cebollar ETAPA          | PMM     | 0.00  | 0.19 | 0.29 | 0.00  | 0.98 | 0.98 |
| Tixán ETAPA             | RF      | 0.00  | 0.18 | 0.24 | 0.00  | 0.99 | 0.98 |
| Tixán UPS               | PMM     | 0.00  | 0.19 | 0.25 | 0.00  | 0.99 | 0.99 |
| Sayausí PTAP ETAPA      | RF      | 0.00  | 0.09 | 0.13 | 0.00  | 1.00 | 1.00 |
| Quingeo UPS             | PMM     | -0.01 | 0.10 | 0.14 | 0.00  | 1.00 | 1.00 |
| Machángara Chulco ETAPA | PMM     | 0.00  | 0.15 | 0.20 | 0.00  | 0.99 | 0.99 |
| Cumbe UPS               | PMM     | 0.01  | 0.12 | 0.17 | 0.00  | 0.99 | 0.99 |
| El Labrado ETAPA        | RF      | 0.00  | 0.12 | 0.16 | 0.00  | 0.99 | 0.99 |
| Izhcayrumi ETAPA        | PMM     | -0.01 | 0.20 | 0.31 | 0.00  | 0.96 | 0.96 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en hPa, *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.



#### 4.2.6. Viento

En la *Tabla 19* se evidencian las métricas de los mejores métodos de relleno de datos para la velocidad del viento a escala horaria. En ella es posible observar que los métodos de imputación presentan un mejor rendimiento para las estaciones de Tixán ETAPA, Tixán UPS, Cebollar y Ucubamba, mientras que para estaciones ubicadas a mayor altitud (El Labrado, Izhcayrrumi, Machángara Chulco, Cumbe y Quingeo) presentaron los valores más altos de *MAE* y *RMSE* y por el contrario valores menores de *r* y *KGE*. Esto pudo asociarse a que el comportamiento de la velocidad del viento a escala horaria es más variable y además que a mayores alturas su comportamiento es diferente al de las estaciones ubicadas en el valle.

A escala diaria las métricas de error como *MAE* y *RMSE* mejoraron significativamente, tal como se observa en la *Tabla 20*. Adicional a ello, las métricas de las estaciones a mayor altitud mejoraron con respecto a la escala horaria.

Para dirección de viento en la *Tabla 21* podemos observar que el coeficiente de correlación de Pearson denota una correlación positiva moderada entre datos observados e imputados, siendo cuatro las estaciones que mostraron un valor por debajo de 0.6. Finalmente, existen cuatro estaciones con valores de *KGE* muy cercanos a 0.5, lo cual indicó una baja eficiencia del método. A diferencia de los valores de dirección del viento rellenos a escala diaria (*Tabla 22*), en donde los valores de *r* y *KGE* fueron superiores a 0.75, a excepción de Sayausí PTAP; sin embargo, como esta estación presentaba un 99.77 % de los datos disponibles fue utilizada como soporte (predictor). Los cambios más drásticos se presentaron en las medidas de rendimiento *MAE* y *RMSE* pues sus rangos disminuyeron considerablemente.

Debido a la alta variabilidad de la velocidad y dirección de viento se decidió trabajar a escala diaria, puesto que existió una notable mejoría en las métricas de error con respecto a la escala horaria.

A pesar, de no encontrarse una correlación lineal entre la velocidad y dirección de viento (*Figura 8*). Los métodos de imputación múltiple de relleno de datos para ambas variables funcionaron mejor cuando se incluían como predictores a la velocidad y dirección del viento de manera simultánea. Lo que puede indicar que los métodos de IM pueden preservar relaciones no lineales.

**Tabla 19.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de velocidad del viento horario

| Estaciones              | Métodos | ME    | MAE  | RMSE | PBIAS | r    | KGE  |
|-------------------------|---------|-------|------|------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA          | CART    | 0.00  | 0.35 | 0.53 | 0.60  | 0.80 | 0.80 |
| UPS UPS                 | CART    | -0.01 | 0.51 | 0.69 | -0.40 | 0.86 | 0.86 |
| CTS UPS                 | CART    | 0.00  | 0.54 | 0.77 | -0.30 | 0.84 | 0.84 |
| Cebollar ETAPA          | CART    | 0.00  | 0.21 | 0.29 | -0.70 | 0.88 | 0.88 |
| Tixán ETAPA             | CART    | 0.00  | 0.21 | 0.29 | 0.30  | 0.93 | 0.93 |
| Tixán UPS               | CART    | 0.00  | 0.22 | 0.31 | 0.30  | 0.91 | 0.91 |
| Sayaquí PTAP ETAPA      | CART    | 0.00  | 0.26 | 0.35 | -0.10 | 0.80 | 0.79 |
| Quingeo UPS             | CART    | 0.02  | 0.83 | 1.10 | 0.80  | 0.74 | 0.74 |
| Machángara Chulco ETAPA | CART    | 0.00  | 0.46 | 0.62 | -0.10 | 0.73 | 0.73 |
| Cumbe UPS               | CART    | -0.04 | 0.91 | 1.25 | -1.60 | 0.65 | 0.64 |
| El Labrado ETAPA        | CART    | 0.00  | 0.48 | 0.62 | 0.20  | 0.74 | 0.74 |
| Izhcayrumi ETAPA        | CART    | 0.00  | 0.63 | 0.81 | 0.00  | 0.68 | 0.68 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en  $m \cdot s^{-1}$ , *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

**Tabla 20.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de velocidad del viento diario

| Estaciones              | Métodos | Iteraciones | ME    | MAE  | RMSE | PBIAS | r    | KGE  |
|-------------------------|---------|-------------|-------|------|------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA          | PMM     | 10          | 0.04  | 0.17 | 0.24 | 5.30  | 0.73 | 0.72 |
| UPS UPS                 | PMM     | 5           | 0.01  | 0.14 | 0.18 | 0.60  | 0.91 | 0.9  |
| CTS UPS                 | CART    | 10          | 0.01  | 0.18 | 0.24 | 0.40  | 0.86 | 0.85 |
| Cebollar ETAPA          | PMM     | 15          | 0.00  | 0.08 | 0.10 | 0.20  | 0.79 | 0.79 |
| Tixán ETAPA             | PMM     | 5           | 0.00  | 0.08 | 0.10 | -0.10 | 0.94 | 0.94 |
| Tixán UPS               | CART    | 5           | 0.01  | 0.07 | 0.09 | 0.60  | 0.96 | 0.94 |
| Sayaquí PTAP ETAPA      | PMM     | 5           | 0.00  | 0.08 | 0.11 | 0.30  | 0.77 | 0.77 |
| Quingeo UPS             | CART    | 5           | 0.00  | 0.32 | 0.39 | 0.20  | 0.77 | 0.76 |
| Machángara Chulco ETAPA | CART    | 10          | 0.01  | 0.18 | 0.24 | 0.70  | 0.78 | 0.78 |
| Cumbe UPS               | RF      | 5           | -0.01 | 0.40 | 0.54 | -0.50 | 0.74 | 0.74 |
| El Labrado ETAPA        | CART    | 5           | -0.01 | 0.22 | 0.28 | -0.60 | 0.81 | 0.8  |
| Izhcayrumi ETAPA        | CART    | 15          | 0.00  | 0.29 | 0.38 | 0.10  | 0.85 | 0.84 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en  $m \cdot s^{-1}$ , *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

**Tabla 21.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de dirección del viento horario

| Estaciones     | Métodos | ME    | MAE   | RMSE  | PBIAS | r    | KGE  |
|----------------|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA | CART    | 0.24  | 26.73 | 36.49 | 0.20  | 0.70 | 0.70 |
| UPS UPS        | CART    | 0.63  | 48.34 | 81.18 | 0.60  | 0.52 | 0.52 |
| CTS UPS        | CART    | -0.08 | 38.26 | 63.61 | -0.10 | 0.69 | 0.69 |
| Cebollar ETAPA | CART    | 0.36  | 28.98 | 40.98 | 0.20  | 0.77 | 0.77 |
| Tixán ETAPA    | CART    | 0.56  | 24.37 | 35.82 | 0.30  | 0.89 | 0.89 |



|                         |      |       |       |       |       |      |      |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Tixán UPS               | CART | 0.49  | 52.79 | 89.53 | 0.30  | 0.66 | 0.66 |
| Sayausí PTAP ETAPA      | CART | -0.66 | 36.56 | 51.14 | -0.40 | 0.64 | 0.63 |
| Quingeo UPS             | CART | 1.02  | 52.28 | 88.65 | 0.70  | 0.58 | 0.58 |
| Machángara Chulco ETAPA | CART | 0.53  | 32.15 | 44.72 | 0.40  | 0.69 | 0.69 |
| Cumbe UPS               | CART | 0.92  | 34.6  | 63.91 | 0.80  | 0.41 | 0.41 |
| El Labrado ETAPA        | CART | -0.19 | 31.58 | 55.49 | -0.20 | 0.75 | 0.75 |
| Izhcayrumi ETAPA        | CART | -0.29 | 34.76 | 48.69 | -0.20 | 0.59 | 0.59 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en grados, *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

**Tabla 22.** Resultados de la evaluación de los métodos de imputación de datos de dirección del viento diario

| Estaciones              | Métodos | Iteraciones | ME    | MAE   | RMSE  | PBIAS | r    | KGE  |
|-------------------------|---------|-------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Ucubamba ETAPA          | PMM     | 5           | 0.18  | 10.29 | 13.51 | 0.10  | 0.75 | 0.75 |
| UPS UPS                 | RF      | 5           | -0.30 | 16.36 | 21.40 | -0.30 | 0.86 | 0.86 |
| CTS UPS                 | CART    | 10          | -0.63 | 13.64 | 19.11 | -0.40 | 0.90 | 0.90 |
| Cebollar ETAPA          | PMM     | 5           | 0.00  | 10.25 | 13.05 | 0.00  | 0.92 | 0.92 |
| Tixán ETAPA             | PMM     | 10          | -0.46 | 10.89 | 13.25 | -0.30 | 0.88 | 0.88 |
| Tixán UPS               | CART    | 10          | -0.54 | 17.11 | 22.89 | -0.30 | 0.83 | 0.82 |
| Sayausí PTAP ETAPA      | PMM     | 5           | -0.09 | 11.70 | 14.56 | -0.10 | 0.54 | 0.53 |
| Quingeo UPS             | CART    | 5           | -0.82 | 19.03 | 25.30 | -0.60 | 0.88 | 0.88 |
| Machángara Chulco ETAPA | CART    | 5           | 1.45  | 12.00 | 14.63 | 1.00  | 0.83 | 0.83 |
| Cumbe UPS               | CART    | 10          | 0.03  | 13.38 | 20.52 | 0.00  | 0.85 | 0.85 |
| El Labrado ETAPA        | CART    | 10          | -0.70 | 15.70 | 20.07 | -0.60 | 0.87 | 0.86 |
| Izhcayrumi ETAPA        | CART    | 10          | -0.25 | 14.68 | 19.34 | -0.20 | 0.89 | 0.88 |

**Nota.** Las unidades de *ME*, *MAE* y *RMSE* están en grados, *PBIAS* en % mientras que *r* y *KGE* son adimensionales.

### 4.3. Análisis Exploratorio de Datos

Posterior al proceso de evaluación de calidad de datos y relleno de vacíos de datos, las variables de temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar global y presión atmosférica se imputaron satisfactoriamente a escala temporal horaria, por lo tanto, se contó con el 100 % de datos disponibles para el periodo junio 2015 a diciembre 2018. Por otra parte, precipitación, velocidad y dirección del viento se trabajó con los datos imputados a escala diaria.

#### 4.3.1. Medidas estadísticas descriptivas

En la *Tabla 23*, *Tabla 24* y *Tabla 25* se presentan resúmenes de las medidas estadísticas para todas las estaciones por variable, para escala temporal horaria, diaria y mensual respectivamente.



La temperatura tanto a escala horaria, diaria y mensual mantuvo sus valores entre los 12 °C. La escala mensual pareció ser el conjunto de datos que menor dispersión presenta según los valores de rango y desviación estándar. En el caso de la escala horaria el rango fue mayor a las demás escalas debido a que se detectó un valor mínimo de -6.38 °C en la estación de Izhcayrumi, dicho valor no fue eliminado puesto que, en la fecha de dicho registro, se encontraron valores menores a 0 °C en estaciones a similar altura. El 50 % de los datos se encuentran entre 10 °C y 14.72 °C. Para todas las escalas temporales la precipitación mantuvo sus valores promedios mayores a la mediana, lo que indica una distribución con cola hacia la derecha. En precipitación horaria, tal como lo indicó el cuartil 3, el 75 % de los datos horarios tuvieron valores de cero, lo cual significó que se trata de una distribución con una prominente cola hacia la derecha. Por otra parte, para la humedad relativa a las tres escalas temporales se observa que se mantuvo un promedio alrededor de 81 %; la mayoría de las observaciones se mantuvieron alrededor del 70 % a 90 % de humedad relativa, en dichas escalas la mediana se mantiene mayor al promedio, por tanto, al contrario de radiación y precipitación la distribución de la humedad tuvo una cola hacia la izquierda. Para conocer acerca de la dispersión de los datos se requirió de estadísticos como el rango y la desviación estándar, dichos valores tuvieron mayor amplitud en el caso de la radiación solar global, humedad relativa y dirección del viento, por tanto, son datos más dispersos. Por su parte, a la radiación solar global le sucedió algo similar a la precipitación a escala horaria puesto que se observó que el 50 % de los datos varían desde  $0 \text{ Wm}^{-2}$  a  $283.49 \text{ Wm}^{-2}$ . Para esta variable a escala diaria y mensual los valores disminuyeron su dispersión. En el caso de la presión atmosférica el rango es considerable y esto indica que los valores de presión en el área de estudio fueron dispersos, puesto que se registraron valores desde 648.64 hPa a 771.41 hPa. Sin embargo, la desviación estándar de la misma indicó que los valores de presión en una misma estación se mantuvieron cerca del valor promedio de cada estación. Dirección y velocidad del viento tuvieron una distribución con cola hacia la izquierda, debido a que el 50 % de los datos se encontraron alrededor de  $1.31 \text{ m.s}^{-1}$ , y  $116.78^\circ$  respectivamente. Los sumarios estadísticos por estación meteorológica pueden ser visualizados en el *Apéndice C*. Sumarios estadísticos posterior al tratamiento de datos e imputación por estación

**Tabla 23.** Resumen estadístico a escala temporal horaria de las estaciones meteorológicas seleccionadas

|               | Mínimo | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo  | Rango   | Rango IQ | $\sigma$ |
|---------------|--------|--------|---------|----------|--------|---------|---------|----------|----------|
| Temperatura   | -6.38  | 10.04  | 11.72   | 12.41    | 14.72  | 27.46   | 33.84   | 4.69     | 3.41     |
| Precipitación | 0.00   | 0.00   | 0.00    | 0.10     | 0.00   | 50.60   | 50.60   | 0.00     | 0.63     |
| Humedad R.    | 8.00   | 71.30  | 85.87   | 81.81    | 94.72  | 100.00  | 92.00   | 23.42    | 15.88    |
| Radiación     | 0.00   | 0.00   | 6.01    | 167.55   | 283.49 | 1348.64 | 1348.64 | 283.49   | 252.16   |
| Presión       | 648.64 | 723.31 | 724.32  | 724.25   | 725.27 | 771.47  | 122.83  | 1.96     | 1.45     |
| V. Viento     | 0.00   | 0.72   | 1.28    | 1.49     | 2.06   | 12.60   | 12.60   | 1.34     | 0.99     |
| D. Viento     | 1.00   | 84.45  | 124.23  | 141.68   | 197.54 | 360.00  | 359.00  | 113.09   | 71.84    |

**Nota.** 1er.Q = Primer cuartil, 3er.Q = Tercer cuartil, Rango IQ = Rango Intercuartílico,  $\sigma$  = Desviación estándar. Las unidades de las variables meteorológicas se encuentran en la *Tabla 2*.

**Tabla 24.** Resumen estadístico a escala temporal diaria para las estaciones meteorológicas seleccionadas

|               | Mínimo | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo | Rango  | Rango IQ | $\sigma$ |
|---------------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|----------|
| Temperatura   | 2.57   | 11.66  | 12.45   | 12.41    | 13.23  | 19.38  | 16.81  | 1.57     | 1.20     |
| Precipitación | 0.00   | 0.01   | 0.46    | 2.49     | 2.70   | 59.20  | 59.20  | 2.69     | 4.79     |
| Humedad R.    | 32.03  | 77.63  | 82.47   | 81.81    | 87.09  | 100.00 | 67.97  | 9.46     | 7.73     |
| Radiación     | 25.52  | 124.88 | 159.22  | 167.55   | 203.57 | 359.79 | 334.28 | 78.68    | 56.98    |
| Presión       | 650.05 | 723.51 | 724.23  | 724.25   | 724.98 | 768.23 | 118.19 | 1.47     | 1.01     |
| V. Viento     | 0.00   | 1.19   | 1.46    | 1.49     | 1.76   | 5.66   | 5.66   | 0.57     | 0.41     |
| D. Viento     | 35.71  | 116.43 | 139.18  | 141.97   | 165.71 | 295.28 | 259.57 | 49.28    | 33.33    |

**Nota.** 1er.Q = Primer cuartil, 3er.Q = Tercer cuartil, Rango IQ = Rango Intercuartílico,  $\sigma$  = Desviación estándar. Las unidades de las variables meteorológicas se encuentran en la *Tabla 2*.

**Tabla 25.** Resumen estadístico a escala temporal mensual para las estaciones meteorológicas seleccionadas

|               | Mínimo | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo | Rango  | Rango IQ | $\sigma$ |
|---------------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|----------|
| Temperatura   | 4.64   | 11.81  | 12.44   | 12.41    | 12.93  | 17.00  | 12.36  | 1.12     | 0.82     |
| Precipitación | 5.40   | 36.85  | 66.94   | 75.93    | 101.80 | 288.70 | 283.30 | 64.95    | 50.39    |
| Humedad R.    | 62.33  | 79.28  | 81.80   | 81.81    | 84.62  | 95.66  | 33.33  | 5.34     | 4.02     |
| Radiación     | 85.34  | 148.81 | 165.61  | 167.63   | 184.14 | 241.24 | 155.90 | 35.33    | 24.44    |
| Presión       | 651.53 | 723.65 | 724.44  | 724.24   | 724.81 | 766.25 | 114.72 | 1.16     | 0.74     |
| V. Viento     | 0.39   | 1.34   | 1.46    | 1.49     | 1.63   | 3.51   | 3.12   | 0.30     | 0.22     |
| D. Viento     | 69.97  | 126.60 | 142.47  | 142.07   | 156.37 | 190.96 | 120.99 | 29.77    | 18.37    |

**Nota.** 1er.Q = Primer cuartil, 3er.Q = Tercer cuartil, Rango IQ = Rango Intercuartílico,  $\sigma$  = Desviación estándar. Las unidades de las variables meteorológicas se encuentran en la *Tabla 2*.

#### 4.3.2. Pruebas de Normalidad

Los resultados de las pruebas de normalidad tanto de Kolmogorov-Smirnov y Lilliefors rechazaron la hipótesis nula para todas las variables de todas las estaciones a escala temporal horaria. Para la escala temporal diaria y mensual, dado que en ciertos casos se encontraron discrepancias entre las dos pruebas de normalidad (*Apéndice D*. Resultados de las pruebas de

Normalidad Lilliefors y Kolmogorov), se aceptó o rechazó la hipótesis nula al graficar el conjunto de datos en una gráfica de cuartiles de normalidad. Los resultados de las pruebas de normalidad se presentan en la *Tabla 26*.

**Tabla 26.** Resultados de las pruebas de normalidad

|                        | Ucubamba ETAPA | UPS UPS | CTS UPS | Cebollar ETAPA | Tixán ETAPA | Tixán UPS | Sayausi PTAP ETAPA | Quingeo UPS | Machángara DJ Chulco ETAPA | Cumbe UPS | El Labrado ETAPA | Izhcayrumi ETAPA |
|------------------------|----------------|---------|---------|----------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|----------------------------|-----------|------------------|------------------|
| <b>Datos Horarios</b>  | Temperatura    | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Precipitación  | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Humedad R.     | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Radiación      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Presión        | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | V. Viento      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | D. Viento      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
| <b>Datos Diarios</b>   | Temperatura    | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Precipitación  | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Humedad        | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Radiación      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Presión        | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | V. Viento      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | D. Viento      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
| <b>Datos mensuales</b> | Temperatura    | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Precipitación  | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Humedad        | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Radiación      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | Presión        | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | V. Viento      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |
|                        | D. Viento      | ■       | ■       | ■              | ■           | ■         | ■                  | ■           | ■                          | ■         | ■                | ■                |

**Nota.** Sombreado verde= La variable de la estación meteorológica sigue una distribución normal. Sombreado rojo = La variable de la estación meteorológica no sigue una distribución normal.

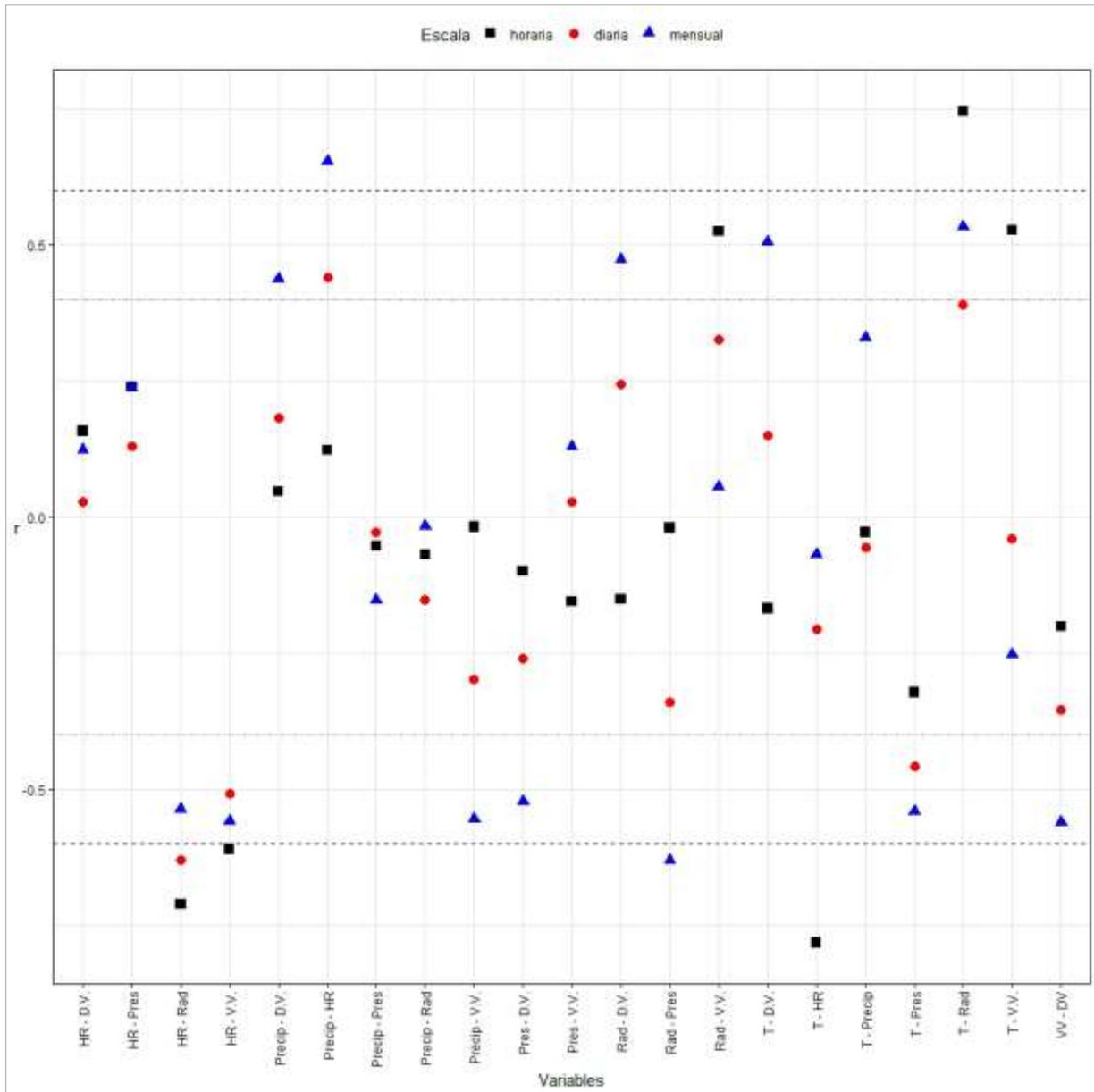
### 4.3.3. Correlación entre variables meteorológicas

En la *Figura 8* se presentan los diferentes valores promedio del coeficiente de correlación de Pearson para las estaciones meteorológicas seleccionadas, a diferentes escalas temporales. En las mismas, a escala temporal horaria se evidenciaron correlaciones lineales fuertes entre la temperatura y radiación solar global, tal como lo descrito en 2.4.1. Otro tipo de correlaciones lineales fuertes negativas fueron encontradas para todas las estaciones entre humedad relativa y radiación, similares resultados fueron encontrados por Tasié & Banyie (2018) y Guan, Yang, & Bell (2007). Al ascender la cantidad de radiación solar que ingresa a las capas más bajas de la



atmósfera ocasiona un incremento en la temperatura del suelo y a su vez en la tasa de evapotranspiración; esto ocasiona un incremento en el contenido de humedad en el aire (Kolebaje, Ikusika, & Akinyemi, 2016); sin embargo, el ascenso de la radiación solar global ocasiona un incremento en la temperatura del aire, el cual provoca un descenso de la humedad relativa; puesto que como se menciona en la sección 2.4.2 para alcanzar la saturación se requerirá un mayor contenido de vapor de agua; puesto que el aire aumenta su capacidad para almacenar vapor de agua. A escala temporal horaria la relación entre humedad relativa y temperatura del aire fue muy fuerte. Sin embargo, la relación entre humedad relativa y radiación solar descendió a medida que aumentamos la escala temporal, siendo a escala mensual una correlación lineal de tipo moderada, según lo descrito en la *Tabla 5*. Por otra parte, Solorzano Tovar (2016) al igual que en este análisis indicó una correlación positiva cercana a 0.4 entre la humedad relativa y precipitación a nivel diario; sin embargo, a escala mensual la asociación que encontramos fue fuerte. La radiación global solar tuvo una correlación fuerte negativa con la presión atmosférica a escala mensual, esto se puede explicar debido a que el factor que permite la entrada de la energía radiante del sol a la superficie de la tierra además de la nubosidad o la presencia de gases en la atmosfera, es la distribución de la presión atmosférica, la cual está directamente asociada a la circulación de las masas de aire (Kulesza, 2020). La Temperatura del aire y la presión atmosférica presentaron una asociación negativa lineal; Guan et al. (2007) mencionaron que al ascender la temperatura del aire e incrementar el contenido de humedad afectarían a la densidad del aire, pues disminuirá; dichos factores conllevan a una disminución de la presión atmosférica en un lugar determinado. Además, se encontró una correlación moderada positiva entre la velocidad del viento, temperatura del aire y radiación solar global, algo que concuerda con lo establecido por Guan et al. (2007); puesto que, mencionaron que las variaciones en la temperatura del aire y la presión atmosférica afectan de manera más significativa a la velocidad de viento en valles o colinas; sin embargo, la correlación entre presión y velocidad del viento en las tres escalas tuvo una asociación débil. Finalmente, la velocidad del viento tuvo una asociación negativa moderada lineal con la precipitación a escala mensual, moderada y fuerte para la humedad relativa para todas las escalas temporales, y moderada para dirección de viento.

**Figura 8.** Correlaciones de Pearson entre variables meteorológicas



**Nota.** T = temperatura del aire, Precip = precipitación, HR = humedad relativa, Rad = radiación, Pres = presión atmosférica, V.V.= velocidad del viento, D.V. = dirección del viento. Las líneas negras entrecortadas representan valores de  $r \pm 0.6$ . Valores superiores este valor representan correlaciones lineales fuertes y muy fuertes según la *Tabla 5*.



#### 4.4. Resultados de análisis espacial

##### 4.4.1. Tendencia *clustering*

En la *Tabla 27* se puede visualizar los resultados del estadístico Hopkins para todas las variables. El valor no superó el umbral de 0.5 por lo que se rechazó la hipótesis nula, por tanto, los datos pudieron ser agrupados al no tratarse de observaciones uniformemente distribuidas.

**Tabla 27.** *Resultados del estadístico Hopkins por variable*

| <b>Variables</b>       | <b>Escala diaria</b> |
|------------------------|----------------------|
| Temperatura            | 0.28                 |
| Precipitación          | 0.41                 |
| Humedad Relativa       | 0.35                 |
| Radiación Solar Global | 0.46                 |
| Presión Atmosférica    | 0.25                 |
| Velocidad de Viento    | 0.32                 |
| Dirección de Viento    | 0.47                 |

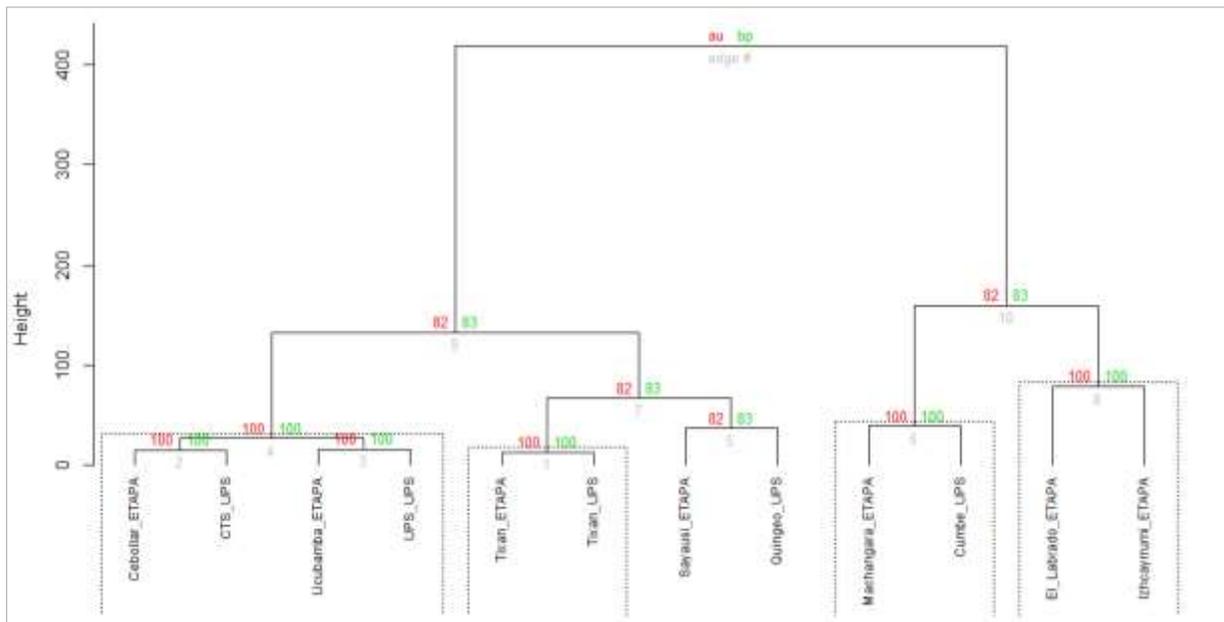
##### 4.4.2. Mejores algoritmos *cluster* y *valor-p* para métodos jerárquicos

Aplicados los estadísticos de validación interna, se estimaron los mejores algoritmos de análisis por conglomerados basado en distancias para cada variable. Los métodos con sus respectivas distancias que presentaron los mejores resultados se observan en la *Tabla 28*. Como consecuencia de lo anterior se observó que el método con mejor desempeño fue análisis jerárquico por aglomerados. Una vez obtenido el mejor método se aplicó el valor de significancia de cada grupo y se obtuvieron los dendrogramas de la *Figura 9*, *Figura 10*, *Figura 11*, *Figura 12*, *Figura 13*, *Figura 14*, *Figura 15* y *Figura 16*. A pesar de obtenerse el número de conglomerados con los criterios de los mejores estadísticos de validación, al realizar el re muestreo o *bootstrap* de las observaciones se optó por utilizar el número de grupos determinados por el nivel de significancia de cada variable. Los grupos fueron aceptados con un nivel de significancia de 5 % para cada rectángulo (grupo), lo que significa que los grupos están fuertemente apoyados por las observaciones, por lo que, estadísticamente cada grupo es válido con más de 95 % de confiabilidad. La distribución espacial de los grupos resultantes de dichos dendrogramas se pueden observar en la *Figura 17* y *Figura 18*.

**Tabla 28.** Mejores resultados de análisis cluster para cada variable

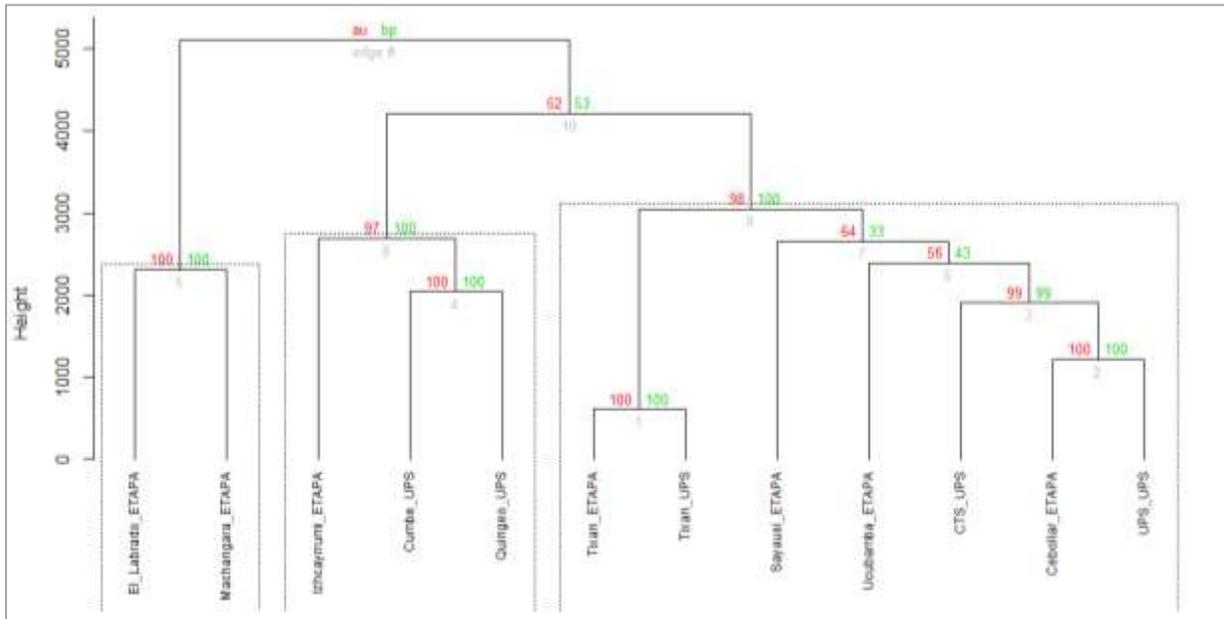
| Mejores métodos   | Variable            | k | Conectividad | Índice Dunn | Índice de silueta |
|---|---------------------|---|--------------|-------------|-------------------|
| Jerárquico por aglomerados (Ward- Euclidiana)                   | Temperatura         | 2 | 7.36         | 0.36        | 0.62              |
| Jerárquico por aglomerados (Ward – Manhattan)                   | Precipitación       | 2 | 5.07         | 0.88        | 0.29              |
| Jerárquico por aglomerados (Ward – Correlación)                 | Humedad             | 2 | 9.97         | 0.17        | 0.44              |
| Jerárquico por aglomerados (Encadenamiento medio – Correlación) | Radiación           | 2 | 5.28         | 0.78        | 0.33              |
| Jerárquico por aglomerados (Encadenamiento medio – Correlación) | Presión             | 2 | 3.05         | 0.77        | 0.73              |
| Jerárquico por aglomerados (Encadenamiento medio – Euclidiana)  | V.Viento            | 3 | 13.00        | 0.61        | 0.48              |
| Jerárquico por aglomerados (Ward – Correlación)                 | D.Viento            | 2 | 4.86         | 1.29        | 0.69              |
| Jerárquico por aglomerados (Ward – Correlación)                 | Todas las variables | 2 | 5.61         | 0.38        | 0.37              |

**Nota.** k = Número de *clusters*.

**Figura 9.** Dendrograma con valores de significancia (%) para temperatura del aire


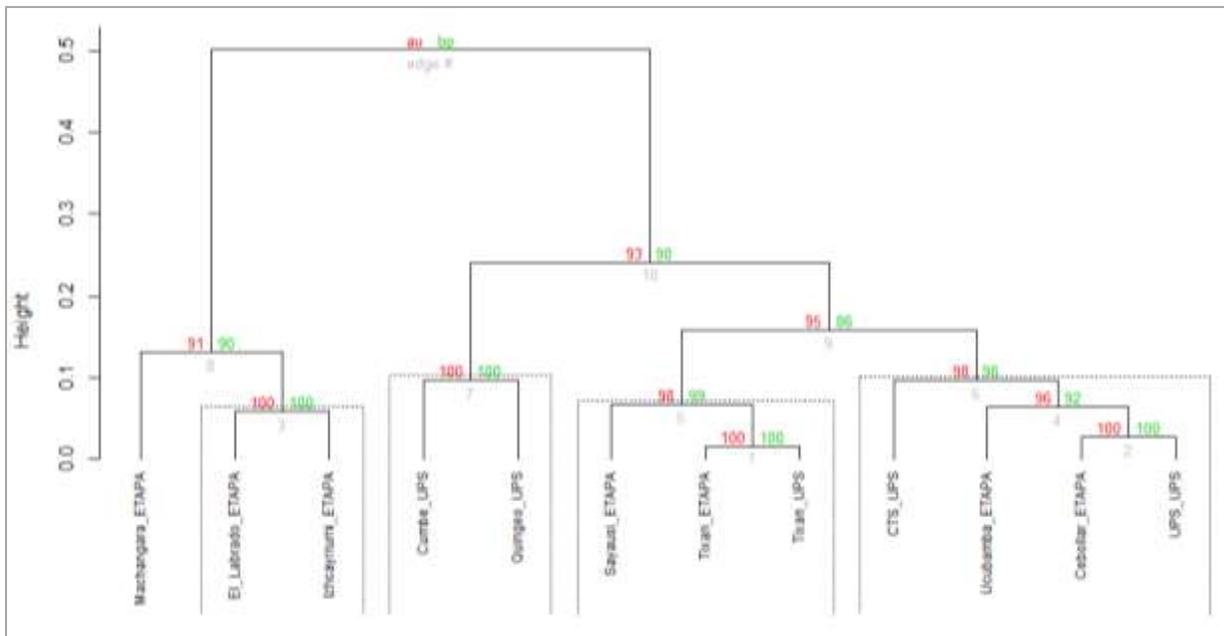
**Nota.** Las líneas entrecortadas representan los *clusters* significativos después del proceso *bootstrap*. Los valores en rojo se refieren a la aproximación parcial, mientras que, los valores en verde a la probabilidad de *bootstrap*.

**Figura 10.** Dendrograma con valores de significancia (%) para precipitación



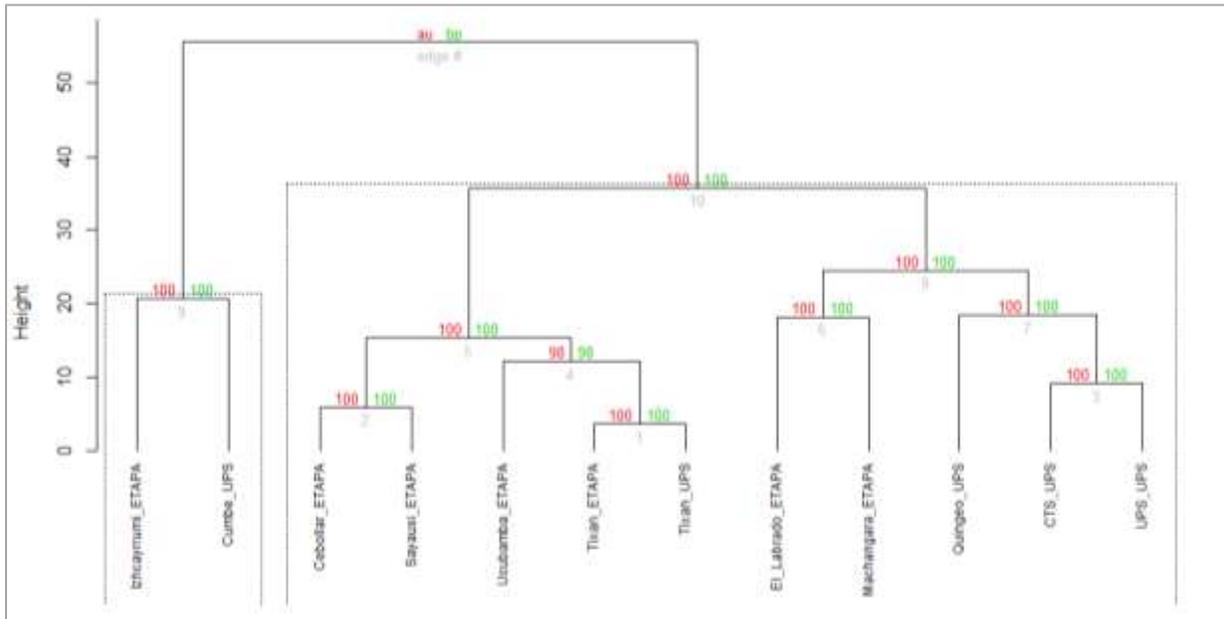
**Nota.** Las líneas entrecortadas representan los *clusters* significativos después del proceso *bootstrap*. Los valores en rojo se refieren a la aproximación parcial, mientras que, los valores en verde a la probabilidad de *bootstrap*.

**Figura 11.** Dendrograma con valores de significancia (%) para humedad relativa

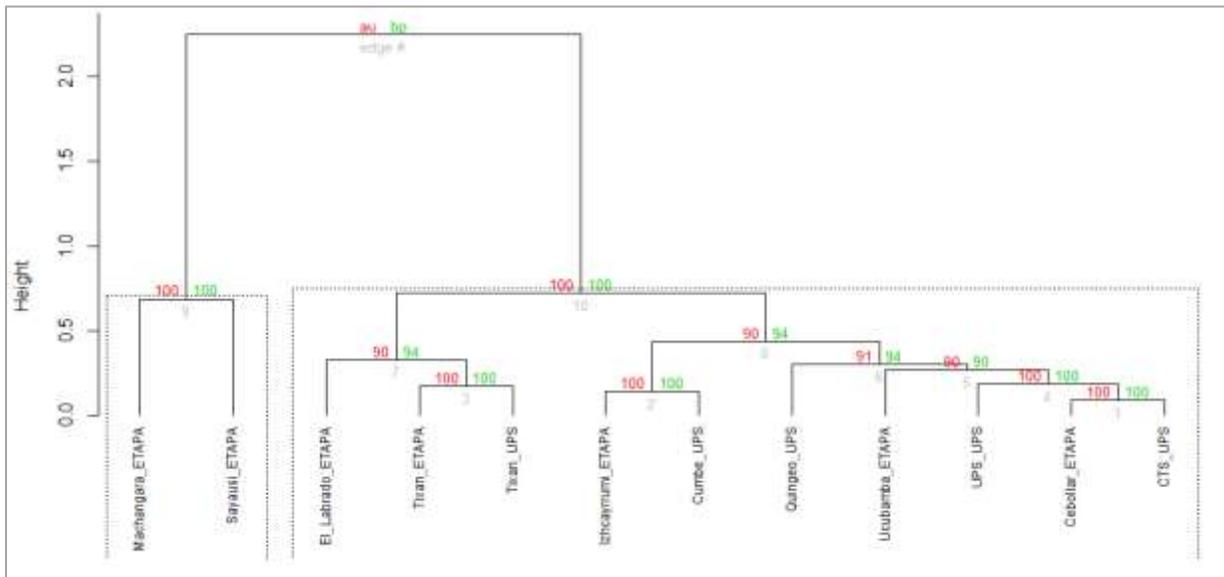


**Nota.** Las líneas entrecortadas representan los *clusters* significativos después del proceso *bootstrap*. Los valores en rojo se refieren a la aproximación parcial, mientras que, los valores en verde a la probabilidad de *bootstrap*.



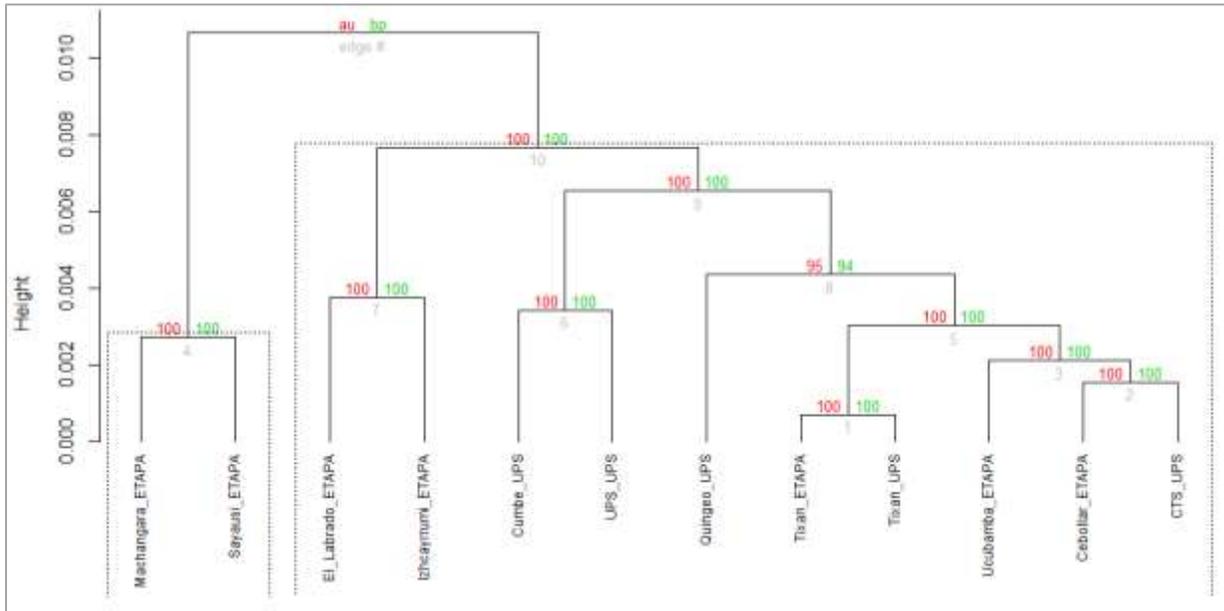
**Figura 14.** Dendrograma con valores de significancia (%) para velocidad del viento

**Nota.** Las líneas entrecortadas representan los *clusters* significativos después del proceso *bootstrap*. Los valores en rojo se refieren a la aproximación parcial, mientras que, los valores en verde a la probabilidad de *bootstrap*.

**Figura 15.** Dendrograma con valores de significancia (%) para dirección de viento

**Nota.** Las líneas entrecortadas representan los *clusters* significativos después del proceso *bootstrap*. Los valores en rojo se refieren a la aproximación parcial, mientras que, los valores en verde a la probabilidad de *bootstrap*.

**Figura 16.** Dendrograma con valores de significancia (%) para todas las variables meteorológicas simultáneamente



**Nota.** Las líneas entrecortadas representan los *clusters* significativos después del proceso *bootstrap*. Los valores en rojo se refieren a la aproximación parcial, mientras que, los valores en verde a la probabilidad de *bootstrap*.

El análisis por grupos a escala espacial diaria identificó 4 grupos para la variable temperatura y humedad relativa. En la *Figura 17* se observa que para las dos variables las estaciones que se encuentran dentro del casco urbano de la ciudad de Cuenca fueron clasificadas dentro de un solo grupo. En la *Figura 19* en el grupo en donde se encuentran las estaciones del casco urbano (C1) se observa que la temperatura claramente incrementó sus valores con respecto a los otros grupos; mientras que, tanto la humedad relativa como la velocidad del viento presentaron la concentración de sus valores por debajo de los demás grupos. La urbanización puede ocasionar cambios en la meteorología del lugar, esto se ha demostrado en varios estudios como Ackerman (1987); H. Liu et al. (2015) y Um, Ha, & Lee (2007) principalmente para variables como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. La temperatura incrementa; mientras que, la velocidad de viento y humedad relativa disminuye en las áreas urbanas con respecto a áreas rurales. El efecto urbano en la meteorología y clima de un lugar se produce por diferentes motivos, al alterar las condiciones naturales, sobre todo con el cambio de uso de suelo se modifican ciclos naturales como balances de energía y ciclos del agua (H. Liu et al., 2015; Um et al., 2007). Las estructuras características de las áreas urbanas como carreteras y edificios en lugar de una cobertura vegetal, provocan que la radiación solar sea apenas reflejada, por tanto la superficie de materiales como el asfalto



absorben gran parte de calor sensible ocasionando un incremento de temperatura del aire en comparación a zonas rurales (Y. Liu et al., 2020). En el caso de temperatura del aire se agrupó a las cuatro estaciones de mayor altitud en dos grupos diferentes, por una parte, Machángara DJ Chulco y Cumbe UPS comparten características similares debido a la altura a la cual se encuentran, teniendo las dos características de subpáramo. Esto a pesar de que geográficamente se encuentran en dos ubicaciones opuestas, pues, mientras Machángara se encuentra al noreste, Cumbe UPS se ubica al sureste de CARP. Por otra parte, El Labrado e Izhcayrrumi se encuentran a más de 3400 *m* s.n.m, dichas estaciones registraron las temperaturas más bajas de la cuenca, alcanzando a menos de 5 °C diarios. Dos estaciones, Sayausí ETAPA y Quingeo UPS no fueron agrupadas dentro de ningún *cluster*; por lo que fueron consideradas como estaciones meteorológicas con un comportamiento diferente a las demás, en cuanto a temperatura del aire.

En la *Figura 19* a través de los diagramas de caja se observó un comportamiento marcado de cada grupo para humedad relativa. Como lo menciona Fries, Rollenbeck, Nauß, Peters, & Bendix (2012) el comportamiento de la humedad relativa en las zonas andinas está fuertemente asociada con el uso del suelo. Los resultados de los grupos de humedad relativa en este estudio se asociaron en base a su cobertura de suelo. Por ejemplo, estaciones como El Labrado e Izhcayrrumi comparten similitudes al localizarse a altitudes de 3000 metros o más y corresponden a zonas de páramo y subpáramo. Por otra parte, Tixán UPS, Tixán ETAPA y Sayausí PTAP están ubicados en áreas de expansión urbana, las cuales son zonas de transición en donde a pesar de encontrarse edificaciones y carreteras también se encuentran cultivos agrícolas y pasto. El último grupo de humedad relativa se conformó por Quingeo y Cumbe, las cuales se ubican en parroquias rurales aledañas, con similar cobertura vegetal, a pesar de Quingeo encontrarse a 300 metros más de altitud con respecto a la estación Cumbe.

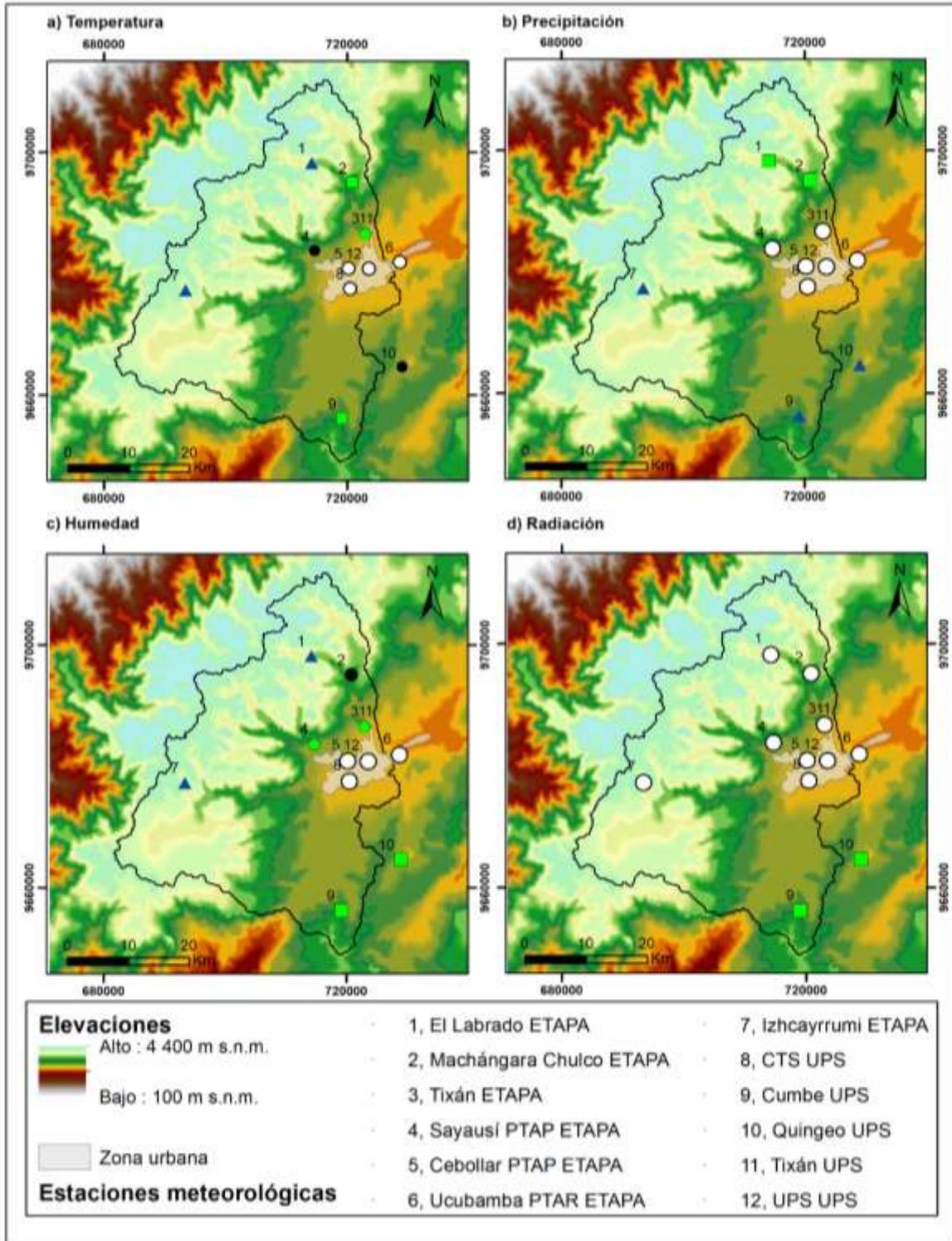
En el caso de la distribución espacial de la precipitación tres fueron los grupos en los cuales se clasificaron las estaciones meteorológicas. El comportamiento de las observaciones de cada grupo se presenta en el diagrama de caja de la *Figura 19*, en este caso se observan variaciones en la mediana de cada grupo; siendo el grupo 2, conformado por El Labrado y Machángara DJ Chulco el grupo con la mediana más alta. Como se observa en la *Figura 17* los grupos se conformaron por estaciones con las que comparten similitudes geográficas; por ejemplo, siete de ellas están distribuidas en la ciudad de Cuenca y sus alrededores (C1); mientras que, las cinco estaciones de



mayor altura se dividen en dos grupos. Dentro del grupo conformado por Cumbe, Quingeo e Izhcayrrumi se evidenció en la *Figura 10* que Izhcayrrumi tiene mayor disimilitud que los otros elementos del grupo, asimismo, en C1 la disimilitud entre estaciones fue mayor con respecto a los demás grupos de precipitación, lo que indicó una variabilidad en el comportamiento de la precipitación en las estaciones de la ciudad de Cuenca. Ballari, Giraldo, Campozano, & Samaniego (2018) reportaron que la variación en los patrones de la lluvia se debe principalmente a factores orográficos. En nuestro análisis la clasificación agrupó a las estaciones que se encuentran en el valle a una altura menor a 2847 *m s.n.m.* y por otra parte, a las estaciones de alta montaña. Las similitudes entre patrones a rangos altitudinales cercanos podrían estar asociadas a las características de la lluvia. En este contexto, Orellana-Alvear, Célleri, Rollenbeck, & Bendix (2017) analizaron características de lluvia a diferentes altitudes de la parte occidental de la CARP y encontraron que a menor altitud (aproximadamente 2690 *m s.n.m.*) el origen de la lluvia es de tipo convectiva y el tamaño de las gotas de lluvia es mayor; mientras que en zonas de mayor altitud (a más de 3626 *m s.n.m.*) además de presentar un diámetro más pequeño, la llovizna es el tipo de precipitación característica y la duración de los eventos de lluvia son mayores, mientras que el origen de la lluvia en esta área es de tipo orográfico.

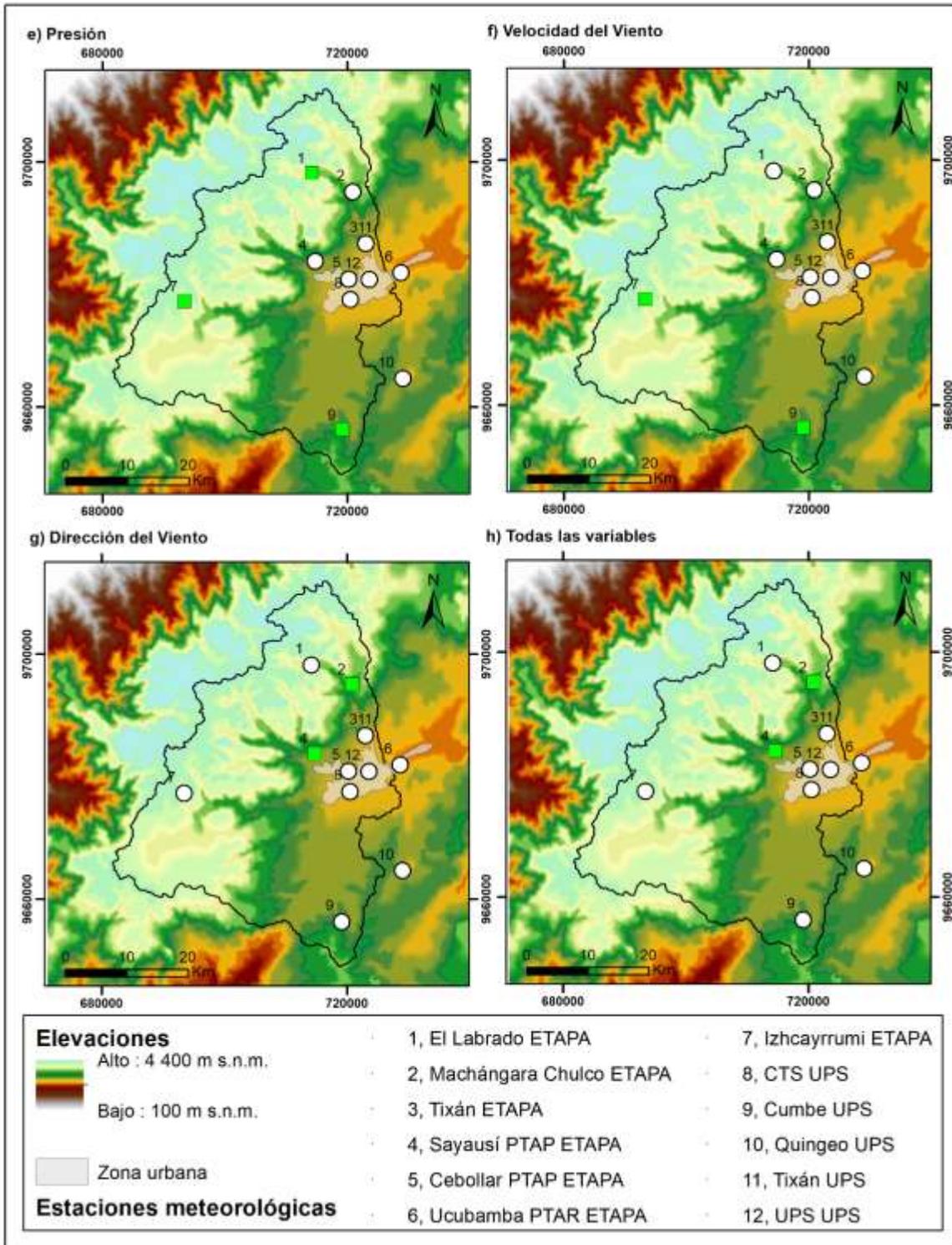
Para tres de las siete variables meteorológicas fueron identificados dos grupos. Por una parte, para la radiación solar, Cumbe y Quingeo fueron agrupados en un solo grupo, el cual tiene menor disimilitud (*Figura 12*) en comparación al otro grupo. Además, como se visualiza en la *Figura 20*, el comportamiento de los grupos de presión atmosférica fue muy marcado, puesto que por una parte agrupó a las estaciones a mayor altitud y por otra a las estaciones con altitud menor a 3000 *m s.n.m.* Finalmente, para la dirección de viento y el análisis para todas las variables meteorológicas se conformaron dos grupos como se presenta en la *Figura 18*, logrando diferenciarse las estaciones Machángara DJ Chulco y Sayausí PTAP.

Figura 17. Clusters de las estaciones meteorológicas por variable

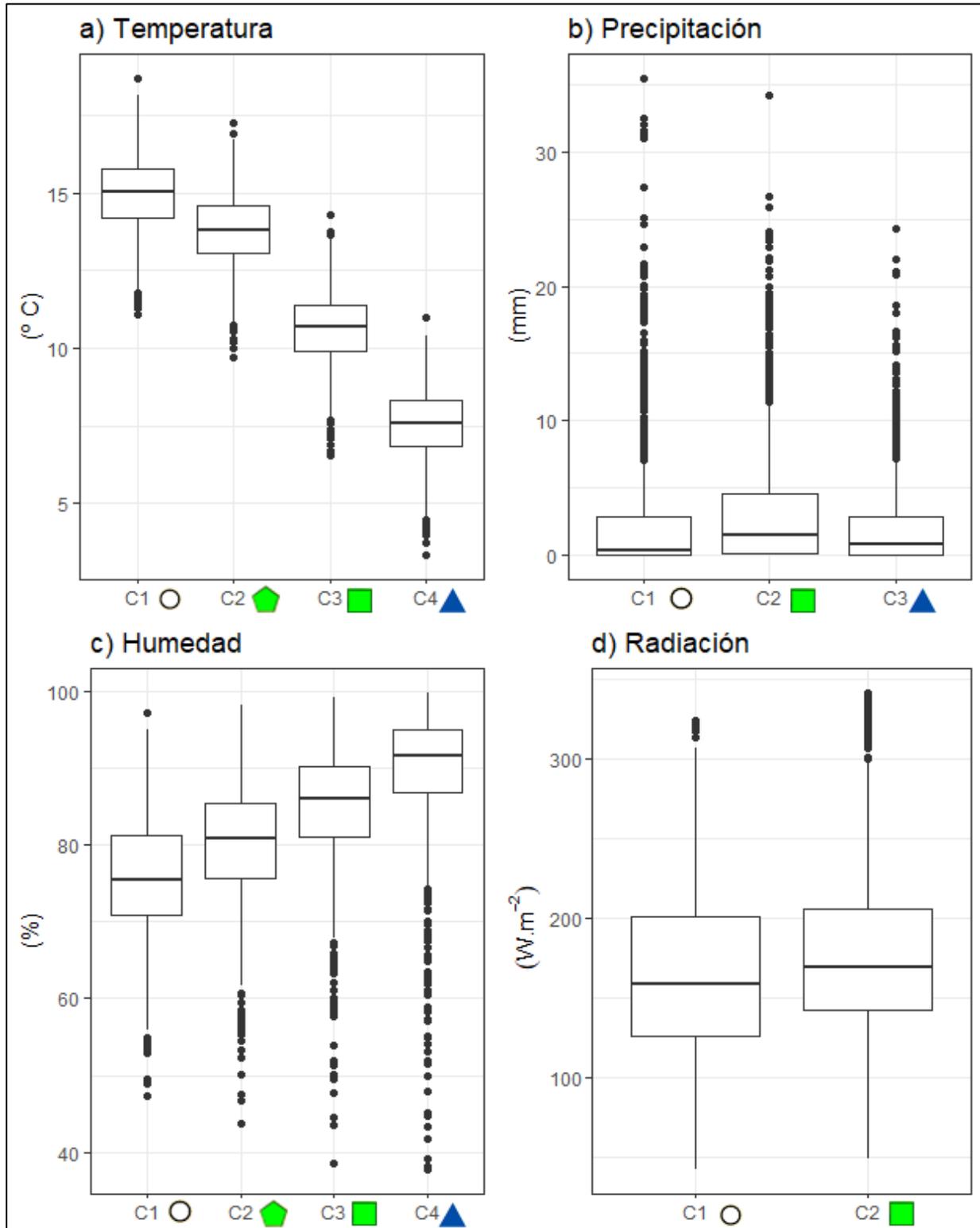


**Nota.** Los símbolos representan estaciones meteorológicas pertenecientes a un determinado *cluster*. Aquellas con un comportamiento único y que no pertenecen a ningún grupo fueron denotadas con punto negro.

**Figura 18.** Clusters de las estaciones meteorológicas por variable

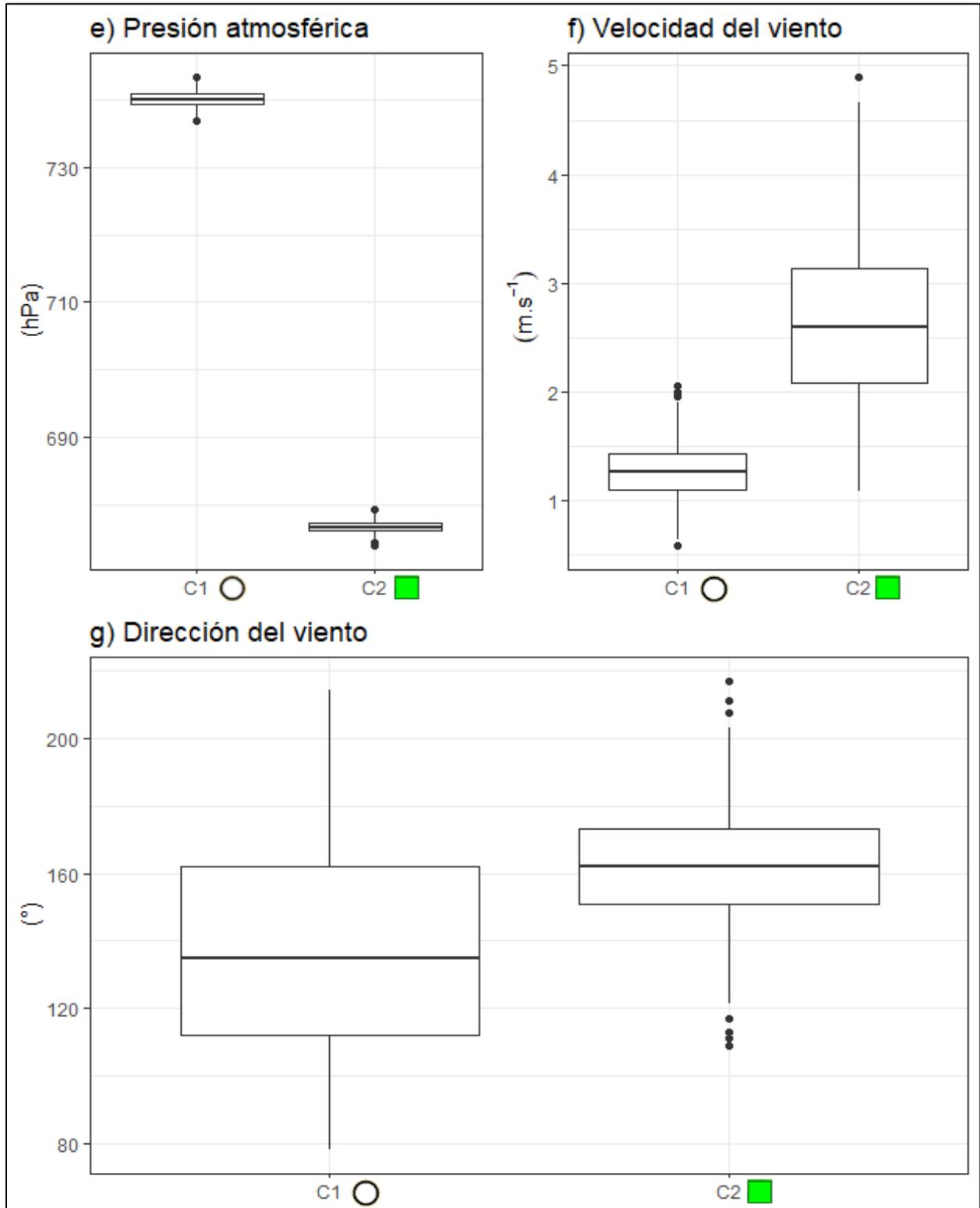


**Nota.** Los símbolos representan estaciones meteorológicas pertenecientes a un determinado *cluster*.

**Figura 19.** Diagramas de caja de los diferentes clusters por variable meteorológica

**Nota.** Los símbolos representan los clusters de la Figura 17.

Figura 20. Diagramas de caja de los diferentes clusters por variable meteorológica



Nota. Los símbolos representan los clusters de la Figura 18.

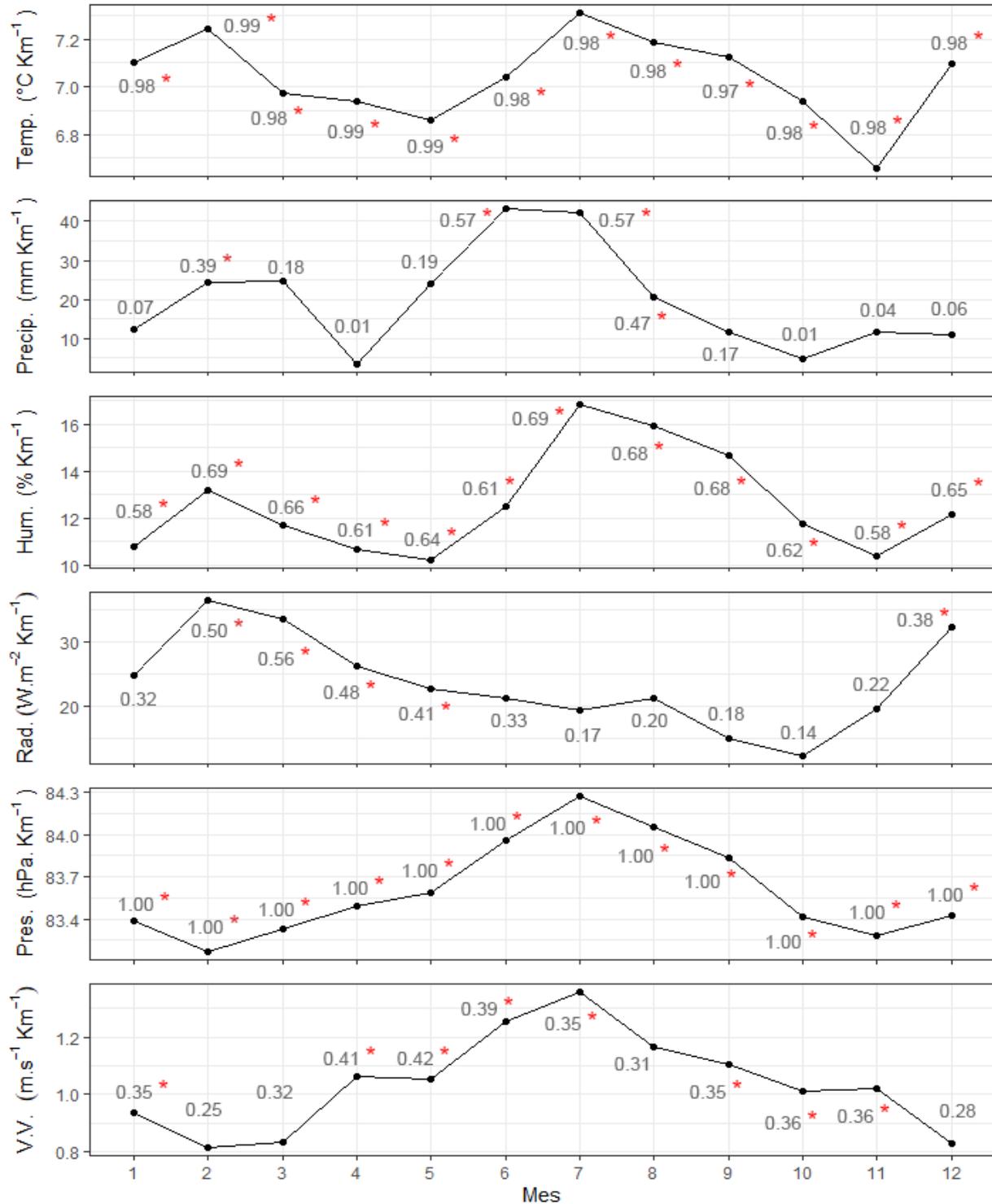


#### 4.4.3. Resultados de la variación altitudinal de las variables meteorológicas

En la *Figura 21* se presentan los gradientes altitudinales de las diferentes variables meteorológicas. Para la temperatura del aire las correlaciones son significativas para todos los meses y el gradiente promedio mensual de temperatura es de  $7.04\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$ . Córdova et al. (2016) realizaron un estudio de la variación de temperatura con la altura; el área de estudio incluye el oeste de los Andes (Parque Nacional Cajas). Los autores reportaron un gradiente muy similar al obtenido en este estudio; el gradiente para la temperatura mensual promedio fue de  $6.88\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ; asimismo, el coeficiente de determinación fue de 0.98. En el caso de la presión atmosférica se obtuvieron gradientes altitudinales con una correlación perfecta; por  $1\text{ km}$  de altitud la presión varía en  $83.6\text{ hPa}$ . En la sección 2.4.4 se detalló la relación de presión con la altitud descrita en la literatura. El gradiente obtenido en el análisis es similar a la descrita en dicha sección. En cuanto a la humedad relativa por cada  $\text{km}$  la humedad relativa varía en  $12.56\%$ . Las correlaciones para esta variable son significativas y mayores a 0.58. En la literatura se ha descrito esta relación, puesto que el porcentaje de humedad relativa decrece con la altitud; aunque, el gradiente altitudinal varía por las latitudes (Peixoto & Oort, 1996).

Por otra parte, para precipitación el promedio de gradiente mensual fue de  $19.53\text{ mm}$  por  $\text{km}$ ; mientras que, para radiación y velocidad de viento, los promedios de variaciones mensuales son  $23.75\text{ Wm}^{-2}$  y  $1.04\text{ ms}^{-1}$  por  $\text{km}$ , respectivamente. En estos casos los coeficientes de determinación indican que los cambios de las variables con respecto a la altura no son representativos.

**Figura 21.** Gradientes altitudinales de las variables meteorológicas



**Nota.** Los valores numéricos junto a los marcadores de la línea continua representan los coeficientes de determinación ( $R^2$ ). El signo (\*) indica cuando la correlación tiene una significancia  $< 0.05$ .



## 4.5. Resultados de análisis temporal

### 4.5.1. Análisis de perfiles temporales

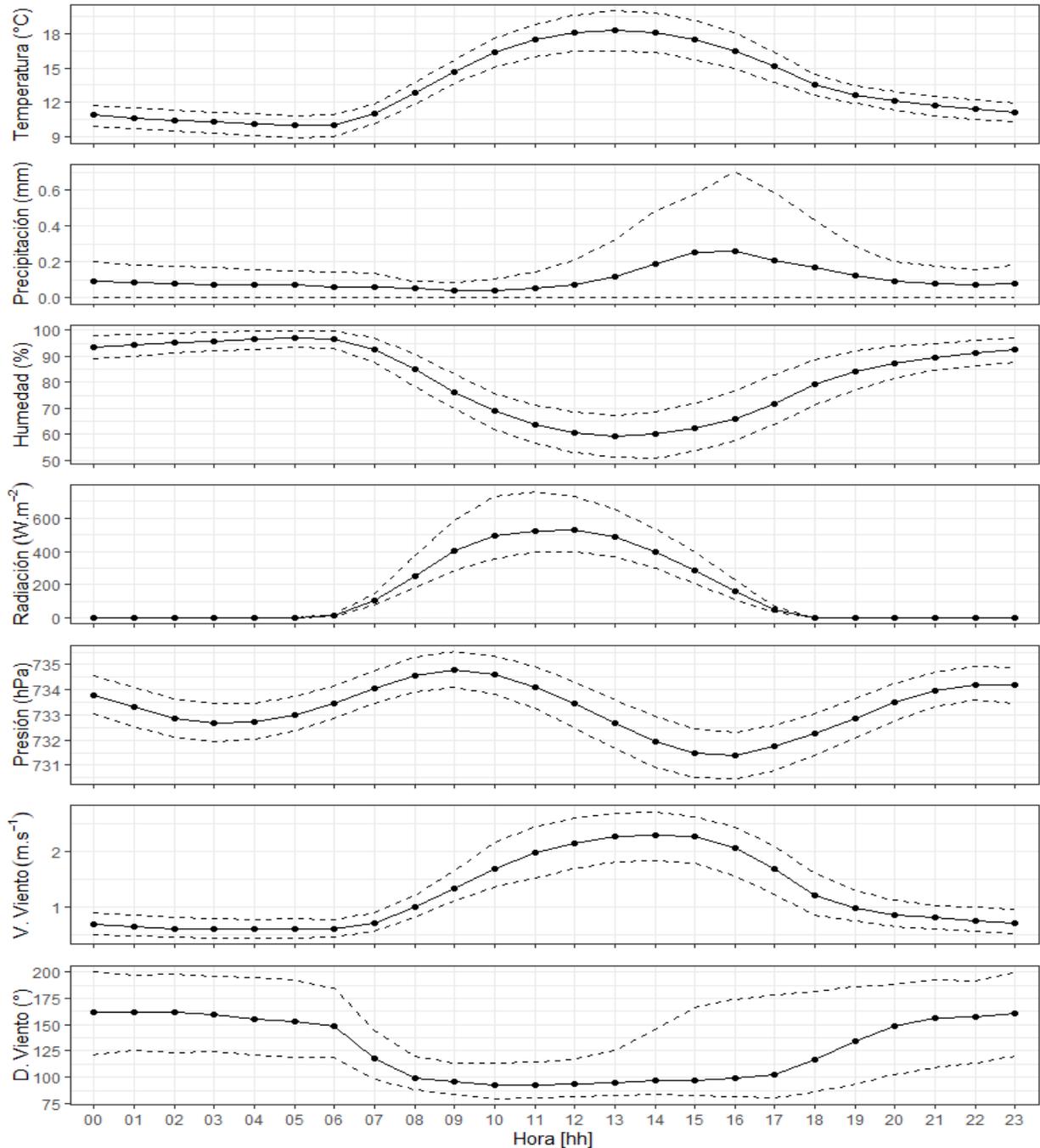
La *Figura 22* representa las variaciones diurnas de las variables meteorológicas en estudio, en el periodo junio 2015 – diciembre 2018. En ella se observan que las mayores temperaturas se registraron entre las 12:00 y 14:00 horas. El pico de radiación se localizó entre las 10:00 a 12:00 horas; por otra parte, el comportamiento de la humedad relativa fue contraria a la temperatura del aire y la radiación, puesto que durante la noche y madrugada (18:00 h a 06:00 h) se registraron los mayores valores y desde las 12:00 h a 15:00 h los valores más bajos de humedad relativa. Para un mayor entendimiento del comportamiento de la precipitación se presenta la *Figura 25*, en donde se indica la cantidad, frecuencia e intensidad de las variaciones diurnas de dicha variable. En la CARP en el período en estudio, la frecuencia de la lluvia horaria tuvo su pico alrededor de las 15:00 h a 16:00 h, en las mismas horas se registraron las lluvias con mayor cantidad e intensidad. Otros autores encontraron patrones similares en la zona del páramo y sur del Ecuador, señalando que durante la mañana tal como se visualiza en la *Figura 22* la radiación solar que alcanza la superficie, presenta sus picos más altos de energía radiante, esto genera levantamientos convectivos, los cuales apoyados por la orografía del lugar dan como resultado coberturas de nubes y precipitación en el lapso de la tarde (Buytaert et al., 2006; Luteyn & Churchill, 1999; Padrón et al., 2015).

En la *Figura 22* también se puede visualizar que el comportamiento de la presión atmosférica fue oscilatorio y alcanzó sus picos en la mañana y en la noche, cada 12 horas aproximadamente. En efecto, el viento presentó sus velocidades más bajas durante la noche, mientras que en el día alcanzó sus velocidades máximas entre las 11:00 h y las 16:00 h; por otra parte, la dirección de viento se encontró principalmente en dirección sureste. Durante las horas de la noche, la dirección predominante se situó alrededor de los  $175^\circ$  (sureste), por el contrario, en las horas del día, el viento se dirigió especialmente desde  $90^\circ$  (este). En la *Figura 23* los rangos de los perfiles semanales nos demostraron variaciones pequeñas en los promedios diarios correspondientes a los diferentes días de la semana, de las distintas variables meteorológicas.

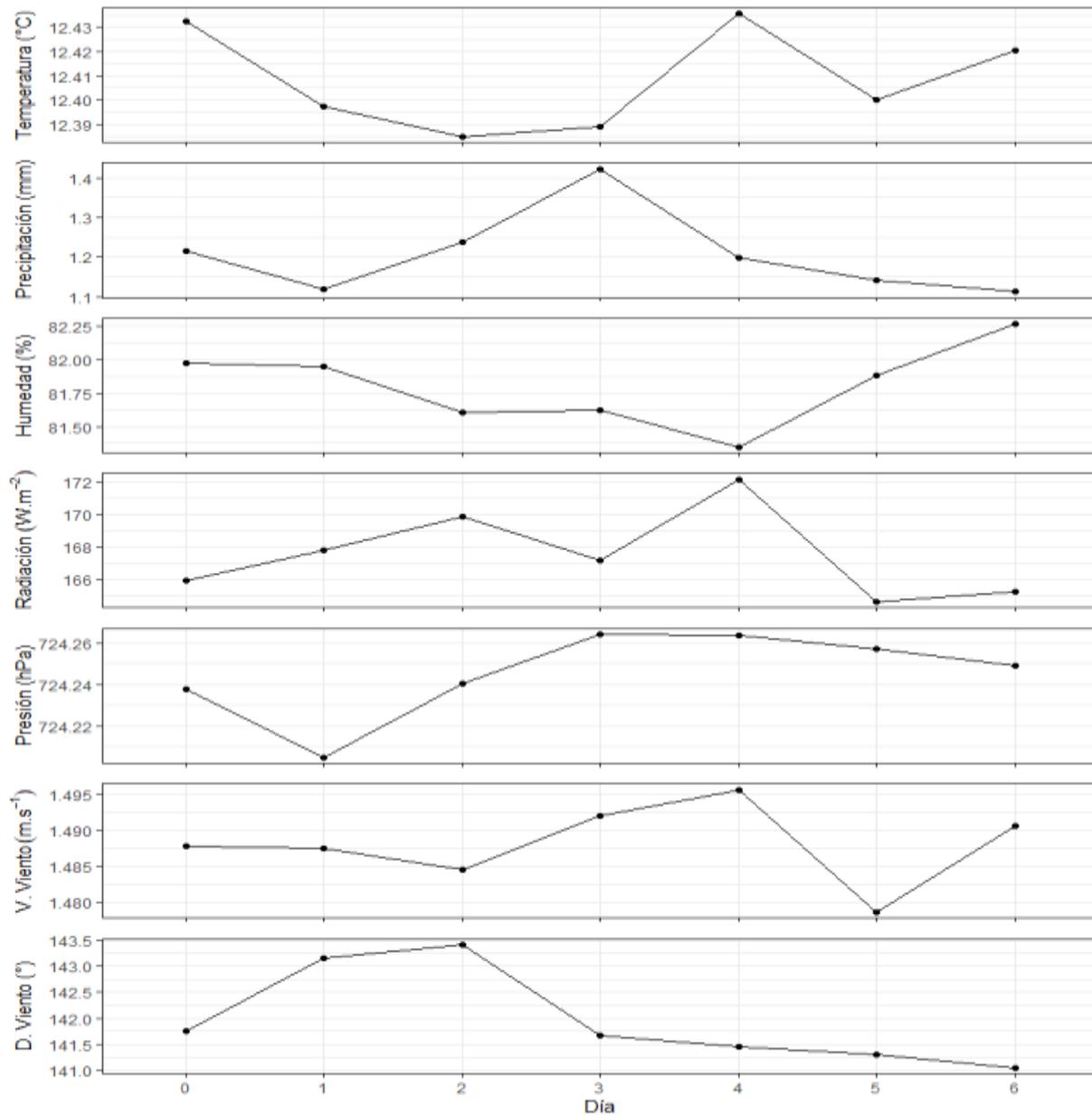
Una vez descrito los comportamientos de las variables durante el día y a lo largo de la semana, en la *Figura 24* se presentan las variaciones de las variables meteorológicas a nivel mensual en el período en estudio. A lo largo del año, la temperatura del aire se mantuvo mayoritariamente en el



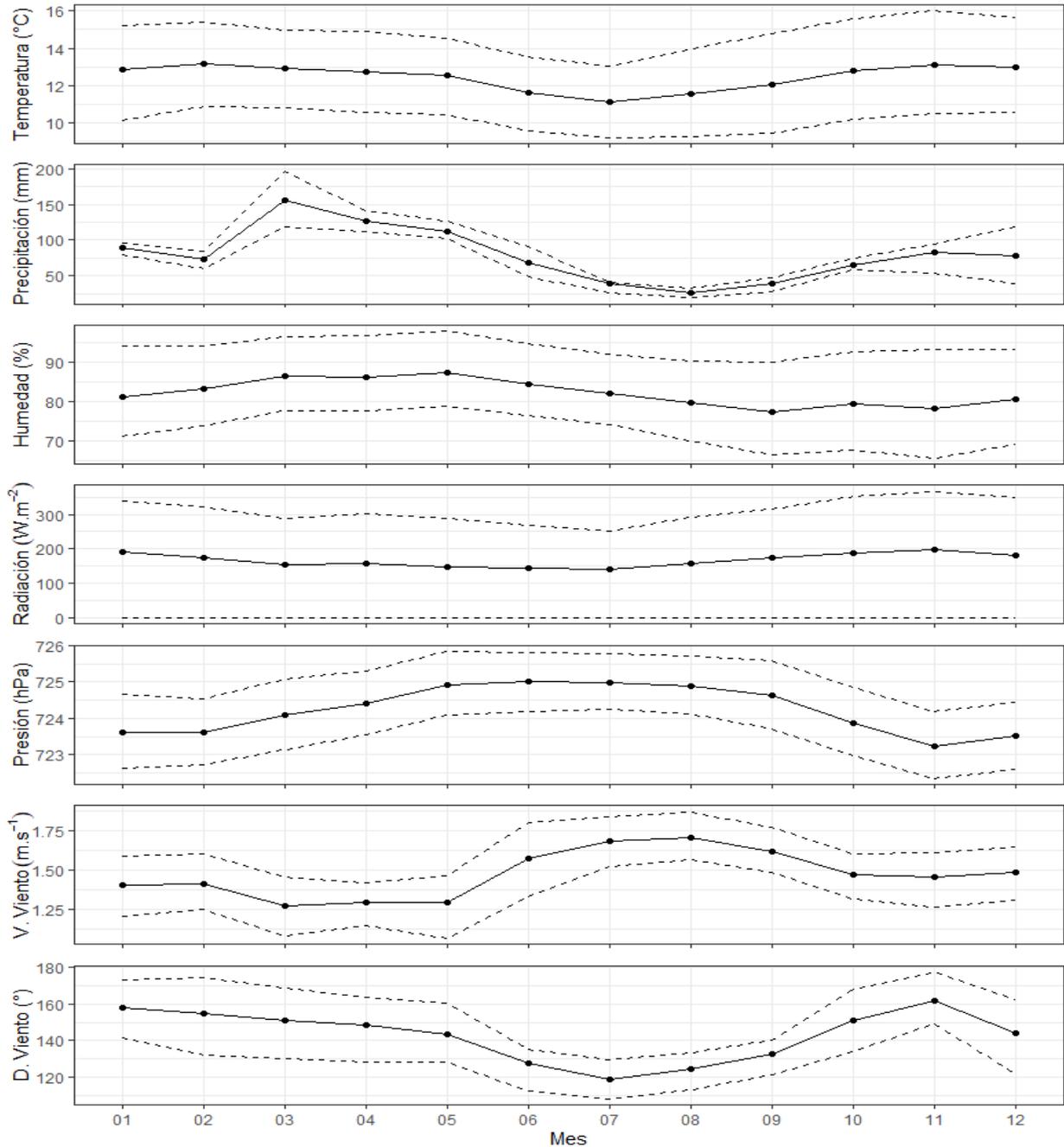
rango de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , como promedio se mantuvo alrededor de  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; sin embargo, los meses de junio, julio y agosto disminuyeron levemente el promedio. Asimismo, la radiación solar global y la humedad relativa se mantuvieron en un promedio mensual alrededor  $200\text{ Wm}^{-2}$  y  $80\%$  con variaciones leves a lo largo de los meses. La presión atmosférica por su parte se localizó entre  $723\text{ hPa}$  y  $726\text{ hPa}$ , presentaron sus puntos más altos durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre. En efecto, la variable de precipitación sufrió variaciones notables en la cantidad total mensual a lo largo del año, presentándose un comportamiento bimodal en CARP, con su primer pico en los meses de marzo, abril y mayo, y el segundo en noviembre.

**Figura 22.** Perfiles diarios de las variables meteorológicas

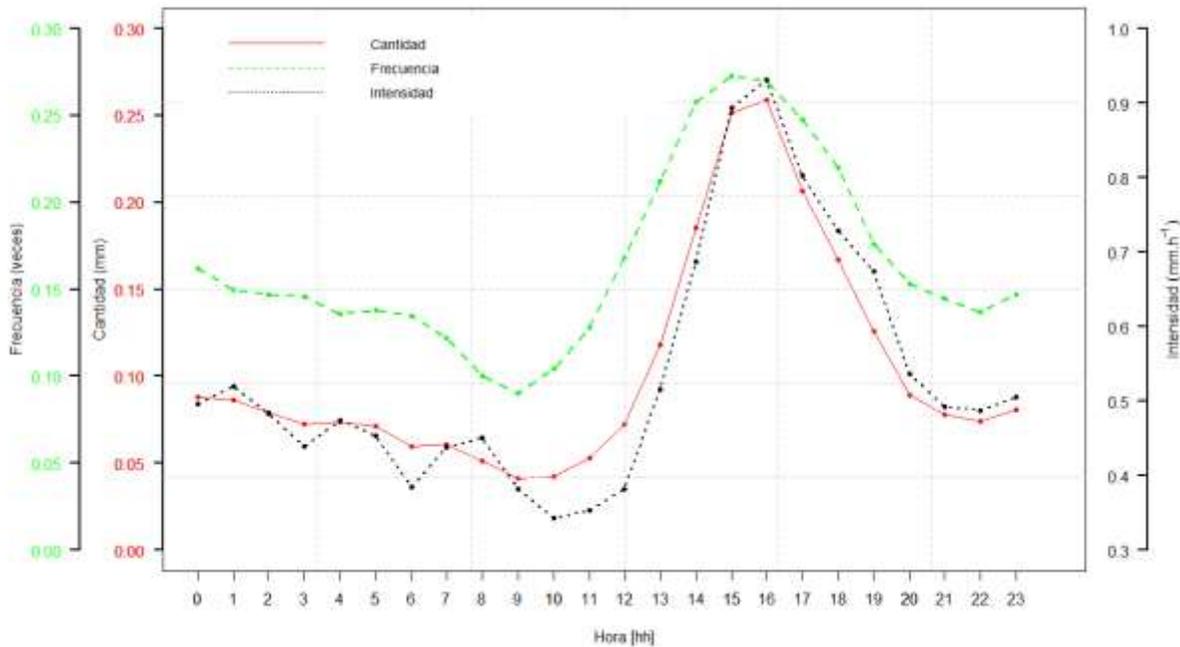
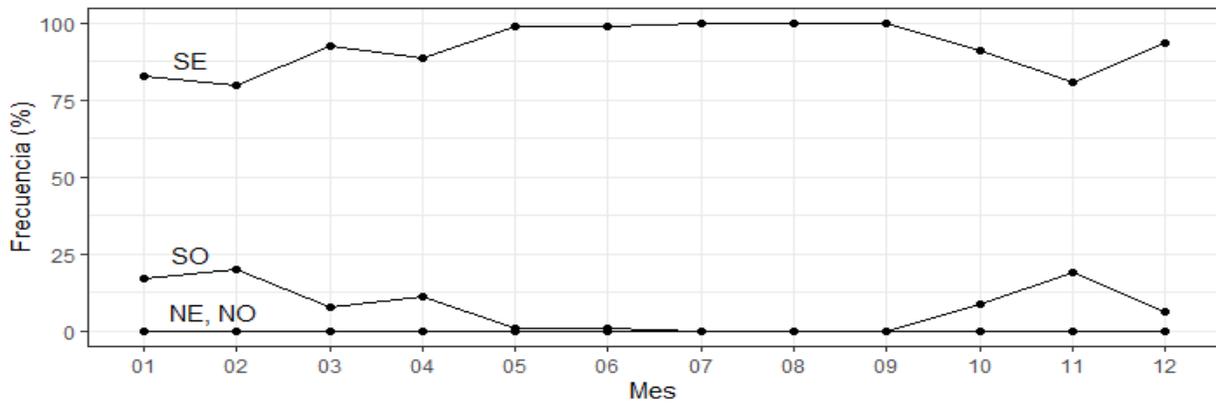
**Nota.** La figura representa el comportamiento de las variables meteorológicas durante las 24 horas. En el caso de temperatura, humedad relativa, radiación solar global, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, la línea sólida representa la mediana del conjunto total de datos, así como, las líneas entrecortadas representan el cuartil 25 (línea inferior) y el cuartil 75 (línea superior); sin embargo, para precipitación se utilizó el promedio, además del cuartil 25 (línea entrecortada inferior) y el cuartil 90 (línea entrecortada superior).

**Figura 23.** *Perfiles semanales de las variables meteorológicas*

**Nota.** 0= domingo, 1=lunes, 2=martes, 3= miércoles, 4= jueves, 5= viernes y 6= sábado. La línea sólida negra representa los promedios correspondientes a un día de la semana.

**Figura 24.** *Perfiles mensuales de las variables meteorológicas*

**Nota.** Las líneas sólidas indican el promedio mensual de las observaciones pertenecientes a los doce meses del año, correspondiente al período junio 2015 a diciembre de 2018. Las líneas entrecortadas representan el primer cuartil (línea inferior) y tercer cuartil (línea superior).

**Figura 25.** Perfil diario de precipitación que incluye frecuencia, cantidad e intensidad**Figura 26.** Frecuencia de la dirección de viento a escala mensual

**Nota.** SE = sureste, SO = suroeste, NE = noreste, NO = noroeste.

Como se puede observar en la *Figura 26* a lo largo del período en estudio la dirección predominante del viento fue sureste, principalmente en los meses de mayo a septiembre. Sin embargo, de octubre a abril los vientos más frecuentes llegaron desde dirección sureste interrumpidos por vientos del suroeste, en una frecuencia aproximada de 25 %. Resultados similares fueron encontrados por Rollenbeck & Bendix (2011) quienes realizaron su estudio en una cuenca andina, entre los valles de Loja y Catamayo, señalando que los vientos intermitentes



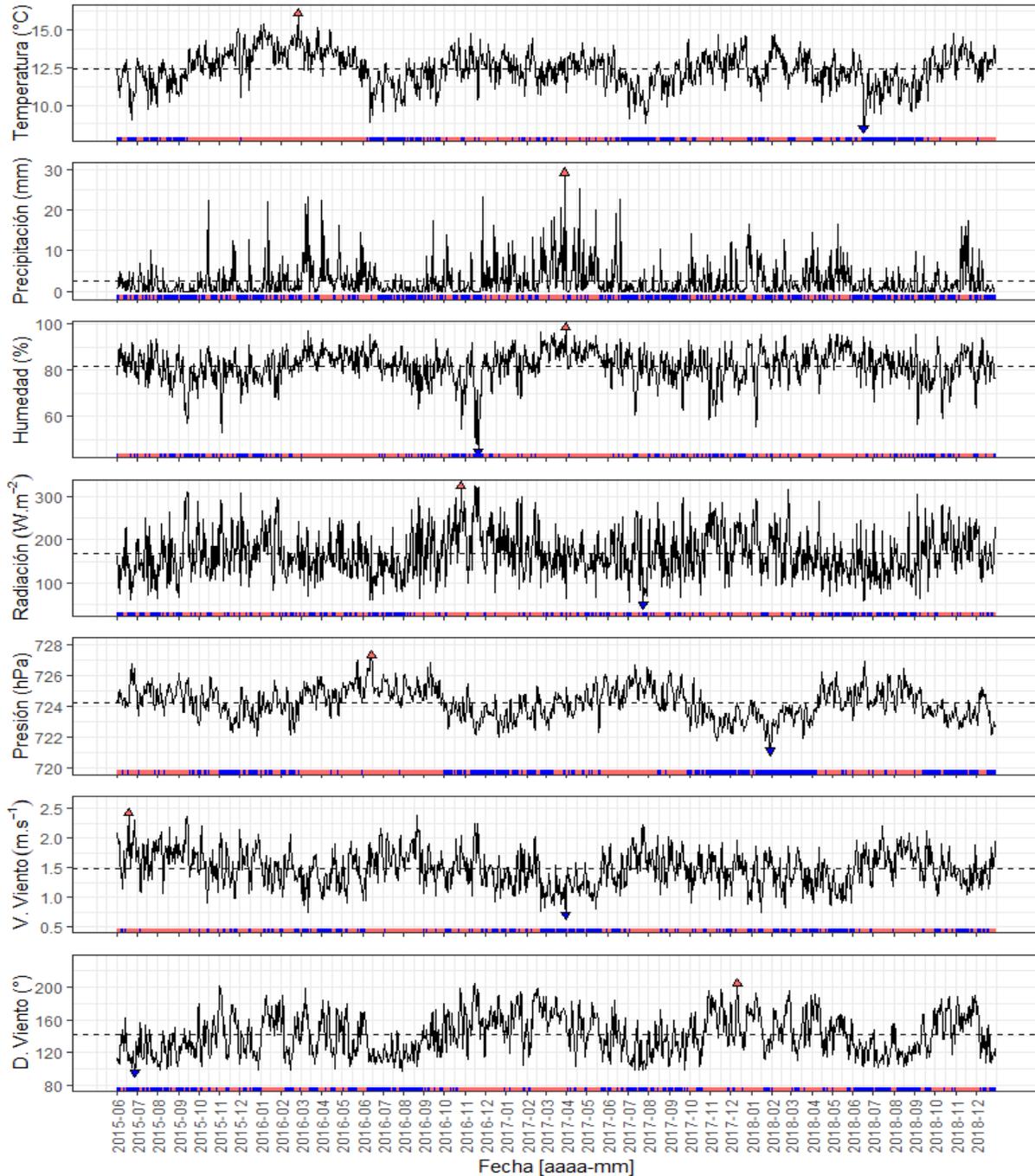
que llegan del océano pacífico (dirección suroeste) traen consigo masas de aire secas, puesto que debido a la presencia de la parte occidental de los Andes se produce el efecto *foehn*, provocando la pérdida de humedad al ascender las masas del aire por las pendientes de los Andes, como consecuencia al descender dichas masas tendrán poca humedad y producirán el conocido verano austral; en la *Figura 27* se visualiza temperaturas superiores promedio a largo plazo durante dichos meses.

En cuanto a precipitación en la *Figura 24* se encontró un comportamiento bimodal, dicho comportamiento en la parte alta de la cuenca del río Paute ha sido descrito por Céleri, Willems, Buytaert, & Feyen (2007). Este tipo de comportamiento en el área de estudio y unimodal en otras áreas del país está asociado a la evolución o desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (Campozano, Céleri, Trachte, Bendix, & Samaniego, 2016; Garcia, Villalba, Araguas Araguas, & Rozanski, 1998). Los eventos de lluvia que se registraron durante el período de octubre a abril suelen ser resultado de la formación de nubes convectivas, tal como lo explica Bendix, Trachte, Cermak, Rollenbeck, & Naub (2009). Además, en estos meses, en la *Figura 27* se registraron valores de presión atmosférica por debajo de la media mientras la temperatura se encontró superior al promedio. Lu & Tu (2020) mencionaron que las variaciones interanuales de la presión atmosférica están asociadas a efectos termodinámicos en la circulación de la atmósfera. Relaciones físicas fundamentales que provocan dichas variaciones son las asociadas a la densidad y temperatura del aire, aunque dicha relación es tipo hiperbólica y no tipo lineal; sin embargo, en la *Figura 8* se puede observar una correlación negativa lineal moderada entre la presión atmosférica y la temperatura del aire, siendo a escala mensual más significativa que a escala diaria. Por otra parte, en los meses de mayo a octubre mayoritariamente los vientos provinieron del sureste (*Figura 26*); las masas de aire húmedo desde la Amazonía son las más habituales y responsables de las lluvias diarias sobre todo en la parte este de los andes (Campozano et al., 2016). Windhorst, Waltz, Timbe, Frede, & Breuer (2013) mencionaron que por estos meses suelen registrarse velocidades del viento más altas, algo que coincide con el análisis, puesto que, se registraron los máximos de velocidad de viento principalmente entre agosto y octubre, por el contrario, según la *Figura 24* la precipitación en estos meses es más baja.

La humedad relativa a lo largo del año permanece alrededor del 80 %, registrando valores por debajo de este valor entre los meses de agosto y febrero. En la *Figura 27* se observa que los promedios mínimos diarios fueron registrados en el mes de noviembre para todos los años (valores



por debajo de 60 %), coincidiendo dichos picos con una dirección suroeste del viento, picos de radiación y temperatura. La vegetación y uso de suelo contribuyen en una parte importante a la distribución de la humedad cerca de la superficie. En bosques se presentan valores cercanos a la saturación debido a la presencia de doseles, debido a la alta radiación que los alcanza y procesos relacionados a la evapotranspiración durante el día y en la noche a la condensación (Fries et al., 2012); sin embargo, a pesar que en zonas de sub páramos no están constituidos por una gran cantidad de doseles, también se mantienen cerca a la saturación debido a la formación de nubes por procesos convectivos (Bendix et al., 2009).

**Figura 27.** Comportamiento de las variables meteorológicas en el período de estudio

**Nota.** Las líneas negras sólidas continuas representan el promedio diario de las estaciones meteorológicas en la fecha indicada en el eje de las abscisas. La línea entrecortada negra representa el promedio diario de largo plazo de cada variable. El sombreado rojo indica observaciones superiores a la media, mientras que el sombreado azul, valores por debajo de la media. Las flechas con dirección hacia arriba indican valores máximos, mientras que las flechas con dirección hacia abajo indican valores mínimos.

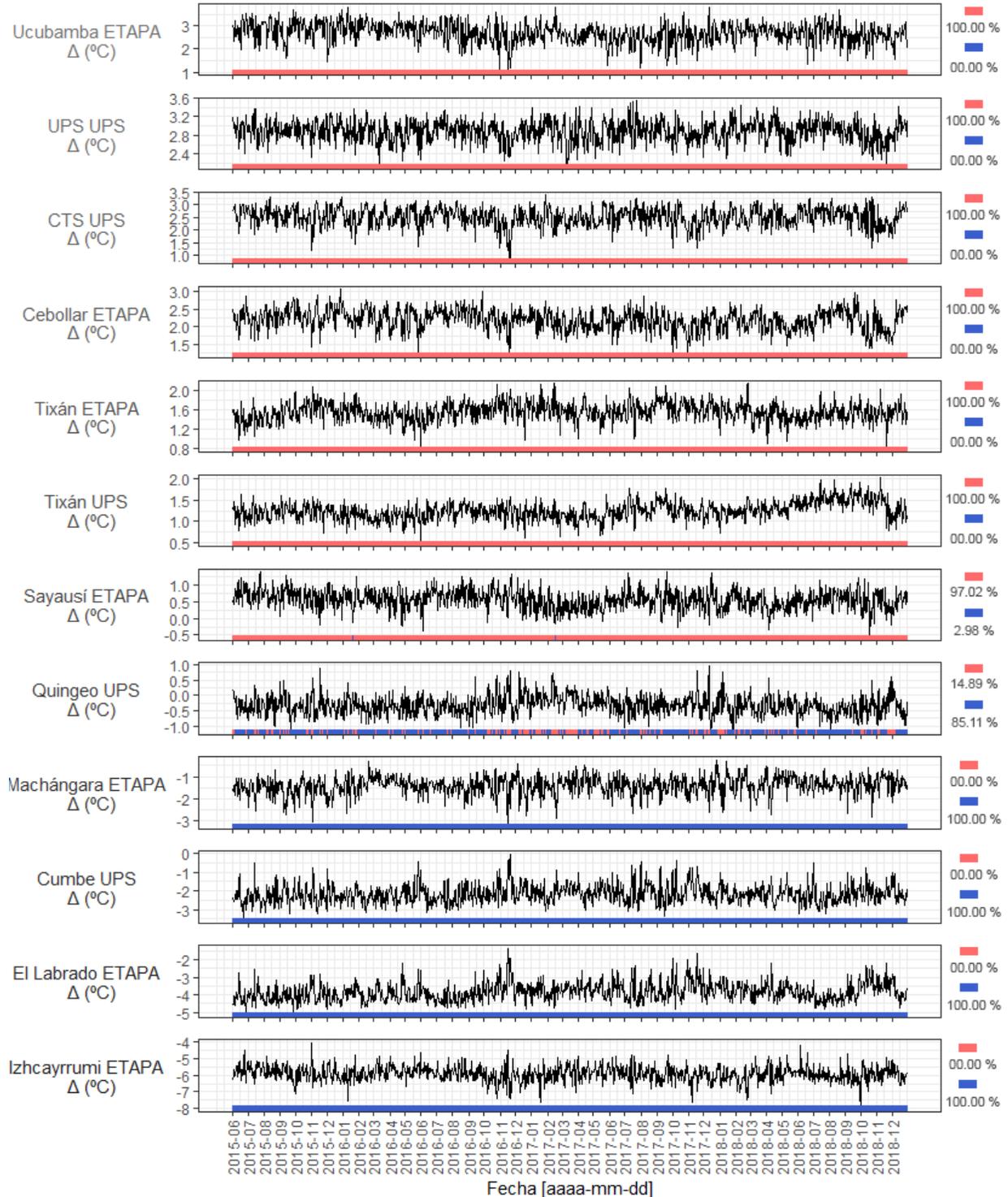


#### 4.5.2. Variaciones diarias respecto al promedio

La *Figura 28*, *Figura 29*, *Figura 30*, *Figura 31*, *Figura 32*, *Figura 33* y *Figura 34* nos proporciona información de las variaciones diarias en el período junio 2015 – diciembre 2018 con respecto a los promedios diarios de las doce estaciones meteorológicas seleccionadas. En las figuras las estaciones se ordenaron en base a su altitud. De tal manera, en la *Figura 28* se muestra una clara relación entre la altitud a la que se ubican las estaciones y las temperaturas observadas con respecto a las demás estaciones. Para empezar, las cinco estaciones ubicadas a mayor altitud en la CARP (Izhcayrrumi, El Labrado, Cumbe, Machángara DJ Chulco y Quingeo) se mantuvieron por debajo del promedio diario de las temperaturas de todas las estaciones. Por otra parte, estaciones que se localizan a menor altitud de la cuenca tendieron a presentar variaciones de temperatura superiores a la media. Asimismo, en la *Figura 29* se observa que en las estaciones de El Labrado y Machángara DJ Chulco presentaron la mayor frecuencia de valores de precipitación que se encontraron por encima del promedio, por consiguiente, en dichas estaciones se registraron mayores cantidades de precipitación acumulada a escala diaria; por el contrario, Ucubamba ETAPA, la estación UPS y CTS tuvieron la menor frecuencia de precipitación acumulada diaria reportada en el periodo de estudio. En la *Figura 30* se identificaron que las estaciones de Sayausí, Machángara, Cumbe, El Labrado e Izhcayrrumi en su mayoría de observaciones se localizaron por encima de la media de humedad relativa, por lo que el aire está más saturado con respecto a las demás estaciones meteorológicas. Además, la radiación solar global (*Figura 31*) estaciones como UPS, CTS, Quingeo y Cebollar mostraron la mayor frecuencia de radiación solar global al encontrarse más veces por encima de la media, a pesar de que no se mostró una relación con la altura como lo descrito en 2.4.4; puesto que la radiación solar global fue mayor en estaciones ubicadas a menor altitud. Sin embargo, es preciso aclarar que el paso de la radiación a las capas más bajas de la atmosfera está influenciado por diversos factores, uno de ellos es la nubosidad de alta montaña, en donde ocasiona que sus valores sean menores; además, la urbanización incrementa la absorción de radiación solar (Pyrgou, Santamouris, & Livada, 2019). Con respecto a las variaciones de presión atmosférica (*Figura 32*), dentro de la cuenca los patrones fueron similares entre las estaciones; sin embargo, los rangos en los cuales se encuentran variaron a lo largo de la altura a la cual se ubican los puntos de medición. Por lo que, las estaciones Izhcayrrumi, El Labrado, Cumbe, Machángara y Quingeo registraron las presiones más bajas. Finalmente, en los sistemas de viento como lo son la velocidad del viento (*Figura 33*) no se

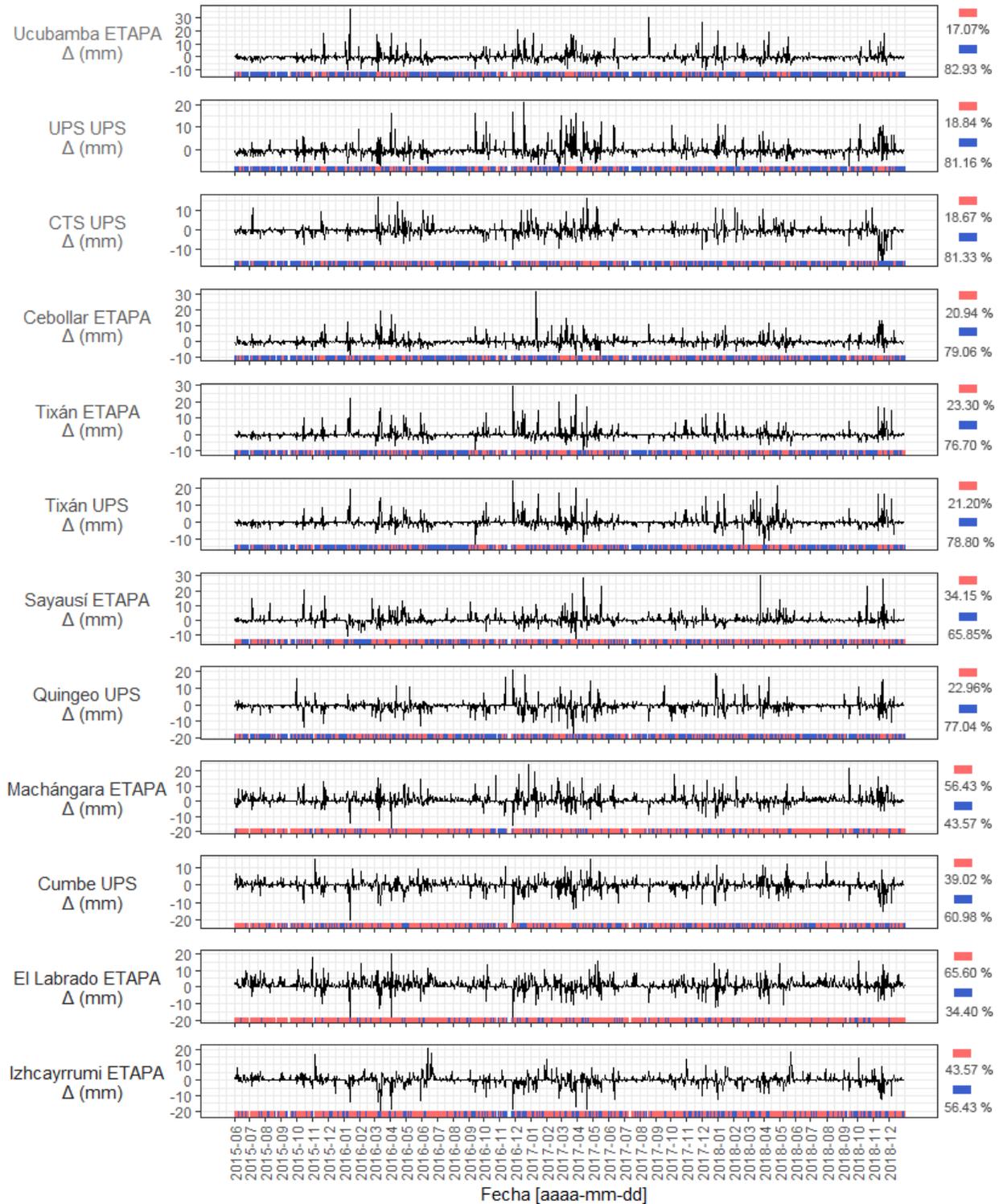


visualizó una relación marcada con la altitud; sin embargo, fue posible observar que las velocidades del viento más elevadas se registraron en estaciones de Izhcayrumi, El Labrado, Cumbe, Quingeo, CTS y UPS. En cuanto a la dirección del viento (*Figura 34*) se observaron variaciones amplias en los rangos con respecto a los promedios diarios, algo que denota una alta variabilidad en dichos sistemas.

**Figura 28.** Variaciones diarias de temperatura por estación meteorológica

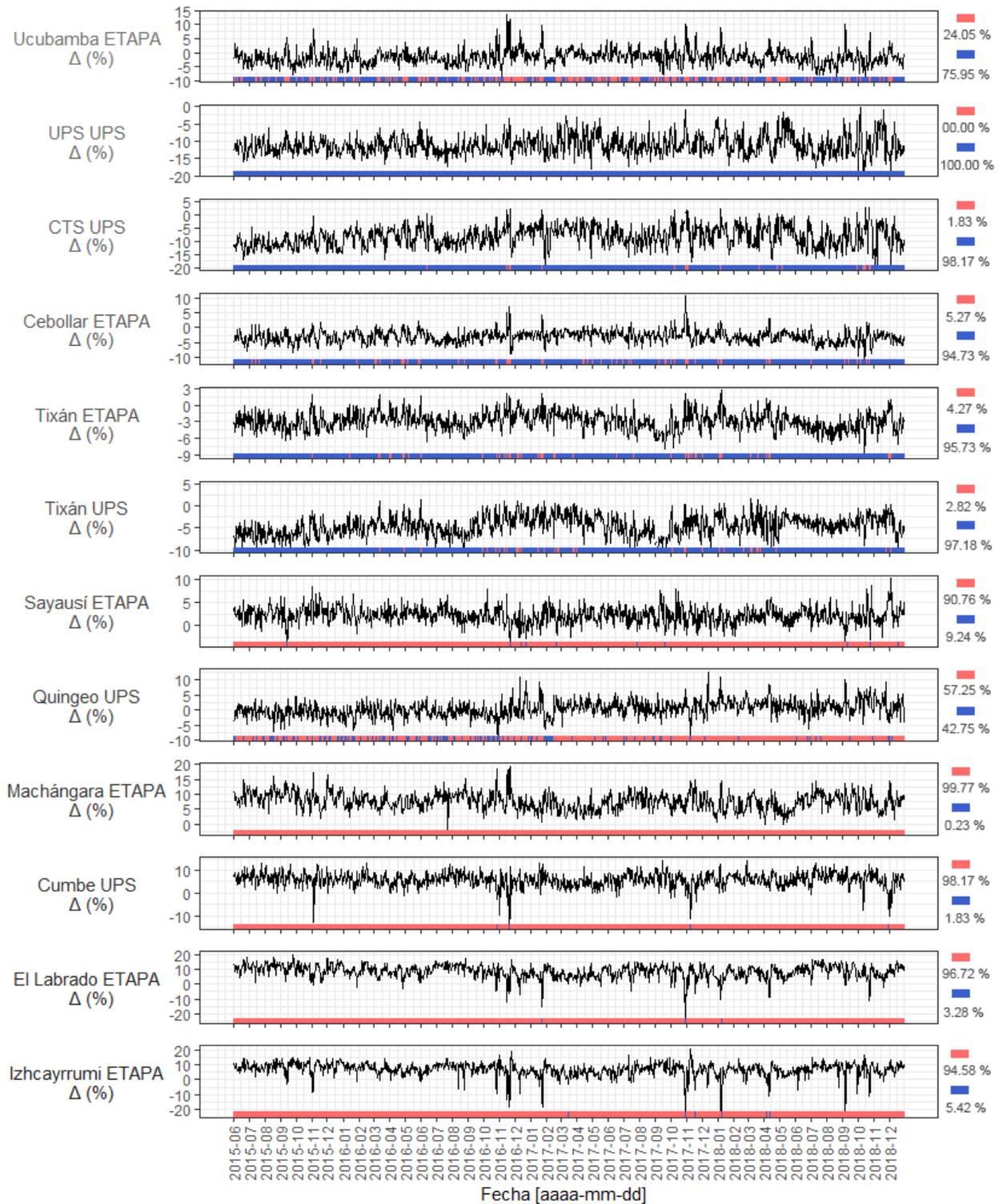
**Nota.** La línea negra continua representa la diferencia diaria de temperatura con respecto al promedio de todas las estaciones meteorológicas a nivel diario. El sombreado rojo indica observaciones por encima de la media, mientras que el sombreado azul, valores por debajo de la media.

**Figura 29.** Variaciones diarias de precipitación por estación meteorológica



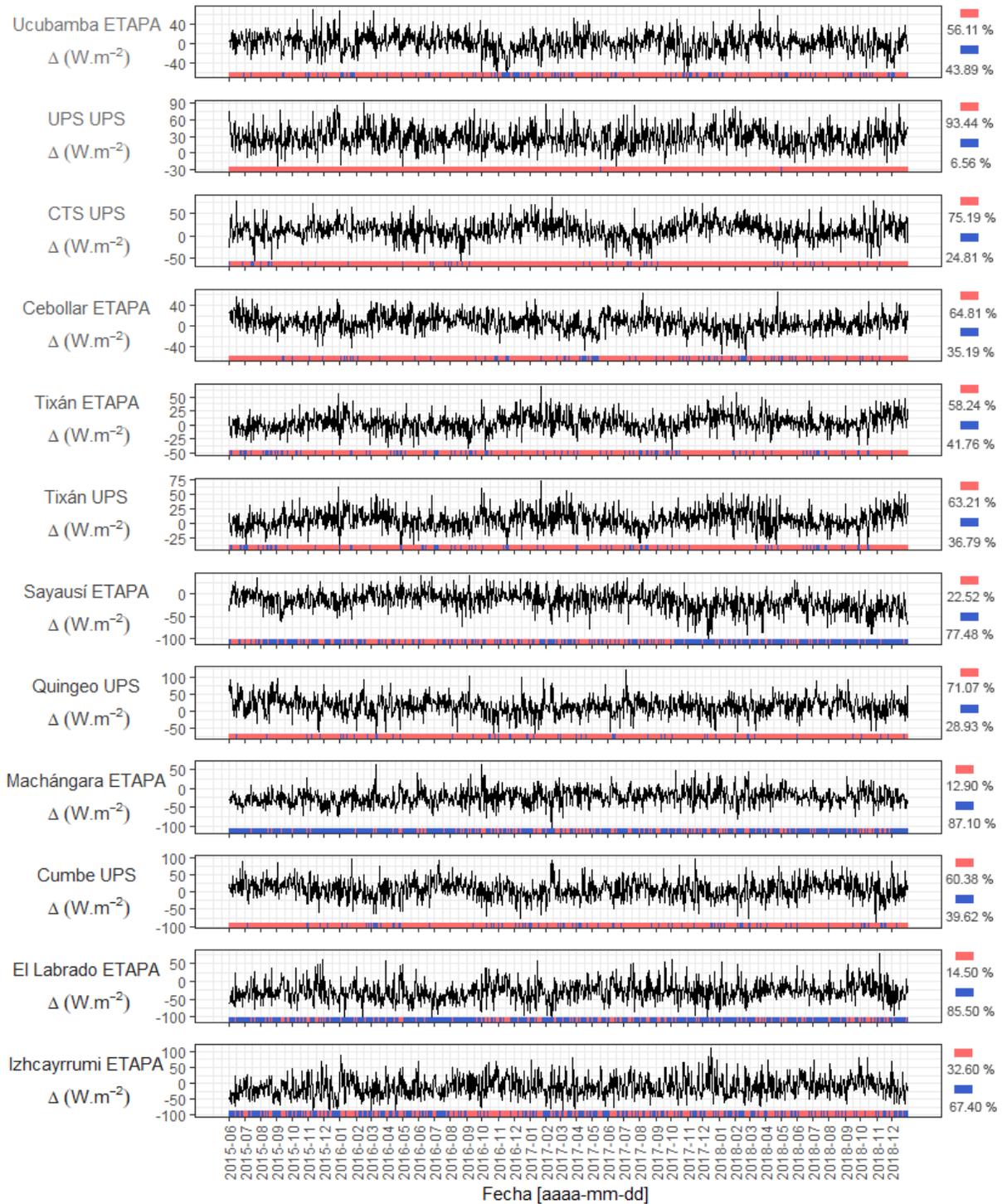
**Nota.** La línea negra continua representa la diferencia diaria de precipitación con respecto al promedio de todas las estaciones meteorológicas a nivel diario. El sombreado rojo indica observaciones por encima de la media, mientras que el sombreado azul, valores por debajo de la media.

**Figura 30.** Variaciones diarias de humedad relativa por estación meteorológica



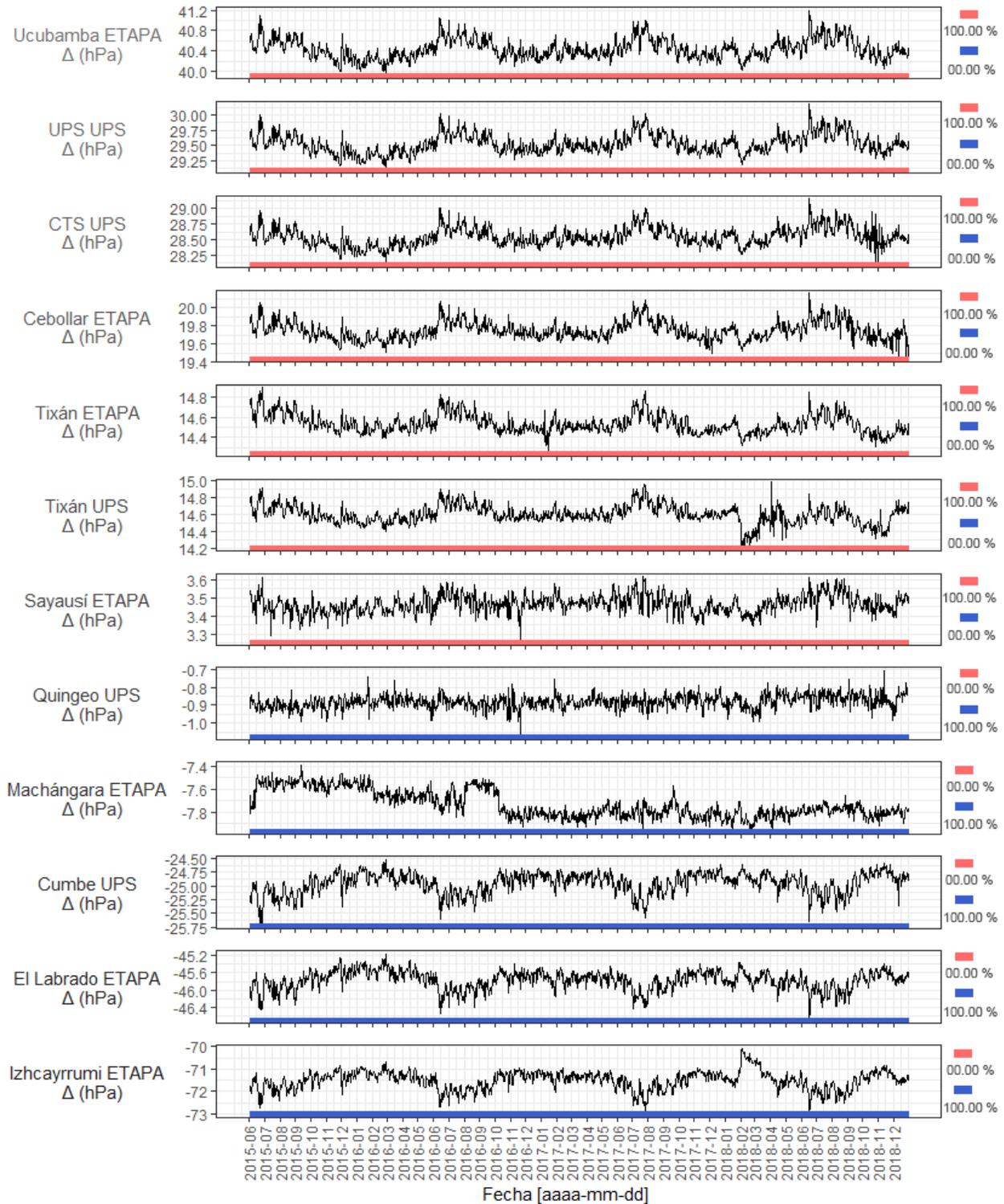
**Nota.** La línea negra continua representa la diferencia diaria de humedad con respecto al promedio de todas las estaciones meteorológicas a nivel diario. El sombreado rojo indica observaciones por encima de la media, mientras que el sombreado azul, valores por debajo de la media.

**Figura 31.** Variaciones diarias de radiación solar global por estación meteorológica



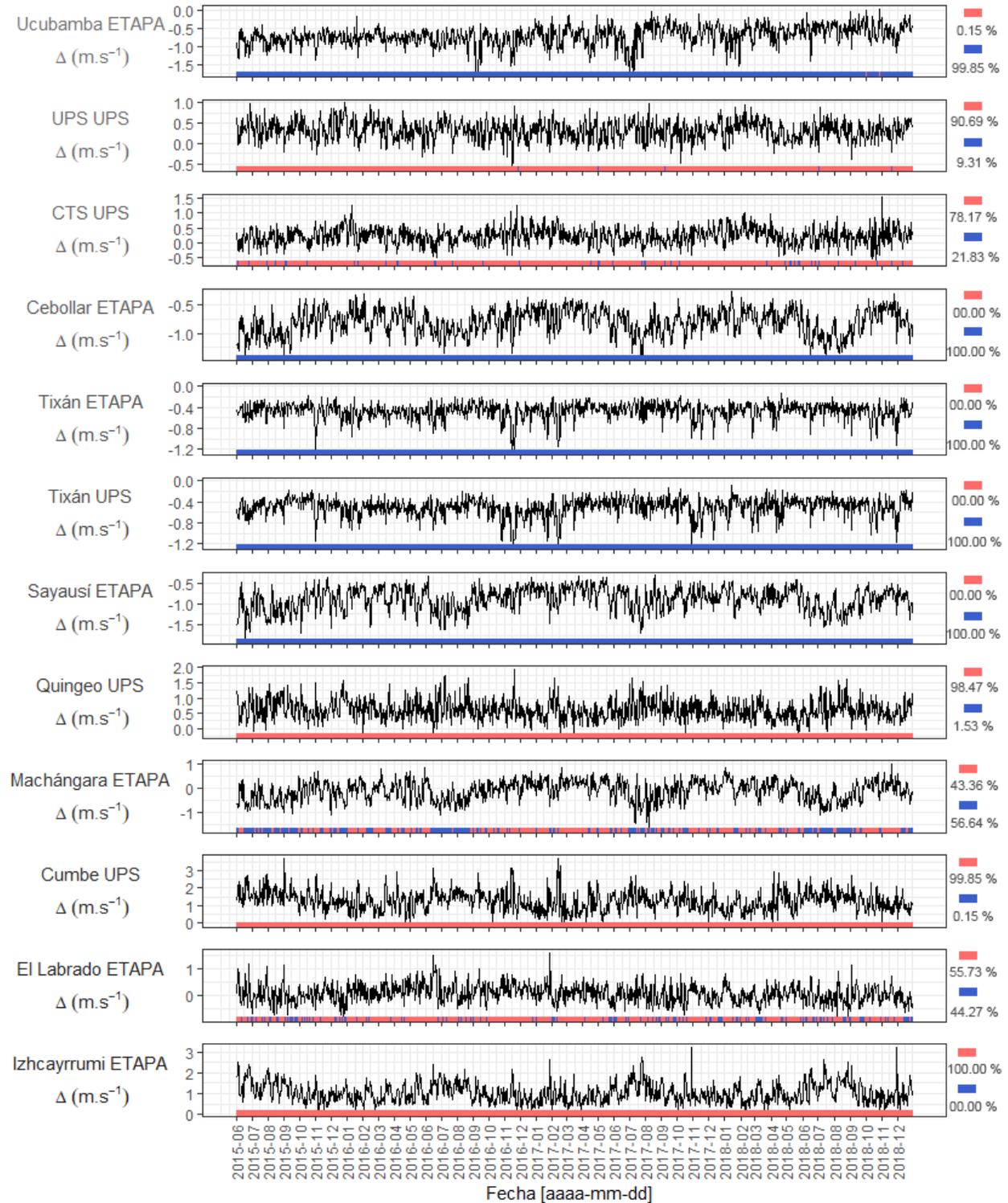
**Nota.** La línea negra continua representa la diferencia diaria de la radiación solar global con respecto al promedio de todas las estaciones a nivel diario. El sombreado rojo indica observaciones por encima de la media, mientras que el sombreado azul, valores por debajo de la media.

**Figura 32.** Variaciones diarias de presión atmosférica por estación meteorológica

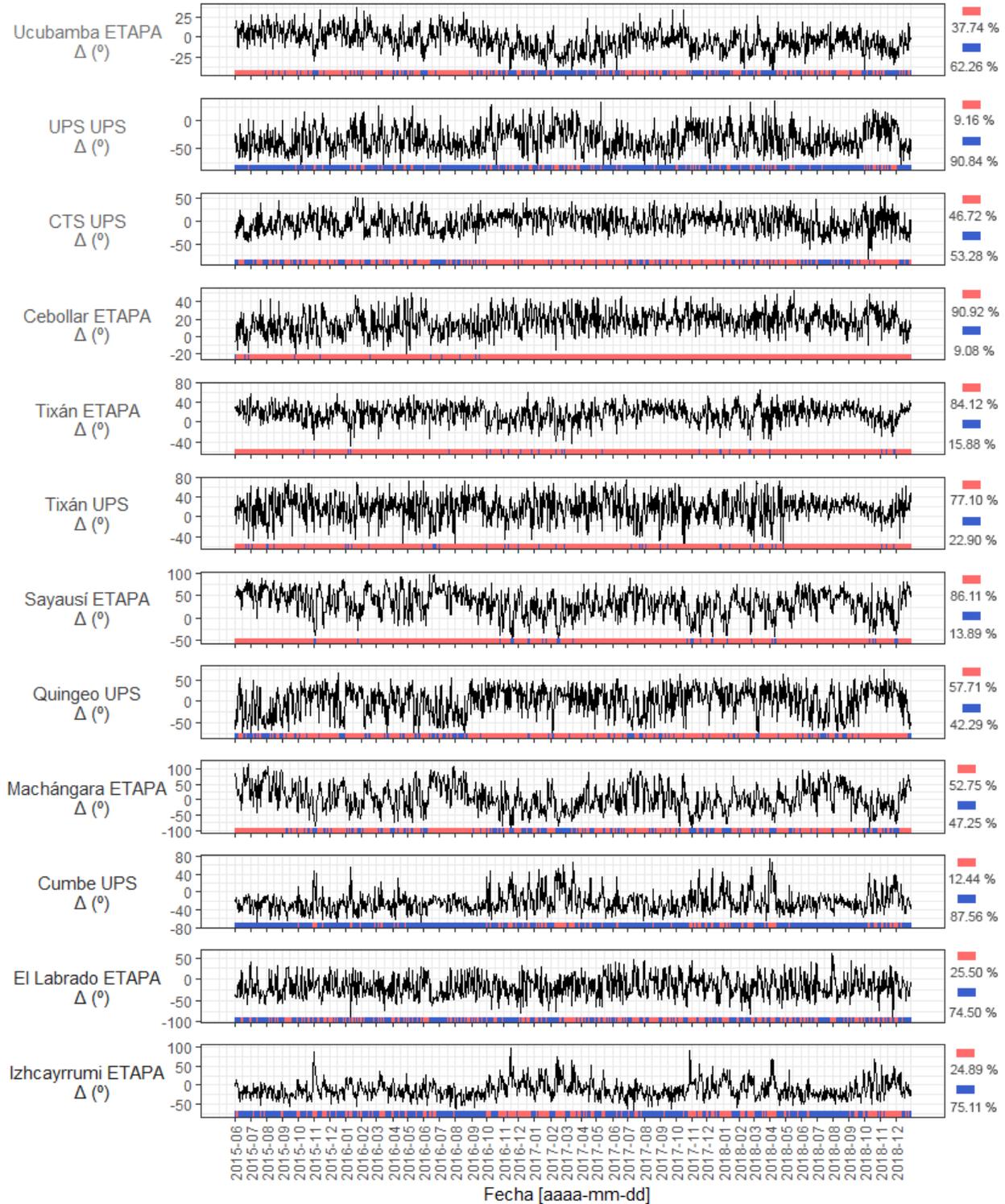


**Nota.** La línea negra continua representa la diferencia diaria de la presión atmosférica con respecto al promedio de todas las estaciones a nivel diario. El sombreado rojo indica observaciones por encima de la media, mientras que el sombreado azul, valores por debajo de la media.

**Figura 33.** Variaciones diarias de velocidad del viento por estación meteorológica



**Nota.** La línea negra continua representa la diferencia diaria de la velocidad de viento con respecto al promedio de todas las estaciones a nivel diario. El sombreado rojo indica observaciones por encima de la media, mientras que el sombreado azul, valores por debajo de la media.

**Figura 34.** Variaciones diarias de dirección del viento por estación meteorológica

**Nota.** La línea negra continua representa la diferencia diaria de dirección de viento con respecto al promedio de todas las estaciones a nivel diario. El sombreado rojo indica observaciones por encima de la media, mientras que el sombreado azul, valores por debajo de la media.



### 4.5.3. Resultados de eventos meteorológicos extremos

Los eventos meteorológicos extremos fueron determinados a partir de temperatura del aire y precipitación. Para un análisis más profundo sobre eventos extremos un mayor período de datos es recomendado, señalando como un tiempo idóneo de 30 años por los desarrolladores de Climact2; por lo que el período de datos disponibles en nuestro estudio no permite analizar causalidades de dichos eventos. Sin embargo, autores como Poveda et al. (2020) atribuyeron los eventos extremos en los Andes a condiciones locales a mesoescala intensificadas que se ajustan a procesos más amplios como convección forzada. Por lo antes mencionado, es importante conocer acerca de las condiciones locales atípicas en el período de estudio, debido a ello se logró identificar eventos como los que se detallan a continuación.

Los eventos extremos de temperatura identificados se presentan en la *Figura 35* y *Figura 36*. En primer lugar, en el año 2016 apenas se registró un evento de ola de calor de 3 días en las estaciones de CTS e Izhcayrumi, mientras que en el año 2017 se determinó una ola de calor con una duración de hasta 4 días para las estaciones en estudio, aunque en el caso de Cumbe UPS y El Labrado ETAPA se observó 2 y 3 eventos respectivamente. Para dichos años, las olas de frío fueron más recurrentes, teniendo una mayor duración de días consecutivos en el año 2017, con hasta 9 días. Por otra parte, en el año 2018 se registró la menor cantidad de eventos de calor, siendo la estación de Cumbe UPS la única en registrar 3 eventos, en donde la duración máxima fue de 4 días. Por el contrario, en este año, en la *Figura 36* se pudo observar que existieron mayores eventos de olas de frío, llegando a registrarse hasta 5 eventos con una duración de hasta 5 días por evento, en las estaciones CTS UPS y Quingeo UPS. En el noroeste de los Andes, región a la cual pertenece nuestro país, las olas de frío por lo general se producen en la estación seca (junio a septiembre) puesto que en la noche se produce un enfriamiento radiativo que ligado a una baja nubosidad resulta en temperaturas muy bajas (Poveda et al., 2020).

En la *Figura 37* se observan los días consecutivos secos. Para los tres años en estudio se reportaron más de 30 días sin registrar precipitación diaria acumulada mayor a 1 mm, en estaciones como Sayausí PTAP (2016), Quingeo UPS (2017) y CTS, Tixán ETAPA y Tixán UPS (2018). Por otra parte, todas las estaciones seleccionadas han presentado mínimo 6 días consecutivos secos en el año, siendo Izhcayrumi la estación con menor número anual de días consecutivos secos para los años 2016, 2017 y 2018; puesto que dicha estación se ubica a una altura mayor a 3500 m, lo que

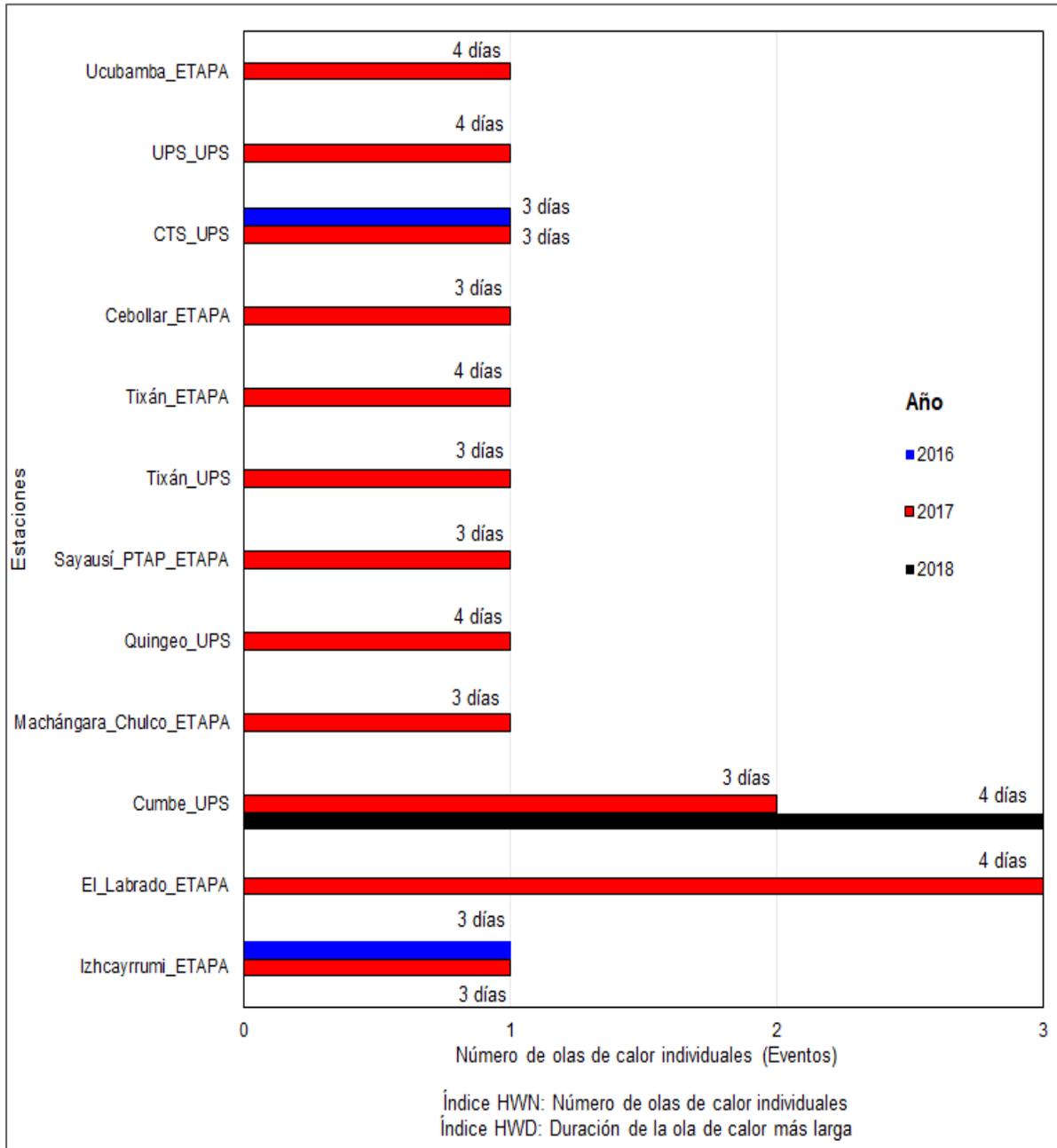


significa que se encuentra en el páramo en donde la precipitación característica son lloviznas de larga duración (Padrón et al., 2015), por esta misma razón en conjunto con El Labrado cuentan con el máximo número anual de días consecutivos húmedos, tal como se puede observar en la *Figura 38*.

En la *Figura 39* se presenta el porcentaje anual de días cálidos, es decir, cuando la temperatura máxima diaria fue mayor al percentil 90, mientras que para el porcentaje anual de días fríos (*Figura 40*) se refiere a cuando la temperatura máxima durante las horas de sol fueron menor al percentil 10. En dichas figuras es posible identificar, a 2016 como el año en donde se reportaron más del 20% anual de días cálidos para todas las estaciones y por el contrario, registra el menor porcentaje anual de días fríos, puesto que todas las estaciones se encontraron por debajo del 10 %. Por otra parte, en este contexto el año 2017 y 2018 son parecidos entre sí, debido a que el porcentaje anual de días cálidos se encuentra por debajo del 18 % y asimismo, el porcentaje anual de días fríos es mayor a 13%, en el caso de 2018 para estaciones como Izhcayrumi, El Labrado, Quingeo y Ucubamba sobrepasan el 19 % de días anual fríos.

Finalmente, otro aspecto analizado fue el aporte de los días muy húmedos al porcentaje de lluvia anual (*Figura 41*), entendiéndose por día muy húmedo cuando su valor supera al percentil 95, alcanzando hasta el 31 % de su aporte a la lluvia total anual en la estación UPS en el año 2017, en general, dicho porcentaje fue muy variable para los años 2016 y 2018, mientras que para el año 2017, este aporte siempre fue mayor al 19 % en todas las estaciones. Rollenbeck & Bendix (2011) mencionó que las lluvias torrenciales, presentes en la estación húmeda en ocasiones son producidas debido a la convergencia entre los sistemas de nubes convectivas que provienen del *oeste* con el flujo de masa húmeda que llega de la cuenca del Amazonas (*este*).

**Figura 35. Índice HWN y HWD**



**Figura 36. Índices CWN\_ECF y CWD\_ECF**

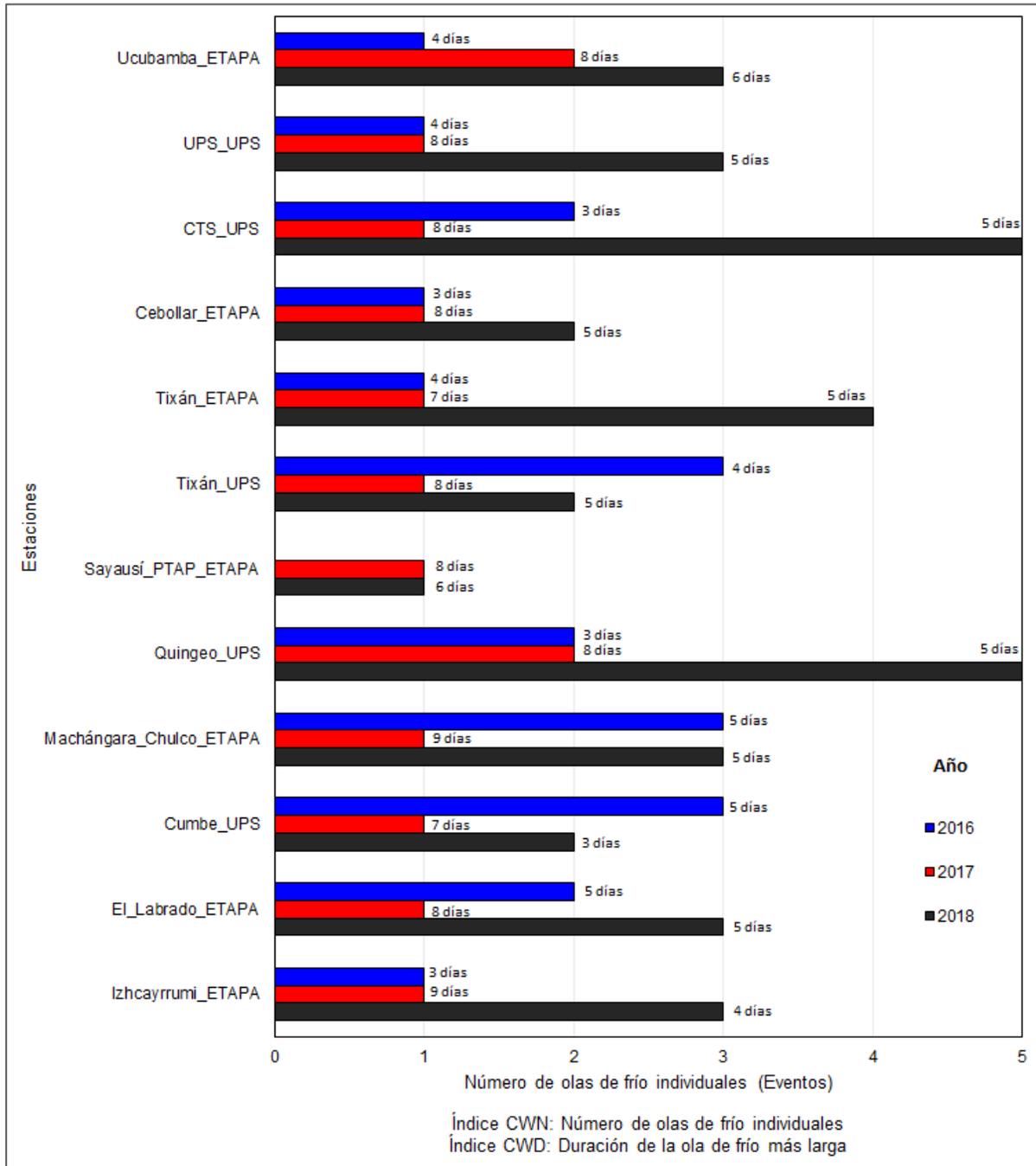
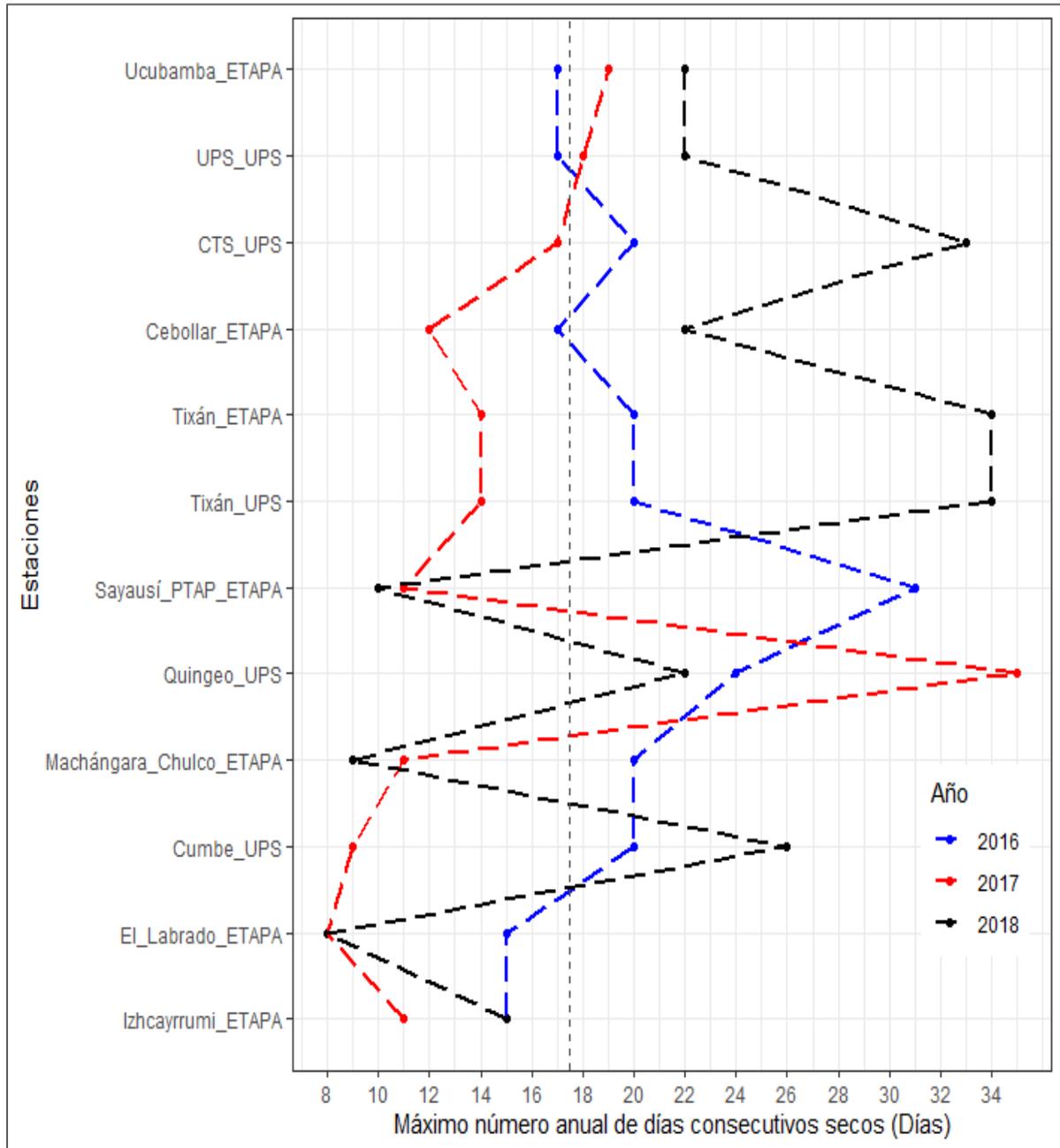
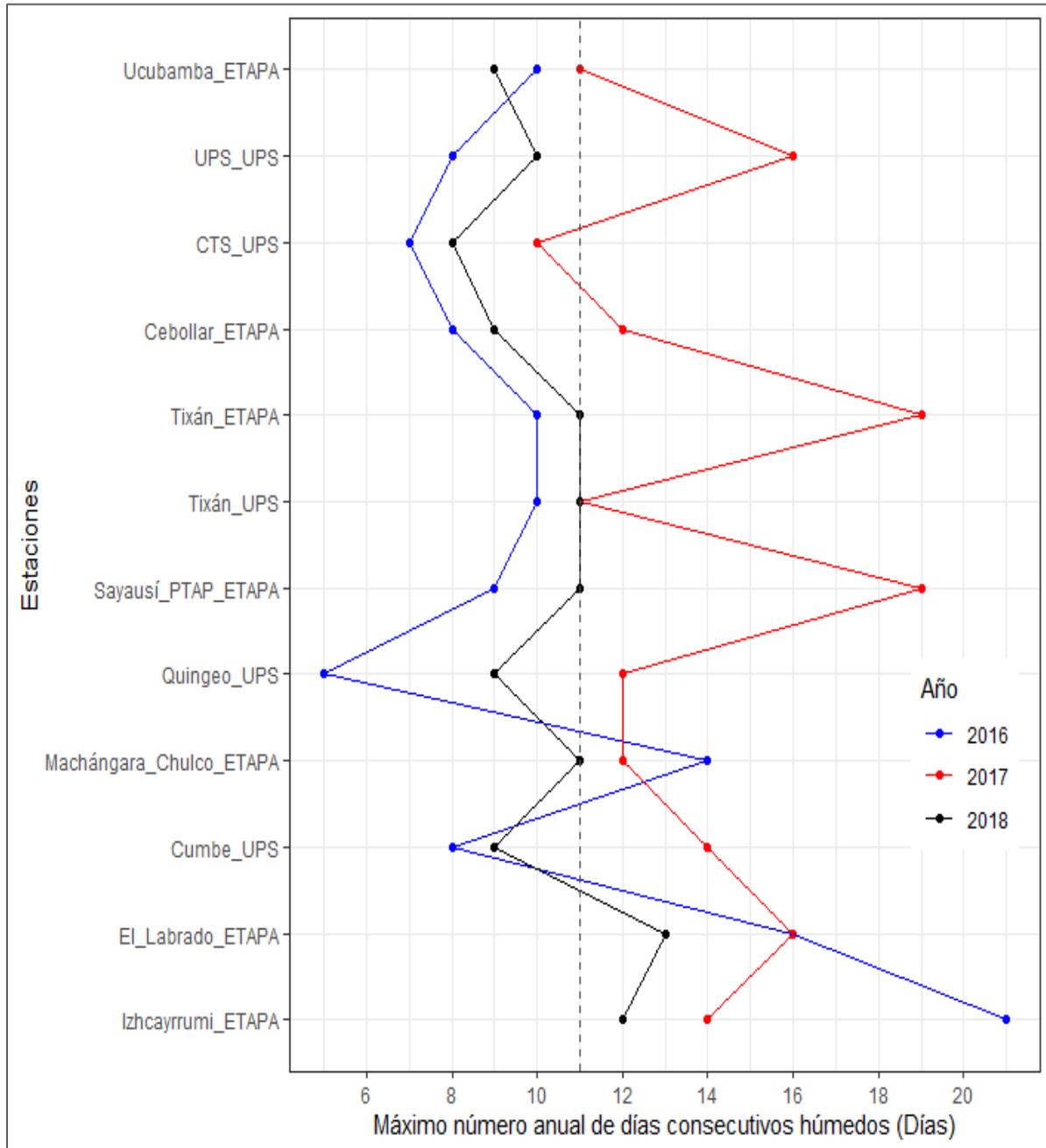
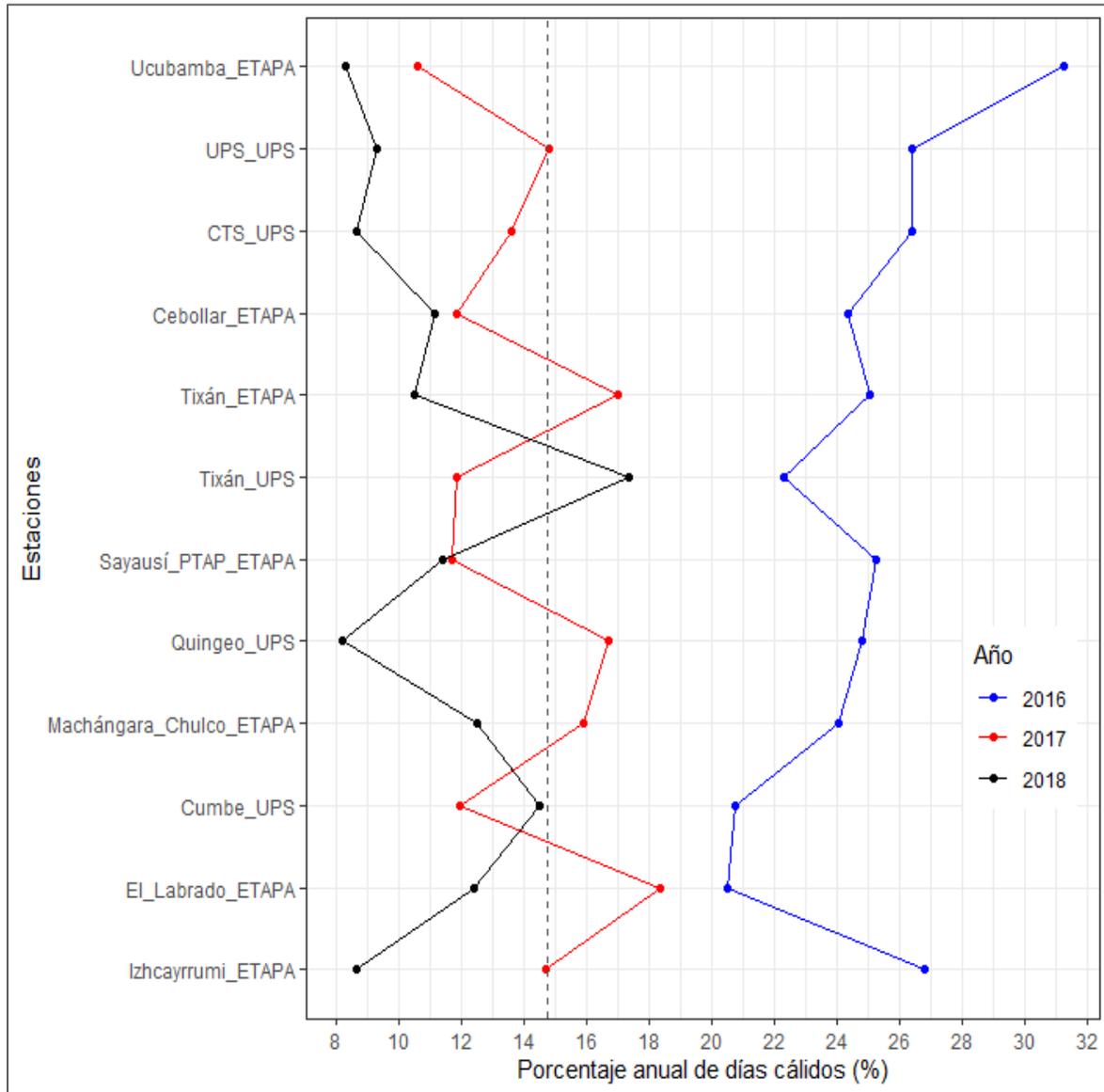


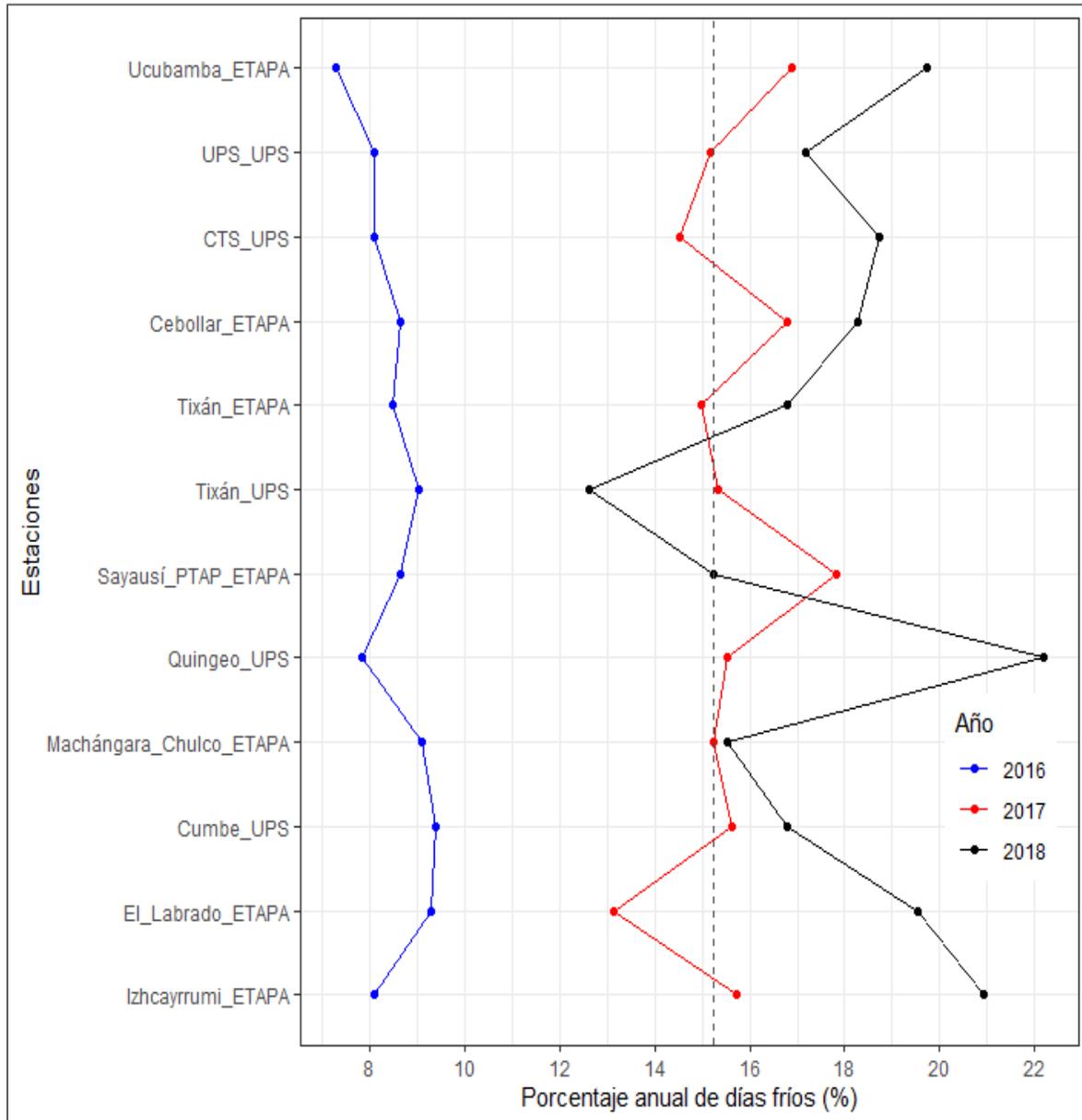


Figura 37. Índice CDD

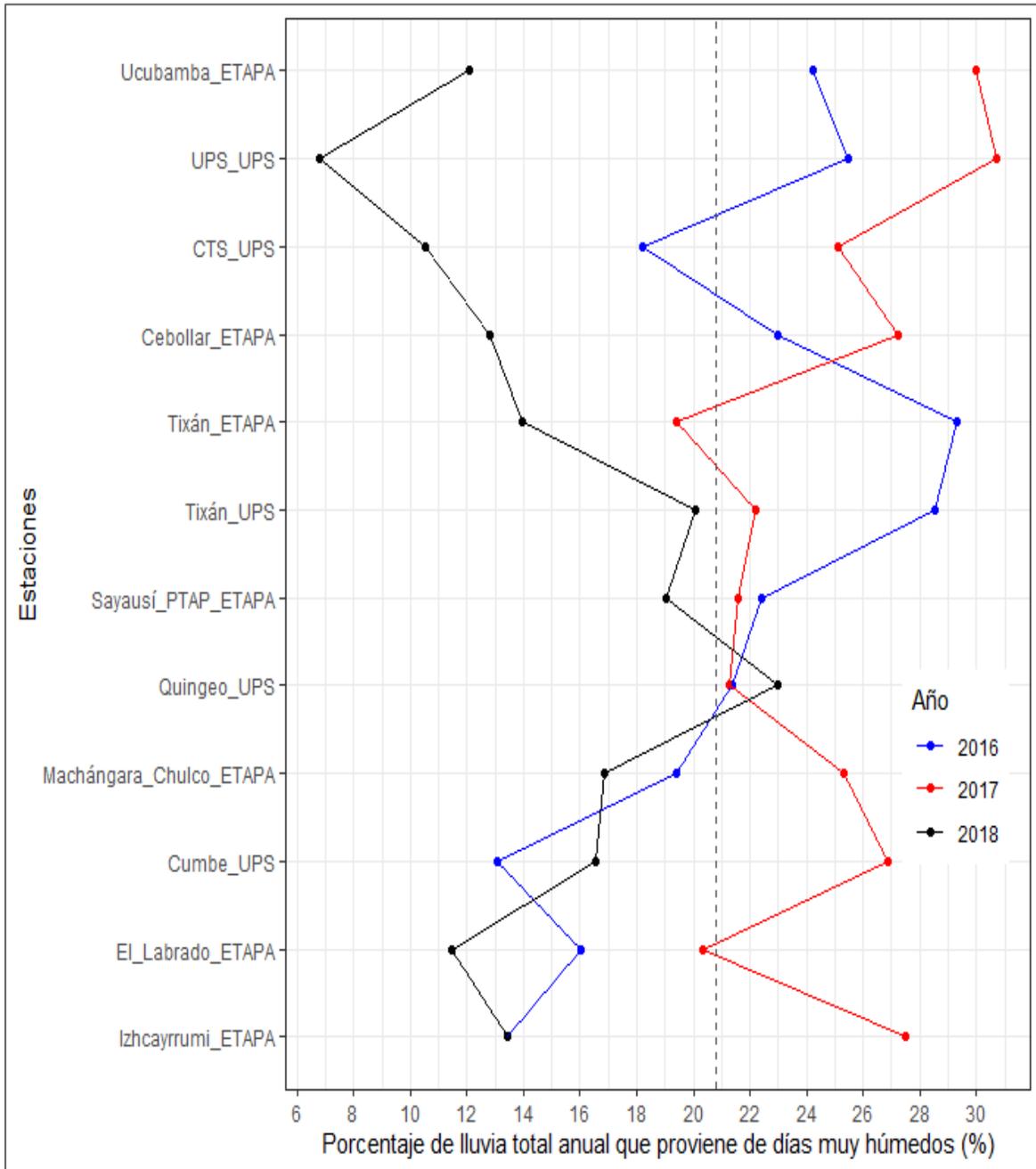


**Figura 38. Índice CWD**

**Figura 39. Índice TX90p**

**Figura 40. Índice TX10 p**

**Figura 41. Índice R95pTOT**





#### 4.6. Resultados de evaluación de productos meteorológicos satelitales

En esta sección se analizan los resultados obtenidos a partir del análisis punto pixel explicado en la sección 3.7.

##### 4.6.1. Evaluación de Temperatura del aire

Para la evaluación de la temperatura del aire en la presente sección nos referimos a la *Figura 42*.

##### 4.6.1.1. Evaluación horaria

Para los niveles de presión con ERA5 los resultados obtenidos mostraron un mejor funcionamiento para el nivel de presión máximo; es decir, el nivel de presión atmosférica superior al identificado para cada estación. Los valores de la mediana de *ME* ( $^{\circ}\text{C}$ ) y *PBIAS* (%) se mantuvieron cerca de 0. Los estadísticos de *RMSE* se mantuvieron por debajo de  $5^{\circ}\text{C}$  para todas las estaciones; alcanzando valores mínimos de aproximadamente  $2^{\circ}\text{C}$ . Además, de acuerdo a *Tabla 5* para casi la totalidad de los datos se obtuvo una correlación lineal fuerte. Similares correlaciones de Pearson se identificaron en ERA5 a un solo nivel de presión y ERA5-Land. Con respecto al ERA5 a un solo nivel de presión, el 50% de los datos de *ME* se encontraron entre  $2.5^{\circ}\text{C}$  a  $-2.5^{\circ}\text{C}$  y tienen como mediana a  $0^{\circ}\text{C}$ ; sin embargo, a comparación de los demás productos a escala temporal horaria, dichos valores alcanzaron *ME* de  $10^{\circ}\text{C}$ ; situaciones similares ocurren con los estadísticos *RMSE* y *PBIAS* pues para pocas estaciones alcanzaron valores extremos; alcanzando hasta  $10^{\circ}\text{C}$  y 75 %, respectivamente. No obstante, se pudo notar un mejor rendimiento para ERA5-Land; puesto que los estadísticos se concentran alrededor de los valores óptimos. ERA5-Land en la *Figura 49* muestra que aunque identificó bien los incrementos y disminuciones de temperatura del aire, los valores máximos tendieron a ser sobreestimados.

##### 4.6.1.2. Evaluación diaria

Para los mínimos niveles de presión, tal como lo describe el *ME* y *PBIAS* el producto subestimó los valores reportados en las estaciones. En cuanto a los estadísticos de error, los máximos niveles de presión presentaron mejores resultados con respecto a los valores mínimos. Tanto el ERA5 a nivel de presión máximo y ERA5-Land presentaron mejores valores de *ME*, debido a que aproximadamente el 75 % de sus valores se encontraron entre ( $2^{\circ}\text{C}$  y  $-2.5^{\circ}\text{C}$ ), con una mediana de  $0^{\circ}\text{C}$ . Los valores de *ME*, *RMSE* y *PBIAS* en ERA5 a un solo nivel de presión tendieron a presentar valores más dispersos que sus contrapartes; en cuanto al *RMSE* el ERA5 a nivel de presión máximo fue el que mejor rendimiento muestra, puesto que casi el 100% de los datos se



encontraron por debajo de 2.5 °C, en este contexto, el segundo producto con mejores resultados fue el ERA5-Land. Por otra parte, los valores de correlación de Pearson alrededor del 75 % de las observaciones tuvieron una correlación mayor a 0.5 para todos los productos y con una mediana de  $r$  de 0.7; siendo mayor la mediana de ERA 5 a un solo nivel de presión.

#### **4.6.1.3. Evaluación mensual**

Las medidas de error como el  $ME$  y  $PBIAS$  se mantuvieron similares a los encontrados en la evaluación horaria y diaria; mientras que, los valores de  $RMSE$  mejoraron ligeramente a esta escala. Con respecto a las demás escalas temporales, los valores de correlación de Pearson disminuyeron el valor de la mediana tanto para ERA5 a diferentes niveles de presión, ERA5 a un solo nivel de presión y ERA5-Land, encontrándose la mayoría de datos con una correlación lineal positiva moderada.

### **4.6.2. Evaluación de Precipitación**

#### **4.6.2.1. Evaluación horaria**

De acuerdo a *Figura 43*, las métricas de error mostraron que el funcionamiento de ERA5 a un solo nivel y ERA5-Land mantuvieron similitudes. En principio, los valores de  $ME$  estuvieron por debajo de 0.15 mm, mientras que para  $RMSE$  la mayoría se encontró por debajo de 0.6 mm/hora para ERA5 a un solo nivel y ERA5-Land. Por otra parte,  $PBIAS$  tuvo valores muy altos alcanzando valores de 25% a 200%. Con respecto a la correlación existente entre los dos productos y las observaciones, mantuvieron asociaciones lineales muy débiles. Por otro lado, las medidas de contingencia mostraron valores de CSI por debajo de 0.20 debido a los altos valores reportados por FAR; a pesar de valores de POD mayores a 0.5. Lo que nos indicó que los productos de ERA5 en un número significativo estimaron eventos de lluvia mayores al umbral que no son reportados por los pluviómetros.

#### **4.6.2.2. Evaluación diaria**

Los estadísticos de error como  $ME$  y  $PBIAS$  indicaron la sobreestimación de los valores de lluvia proporcionados por los productos, por otra parte,  $RMSE$  tuvo una mediana de 6 mm. Con respecto a las medidas de contingencia la Probabilidad de Ocurrencia de los eventos de lluvia fue considerablemente mayor en la lluvia a escala diaria con valores superiores de 0.9; sin embargo, los valores de FAR continuaron siendo altos, lo que indicó que dichos productos meteorológicos tendieron a identificar los periodos lluviosos pero no los periodos secos; en consecuencia los



valores de CSI mejoraron levemente con respecto a las otras escalas temporales pero siguieron sin alcanzar los valores óptimos. En el ejemplo de la *Figura 50* se observa que el producto satelital (ERA5-Land) detectó los patrones diarios a lo largo del año; aunque presenta niveles máximos superiores de lluvia en los meses de febrero a marzo que la estación registró.

#### **4.6.2.3. Evaluación mensual**

Al igual que las demás escalas temporales, los valores a escala mensual tendieron a sobreestimar las observaciones de lluvia y con valores de *RMSE* alrededor de 3 mm mensuales; mientras que los porcentajes de desviación se encontraron alrededor de 100 %, algo que denota un error considerable en los datos del producto. Los resultados de las medidas de contingencia nos proporcionaron información del comportamiento de los valores del producto con respecto a las observaciones en tierra y en esta caso es contrario a las anteriores escalas, puesto que detecta mejor los eventos en donde el valor de la lluvia es menor al umbral; además presentaron valores de POD cercanos a uno para ambos productos, siendo mejor ERA5 a un solo nivel, dichos resultados se interpretaron con una mayor eficiencia en la detección de lluvia superior al umbral, como consecuencia el valor de CSI a esta escala es mayor; aunque todavía no alcanza los valores idóneos. Por otra parte, en la escala temporal mensual el 75% de los datos tuvieron una correlación lineal fuerte, inclusive alcanzaron asociaciones muy fuertes.

#### **4.6.3. Evaluación de Humedad Relativa**

En la *Figura 44* se presenta la evaluación de los datos de humedad relativa para ERA5 a diferentes niveles de presión. En principio, *ME* y *PBIAS* no presentaron grandes variaciones para todos los casos y la mediana fue similar; la misma se mantuvo alrededor 2.5 %. Por otra parte, los valores de *RMSE* fueron mejores a escala mensual describiendo un mejor funcionamiento para ERA5 al máximo nivel de presión. Finalmente, los niveles de asociación a escala temporal horaria mostraron una correlación lineal fuerte para la mayor parte de las estaciones, a escala diaria las relaciones disminuyeron levemente; mientras que a nivel mensual la dispersión de los datos del producto fue mayor, ya que para algunas estaciones alcanzaron valores superiores a 0.9. En la *Figura 49* se observa que los valores obtenidos por el producto fueron muy cercanos a los registrados en la estación; a pesar de leves sobreestimaciones del producto en los valores mínimos detectados por la estación meteorológica.



#### 4.6.4. Evaluación de Radiación Solar Global

La *Figura 45* representa la distribución de las métricas estadísticas utilizadas para evaluar la radiación solar global. Tanto a escala temporal horaria como diaria el ERA5 a un solo nivel rindió mejor con respecto a ERA5-Land; las medidas de *ME* y *PBIAS* demostraron una subestimación significativa de las observaciones de ERA5-Land en radiación solar global tanto a escala horaria como diaria. Una asociación lineal muy fuerte fue demostrada para los valores horarios de ERA5 a un solo nivel, mientras las otras pruebas evidenciaron correlaciones moderadas y fuertes en la escala mensual. Además, a dicha escala temporal el comportamiento entre ambos fue similar y mostraron los niveles más bajos de *RMSE*. Para ciertas estaciones pudieron alcanzar  $r$  mayores a 0.7. En la *Figura 49* se evidencia una alta correlación de los datos de la estación y el producto satelital, puesto que los patrones de ambos fueron muy similares, adicional a ello se observó que para los valores máximos de la estación meteorológica, el producto tendió a sobreestimar dichos valores.

#### 4.6.5. Evaluación de Presión Atmosférica

En la *Figura 46* se muestra que ERA5-Land evidenció un mejor rendimiento en todos los estadísticos al ERA5 a un solo nivel de presión, debido a que los valores de ERA5 fueron más dispersos mientras que ERA5-Land se concentraron alrededor de los valores óptimos. Por otra parte, la correlación lineal indicó valores fuertes y muy fuertes para ambos productos, mostrando los mejores resultados a escala temporal mensual. Los patrones de la estación y ERA5-Land empatan muy bien; sin embargo, al ser la presión atmosférica altamente variable con la altitud el producto no detectaron los valores exactos, por lo que en el caso de la *Figura 49* subestimó sus valores ligeramente (21.1 hPa).

#### 4.6.6. Evaluación de Viento

En principio se puede observar en la *Figura 47* que las medianas de *ME* para todas las pruebas a excepción del ERA5 a niveles máximo, fueron cero; puesto que, valores de *ME* y *PBIAS* del ERA5 de niveles de presión máximo muestran que dichos datos sobrestiman los valores de presión para la mayoría de datos de las estaciones. Una principal característica de estas evaluaciones fueron que los estadísticos se localizaron muy dispersos, por lo que depende mucho de la estación evaluada; sin embargo, se observa una clara tendencia en los resultados estadísticos que indicaron una mejoría a escala temporal mensual; identificándose medianas de correlación alrededor de 0.6.



Por otro lado, la dirección del viento es una parte fundamental en las condiciones meteorológicas del lugar; sin embargo, es un tanto difícil de detectar correctamente. En la *Figura 48* se observó asociaciones cercanas a 0 y porcentajes de desviación que sobrepasaron el 100%, por otra parte los valores de RMSE demostraron valores menores a escala diaria pero siguen siendo poco favorables. En la *Figura 50*, para la estación Tixán ETAPA el producto meteorológico (ERA5-Land) no pudo detectar las variaciones de dirección de viento a través del año 2018 y además tuvo deficiencias para detectar la dirección predominante en nuestra área de estudio. Por otra parte, para la velocidad del viento, el producto sobreestimó y subestimó los valores de la estación a lo largo del año; sin embargo, detectó bien el umbral de velocidad de viento en los puntos máximos de la estación meteorológica.

#### **4.7. Discusiones para las evaluaciones de productos meteorológicos**

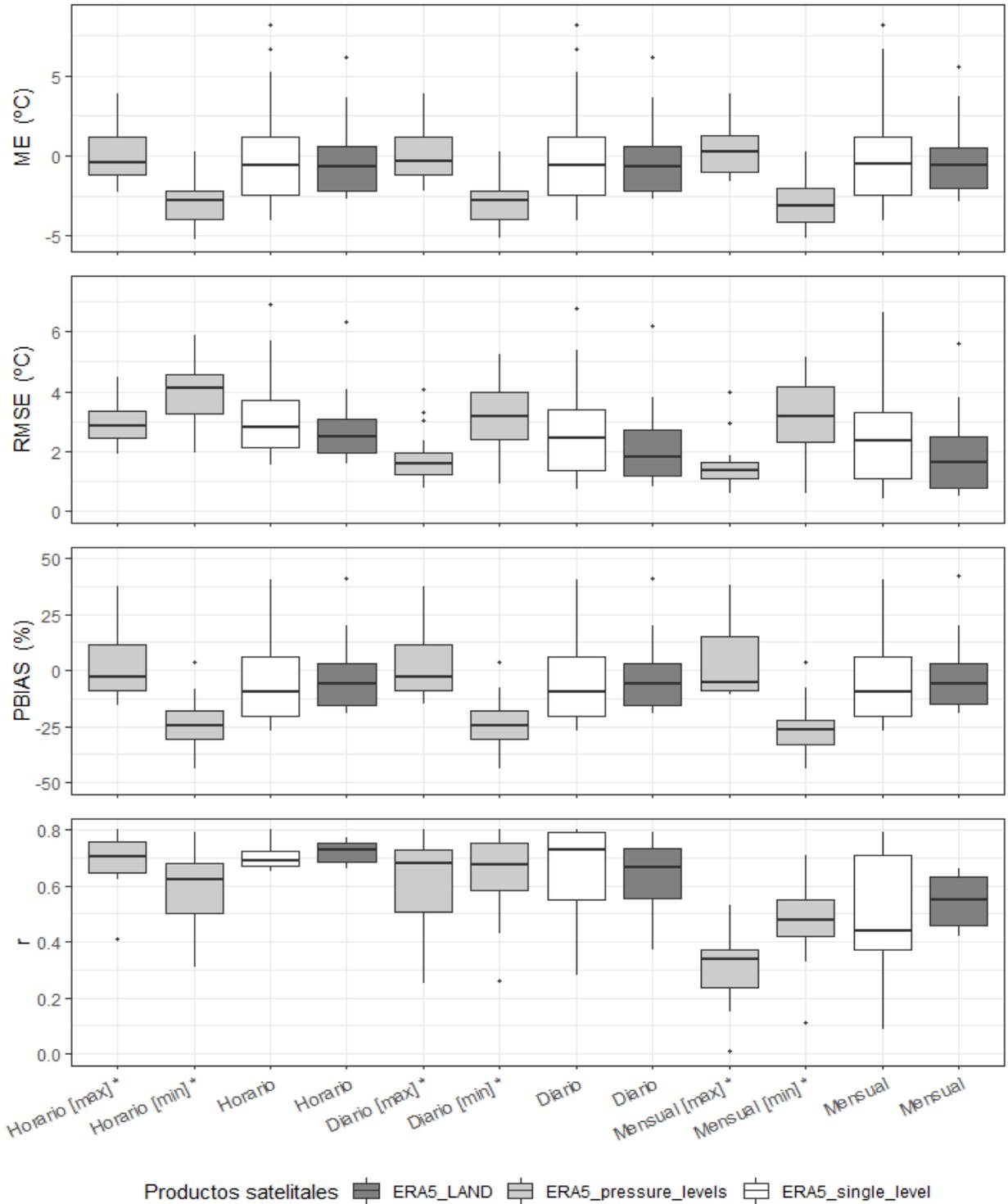
Los productos de ECWMF fueron evaluados para las siete variables meteorológicas en el periodo junio 2015 a diciembre 2018. Obteniendo los resultados descritos en la sección anterior; aunque es importante recalcar que al evaluar el rendimiento de los productos meteorológicos satelitales fue necesario considerar que los valores de la estación representan un punto en específico; mientras que los valores extraídos de los productos representan un espacio físico más amplio. No obstante, en los resultados fue posible observar muy buenos rendimientos para variables meteorológicas como la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar global y presión atmosférica en términos de sus métricas. Los resultados de humedad relativa se muestran realistas y con un buen rendimiento debido a que consideran la humedad relativa líquida y de hielo presente en las nubes (Song, Kim, Lee, & Kim, 2020). En el caso de la temperatura del aire, la presión atmosférica y velocidad del viento mostraron un mejor rendimiento en ERA5-Land, seguido de ERA5 a máximos niveles de presión. Sin embargo, al considerar el nivel de resolución espacial ERA5-Land presenta mayores ventajas para análisis posteriores. Recientemente se evaluó la eficiencia del ERA Interim, una versión anterior a ERA5 en Chile, en la región andina los autores identificaron una fluctuación en el rendimiento del producto meteorológico satelital, debido a que varía dependiendo de la región analizada dentro de los Andes chilenos; es decir, mientras en unas áreas se reportó una subestimación de los valores de precipitación y temperatura del aire en otros los sobreestimó (Schumacher et al., 2020).



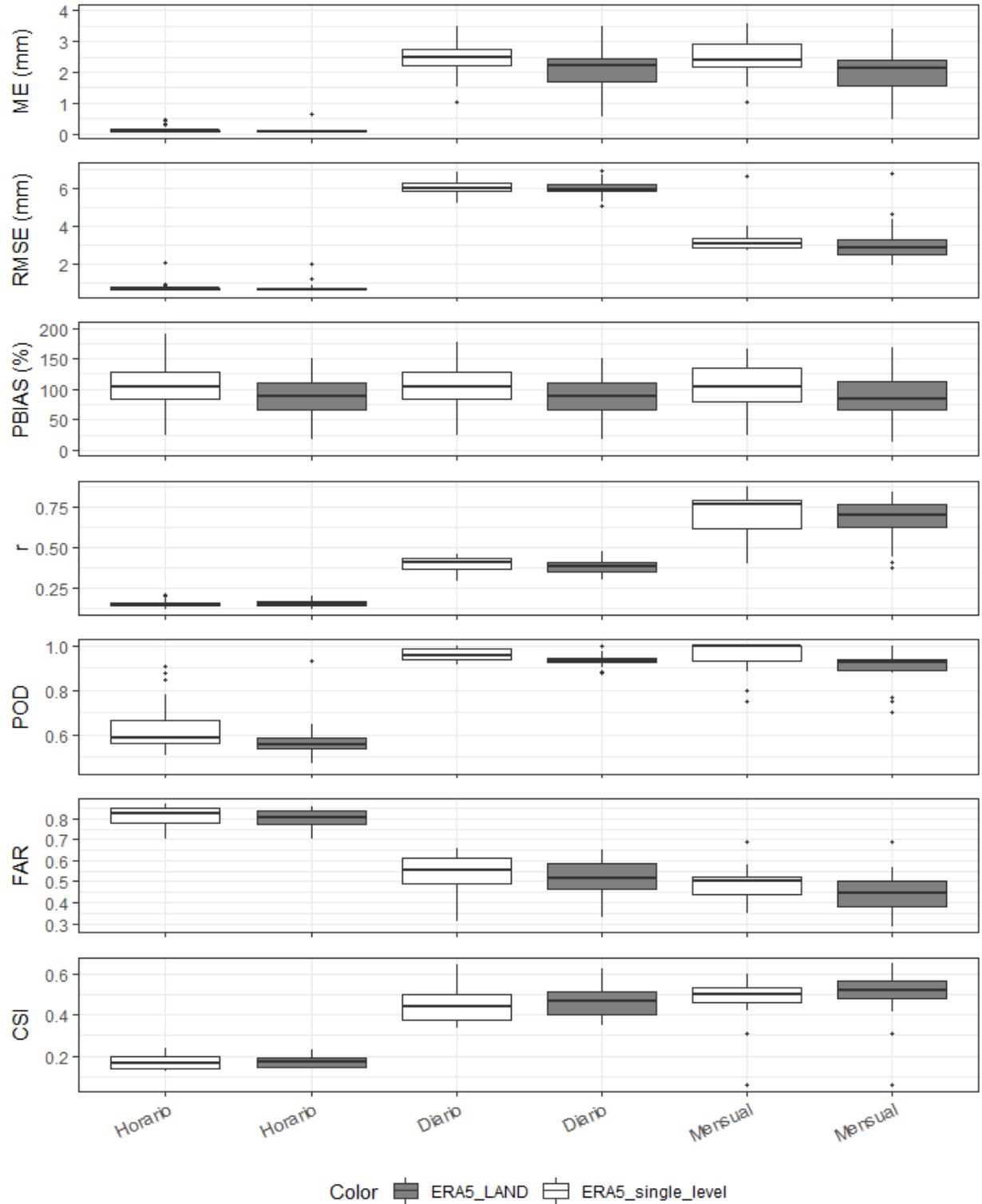
Las sobreestimaciones y bajas correlaciones en la precipitación han sido encontradas por otros autores; Rustemeier et al. (2019) mencionaron que la precipitación es la variable meteorológica más difícil de predecir por datos de reanálisis; sin embargo, también señalan que son mejor reproducidos en lugares ubicados en el hemisferio norte, teniendo déficits en Sudamérica y África. Nogueira (2020) reportó fuertes desviaciones positivas sobre todo en altas cadenas montañosas como el Himalaya y los Andes; mientras en otras regiones de China Tang et al., (2020) encontraron un mal rendimiento de los productos de ERA5 en la precipitación horaria, además de correlaciones débiles entre dichas observaciones y valores CSI menores a 0.31. La variabilidad espacial del comportamiento de la lluvia trae consigo limitaciones a los productos meteorológicos satelitales, mientras que en áreas de estudio más homogéneas ofrecen mejores resultados (Baudouin et al., 2020). Sin embargo, a escala temporal mensual las observaciones mostraron asociaciones significativas con los productos meteorológicos con ERA5 a un solo nivel con un mejor rendimiento para detectar la lluvia.

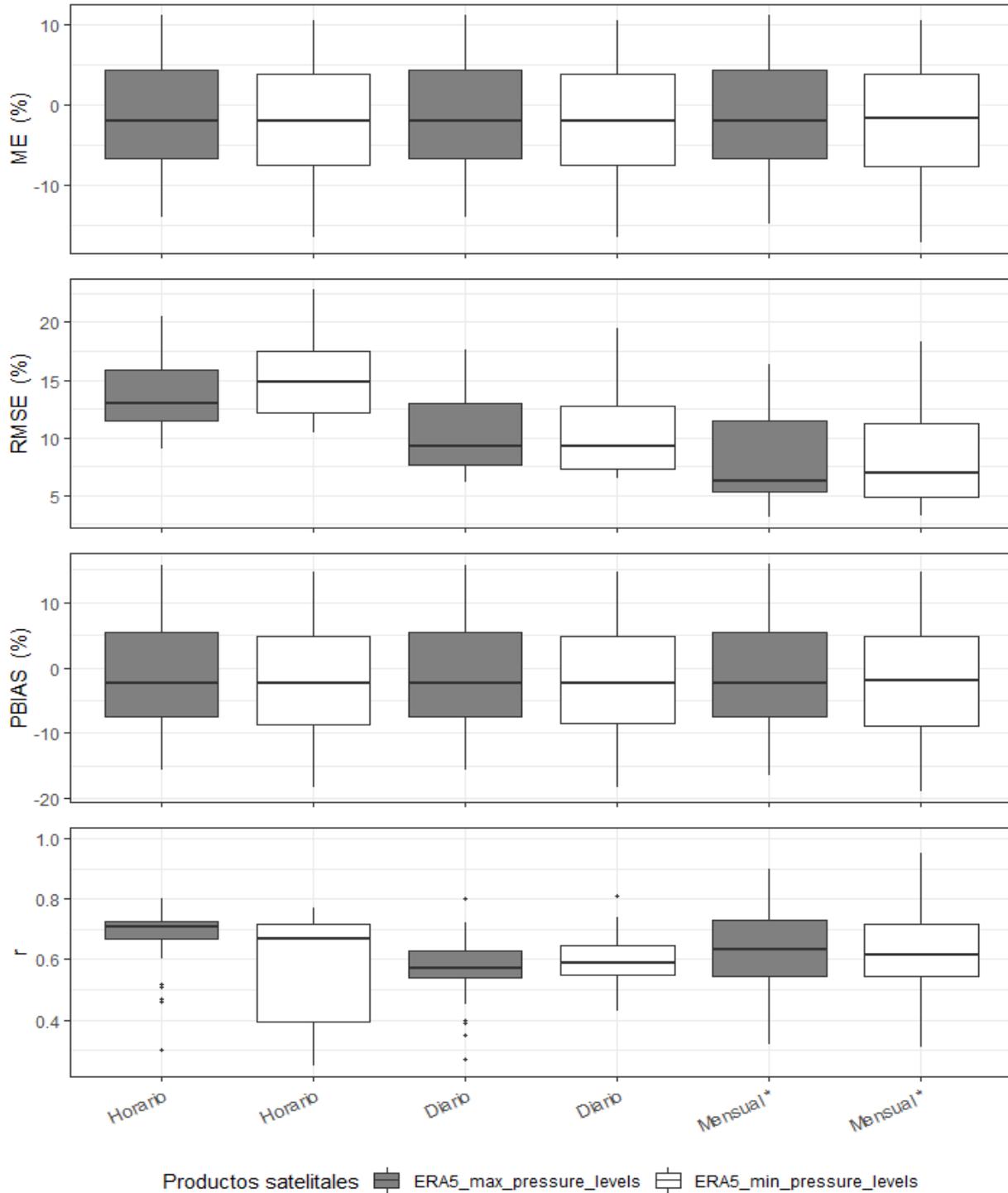
Sianturi et al. (2020) reporta sobrestimaciones en la radiación solar global a escala mensual, así como altos niveles de correlación de las observaciones a escala horaria; lo que coincide con los resultados encontrados en nuestro estudio.

Al contrario de Tetzner et al. (2019) en donde encontraron que ERA5 subestima las magnitudes de velocidad de viento, en nuestro caso se reportaron sobreestimaciones de la velocidad del viento

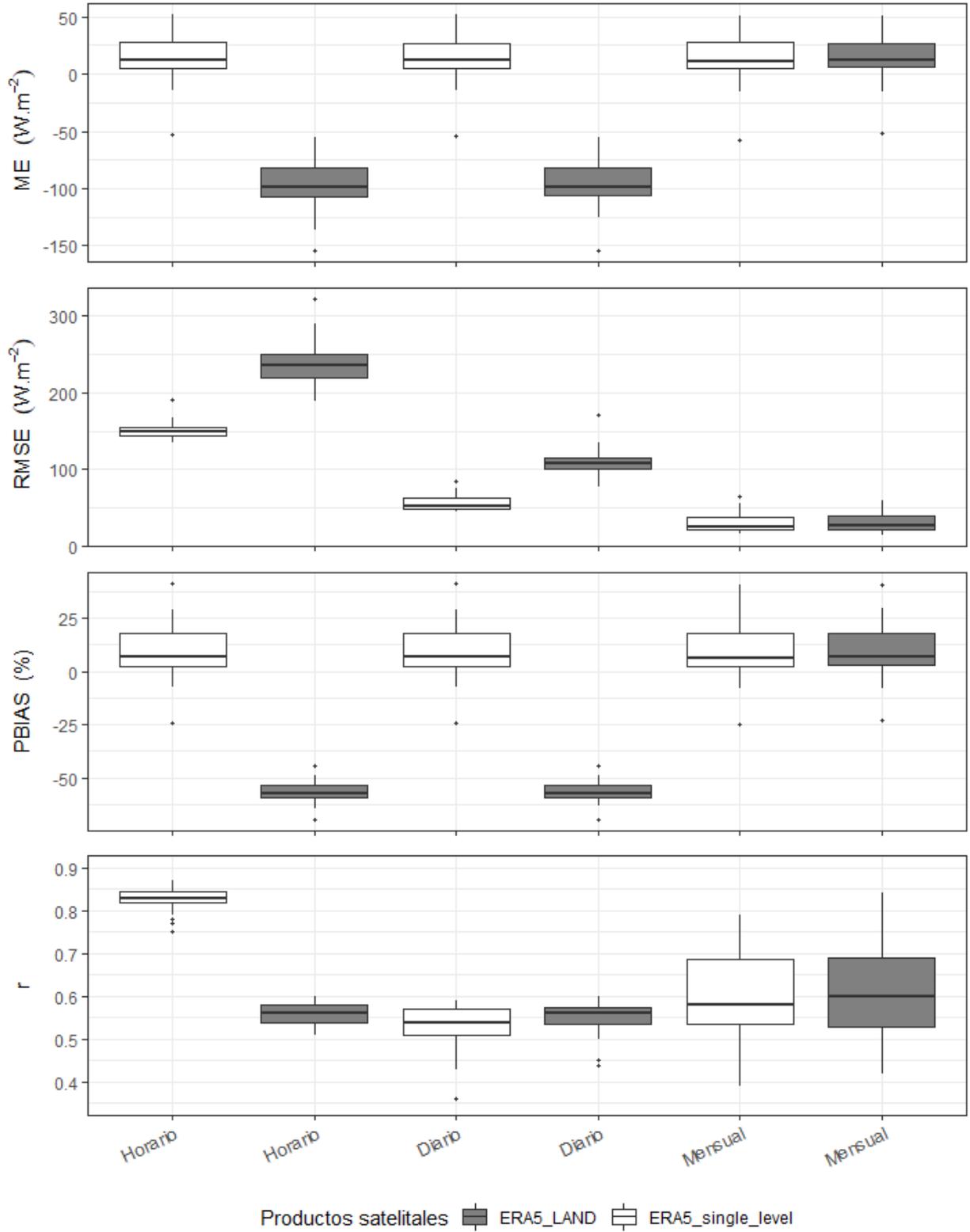
**Figura 42.** Diagramas de caja de las métricas de evaluación para temperatura del aire

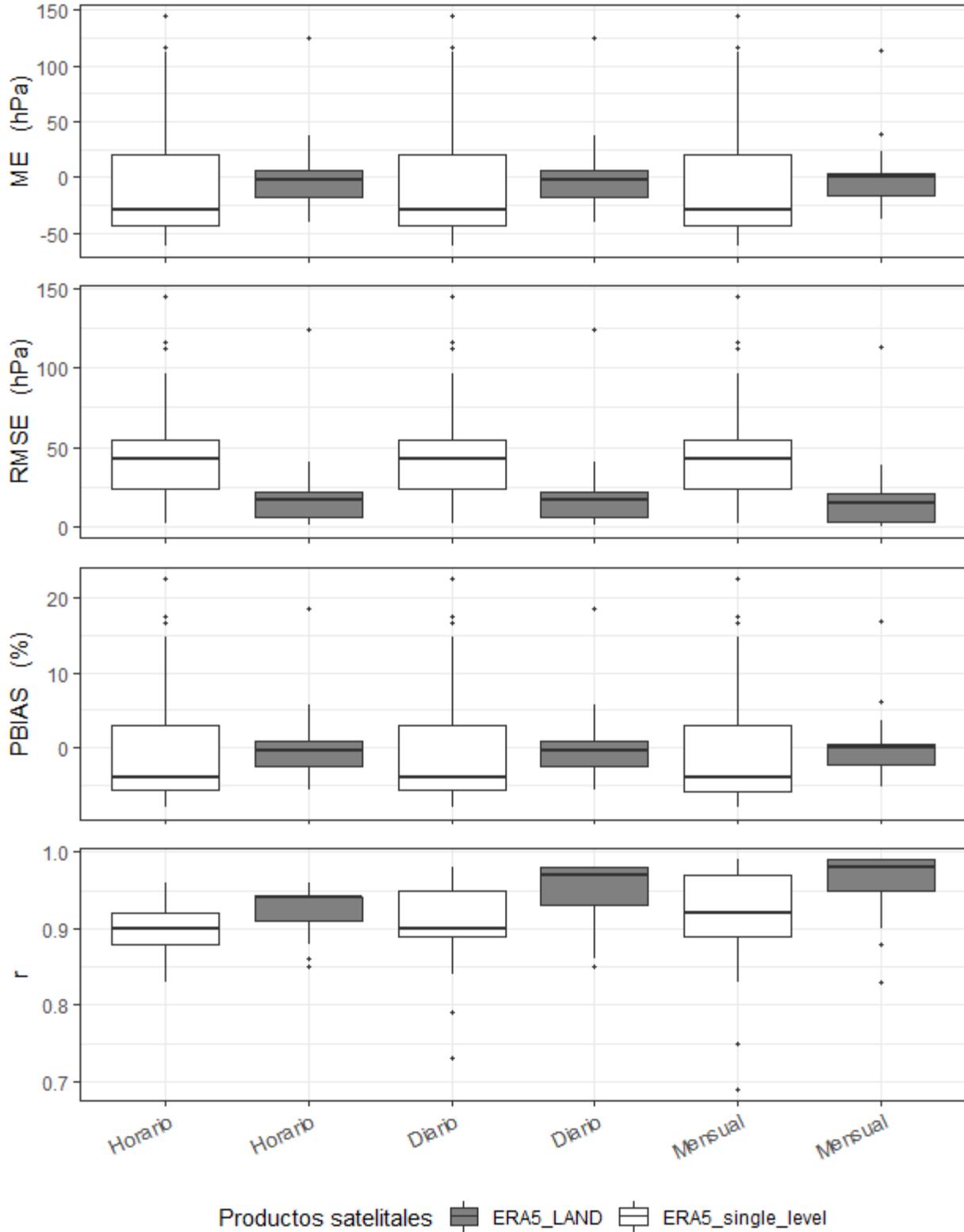
**Nota.** Para las observaciones que incluyen el signo (\*) se eliminó los valores extremos para facilitar la visualización del lector.

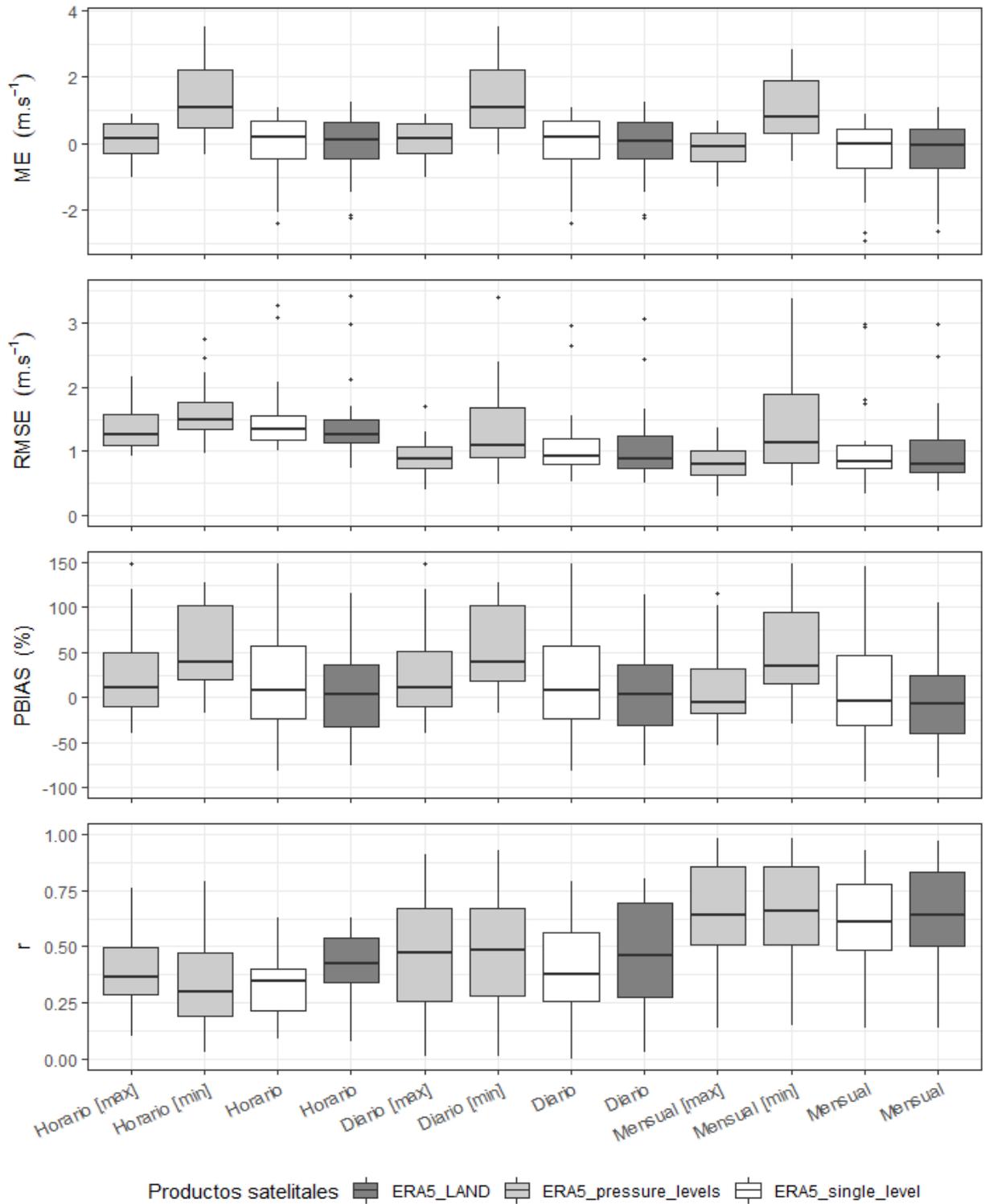
**Figura 43.** Diagramas de caja de las métricas de evaluación para precipitación

**Figura 44.** Diagramas de caja de las métricas de evaluación para humedad relativa

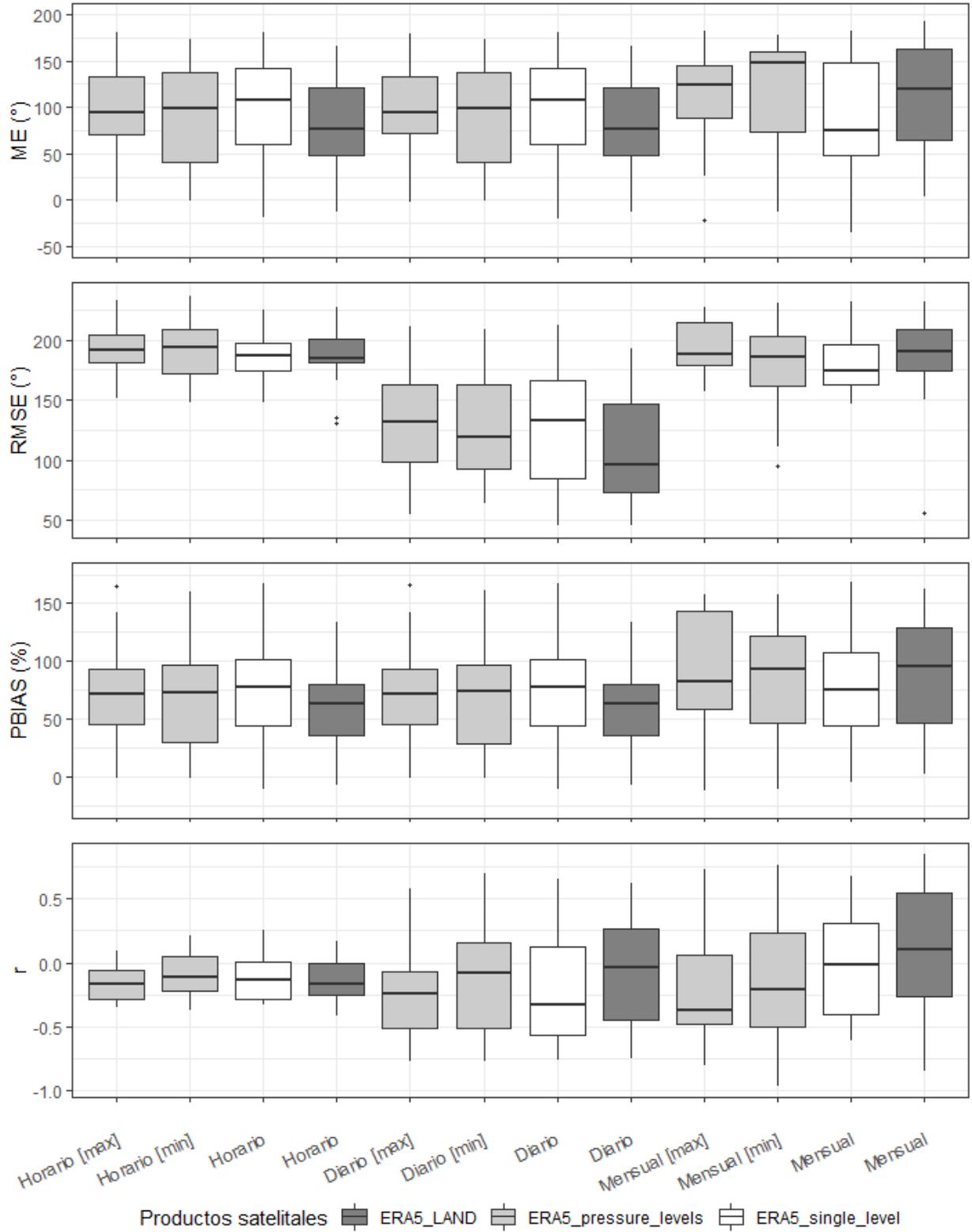
**Nota.** Para las observaciones que incluyen el signo (\*) se eliminó los valores extremos para facilitar la visualización del lector.

**Figura 45.** Diagramas de caja de las métricas de evaluación para radiación solar global

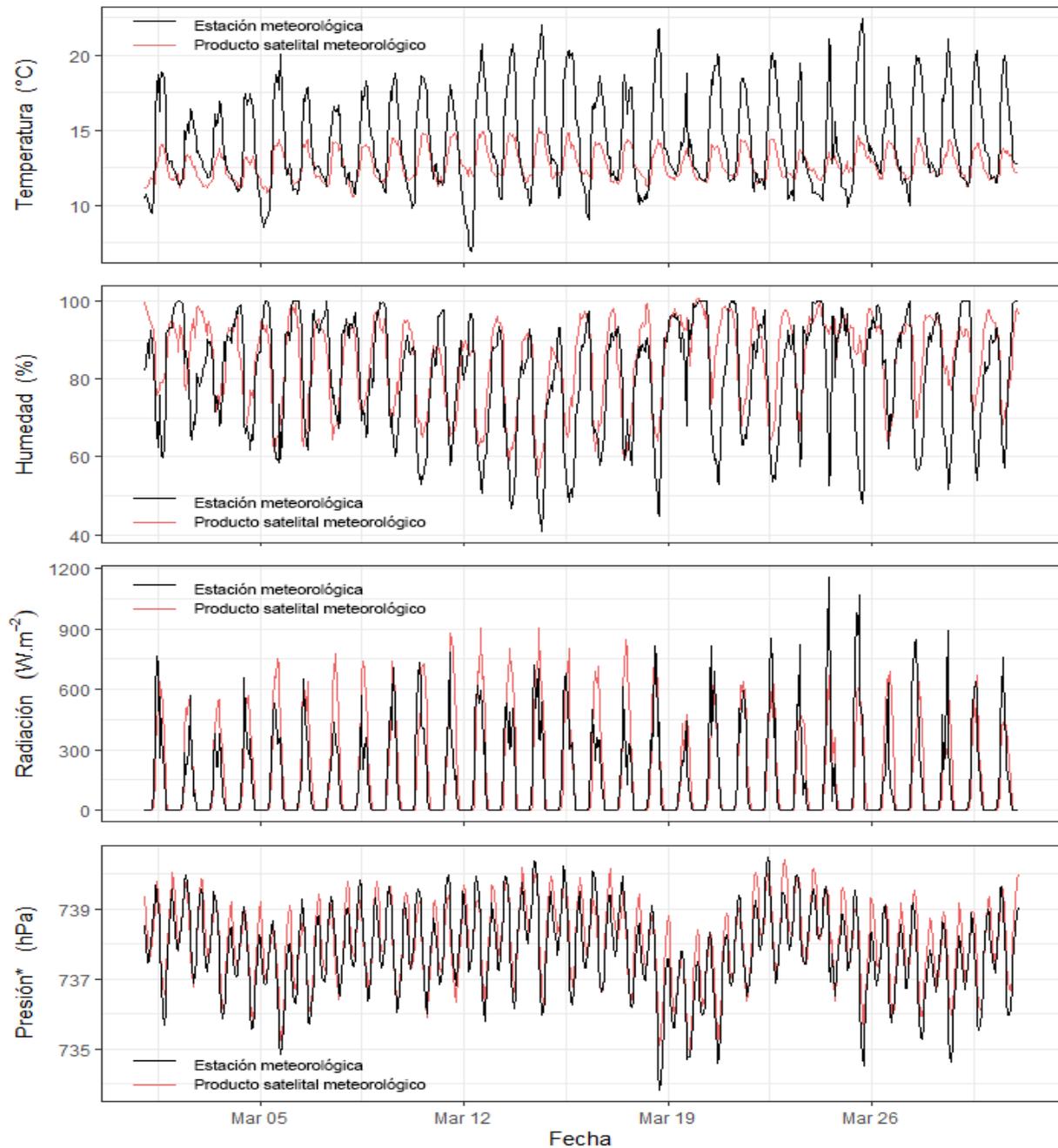
**Figura 46.** Diagramas de caja de las métricas de evaluación para presión atmosférica

**Figura 47.** Diagramas de caja de las métricas de evaluación para velocidad del viento

**Figura 48.** Diagramas de caja de las métricas de evaluación para dirección del viento

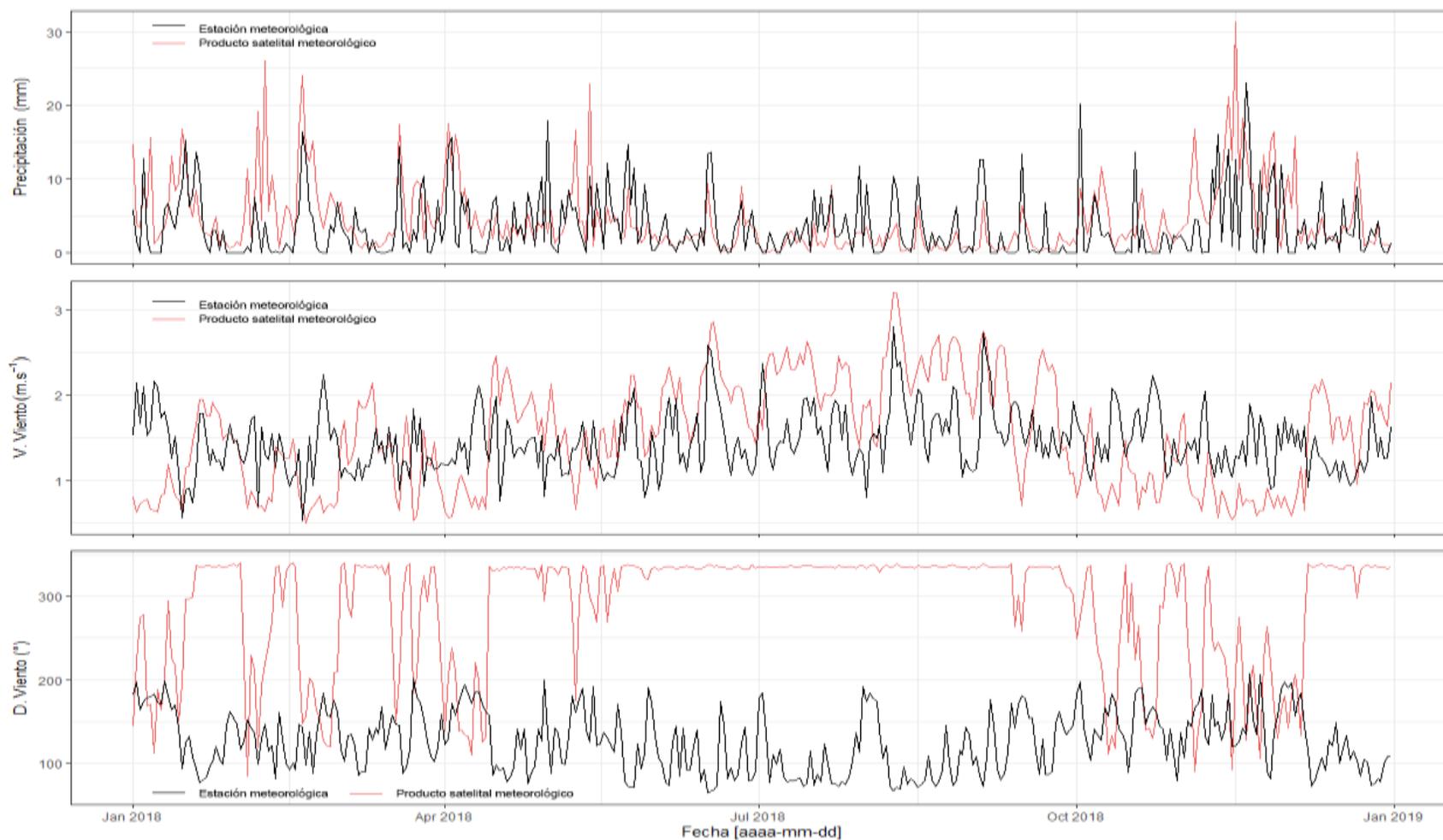


**Figura 49.** Comparación de los patrones horarios de la estación meteorológica vs el producto satelital meteorológico



**Nota.** \* Para la presión atmosférica se sumó al producto meteorológico satelital la diferencia entre los valores del producto ( $\Delta=21.1$  hPa) y la estación meteorológica para comparar visualmente la distribución de los patrones. La estación meteorológica corresponde a los datos horarios registrados en Tixán ETAPA EP y producto satelital meteorológico corresponde a ERA5-Land para temperatura y presión atmosférica; mientras que, para humedad relativa ERA5 al máximo nivel de presión y para radiación solar global ERA5 a un solo nivel de presión.

**Figura 50.** Comparación de los patrones diarios de la estación meteorológica vs el producto satelital meteorológico



**Nota.** La estación meteorológica corresponde a los datos diarios registrados en Tixán ETAPA EP y producto satelital meteorológico corresponde a ERA5-Land para precipitación, velocidad viento y dirección de viento.

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se han analizado aspectos importantes referentes a la meteorología de la CARP. Este estudio contribuye al conocimiento del comportamiento espacio temporal de precipitación, temperatura y humedad relativa del aire, presión atmosférica, radiación solar global, velocidad y dirección del viento. Asimismo, aporta al procesamiento de las bases de datos meteorológicos para la inferencia de las mismas, suponiendo un avance en la explicación y análisis de las condiciones atmosféricas. Los principales hallazgos se mencionan en la presente sección.

Datos registrados por estaciones meteorológicas de ETAPA-EP y UPS fueron estructurados y evaluados exhaustivamente para asegurar una satisfactoria calidad de los mismos en el presente estudio. Al disponer de series con vacíos de datos, se evaluaron y aplicaron métodos de Imputación Múltiple por Ecuaciones Encadenadas (MICE) para cada variable meteorológica, obteniendo resultados aceptables a escala horaria para temperatura del aire, presión atmosférica, humedad relativa y radiación solar global, y a escala diaria para precipitación, velocidad y dirección del viento. De esta forma, y con la aplicación de los modelos estudiados, los valores perdidos en las series meteorológicas dejan de representar un inconveniente para las instituciones. Por otra parte, el Análisis Exploratorio de Datos (EDA) demostró que, a medida que aumentamos la escala temporal, las observaciones meteorológicas tienden a seguir una distribución normal, incluso variables como precipitación; además, se identificaron correlaciones lineales significativas entre variables meteorológicas.

Por otra parte, se clasificaron patrones de diferentes variables meteorológicas mediante aprendizaje no supervisado *clustering*. Con respecto a las técnicas de agrupamiento aplicadas en el presente estudio se destaca el método de aglomeración jerárquica que de acuerdo a los estadísticos de validación interna ofrecen mejores resultados en comparación con los métodos particionales. Se presentaron diferentes resultados en cuanto a las diferentes medidas de distancia. Además, los diferentes grupos de estaciones para cada variable a escala diaria fueron obtenidos con la técnica estadística *bootstrap*, determinando así que los elementos de cada conglomerado cuentan con un valor de confianza mínimo de 95 %. Para temperatura y humedad relativa del aire, velocidad del viento y precipitación presentaron un comportamiento singular en áreas urbanas. Se identificó que dentro de estas áreas urbanas la temperatura incrementa; mientras que, la velocidad



de viento y humedad relativa disminuye con respecto a áreas rurales. Las estaciones meteorológicas que no fueron clasificadas dentro ningún *cluster* se consideraron estaciones con comportamientos atípicos con respecto a la muestra, lo que denota variabilidad espacial entre estaciones a pesar de encontrarse a distancias cortas y de presentar características morfológicas similares; por el contrario, la mayoría de grupos obtenidos se asociaron a características similares entre las estaciones meteorológicas. Otro factor que influye en las variaciones espaciales entre estaciones es la altitud. En este contexto fue posible encontrar que las variables meteorológicas se asociaron a la altitud, principalmente para presión atmosférica, temperatura del aire y humedad relativa, con un  $R^2$  de 1, mayor a 0.97 y 0.58 respectivamente.

Mediante el análisis temporal se identificaron aspectos relevantes de la meteorología del área de estudio. La mayor cantidad, frecuencia e intensidad de precipitación se registra en horas de la tarde, mientras que su comportamiento anual es bimodal, presentando un pico en marzo y otro en noviembre. Alrededor del mediodía se registraron las temperaturas más altas y los picos de radiación solar global; en contraste, la humedad relativa presentó sus valores más altos en horas de la noche. Además, la estación lluviosa se registra entre los meses de octubre y mayo. La temperatura promedio mensual se mantiene en el rango de 10 °C a 16 °C, presentándose las temperaturas más bajas en la estación seca más prominente (junio a septiembre) así como valores pico de velocidad de viento. Por otra parte, la humedad relativa promedio en la cuenca se ubica en el rango de 70 % a 90 %, alcanzando valores cercanos a la saturación en estaciones meteorológicas ubicadas a mayor altitud respecto a estaciones ubicadas en el valle. A escala temporal mensual la humedad relativa incrementa sus valores en la estación lluviosa y disminuye en la estación seca. Los sistemas de viento alcanzan la cuenca alta del Río Paute de forma predominante desde la Amazonía (sureste); sin embargo, en la estación lluviosa se registran vientos desde el Océano Pacífico con menor frecuencia. La radiación solar global diaria promedio se mantuvo alrededor de  $200 \text{ Wm}^{-2} \text{ día}$ . Finalmente la presión atmosférica no presentó mayores variaciones a lo largo del año y el promedio de la CARP es de 724 hPa.

Respecto a eventos extremos, en el año 2018 se identificó la mayor cantidad de eventos de olas de frío y el mayor porcentaje de días fríos. Al contrario, en 2016 se presentaron mayores eventos de olas de calor y mayor porcentaje de días cálidos, mientras que, en 2017 se reportó el máximo número de días húmedos. Además, estaciones ubicadas a mayor altitud (El Labrado e Izhcayrumi)



contaron con más días consecutivos húmedos, por su tipo de precipitación característica (llovizna). Por otra parte, en el año 2018 se registraron más de 30 días consecutivos secos (días consecutivos con precipitación acumulada diaria  $< 1$  mm) para tres estaciones meteorológicas. Por último, en el año 2017 en todas las estaciones meteorológicas, los días muy húmedos aportaron más del 20 % a la lluvia total anual.

Con el fin de encontrar alternativas para incrementar el análisis, comprensión e investigación meteorológica de las variables en estudio, se evaluó el rendimiento de los productos satelitales ERA5–Land y ERA5 a diferentes niveles de presión y a un único nivel. Las correlaciones de Pearson indicaron una relación fuerte y muy fuerte para las variables temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar global a escala horaria, para la mayoría de estaciones meteorológicas. En este contexto, se evidenció el buen ajuste de los productos meteorológicos a los patrones temporales de las variables. Por otra parte, las métricas de error demostraron una gran precisión en humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar a escala horaria. La velocidad y dirección del viento de los productos satelitales no detectaron las amplias variaciones presentadas a lo largo del tiempo, mientras que, la precipitación a escala mensual exhibió una correlación fuerte entre datos de estaciones meteorológicas y ERA5.

## **6. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES**

La estructuración y consolidación de bases meteorológicas es un paso fundamental para investigaciones en ciencias ambientales, por lo que es primordial enfatizar y asignar recursos al control y evaluación de la calidad de datos de manera constante. Se recomienda plantear investigaciones para evaluar y construir un sistema con algoritmos óptimos de aprendizaje automático para la permanente evaluación de cada una de las variables meteorológicas en las instituciones.

Debido a que las redes meteorológicas en el área de estudio empezaron a consolidarse en el año 2014, no fue posible relacionar las variables en estudio con procesos climáticos de largo plazo; sin embargo, con el constante registro de datos en estaciones meteorológicas, la metodología planteada en este estudio puede ser replicada para el análisis del comportamiento y variación de dichas variables a largo plazo.



Los datos obtenidos de productos meteorológicos satelitales que ya han sido validados pueden emplearse a estudios climáticos o identificación de eventos extremos; así como analizar causas y consecuencias sobre dichos fenómenos; sin embargo, dichas observaciones deben ser manejadas con cautela. Debido a la constante actualización, mejora y lanzamiento de productos meteorológicos satelitales, será fundamental evaluar su desempeño como paso inicial para diversas aplicaciones.

Finalmente, investigaciones dentro de campos en las cuales la meteorología desempeña un eje transversal (p.ej.: energías renovables, hidrología, biología, ecología, calidad del aire, agronomía, entre otras), pueden ser planteadas con el debido apoyo interinstitucional e interdisciplinario, tomando como base los Objetivos de Desarrollo Sostenible.



## 7. REFERENCIAS

- Ackerman, B. (1987). Climatology of Chicago area urban- rural differences in humidity. *Journal of Climate & Applied Meteorology*. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<0427:COCAUR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<0427:COCAUR>2.0.CO;2)
- Afrifa-Yamoah, E., Mueller, U. A., Taylor, S. M., & Fisher, A. J. (2020). Missing data imputation of high-resolution temporal climate time series data. *Meteorological Applications*, 27(1), 1–18. <https://doi.org/10.1002/met.1873>
- Aguilera, H., Guardiola-albert, C., & Serrano-hidalgo, C. (2020). Estimating extremely large amounts of missing precipitation data. *Journal of Hydroinformatics*, 1–15. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.127>
- Ahrens, C. D. (2001). *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere* (3. era ed.). Cole Publishing Co.
- Ahrens, C. D. (2008). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. (J. Warde, Ed.) (9.na. ed.). Belmont: Brooks/Cole.
- Aieb, A., Madani, K., Scarpa, M., Bonacorso, B., & Lefsih, K. (2019). A new approach for processing climate missing databases applied to daily rainfall data in Soummam watershed , Algeria. *Heliyon*, (October 2018), e01247. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01247>
- Alexander, L., & Herold, N. (2016). *ClimPACT2 Indices and software*. The University of South Wales. Sidney, Australia. Retrieved from <https://github.com/ARCCSS-extremes/climimpact2>
- Allaerts, D., Broucke, S. Vanden, Van Lipzig, N., & Meyers, J. (2018). Annual impact of wind-farm gravity waves on the Belgian-Dutch offshore wind-farm cluster. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(7). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/7/072006>
- Andrienko, N., & Andrienko, G. (2006). *Exploratory Analysis of Spatial and Temporal Data* (1.era ed.). Berlín: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/3-540-31190-4>
- Aniskevich, S., Bezrukovs, V., Zandovskis, U., & Bezrukovs, D. (2017). Modelling the Spatial Distribution of Wind Energy Resources in Latvia. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 54(6), 10–20. <https://doi.org/10.1515/lpts-2017-0037>



- Araya-lópez, J. L. (2014). Experiencias en la aplicación operativa de un método multivariado de imputación de datos meteorológicos Experiences in the Application of a Multivariate Method for Imputation of Meteorological Data, *27*(506), 70–79.
- Arroyo, Á., Tricio, V., Corchado, E., & Herrero, Á. (2015). A comparison of clustering techniques for meteorological analysis. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 368, pp. 117–130). Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19719-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19719-7_11)
- Ballari, D., Giraldo, R., Campozano, L., & Samaniego, E. (2018). Spatial functional data analysis for regionalizing precipitation seasonality and intensity in a sparsely monitored region: Unveiling the spatio-temporal dependencies of precipitation in Ecuador. *International Journal of Climatology*, *38*(8), 3337–3354. <https://doi.org/10.1002/joc.5504>
- Baudouin, J. P., Herzog, M., & A Petrie, C. (2020). Cross-validating precipitation datasets in the Indus River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, *24*(1), 427–450. <https://doi.org/10.5194/hess-24-427-2020>
- Bendix, J., Trachte, K., Cermak, J., Rollenbeck, R., & Naub, T. (2009). Formation of convective clouds at the foothills of the tropical eastern Andes (South Ecuador). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *48*(8), 1682–1695. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2078.1>
- Bertsimas, D., Pawlowski, C., & Zhuo, Y. D. (2018). From predictive methods to missing data imputation: An optimization approach. *Journal of Machine Learning Research*, *18*, 1–39.
- Bierly, E. W., Mitchell, J. M., Gerhardt, J. R., Baum, W. A., & Newton, C. W. (1972). *Meteorology of southern hemisphere*. (C. W. Newton, Ed.). American Meteorological Society.
- Blair, J., & Lacy, M. G. (1993). from the SAGE Social Science Collections . Rights Reserved . *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*, *503*(1), 122–136.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, *329*(3–4), 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>



- Caloiero, T., Buttafuoco, G., Coscarelli, R., & Ferrari, E. (2015). Spatial and temporal characterization of climate at regional scale using homogeneous monthly precipitation and air temperature data: An application in Calabria (southern Italy). *Hydrology Research*, 46(4), 629–646. <https://doi.org/10.2166/nh.2014.022>
- Camarillo-Peñaranda, J. R., Saavedra-Montes, A. J., & Ramos-Paja, C. A. (2013). Recomendaciones para Seleccionar Índices para la Validación de Modelos. *TecnoLógicas*, (November), 109. <https://doi.org/10.22430/22565337.372>
- Camposano, L., Célleri, R., Trachte, K., Bendix, J., & Samaniego, E. (2016). Rainfall and Cloud Dynamics in the Andes: A Southern Ecuador Case Study. *Advances in Meteorology*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3192765>
- Camposano, L., Sanchez, E., Aviles, A., & Samaniego, E. (2014). Evaluation of infilling methods for time series of daily precipitation and temperature : The case of the Ecuadorian Andes, 5(1), 99–115.
- Camposano, L., Tenelanda, D., Sanchez, E., Samaniego, E., & Feyen, J. (2016). Comparison of Statistical Downscaling Methods for Monthly Total Precipitation: Case Study for the Paute River Basin in Southern Ecuador. *Advances in Meteorology*, 2016, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2016/6526341>
- Castro Cacabelos, M., Gude Sampedro, F., & Pérez González, A. (2014). *Imputación de datos faltantes en un modelo de tiempo de fallo acelerado*. Universidad de Coruña, Universidad Santiago de Compostela, Universidad de Vigo.
- Castro, L. M., Carvajal, Y., & Ávila, Á. J. (2012). Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos. *EIDENAR*, 11(Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente), 11–20.
- Cavalcante, R. B. L., Ferreira, D. B. da S., Pontes, P. R. M., Tedeschi, R. G., da Costa, C. P. W., & de Souza, E. B. (2020). Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmospheric Research*, 238(January), 104879. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879>
- Cazorla, M. del C., & Tamayo, E. (2014). Atmospheric measurement station at Universidad San



- Francisco de Quito (EMA): ground-based physical meteorology instrumentation and assessment of initial measurements. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 6(2), C21–C30. <https://doi.org/10.18272/aci.v6i2.184>
- Célleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space time rainfall variability in the Paute Basin Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316–3327. <https://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- Christmann, E. P., & Badgett, J. L. (2008). *Interpreting Assessment Data : Statistical Techniques You Can Use*. National Science Teachers Association (NSTA).
- Cichosz, P. (2015). *Data mining algorithms explained using R* (1. era ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Coleman, J. S. M., & Law, K. T. (2015). Meteorology. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09492-6>
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J. D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J. J., ... Villacis, M. (2020). Climatological and Hydrological Observations for the South American Andes: In situ Stations, Satellite, and Reanalysis Data Sets. *Frontiers in Earth Science*, 8(April), 1–20. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>
- Copas, J. B., & Malley, P. F. (2008). Multiple imputation using an iterative hot-deck with distance-based donor selection, (April), 4267–4278. <https://doi.org/10.1002/sim>
- Córdova, M., Célleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for temperature mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684. <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>
- Cutler, A., Cutler, D. R., & Stevens, J. R. (2012). Random Forests. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7>
- Davey, C. A., Redmond, K. T., & Simeral, D. B. (2007). Weather and Climate Inventory National Park Service Rocky Mountain Network. *U.S. Department of the Interior*.
- Deng, Y., Chang, C., Ido, M. S., & Long, Q. (2016). Multiple Imputation for General Missing



- Data Patterns in the Presence of High-dimensional Data. *Nature Publishing Group*, (November 2015), 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep21689>
- ECMWF. (2019). ERA5-Land hourly data from 1981 to present. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis*. (D. J. Balding, N. A. C. Cressie, G. M. Fitzmaurice, H. Goldstein, G. Molenberghs, D. W. Scott, ... S. Weisberg, Eds.) (5.ta ed.). John Wiley and Sons Ltd.
- Ewen, R. B. (1976). *Workbook for Introductory Statistics for the Behavioral Sciences*. (2.da ed.). New York: Academic Press.
- Ferrari, G. T., & Ozaki, V. (2014). Missing data imputation of climate datasets: implications to modeling extreme drought events. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 21–28.
- Field, A., Miles, J., & Field, Z. (2012). *Discovering statistics using R* (1.era ed.). SAGE Publications Ltd.
- Freitas, E. da S., Coelho, V. H. R., Xuan, Y., Melo, D. de C. D., Gadelha, A. N., Santos, E. A., ... Almeida, C. das N. (2020). The performance of the IMERG satellite-based product in identifying sub-daily rainfall events and their properties. *Journal of Hydrology*, 589(June), 125128. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125128>
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., & Bendix, J. (2012). Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152(1), 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.004>
- Garcia-Dias, R., Vieira, S., Lopez Pinaya, W. H., & Mechelli, A. (2020). Clustering analysis. In *Machine Learning* (pp. 227–247). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815739-8.00013-4>
- Garcia, M., Villalba, F., Araguas Araguas, L., & Rozanski, K. (1998). The role of atmospheric circulation patterns in controlling the regional distribution of stable isotope contents in precipitation: Preliminary results from two transects in the Ecuadorian Andes. *Isotope Techniques in the Study of Environmental Change. Proceedings of a Symposium, Vienna*,



April 1997., 127–140.

- García Reinoso, P. L. (2015). Imputación de Datos en Series de Precipitación Diaria Caso de Estudio Cuenca del Río Quindío \* Imputation of Missing Daily Rainfall Data Case Study of Quindio River Basin, (18), 73–85.
- Ghodichore, N., Dhanya, C. T., & Vinnarasi, R. (2017). Examination of mean precipitation and moisture transport in reanalysis products over India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 5010(August), 1–11. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1364983>
- Gómez, Á. P., Pacheco, J. A., & López Herrero, M. J. (2017). *Comparativa de análisis de imputación de datos faltantes con análisis de casos completos en pruebas diagnósticas*. Universidad Complutense de Madrid.
- Goyal, M. K., & Gupta, V. (2014). Identification of homogeneous rainfall regimes in northeast region of India using fuzzy cluster analysis. *Water Resources Management*, 28(13), 4491–4511. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0699-7>
- Greybush, S. J., Gillespie, H. E., & Wilson, R. J. (2019). Transient eddies in the TES/MCS Ensemble Mars Atmosphere Reanalysis System (EMARS). *Icarus*, 317, 158–181. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.07.001>
- Guallpa, M. (2014). Protocolo de control de calidad de datos hidrometeorológicos de la red de etapa. *Programa de Monitoreo y Vigilancia de Recursos Hídricos y de Clima Sub Gerencia de Gestión Ambiental*.
- Guallpa, M., Orellana-Alvear, J., & Bendix, J. (2019). Tropical andes radar precipitation estimates need high temporal and moderate spatial resolution. *Water (Switzerland)*, 11(5), 1–22. <https://doi.org/10.3390/w11051038>
- Guan, L., Yang, J., & Bell, J. M. (2007). Cross-correlations between weather variables in Australia. *Building and Environment*, 42(3), 1054–1070. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.010>
- Haining, R. (2004). *Spatial Data Analysis Theory and Practice* (1.era ed.). Cambridge, United Kingdom: The press syndicate of the university of cambridge.



- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011). *Data Mining: Concepts and Techniques* (3.era ed.). Waltham: Morgan Kaufmann.
- Haurwitz, B. (1941). *Dynamic Meteorology* (1.era ed.). New York and London: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC.
- Hénin, R., Liberato, M., Ramos, A., & Gouveia, C. (2018). Assessing the Use of Satellite-Based Estimates and High-Resolution Precipitation Datasets for the Study of Extreme Precipitation Events over the Iberian Peninsula. *Water*, *10*(11), 1688.  
<https://doi.org/10.3390/w10111688>
- Holton, J. R., & Staley, D. O. (1973). An Introduction to Dynamic Meteorology. *American Journal of Physics*, *41*(5). <https://doi.org/10.1119/1.1987371>
- Hu, G., Zhao, L., Li, R., Wu, X., Wu, T., Xie, C., ... Su, Y. (2019). Variations in soil temperature from 1980 to 2015 in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau based on observed and reanalysis products. *Geoderma*, *337*(October 2018), 893–905.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.044>
- Huang, J., Rikus, L. J., Qin, Y., & Katzfey, J. (2018). Assessing model performance of daily solar irradiance forecasts over Australia. *Solar Energy*, *176*(October), 615–626.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.080>
- Huang, W.-R., Chang, Y.-H., & Liu, P.-Y. (2018). Assessment of IMERG precipitation over Taiwan at multiple timescales. *Atmospheric Research*, *214*, 239–249.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.004>
- Huth, R., Nemesova, I., & Klimperová, N. (1993). Weather categorization based on the average linkage clustering technique: An application to European mid-latitudes. *International Journal of Climatology*, *13*(8), 817–835. <https://doi.org/10.1002/joc.3370130802>
- Jacobson, M. Z. (2005). *Fundamentals of atmospheric modeling second edition. Fundamentals of Atmospheric Modeling Second Edition* (Vol. 9780521839709). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139165389>
- Jiang, S., Ren, L., Xu, C.-Y., Yong, B., Yuan, F., Liu, Y., ... Zeng, X. (2018). Statistical and hydrological evaluation of the latest Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM



- (IMERG) over a midlatitude humid basin in South China. *Atmospheric Research*, 214, 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.021>
- Jimenez, V. A., & Rodriguez, S. (2014). Imputación de Datos Climáticos Utilizando Algoritmos Genéticos Niching, (July 2015).
- Jinubala, V., & Lawrence, R. (2016). Analysis of Missing Data and Imputation on Agriculture Data With Predictive Mean Matching Method. *International Journal of Science and Applied Information Technology (IJSAIT)*, 5(1), 1–4. Retrieved from <http://warse.org/IJSAIT/static/pdf/Issue/icect2016sp01.pdf>
- Kabacoff, R. I. (2011). *R IN ACTION: Data analysis and graphics with R*. (J. Stout & T. Taylor, Eds.), *Online* (2.da ed.). Shelter Island: Manning Publications Co. <https://doi.org/https://doi.org/citeulike-article-id:10054678>
- Kassambara, A. (2017). *Multivariate Analysis 1: Practical Guide To Cluster Analysis in R Unsupervised Machine Learning*. Taylor & Francis Group (1.era ed.). New York: STHDA.
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note : Inherent benchmark or not ? Comparing Nash – Sutcliffe and Kling – Gupta efficiency scores, 4323–4331.
- Kolebaje, O. T., Ikusika, A., & Akinyemi, P. (2016). Estimating solar radiation in ikeja and port harcourt via correlation with relative humidity and temperature. *International Journal of Energy Production and Management*, 1(3), 253–262. <https://doi.org/10.2495/EQ-V1-N3-253-262>
- Kreiss, J. P., & Lahiri, S. N. (2012). *Bootstrap Methods for Time Series*. *Handbook of Statistics* (Vol. 30). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53858-1.00001-6>
- Kuleshov, Y., Choy, S., Fu, E. F., Chane-Ming, F., Liou, Y.-A., & Pavelyev, A. G. (2016). Analysis of meteorological variables in the Australasian region using ground- and space-based GPS techniques. *Atmospheric Research*, 176–177, 276–289. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2016.02.021>
- Kulesza, K. (2020). Influence of air pressure patterns over Europe on solar radiation variability over Poland (1986–2015). *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.6689>



- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 62(318), 399. <https://doi.org/10.2307/2283970>
- Liu, H., Ma, W., Qian, J., Cai, J., Ye, X., Li, J., & Wang, X. (2015). Effect of urbanization on the urban meteorology and air pollution in Hangzhou. *Journal of Meteorological Research*, 29(6), 950–965. <https://doi.org/10.1007/s13351-015-5013-y>
- Liu, T., Wei, H., & Zhang, K. (2018). Wind power prediction with missing data using Gaussian process regression and multiple imputation. *Applied Soft Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.027>
- Liu, Y., Li, Q., Yang, L., Mu, K., Zhang, M., & Liu, J. (2020). Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions. *Science of the Total Environment*, 743, 140589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140589>
- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino, (June 2014), 284.
- Loh, W. (2011). Classification and regression trees, 1(February), 14–23. <https://doi.org/10.1002/widm.8>
- Lu, E., & Tu, J. (2020). Relative importance of surface air temperature and density to interannual variations in monthly surface atmospheric pressure. *International Journal of Climatology*, (June), 1–13. <https://doi.org/10.1002/joc.6730>
- Luteyn, J. L., & Churchill, S. P. (1999). *Páramos : a checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature - Ghent University Library*. New York (N.Y.) : New York botanical garden. Retrieved from <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:000782320>
- Lyra, G. B., Oliveira-Júnior, J. F., & Zeri, M. (2014). Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. *International Journal of Climatology*, 34(13), 3546–3558. <https://doi.org/10.1002/joc.3926>
- Mbogo, G.-K., Rakitin, S. V., & Visheratin, A. (2017). High-performance meteorological data processing framework for real-time analysis and visualization. *Procedia Computer Science*, 119, 334–340. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2017.11.192>



- Mcgregor, G. R. (1999). Basic Meteorology. *Air Pollution and Health*, 21–49.  
<https://doi.org/10.1016/B978-012352335-8/50078-8>
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (1983). *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. (D. J. Balding, N. A. C. Cressie, G. M. Fitzmaurice, G. H. Givens, H. Goldstein, D. W. Scott, ... S. Weisberg, Eds.), *IEE Colloquium (Digest)* (Second Edi). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Mora, D. E., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2014). Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 631–648. <https://doi.org/10.5194/hess-18-631-2014>
- Mora, D. E., & Willems, P. (2012). Decadal oscillations in rainfall and air temperature in the Paute River Basin-Southern Andes of Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1–2), 267–282. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0527-4>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, 50(3), 885–900.
- Nogueira, M. (2020). Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology*, 583(July). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124632>
- Olauson, J. (2018). ERA5: The new champion of wind power modelling? *Renewable Energy*, 126, 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.056>
- Oñate-Valdivieso, F., Fries, A., Mendoza, K., Gonzalez-Jaramillo, V., Pucha-Cofrep, F., Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2018). Temporal and spatial analysis of precipitation patterns in an Andean region of southern Ecuador using LAWR weather radar. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130(4), 473–484. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0535-8>
- Orellana-Alvear, J., Célleri, R., Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2017). Analysis of rain types and their Z-R relationships at different locations in the high andes of southern Ecuador. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(11), 3065–3080.



<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0009.1>

Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., & Célleri, R. (2015). Rainfall in the andean páramo: New insights from high-resolution monitoring in southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985–996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>

Palomino-Ángel, S., Anaya-Acevedo, J. A., & Botero, B. A. (2019). Evaluation of 3B42V7 and IMERG daily-precipitation products for a very high-precipitation region in northwestern South America. *Atmospheric Research*, 217, 37–48.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.10.012>

Pani, S. K., Lin, N. H., & RavindraBabu, S. (2020). Association of COVID-19 pandemic with meteorological parameters over Singapore. *Science of the Total Environment*, 740, 140112.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140112>

Paredes-Trejo, F., Alves Barbosa, H., Venkata Lakshmi Kumar, T., Kumar Thakur, M., & de Oliveira Buriti, C. (2020). Assessment of the CHIRPS-Based Satellite Precipitation Estimates. In *Inland Waters - Dynamics and Ecology [Working Title]*. IntechOpen.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.91472>

Pearce, R. P. (2002). *Meteorology at the millennium*. (R. P. Pearce, Ed.) (1.era ed.). San Diego: Academic Press. Retrieved from <https://www.elsevier.com/books/meteorology-at-the-millennium/pearce/978-0-12-548035-2>

Pearson, R. K. (2018). *Exploratory Data Analysis Using R* (1.era ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315382111>

Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1996). The climatology of relative humidity in the atmosphere. *Journal of Climate*, 9(12 III), 3443–3463. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<3443:tcorhi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<3443:tcorhi>2.0.co;2)

Peng, R. D. (2016). *Exploratory Data Analysis with R* (1.era ed.). Leanpub.

Perpiñán, O. (2014). *Displaying Time Series , Spatial , and Space-Time Data with R*. (J. M. Chambers, D. Temple Lang, T. Hothorn, & H. Wickham, Eds.). Madrid: CRC Press.

Petterssen, S. (1941). *Introduction to Meteorology* (1.era ed.). New York: M. Retrieved from



McGraw Hill Book Company, Inc

- Plant, R. E. (2012). *Spatial Data Analysis in Ecology and Agriculture Using R*. Davis, California: CRC Press.
- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., & van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8(May), 1–32. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162>
- Pyrgou, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2019). Spatiotemporal analysis of diurnal temperature range: Effect of urbanization, cloud cover, solar radiation, and precipitation. *Climate*, 7(7), 1–13. <https://doi.org/10.3390/cli7070089>
- Raspe, S., Bastrup-Birk, A., Fleck, S., Weis, W., Mayer, H., Meesenburg, H., ... Gartner, K. (2013). Meteorology. *Developments in Environmental Science*, 12, 319–336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098222-9.00017-0>
- Ratner, B. (2009). The correlation coefficient: Its values range between 1/1, or do they. *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing*, 17(2), 139–142. <https://doi.org/10.1057/jt.2009.5>
- Rivera, J. A., Marianetti, G., & Hinrichs, S. (2018). Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research*, 213, 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023>
- Rodríguez Jiménez, R. M., Benito Capa, Á., & Portela Lozano, A. (2004). *Meteorología y climatología*. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. Retrieved from <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
- Rohm, W., Yuan, Y., Biadeglne, B., Zhang, K., & Marshall, J. Le. (2014). Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions. *Atmospheric Research*, 138, 414–426. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.026>
- Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2011). Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmospheric Research*, 99(2), 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.018>



- Rubin, D. B. (1976). Inference and missing data. *Biometrika*, 63(3), 581–592.  
<https://doi.org/10.1093/biomet/63.3.581>
- Rüfenacht, R., Baumgarten, G., Hildebrand, J., Schranz, F., Matthias, V., Stober, G., ... Kämpfer, N. (2018). Validation of middle-atmospheric wind in observations and models data gap, (2016), 1–30.
- Rustemeier, E., Ziese, M., Meyer-Christoffer, A., Schneider, U., Finger, P., & Becker, A. (2019). Uncertainty assessment of the ERA-20C reanalysis based on the monthly in situ precipitation analysis of the global precipitation climatology centre. *Journal of Hydrometeorology*, 20(2), 231–250. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0239.1>
- Ruy, J., Carvalho, P. De, Eduardo, J., Almeida, B., Nakai, A. M., & Assad, E. D. (2017). Model for Multiple Imputation to Estimate Daily Rainfall Data and Filling of Faults Modelo de Imputação Múltipla para Estimar Dados de Precipitação Diária e Preenchimento de Falhas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 575–583.
- Salfrán Vaquero, D. (2018). Multiple Imputation for Complex Data Sets.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2017). Solar Radiation. In *Solar Heating and Cooling Systems* (pp. 13–28). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811662-3.00002-5>
- Schumacher, V., Justino, F., Fernández, A., Meseguer-Ruiz, O., Sarricolea, P., Comin, A., ... Althoff, D. (2020). Comparison between observations and gridded data sets over complex terrain in the Chilean Andes: Precipitation and temperature. *International Journal of Climatology*, (February), 1–23. <https://doi.org/10.1002/joc.6518>
- Shobha, N., & Asha, T. (2017). Monitoring weather based meteorological data: Clustering approach for analysis. In *IEEE International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications, ICIMIA 2017 - Proceedings* (pp. 75–81). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICIMIA.2017.7975575>
- Shtiliyanova, A., Bellocchi, G., Borrás, D., Eza, U., Martin, R., & Carrère, P. (2017). Kriging-based approach to predict missing air temperature data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 440–449. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2017.09.033>
- Sianturi, Y., Marjuki, & Sartika, K. (2020). Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to



- estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. *AIP Conference Proceedings*, 2223(April). <https://doi.org/10.1063/5.0000854>
- Solorzano Tovar, E. (2016). *Identificación y caracterización de patrones climáticos en la ciudad de Manizales, usando técnicas de series de tiempo y de conglomerados*. <https://doi.org/10.1080/09540260500073638>
- Song, H. J., Kim, S., Lee, H., & Kim, K. H. (2020). Climatology of tropospheric relative humidity over the Korean peninsula from radiosonde and ECMWF reanalysis. *Atmosphere*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/atmos11070704>
- Spellman, F. R. (2013). *The Handbook of Meteorology*. Plymouth, UK: Scarecrow PRESS, INC.
- Ssenyunzi, R. C., Oruru, B., D'ujanga, F. M., Realini, E., Barindelli, S., Tagliaferro, G., ... van de Giesen, N. (2020). Performance of ERA5 data in retrieving Precipitable Water Vapour over East African tropical region. *Advances in Space Research*, 65(8), 1877–1893. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.02.003>
- Sterl, S., Liersch, S., Koch, H., Lipzig, N. P. M. V., & Thiery, W. (2018). A new approach for assessing synergies of solar and wind power: Implications for West Africa. *Environmental Research Letters*, 13(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad8f6>
- Storch, H. Von, & Zwiers, F. W. (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press.
- Tahir, Z. U. R., Azhar, M., Mumtaz, M., Asim, M., Moeenuddin, G., Sharif, H., & Hassan, S. (2020). Evaluation of the reanalysis surface solar radiation from NCEP, ECMWF, NASA, and JMA using surface observations for Balochistan, Pakistan. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(2). <https://doi.org/10.1063/1.5135381>
- Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., & Hong, Y. (2020). Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sensing of Environment*, 240(January), 111697. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>
- Tarek, M., Brissette, F. P., & Arsenault, R. (2019). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modeling over North-America, (July).



- Tasie, N., & Banyie, L. (2018). The Effect of Relative Humidity on the Solar Radiation Intensity in Port Harcourt , Nigeria. *International Journal of Research*, 05(21), 128–136.
- Tetzner, D., Thomas, E., & Allen, C. (2019). A validation of ERA5 reanalysis data in the southern antarctic peninsula—Ellsworth land region, and its implications for ice core studies. *Geosciences (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/geosciences9070289>
- Tiwari, S., Kumar Jha, S., & Sivakumar, B. (2019). Reconstruction of daily rainfall data using the concepts of networks: Accounting for spatial connections in neighborhood selection. *Journal of Hydrology*, 579(September), 124185. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124185>
- Tradowsky, J. S., Bodeker, G. E., Querel, R. R., Builtjes, P. J. H., & Fischer, J. (2018). Combining Data from the Distributed GRUAN Site Lauder-Invercargill, New Zealand, to Provide a Site Atmospheric State Best Estimate of Temperature. *Earth System Science Data Discussions*, 1–23. <https://doi.org/10.5194/essd-2018-20>
- Triola, M. F. (2018). *Estadística* (12va ed.). México: Pearson Educación de México.
- Tsinko, Y., Bakhshaii, A., Johnson, E. A., & Martin, Y. E. (2018). Comparisons of fire weather indices using Canadian raw and homogenized weather data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 110–119. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2018.07.005>
- Turrado Crespo, C., Meizoso López, M. del C., Sánchez Lasheras, F., Rodríguez Gómez, B. A., Calvo Rollé, J. L., & Cos Juez, F. J. (2014). Missing Data Imputation of Solar Radiation Data under Different Atmospheric Conditions. *Sensors*, 14, 20382–20399. <https://doi.org/10.3390/s141120382>
- Um, H. H., Ha, K. J., & Lee, S. S. (2007). Evaluation of the urban effect of long-term relative humidity and the separation of temperature and water vapor effects. *International Journal of Climatology*, 27(11), 1531–1542. <https://doi.org/10.1002/joc.1483>
- Urraca, R., Huld, T., Gracia-Amillo, A., Martinez-de-Pison, F. J., Kaspar, F., & Sanz-Garcia, A. (2018). Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. *Solar Energy*, 164(October 2017), 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.059>



- Urraca, R., Huld, T., Lindfors, A. V., Riihelä, A., Martinez-de-Pison, F. J., & Sanz-Garcia, A. (2018). Quantifying the amplified bias of PV system simulations due to uncertainties in solar radiation estimates. *Solar Energy*, 176(October), 663–677.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.065>
- Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J., & Deckers, J. (2007). Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador. *Geomorphology*, 87(1–2), 53–67.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.042>
- Vink, G., Frank, L. E., Pannekoek, J., & van Buuren, S. (2014). Predictive mean matching imputation of semicontinuous variables. *Statistica Neerlandica*, 68(1), 61–90.  
<https://doi.org/10.1111/stan.12023>
- Walawender, J. P., Boilley, A., Blanc, P., Wald, L., & Antipolis, S. (2017). Estimating downwelling solar irradiance at the surface of the tropical Atlantic Ocean : A comparison of PIRATA measurements against several re-analyses and satellite-derived data sets, (December), 1–34.
- Wang, Z. (2019). The Solar Resource and Meteorological Parameters. In *Design of Solar Thermal Power Plants* (pp. 47–115). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815613-1.00002-x>
- Wesonga, R. (2015). On multivariate imputation and forecasting of decadal wind speed missing data. <https://doi.org/10.1186/s40064-014-0774-9>
- Whiteman, D. C. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2001\)021\[0095:MMFAA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2001)021[0095:MMFAA]2.0.CO;2)
- Willett, H. C., & Sanders, F. (1959). *Descriptive Meteorology* (2.da ed.). New York: Academic Press.
- Windhorst, D., Waltz, T., Timbe, E., Frede, H. G., & Breuer, L. (2013). Impact of elevation and weather patterns on the isotopic composition of precipitation in a tropical montane rainforest. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 409–419.  
<https://doi.org/10.5194/hess-17-409-2013>



WMO. (2011). Statistical methods for analysing datasets. In *Guide to Climatological Practices* (3.era ed.). Geneva: WMO-No. 100.

Xu, X., Frey, S. K., Boluwade, A., Eler, A. R., Khader, O., Lapen, D. R., & Sudicky, E. (2019). Evaluation of variability among different precipitation products in the Northern Great Plains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 24(November 2018), 100608. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100608>

Yang, M., Liu, G., Chen, T., Chen, Y., & Xia, C. (2020). Evaluation of GPM IMERG precipitation products with the point rain gauge records over Sichuan, China. *Atmospheric Research*, 246, 105101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105101>

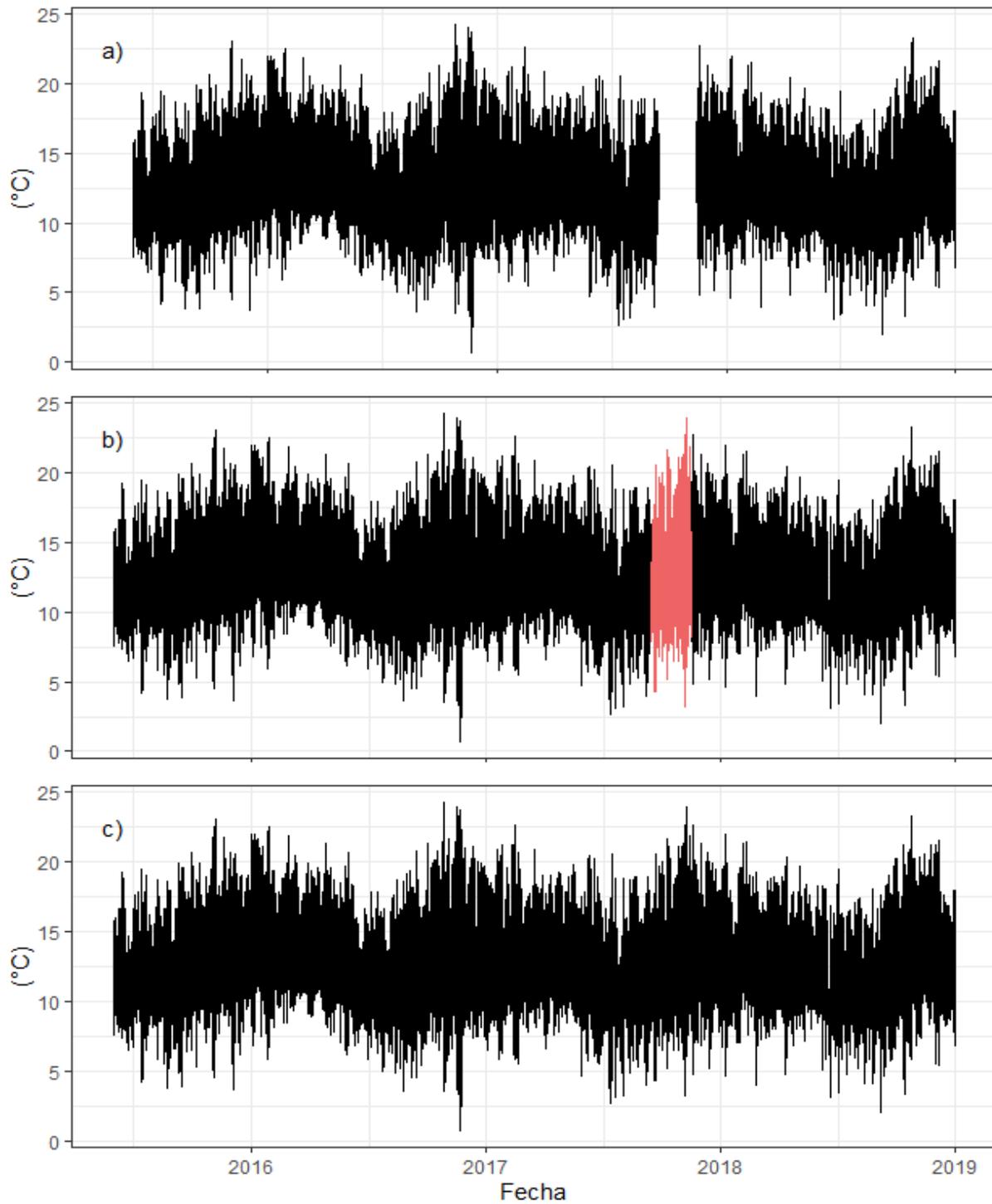
## 8. APÉNDICES

### Apéndice A. Captura de pantalla de un ejemplo de la aplicación web interactiva para evaluación de calidad de datos

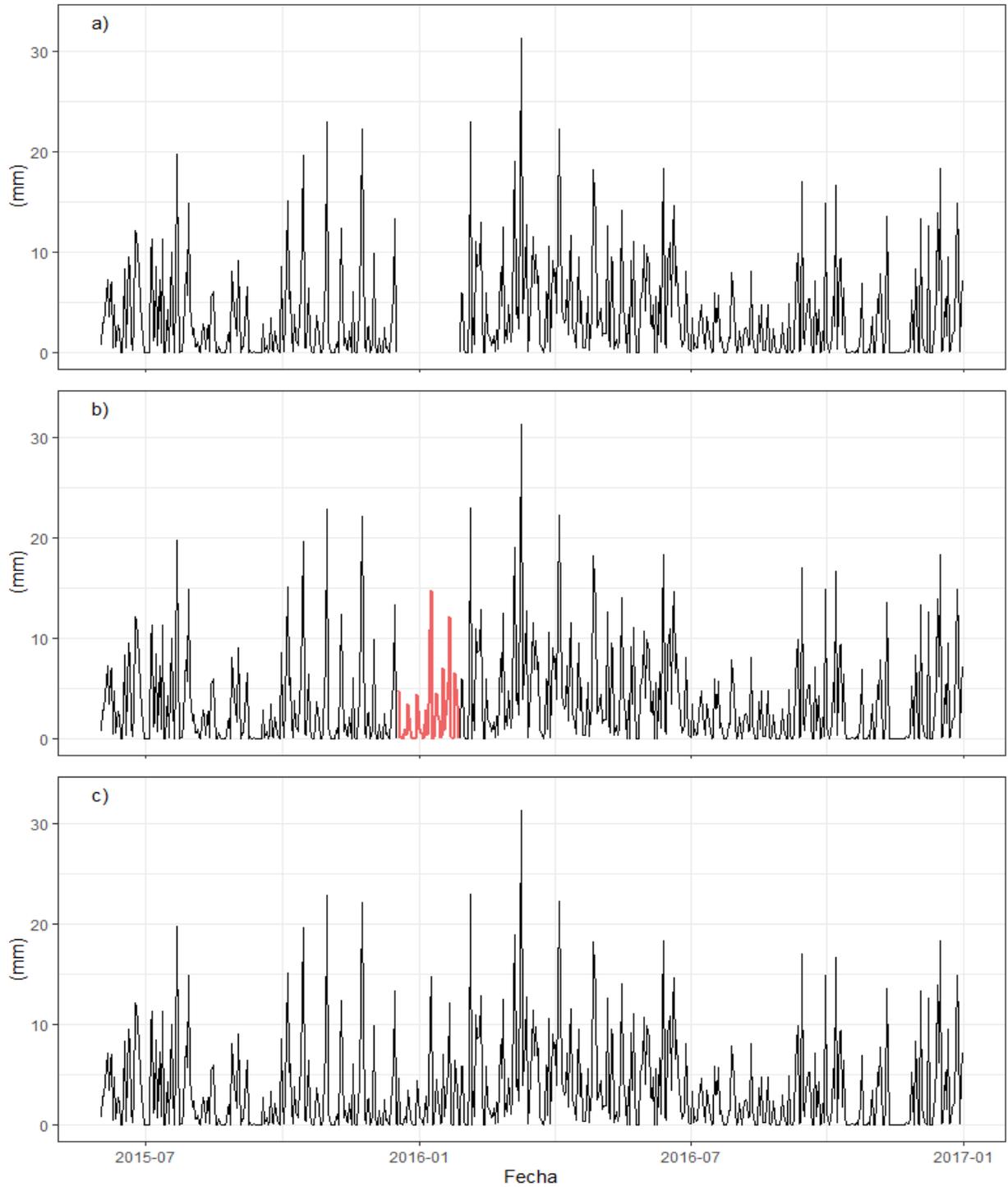


**Nota.** **a:** Leyenda. **b:** series de tiempo de determinada estación. **c:** puntero correspondiente al valor presentado la leyenda, **d:** selector de rango temporal.

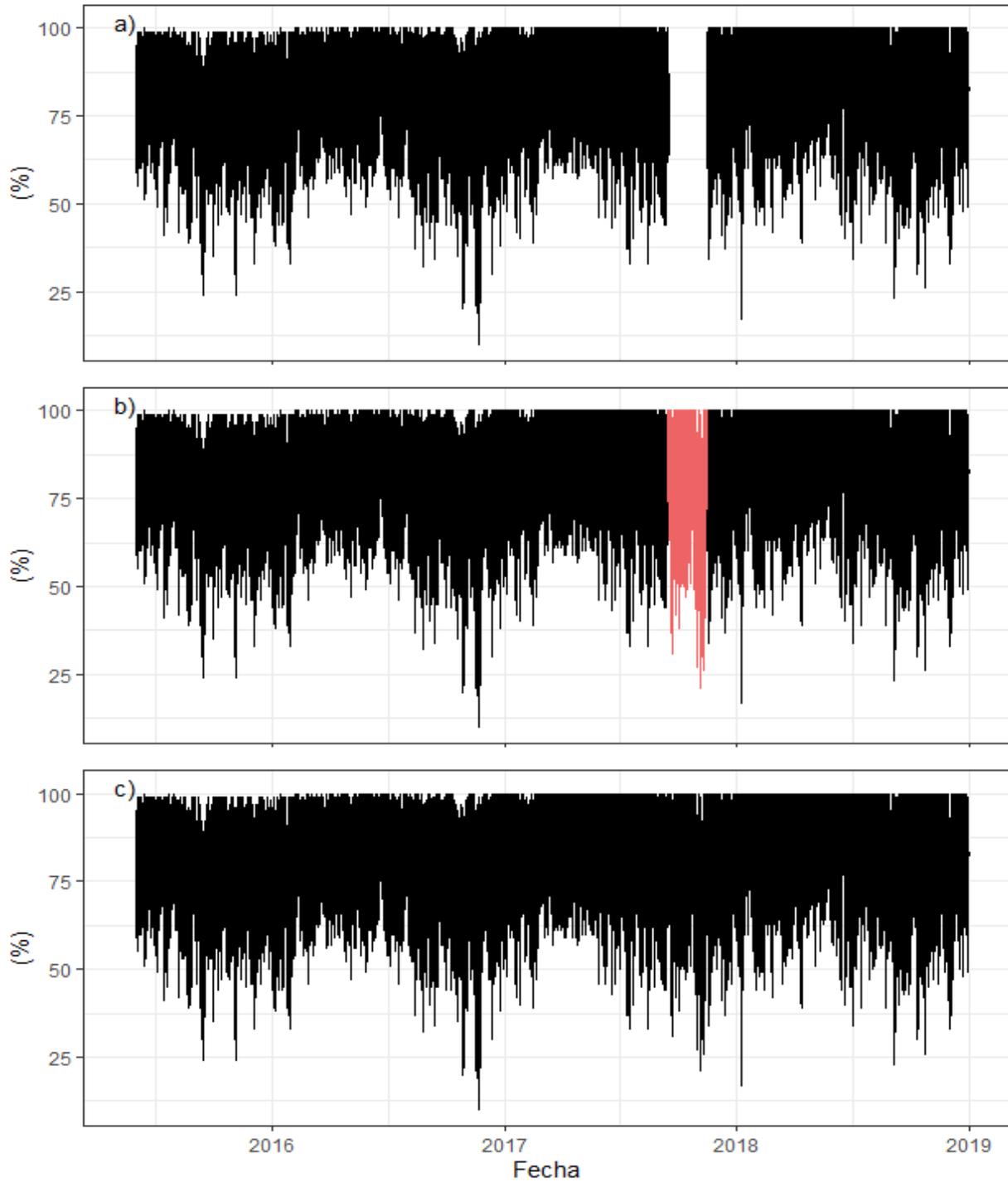
**Apéndice B.** Ejemplos gráficos del proceso de evaluación y relleno de datos



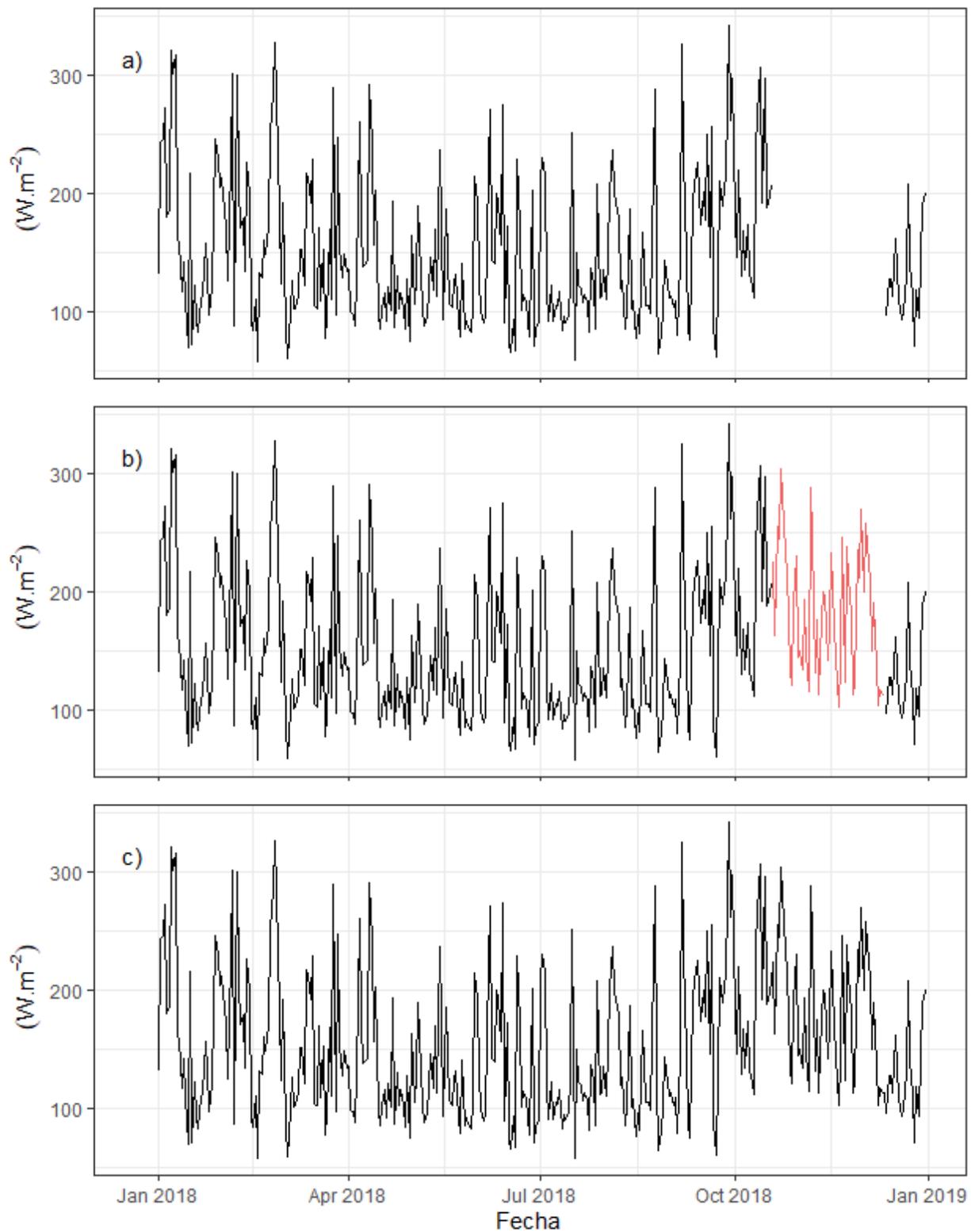
**Nota.** Tratamiento de temperatura del aire para la estación Quingeo UPS a escala horaria



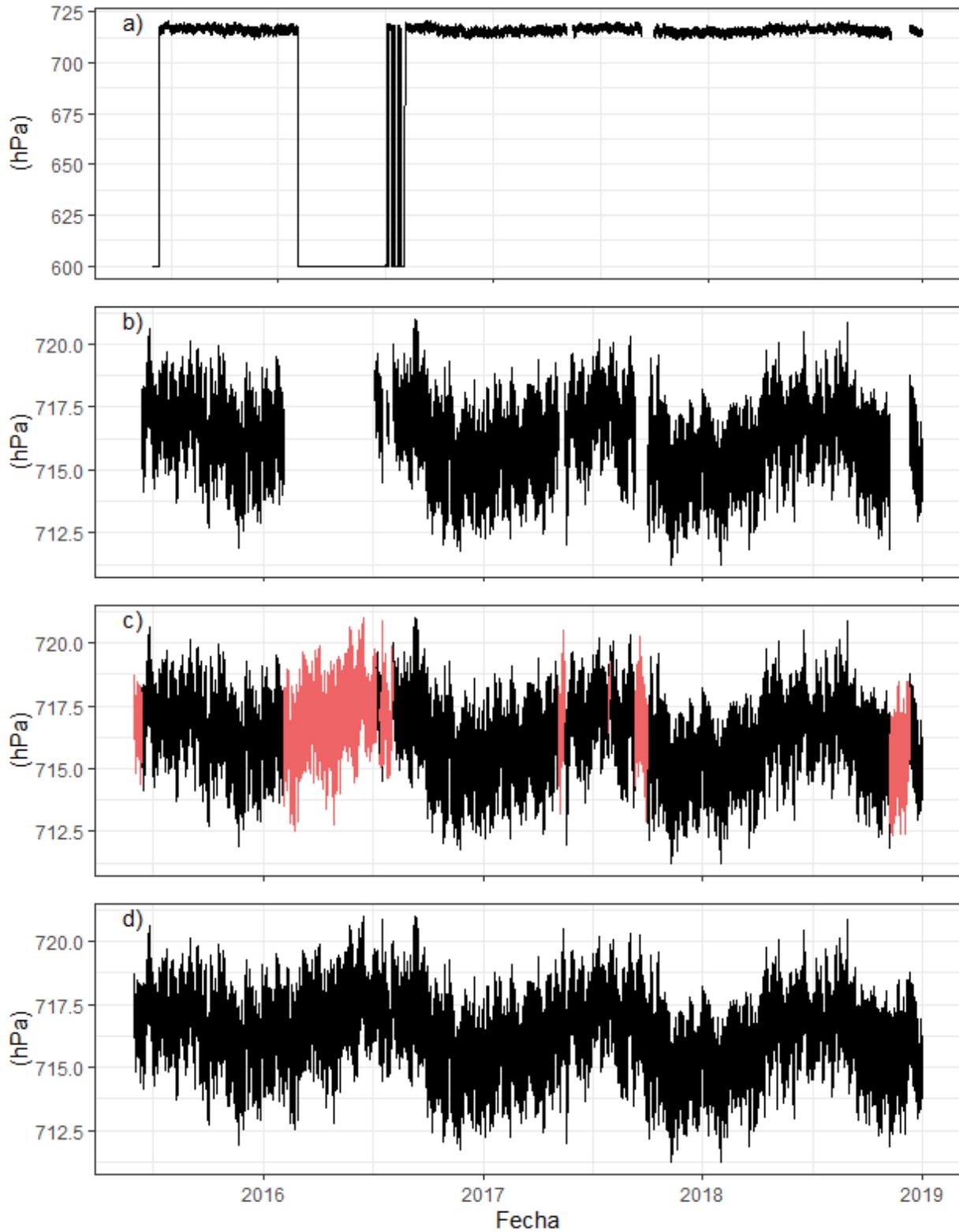
**Nota.** Tratamiento de precipitación para la estación El Labrado ETAPA EP a escala diaria



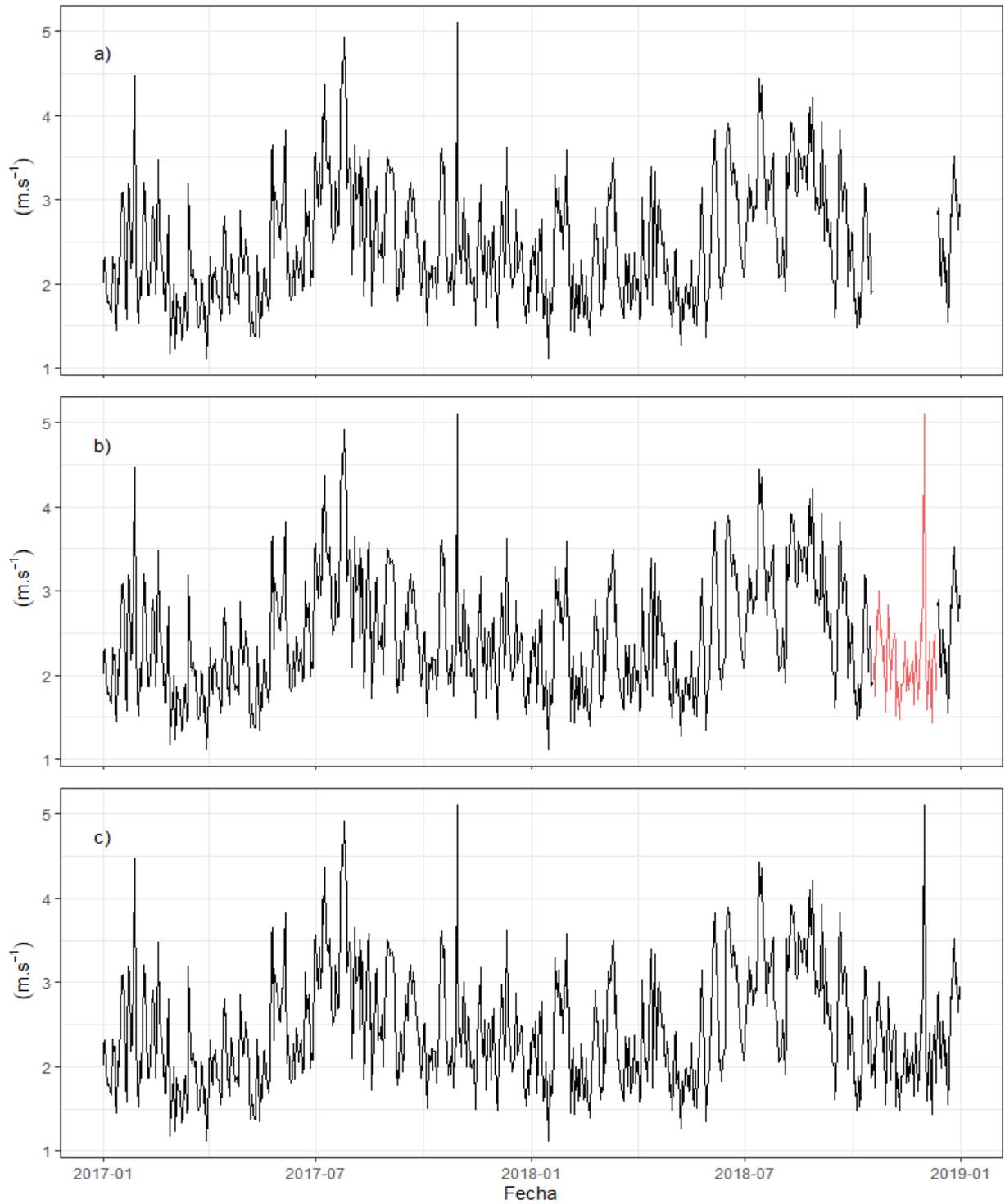
**Nota.** Tratamiento de humedad relativa para la estación Quingeo UPS a escala horaria



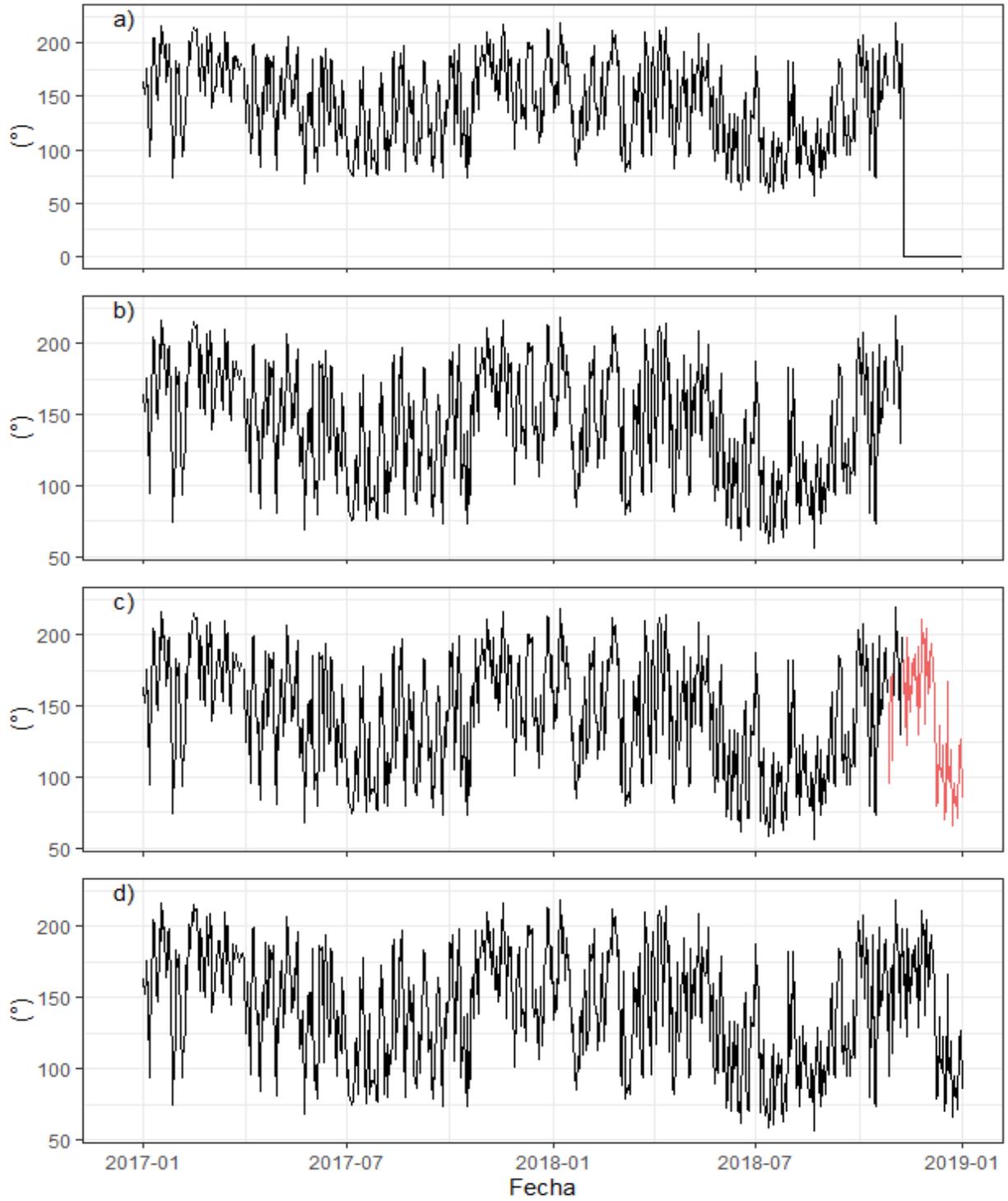
**Nota.** Tratamiento de radiación solar global para la estación Izhcayrumi ETAPA EP a escala horaria



**Nota.** Tratamiento de presión atmosférica para la estación Machángara DJ Chulco ETAPA EP a escala horaria



**Nota.** Tratamiento de velocidad de viento para la estación Izhcayrrumi ETAPA EP a escala diaria



**Nota.** Tratamiento de dirección de viento para la estación CTS UPS a escala diaria

Apéndice C. Sumarios estadísticos posterior al tratamiento de datos e imputación por estación

Tabla C1. Sumario Estadístico a escala temporal horaria

|                        | Mínimo | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo | Rango   | Rango IQ | Desv. Est. |        | Mínimo                    | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo | Rango  | Rango IQ | Desv. Est. |        |        |
|------------------------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|---------|----------|------------|--------|---------------------------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|------------|--------|--------|
| <b>Ucumbamba_ETAPA</b> | Temp   | -0.15  | 12.34   | 14.34    | 15.10  | 18.05  | 27.46   | 27.61    | 5.71       | 4.00   | <b>Sayausí_FTAP_ETAPA</b> | Temp   | 1.59    | 10.07    | 11.75  | 12.97  | 15.70  | 26.06    | 24.47      | 5.63   | 4.07   |
|                        | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.00     | 0.10   | 0.00   | 50.60   | 50.60    | 0.00       | 0.81   |                           | Precip | 0.00    | 0.00     | 0.00   | 0.11   | 0.00   | 35.90    | 35.90      | 0.00   | 0.70   |
|                        | HR     | 11.22  | 65.91   | 85.60    | 80.18  | 95.60  | 100.00  | 88.78    | 29.69      | 17.66  |                           | HR     | 13.47   | 73.59    | 89.80  | 83.99  | 97.30  | 100.00   | 86.53      | 23.71  | 16.14  |
|                        | Rad    | 0.00   | 0.00    | 6.03     | 169.16 | 282.64 | 1150.00 | 1150.00  | 282.64     | 256.97 |                           | Rad    | 0.00    | 0.00     | 4.68   | 152.23 | 236.09 | 1217.10  | 1217.10    | 236.09 | 243.33 |
|                        | Pres   | 758.35 | 763.63  | 764.82   | 764.69 | 765.87 | 771.47  | 13.12    | 2.24       | 1.68   |                           | Pres   | 722.37  | 726.76   | 727.78 | 727.71 | 728.73 | 732.19   | 9.82       | 1.97   | 1.45   |
|                        | V.V.   | 0.00   | 0.12    | 0.48     | 0.79   | 1.18   | 5.21    | 5.21     | 1.06       | 0.86   |                           | V.V.   | 0.00    | 0.15     | 0.42   | 0.60   | 0.94   | 2.98     | 2.98       | 0.79   | 0.55   |
|                        | D.V.   | 16.38  | 98.90   | 151.90   | 137.58 | 176.10 | 278.10  | 261.72   | 77.20      | 47.37  |                           | D.V.   | 36.22   | 118.60   | 179.00 | 175.37 | 233.30 | 332.20   | 295.98     | 114.70 | 59.74  |
| <b>UPS_UPS</b>         | Temp   | 3.50   | 12.90   | 14.70    | 15.29  | 17.60  | 26.00   | 22.50    | 4.70       | 3.33   | <b>Quingeo_UPS</b>        | Temp   | 0.70    | 9.70     | 11.40  | 12.09  | 14.40  | 24.30    | 23.60      | 4.70   | 3.28   |
|                        | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.00     | 0.09   | 0.00   | 29.20   | 29.20    | 0.00       | 0.70   |                           | Precip | 0.00    | 0.00     | 0.00   | 0.08   | 0.00   | 27.70    | 27.70      | 0.00   | 0.55   |
|                        | HR     | 8.00   | 57.00   | 72.00    | 70.60  | 84.00  | 100.00  | 92.00    | 27.00      | 18.04  |                           | HR     | 10.00   | 71.00    | 86.00  | 82.35  | 96.00  | 100.00   | 90.00      | 25.00  | 15.97  |
|                        | Rad    | 0.00   | 0.00    | 7.00     | 193.92 | 341.00 | 1217.00 | 1217.00  | 341.00     | 283.48 |                           | Rad    | 0.00    | 0.00     | 8.00   | 180.78 | 328.00 | 1226.00  | 1226.00    | 328.00 | 260.79 |
|                        | Pres   | 747.60 | 752.70  | 753.90   | 753.77 | 754.90 | 758.60  | 11.00    | 2.20       | 1.63   |                           | Pres   | 718.20  | 722.40   | 723.40 | 723.36 | 724.40 | 727.70   | 9.50       | 2.00   | 1.42   |
|                        | V.V.   | 0.00   | 0.80    | 1.40     | 1.82   | 2.60   | 8.20    | 8.20     | 1.80       | 1.29   |                           | V.V.   | 0.00    | 0.90     | 1.80   | 2.09   | 2.90   | 10.40    | 10.40      | 2.00   | 1.49   |
|                        | D.V.   | 1.00   | 48.00   | 78.00    | 107.81 | 149.00 | 360.00  | 359.00   | 101.00     | 82.64  |                           | D.V.   | 1.00    | 57.00    | 94.00  | 142.20 | 249.00 | 360.00   | 359.00     | 192.00 | 96.11  |
| <b>CTS_UPS</b>         | Temp   | 0.50   | 12.60   | 14.40    | 14.92  | 17.30  | 25.50   | 25.00    | 4.70       | 3.41   | <b>Machángara_ETAPA</b>   | Temp   | -2.03   | 8.62     | 10.44  | 11.01  | 13.57  | 22.60    | 24.63      | 4.95   | 3.71   |
|                        | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.00     | 0.09   | 0.00   | 20.50   | 20.50    | 0.00       | 0.59   |                           | Precip | 0.00    | 0.00     | 0.00   | 0.13   | 0.00   | 25.70    | 25.70      | 0.00   | 0.67   |
|                        | HR     | 8.00   | 58.00   | 75.00    | 73.59  | 91.00  | 100.00  | 92.00    | 33.00      | 19.31  |                           | HR     | 13.80   | 81.70    | 97.20  | 89.37  | 100.00 | 100.00   | 86.20      | 18.30  | 14.46  |
|                        | Rad    | 0.00   | 0.00    | 7.00     | 180.34 | 304.00 | 1204.00 | 1204.00  | 304.00     | 269.40 |                           | Rad    | 0.00    | 0.00     | 5.91   | 144.72 | 231.69 | 1348.64  | 1348.64    | 231.69 | 225.83 |
|                        | Pres   | 746.70 | 751.80  | 752.90   | 752.79 | 753.90 | 757.60  | 10.90    | 2.10       | 1.62   |                           | Pres   | 711.23  | 715.57   | 716.59 | 716.51 | 717.54 | 720.99   | 9.76       | 1.97   | 1.45   |
|                        | V.V.   | 0.00   | 0.70    | 1.20     | 1.71   | 2.40   | 8.70    | 8.70     | 1.70       | 1.36   |                           | V.V.   | 0.00    | 0.72     | 1.23   | 1.36   | 1.81   | 5.60     | 5.60       | 1.09   | 0.85   |
|                        | D.V.   | 1.00   | 72.00   | 99.00    | 138.87 | 215.00 | 360.00  | 359.00   | 143.00     | 81.94  |                           | D.V.   | 21.35   | 100.20   | 167.30 | 148.22 | 195.40 | 295.50   | 274.15     | 95.20  | 56.73  |
| <b>CoboHar_ETAPA</b>   | Temp   | 1.06   | 11.94   | 13.75    | 14.60  | 17.29  | 26.85   | 25.79    | 5.35       | 3.77   | <b>Cumbe_UPS</b>          | Temp   | 2.90    | 8.10     | 9.50   | 10.24  | 12.10  | 20.80    | 17.90      | 4.00   | 2.98   |
|                        | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.00     | 0.10   | 0.00   | 22.50   | 22.50    | 0.00       | 0.66   |                           | Precip | 0.00    | 0.00     | 0.00   | 0.09   | 0.00   | 14.20    | 14.20      | 0.00   | 0.48   |
|                        | HR     | 11.76  | 65.75   | 82.70    | 78.68  | 93.20  | 100.00  | 88.24    | 27.45      | 17.10  |                           | HR     | 14.00   | 80.00    | 92.00  | 87.59  | 99.00  | 100.00   | 86.00      | 19.00  | 13.53  |
|                        | Rad    | 0.00   | 0.00    | 2.22     | 174.12 | 304.55 | 1128.33 | 1128.33  | 304.55     | 260.13 |                           | Rad    | 0.00    | 0.00     | 7.00   | 175.13 | 310.00 | 1240.40  | 1240.40    | 310.00 | 251.55 |
|                        | Pres   | 738.22 | 743.00  | 744.10   | 743.99 | 745.07 | 748.59  | 10.37    | 2.07       | 1.54   |                           | Pres   | 694.50  | 698.50   | 699.30 | 699.30 | 700.20 | 703.20   | 8.70       | 1.70   | 1.25   |
|                        | V.V.   | 0.00   | 0.11    | 0.53     | 0.68   | 1.18   | 2.98    | 2.98     | 1.07       | 0.61   |                           | V.V.   | 0.00    | 1.80     | 2.50   | 2.74   | 3.40   | 12.60    | 12.60      | 1.60   | 1.48   |
|                        | D.V.   | 34.09  | 107.60  | 141.30   | 158.99 | 209.60 | 319.80  | 285.71   | 102.00     | 60.83  |                           | D.V.   | 1.00    | 90.00    | 99.00  | 119.02 | 124.00 | 360.00   | 359.00     | 34.00  | 59.42  |
| <b>Tixán_ETAPA</b>     | Temp   | 2.25   | 11.45   | 13.19    | 13.97  | 16.46  | 25.82   | 23.57    | 5.01       | 3.46   | <b>El La brado_ETAPA</b>  | Temp   | 0.31    | 6.58     | 7.98   | 8.57   | 10.22  | 19.34    | 19.03      | 3.64   | 2.91   |
|                        | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.00     | 0.10   | 0.00   | 46.10   | 46.10    | 0.00       | 0.73   |                           | Precip | 0.00    | 0.00     | 0.00   | 0.15   | 0.00   | 15.40    | 15.40      | 0.00   | 0.56   |
|                        | HR     | 10.42  | 67.15   | 82.40    | 78.90  | 92.30  | 100.00  | 89.58    | 25.15      | 16.21  |                           | HR     | 17.02   | 86.00    | 96.30  | 90.55  | 99.90  | 100.00   | 82.98      | 13.90  | 13.08  |
|                        | Rad    | 0.00   | 0.00    | 6.39     | 171.32 | 293.64 | 1277.29 | 1277.29  | 293.64     | 256.27 |                           | Rad    | 0.00    | 0.00     | 5.29   | 139.08 | 220.33 | 1318.28  | 1318.28    | 220.33 | 218.59 |
|                        | Pres   | 733.15 | 737.79  | 738.88   | 738.78 | 739.85 | 743.37  | 10.22    | 2.05       | 1.52   |                           | Pres   | 674.10  | 677.65   | 678.51 | 678.47 | 679.33 | 682.24   | 8.14       | 1.67   | 1.21   |
|                        | V.V.   | 0.00   | 0.37    | 0.85     | 1.02   | 1.52   | 4.27    | 4.27     | 1.16       | 0.78   |                           | V.V.   | 0.00    | 0.82     | 1.59   | 1.56   | 2.22   | 5.94     | 5.94       | 1.39   | 0.87   |
|                        | D.V.   | 27.33  | 91.30   | 151.70   | 159.18 | 221.80 | 319.30  | 291.97   | 130.50     | 76.49  |                           | D.V.   | 33.48   | 65.55    | 81.90  | 124.59 | 190.18 | 310.10   | 276.62     | 124.63 | 78.26  |
| <b>Tixán_UPS</b>       | Temp   | 2.40   | 11.30   | 13.00    | 13.66  | 15.90  | 24.70   | 22.30    | 4.60       | 3.22   | <b>Izhcayrumi_ETAPA</b>   | Temp   | -6.38   | 4.85     | 6.22   | 6.49   | 8.09   | 15.72    | 22.10      | 3.24   | 2.76   |
|                        | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.00     | 0.10   | 0.00   | 42.10   | 42.10    | 0.00       | 0.71   |                           | Precip | 0.00    | 0.00     | 0.00   | 0.10   | 0.00   | 10.80    | 10.80      | 0.00   | 0.41   |
|                        | HR     | 10.00  | 65.00   | 79.00    | 77.25  | 91.00  | 100.00  | 90.00    | 26.00      | 16.67  |                           | HR     | 13.41   | 84.50    | 92.40  | 88.64  | 97.30  | 100.00   | 86.59      | 12.80  | 12.44  |
|                        | Rad    | 0.00   | 0.00    | 6.00     | 174.04 | 294.00 | 1253.00 | 1253.00  | 294.00     | 262.40 |                           | Rad    | 0.00    | 0.00     | 6.66   | 155.74 | 255.92 | 1205.58  | 1205.58    | 255.92 | 237.18 |
|                        | Pres   | 733.20 | 737.90  | 738.90   | 738.84 | 739.90 | 743.50  | 10.30    | 2.00       | 1.53   |                           | Pres   | 648.64  | 651.99   | 652.77 | 652.73 | 653.51 | 656.30   | 7.66       | 1.52   | 1.10   |
|                        | V.V.   | 0.00   | 0.40    | 0.80     | 0.99   | 1.40   | 4.60    | 4.60     | 1.00       | 0.76   |                           | V.V.   | 0.00    | 1.79     | 2.52   | 2.54   | 3.22   | 7.78     | 7.78       | 1.43   | 1.02   |
|                        | D.V.   | 1.00   | 71.00   | 129.00   | 159.72 | 253.50 | 360.00  | 359.00   | 182.50     | 108.46 |                           | D.V.   | 27.71   | 93.20    | 118.60 | 128.61 | 153.60 | 337.50   | 309.79     | 60.40  | 54.10  |



**Tabla C2. Sumario Estadístico a escala temporal diaria**

|                           | Mínimo | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo | Rango  | Rango IQ | Desv. Est. |       | Mínimo | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo | Rango  | Rango IQ | Desv. Est. |       |
|---------------------------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|------------|-------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|------------|-------|
| <b>Umbanba_ETAPA</b>      | Temp   | 10.65  | 14.32   | 15.16    | 15.10  | 15.98  | 19.38  | 8.73     | 1.66       | 1.29  | Temp   | 8.58   | 12.21   | 12.98    | 12.97  | 13.77  | 16.85  | 8.26     | 1.57       | 1.20  |
|                           | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.10     | 2.29   | 1.70   | 59.20  | 59.20    | 1.70       | 5.53  | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.40     | 2.75   | 3.00   | 45.60  | 45.60    | 3.00       | 5.28  |
|                           | HR     | 56.54  | 75.64   | 80.02    | 80.18  | 84.92  | 98.78  | 42.24    | 9.28       | 6.85  | HR     | 41.89  | 79.86   | 84.94    | 83.99  | 89.13  | 99.09  | 57.20    | 9.27       | 7.48  |
|                           | Rad    | 42.14  | 133.16  | 166.07   | 169.16 | 204.11 | 300.70 | 258.56   | 70.94      | 48.77 | Rad    | 41.49  | 111.97  | 145.24   | 152.23 | 184.12 | 320.27 | 278.78   | 72.15      | 53.47 |
|                           | Pres   | 761.35 | 763.85  | 764.66   | 764.69 | 765.52 | 768.23 | 6.88     | 1.67       | 1.14  | Pres   | 724.57 | 726.96  | 727.68   | 727.71 | 728.48 | 730.86 | 6.29     | 1.51       | 1.02  |
|                           | V.V.   | 0.00   | 0.54    | 0.81     | 0.79   | 1.01   | 1.71   | 1.71     | 0.47       | 0.33  | V.V.   | 0.21   | 0.49    | 0.59     | 0.60   | 0.70   | 1.14   | 0.93     | 0.21       | 0.16  |
|                           | D.V.   | 84.06  | 124.10  | 137.18   | 137.65 | 151.79 | 188.47 | 104.41   | 27.69      | 19.50 | D.V.   | 136.06 | 164.59  | 174.41   | 175.38 | 184.35 | 234.42 | 98.36    | 19.76      | 15.28 |
| <b>UPS UPS</b>            | Temp   | 11.14  | 14.52   | 15.35    | 15.29  | 16.08  | 19.00  | 7.86     | 1.56       | 1.18  | Temp   | 8.11   | 11.38   | 12.14    | 12.09  | 12.89  | 15.93  | 7.82     | 1.51       | 1.13  |
|                           | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.10     | 2.31   | 2.00   | 45.40  | 45.40    | 2.00       | 5.12  | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.20     | 1.88   | 1.70   | 44.10  | 44.10    | 1.70       | 4.09  |
|                           | HR     | 37.67  | 65.29   | 70.13    | 70.60  | 76.52  | 95.25  | 57.58    | 11.23      | 8.46  | HR     | 41.25  | 78.14   | 82.88    | 82.35  | 87.46  | 99.08  | 57.83    | 9.32       | 7.59  |
|                           | Rad    | 51.71  | 149.64  | 190.31   | 193.92 | 235.82 | 346.38 | 294.67   | 86.19      | 58.05 | Rad    | 51.08  | 143.84  | 172.85   | 180.78 | 208.50 | 354.75 | 303.67   | 64.66      | 51.58 |
|                           | Pres   | 750.49 | 752.97  | 753.73   | 753.77 | 754.57 | 757.22 | 6.73     | 1.60       | 1.11  | Pres   | 720.28 | 722.64  | 723.35   | 723.36 | 724.10 | 726.42 | 6.14     | 1.46       | 1.00  |
|                           | V.V.   | 0.82   | 1.51    | 1.81     | 1.81   | 2.10   | 3.28   | 2.46     | 0.59       | 0.42  | V.V.   | 0.79   | 1.71    | 2.03     | 2.09   | 2.42   | 4.17   | 3.38     | 0.71       | 0.53  |
|                           | D.V.   | 35.71  | 74.33   | 98.02    | 108.25 | 139.73 | 217.96 | 182.25   | 65.40      | 41.43 | D.V.   | 43.88  | 105.02  | 151.54   | 143.10 | 182.00 | 240.88 | 197.00   | 76.98      | 50.03 |
| <b>CTS UPS</b>            | Temp   | 11.09  | 14.17   | 14.95    | 14.92  | 15.73  | 18.19  | 7.10     | 1.56       | 1.19  | Temp   | 7.31   | 10.18   | 11.04    | 11.01  | 11.85  | 15.05  | 7.73     | 1.68       | 1.25  |
|                           | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.10     | 2.04   | 2.00   | 27.70  | 27.70    | 2.00       | 4.22  | Precip | 0.00   | 0.00    | 1.00     | 3.23   | 4.10   | 37.20  | 37.20    | 4.10       | 5.21  |
|                           | HR     | 47.25  | 67.58   | 73.21    | 73.59  | 79.59  | 97.71  | 50.46    | 12.01      | 8.56  | HR     | 63.06  | 86.31   | 90.23    | 89.37  | 93.72  | 99.81  | 36.75    | 7.42       | 5.84  |
|                           | Rad    | 41.25  | 135.24  | 173.69   | 180.34 | 219.36 | 343.79 | 302.54   | 84.13      | 58.66 | Rad    | 25.52  | 102.28  | 134.32   | 144.72 | 178.10 | 319.50 | 293.98   | 75.82      | 58.00 |
|                           | Pres   | 749.49 | 752.00  | 752.76   | 752.79 | 753.58 | 756.20 | 6.71     | 1.58       | 1.10  | Pres   | 713.43 | 715.74  | 716.51   | 716.51 | 717.31 | 719.48 | 6.05     | 1.57       | 1.04  |
|                           | V.V.   | 0.68   | 1.39    | 1.71     | 1.71   | 2.02   | 2.96   | 2.28     | 0.63       | 0.43  | V.V.   | 0.07   | 1.13    | 1.35     | 1.36   | 1.57   | 2.35   | 2.28     | 0.44       | 0.34  |
|                           | D.V.   | 49.13  | 103.40  | 139.04   | 138.87 | 172.95 | 238.08 | 188.96   | 69.55      | 40.30 | D.V.   | 65.08  | 131.06  | 146.55   | 147.94 | 163.74 | 215.26 | 150.17   | 32.68      | 23.48 |
| <b>Coballar_ETAPA</b>     | Temp   | 10.45  | 13.80   | 14.60    | 14.60  | 15.43  | 18.27  | 7.81     | 1.63       | 1.21  | Temp   | 5.64   | 9.55    | 10.36    | 10.24  | 11.09  | 13.60  | 7.95     | 1.54       | 1.22  |
|                           | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.20     | 2.42   | 2.20   | 43.90  | 43.90    | 2.20       | 5.04  | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.50     | 2.26   | 2.98   | 27.40  | 27.40    | 2.98       | 3.80  |
|                           | HR     | 47.40  | 74.25   | 78.79    | 78.68  | 83.90  | 97.11  | 49.71    | 9.64       | 7.35  | HR     | 35.75  | 84.01   | 89.17    | 87.59  | 92.86  | 100.00 | 64.25    | 8.85       | 7.90  |
|                           | Rad    | 36.26  | 132.71  | 170.80   | 174.12 | 212.55 | 320.93 | 284.67   | 79.84      | 54.71 | Rad    | 37.88  | 136.57  | 166.31   | 175.13 | 204.09 | 350.92 | 313.05   | 67.52      | 56.63 |
|                           | Pres   | 740.74 | 743.20  | 743.96   | 743.99 | 744.77 | 747.30 | 6.56     | 1.56       | 1.07  | Pres   | 696.38 | 698.67  | 699.30   | 699.30 | 699.92 | 701.95 | 5.58     | 1.25       | 0.87  |
|                           | V.V.   | 0.15   | 0.57    | 0.68     | 0.68   | 0.78   | 1.22   | 1.07     | 0.21       | 0.16  | V.V.   | 0.93   | 2.15    | 2.76     | 2.74   | 3.27   | 5.66   | 4.73     | 1.12       | 0.78  |
|                           | D.V.   | 80.53  | 132.73  | 155.73   | 159.07 | 185.26 | 231.73 | 151.20   | 52.53      | 31.81 | D.V.   | 78.58  | 94.75   | 100.94   | 118.98 | 133.08 | 256.83 | 178.25   | 38.33      | 37.32 |
| <b>Tixán_ETAPA</b>        | Temp   | 9.69   | 13.22   | 13.99    | 13.97  | 14.77  | 17.46  | 7.77     | 1.55       | 1.18  | Temp   | 4.11   | 7.79    | 8.65     | 8.57   | 9.44   | 11.76  | 7.65     | 1.64       | 1.28  |
|                           | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.20     | 2.48   | 2.10   | 53.50  | 53.50    | 2.10       | 5.53  | Precip | 0.00   | 0.10    | 1.70     | 3.49   | 5.30   | 31.30  | 31.30    | 5.20       | 4.57  |
|                           | HR     | 45.78  | 74.60   | 79.49    | 78.90  | 84.15  | 97.01  | 51.23    | 9.55       | 7.53  | HR     | 37.44  | 87.17   | 92.64    | 90.55  | 96.41  | 100.00 | 62.56    | 9.24       | 8.52  |
|                           | Rad    | 51.24  | 128.29  | 164.84   | 171.32 | 208.37 | 338.16 | 286.92   | 80.09      | 56.12 | Rad    | 31.36  | 91.14   | 122.47   | 139.08 | 176.01 | 336.63 | 305.27   | 84.87      | 63.41 |
|                           | Pres   | 735.56 | 738.00  | 738.76   | 738.78 | 739.58 | 742.08 | 6.52     | 1.58       | 1.06  | Pres   | 675.75 | 677.84  | 678.47   | 678.47 | 679.11 | 681.19 | 5.44     | 1.26       | 0.87  |
|                           | V.V.   | 0.32   | 0.81    | 0.99     | 1.02   | 1.21   | 2.02   | 1.69     | 0.41       | 0.29  | V.V.   | 0.53   | 1.25    | 1.49     | 1.56   | 1.80   | 3.41   | 2.88     | 0.55       | 0.43  |
|                           | D.V.   | 76.33  | 142.41  | 160.55   | 159.26 | 176.73 | 223.58 | 147.25   | 34.33      | 24.66 | D.V.   | 59.53  | 88.55   | 125.26   | 124.71 | 154.75 | 224.55 | 165.01   | 66.21      | 38.15 |
| <b>Tixán UPS</b>          | Temp   | 9.70   | 12.97   | 13.68    | 13.66  | 14.41  | 17.03  | 7.33     | 1.45       | 1.12  | Temp   | 2.57   | 5.77    | 6.55     | 6.49   | 7.25   | 10.27  | 7.70     | 1.48       | 1.12  |
|                           | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.20     | 2.32   | 1.90   | 49.50  | 49.50    | 1.90       | 5.24  | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.80     | 2.44   | 3.38   | 27.90  | 27.90    | 3.38       | 3.81  |
|                           | HR     | 43.42  | 72.50   | 77.69    | 77.25  | 82.67  | 98.50  | 55.08    | 10.17      | 8.09  | HR     | 32.03  | 86.23   | 90.41    | 88.64  | 93.74  | 99.87  | 67.84    | 7.51       | 8.57  |
|                           | Rad    | 48.96  | 130.08  | 168.25   | 174.04 | 213.95 | 359.79 | 310.83   | 83.86      | 57.20 | Rad    | 35.22  | 103.69  | 135.53   | 155.74 | 197.80 | 346.28 | 311.06   | 94.11      | 67.13 |
|                           | Pres   | 735.66 | 738.04  | 738.81   | 738.84 | 739.63 | 742.17 | 6.51     | 1.59       | 1.06  | Pres   | 650.05 | 652.21  | 652.76   | 652.73 | 653.27 | 655.31 | 5.26     | 1.06       | 0.77  |
|                           | V.V.   | 0.43   | 0.74    | 0.94     | 0.98   | 1.19   | 1.98   | 1.56     | 0.45       | 0.30  | V.V.   | 1.12   | 1.99    | 2.41     | 2.52   | 3.00   | 5.11   | 3.99     | 1.01       | 0.69  |
|                           | D.V.   | 43.46  | 137.28  | 162.52   | 160.26 | 186.95 | 251.92 | 208.46   | 49.67      | 37.43 | D.V.   | 58.45  | 98.98   | 118.40   | 130.23 | 157.17 | 295.28 | 236.83   | 58.20      | 40.55 |
| <b>Sayausi_PTAP_ETAPA</b> | Temp   | 8.58   | 12.21   | 12.98    | 12.97  | 13.77  | 16.85  | 8.26     | 1.57       | 1.20  | Temp   | 8.58   | 12.21   | 12.98    | 12.97  | 13.77  | 16.85  | 8.26     | 1.57       | 1.20  |
|                           | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.40     | 2.75   | 3.00   | 45.60  | 45.60    | 3.00       | 5.28  | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.40     | 2.75   | 3.00   | 45.60  | 45.60    | 3.00       | 5.28  |
|                           | HR     | 41.89  | 79.86   | 84.94    | 83.99  | 89.13  | 99.09  | 57.20    | 9.27       | 7.48  | HR     | 41.89  | 79.86   | 84.94    | 83.99  | 89.13  | 99.09  | 57.20    | 9.27       | 7.48  |
|                           | Rad    | 41.49  | 111.97  | 145.24   | 152.23 | 184.12 | 320.27 | 278.78   | 72.15      | 53.47 | Rad    | 41.49  | 111.97  | 145.24   | 152.23 | 184.12 | 320.27 | 278.78   | 72.15      | 53.47 |
|                           | Pres   | 724.57 | 726.96  | 727.68   | 727.71 | 728.48 | 730.86 | 6.29     | 1.51       | 1.02  | Pres   | 724.57 | 726.96  | 727.68   | 727.71 | 728.48 | 730.86 | 6.29     | 1.51       | 1.02  |
|                           | V.V.   | 0.21   | 0.49    | 0.59     | 0.60   | 0.70   | 1.14   | 0.93     | 0.21       | 0.16  | V.V.   | 0.21   | 0.49    | 0.59     | 0.60   | 0.70   | 1.14   | 0.93     | 0.21       | 0.16  |
|                           | D.V.   | 136.06 | 164.59  | 174.41   | 175.38 | 184.35 | 234.42 | 98.36    | 19.76      | 15.28 | D.V.   | 136.06 | 164.59  | 174.41   | 175.38 | 184.35 | 234.42 | 98.36    | 19.76      | 15.28 |
| <b>Quingeo UPS</b>        | Temp   | 8.11   | 11.38   | 12.14    | 12.09  | 12.89  | 15.93  | 7.82     | 1.51       | 1.13  | Temp   | 8.11   | 11.38   | 12.14    | 12.09  | 12.89  | 15.93  | 7.82     | 1.51       | 1.13  |
|                           | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.20     | 1.88   | 1.70   | 44.10  | 44.10    | 1.70       | 4.09  | Precip | 0.00   | 0.00    | 0.20     | 1.88   | 1.70   | 44.10  | 44.10    | 1.70       | 4.09  |
|                           | HR     | 41.25  | 78.14   | 82.88    | 82.35  | 87.46  | 99.08  | 57.83    | 9.32       | 7.59  | HR     | 41.25  | 78.14   | 82.88    | 82.35  | 87.46  | 99.08  | 57.83    | 9.32       | 7.59  |
|                           | Rad    | 51.08  | 143.84  | 172.85   | 180.78 | 208.50 | 354.75 | 303.67   | 64.66      | 51.58 | Rad    | 51.08  | 143.84  | 172.85   | 180.78 | 208.50 | 354.75 | 303.67   | 64.66      | 51.58 |
|                           | Pres   | 720.28 | 722.64  | 723.35   | 723.36 | 724.10 | 726.42 | 6.14     | 1.46       | 1.00  | Pres   | 720.28 | 722.64  | 723.35   | 723.36 | 724.10 | 726.42 | 6.14     | 1.46       | 1.00  |
|                           | V.V.   | 0.79   | 1.71    | 2.03     | 2.09   | 2.42   | 4.17   | 3.38     | 0.71       | 0.53  | V.V.   | 0.79   | 1.71    | 2.03     | 2.09   | 2.42   | 4.17   |          |            |       |



**Tabla C3. Sumario Estadístico a escala temporal mensual**

|                         | Mínimo | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo | Rango  | Rango IQ | Desv. Est. |       | Mínimo | 1er.Q  | Mediana | Promedio | 3er.Q  | Máximo | Rango  | Rango IQ | Desv. Est. |       |
|-------------------------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|------------|-------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|----------|------------|-------|
| <b>Ucumbamba_ETAPA</b>  | Temp   | 13.03  | 14.47   | 15.03    | 15.11  | 15.64  | 17.00  | 3.96     | 1.17       | 0.86  | Temp   | 11.18  | 12.47   | 12.89    | 12.97  | 13.43  | 14.79  | 3.60     | 0.96       | 0.79  |
|                         | Precip | 5.40   | 22.95   | 60.10    | 69.75  | 97.00  | 288.70 | 283.30   | 74.05      | 58.11 | Precip | 14.80  | 40.10   | 80.80    | 83.86  | 103.50 | 261.50 | 246.70   | 63.40      | 57.83 |
|                         | HR     | 72.06  | 77.23   | 80.03    | 80.19  | 82.88  | 89.41  | 17.35    | 5.65       | 4.05  | HR     | 74.29  | 81.85   | 83.78    | 83.99  | 86.65  | 91.05  | 16.76    | 4.80       | 3.87  |
|                         | Rad    | 133.30 | 152.04  | 174.33   | 169.23 | 183.34 | 207.41 | 74.11    | 31.30      | 18.84 | Rad    | 106.83 | 138.05  | 152.42   | 152.32 | 163.13 | 217.14 | 110.32   | 25.08      | 23.43 |
|                         | Pres   | 763.21 | 763.98  | 764.83   | 764.68 | 765.35 | 766.25 | 3.05     | 1.37       | 0.85  | Pres   | 726.31 | 727.13  | 727.92   | 727.71 | 728.28 | 729.01 | 2.71     | 1.14       | 0.75  |
|                         | V.V.   | 0.39   | 0.64    | 0.74     | 0.79   | 0.92   | 1.22   | 0.83     | 0.28       | 0.20  | V.V.   | 0.47   | 0.55    | 0.60     | 0.60   | 0.64   | 0.77   | 0.30     | 0.09       | 0.07  |
|                         | D.V.   | 114.64 | 130.21  | 136.24   | 137.69 | 146.99 | 165.02 | 50.39    | 16.78      | 11.03 | D.V.   | 163.56 | 171.96  | 175.89   | 175.42 | 178.53 | 187.13 | 23.57    | 6.57       | 6.20  |
| <b>UPS_UPS</b>          | Temp   | 13.53  | 14.73   | 15.30    | 15.29  | 15.76  | 16.97  | 3.44     | 1.04       | 0.77  | Temp   | 10.18  | 11.46   | 12.29    | 12.09  | 12.66  | 13.86  | 3.68     | 1.20       | 0.83  |
|                         | Precip | 7.60   | 28.10   | 63.50    | 70.46  | 95.45  | 273.80 | 266.20   | 67.35      | 56.50 | Precip | 6.90   | 28.95   | 45.00    | 57.30  | 87.20  | 170.90 | 164.00   | 58.25      | 40.52 |
|                         | HR     | 62.33  | 67.53   | 70.55    | 70.60  | 72.88  | 81.79  | 19.46    | 5.35       | 4.48  | HR     | 73.21  | 79.30   | 82.62    | 82.35  | 85.11  | 90.86  | 17.66    | 5.81       | 4.27  |
|                         | Rad    | 151.28 | 172.41  | 194.15   | 194.02 | 212.47 | 239.59 | 88.32    | 40.06      | 24.57 | Rad    | 151.75 | 165.53  | 179.28   | 180.84 | 193.00 | 217.99 | 66.24    | 27.46      | 17.98 |
|                         | Pres   | 752.33 | 753.09  | 753.92   | 753.77 | 754.42 | 755.30 | 2.98     | 1.33       | 0.82  | Pres   | 722.02 | 722.79  | 723.60   | 723.36 | 723.90 | 724.63 | 2.61     | 1.12       | 0.73  |
|                         | V.V.   | 1.29   | 1.71    | 1.78     | 1.81   | 1.92   | 2.24   | 0.95     | 0.21       | 0.22  | V.V.   | 1.57   | 1.91    | 2.07     | 2.09   | 2.25   | 2.69   | 1.11     | 0.34       | 0.28  |
|                         | D.V.   | 69.97  | 83.40   | 107.42   | 108.39 | 127.60 | 153.24 | 83.28    | 44.20      | 25.77 | D.V.   | 88.49  | 118.44  | 147.83   | 143.28 | 169.91 | 188.93 | 100.44   | 51.47      | 30.98 |
| <b>CTS_UPS</b>          | Temp   | 13.24  | 14.36   | 14.90    | 14.92  | 15.39  | 16.52  | 3.28     | 1.03       | 0.74  | Temp   | 9.07   | 10.32   | 11.13    | 11.01  | 11.52  | 12.69  | 3.61     | 1.21       | 0.85  |
|                         | Precip | 8.30   | 23.95   | 54.30    | 62.00  | 88.80  | 200.90 | 192.60   | 64.85      | 47.22 | Precip | 21.80  | 61.35   | 86.50    | 98.49  | 127.26 | 239.30 | 217.50   | 65.91      | 52.86 |
|                         | HR     | 63.75  | 70.70   | 72.29    | 73.60  | 77.33  | 84.96  | 21.21    | 6.63       | 4.87  | HR     | 82.05  | 87.52   | 89.50    | 89.37  | 91.67  | 94.28  | 12.23    | 4.15       | 2.87  |
|                         | Rad    | 134.52 | 154.08  | 172.47   | 180.48 | 204.68 | 241.24 | 106.72   | 50.60      | 29.50 | Rad    | 98.10  | 127.72  | 140.81   | 144.81 | 159.93 | 200.11 | 102.02   | 32.21      | 25.85 |
|                         | Pres   | 751.37 | 752.12  | 752.96   | 752.79 | 753.43 | 754.30 | 2.93     | 1.31       | 0.81  | Pres   | 715.05 | 715.84  | 716.68   | 716.51 | 717.10 | 717.77 | 2.73     | 1.26       | 0.79  |
|                         | V.V.   | 1.17   | 1.62    | 1.72     | 1.71   | 1.82   | 2.11   | 0.95     | 0.20       | 0.19  | V.V.   | 1.06   | 1.28    | 1.37     | 1.37   | 1.47   | 1.67   | 0.61     | 0.18       | 0.14  |
|                         | D.V.   | 98.12  | 116.89  | 139.40   | 139.00 | 159.15 | 175.85 | 77.72    | 42.26      | 23.73 | D.V.   | 133.06 | 141.98  | 144.52   | 147.94 | 154.30 | 168.38 | 35.32    | 12.32      | 9.27  |
| <b>Cebollar_ETAPA</b>   | Temp   | 12.82  | 14.09   | 14.59    | 14.60  | 15.06  | 16.33  | 3.51     | 0.97       | 0.78  | Temp   | 8.23   | 9.64    | 10.40    | 10.24  | 10.85  | 11.89  | 3.67     | 1.21       | 0.86  |
|                         | Precip | 8.00   | 34.55   | 64.00    | 73.60  | 96.60  | 252.80 | 244.80   | 62.05      | 55.66 | Precip | 18.70  | 39.35   | 59.40    | 68.79  | 90.90  | 188.20 | 169.50   | 51.55      | 38.71 |
|                         | HR     | 70.46  | 76.22   | 78.37    | 78.68  | 81.52  | 87.69  | 17.23    | 5.30       | 4.14  | HR     | 75.70  | 85.45   | 88.58    | 87.60  | 90.08  | 93.77  | 18.07    | 4.64       | 3.76  |
|                         | Rad    | 133.91 | 154.66  | 179.14   | 174.17 | 186.99 | 224.82 | 90.91    | 32.33      | 22.04 | Rad    | 141.25 | 159.24  | 172.42   | 175.19 | 189.45 | 222.83 | 81.58    | 30.21      | 20.24 |
|                         | Pres   | 742.56 | 743.36  | 744.21   | 743.99 | 744.61 | 745.44 | 2.88     | 1.25       | 0.79  | Pres   | 698.10 | 698.81  | 699.49   | 699.29 | 699.76 | 700.39 | 2.29     | 0.95       | 0.63  |
|                         | V.V.   | 0.51   | 0.62    | 0.69     | 0.68   | 0.73   | 0.85   | 0.33     | 0.11       | 0.08  | V.V.   | 1.71   | 2.39    | 2.70     | 2.74   | 3.08   | 3.51   | 1.80     | 0.69       | 0.43  |
|                         | D.V.   | 125.79 | 141.31  | 159.95   | 159.16 | 174.57 | 190.96 | 65.17    | 33.26      | 19.62 | D.V.   | 92.74  | 97.42   | 115.83   | 119.17 | 138.41 | 174.68 | 81.94    | 40.99      | 22.86 |
| <b>Tixán_ETAPA</b>      | Temp   | 12.13  | 13.31   | 13.99    | 13.97  | 14.49  | 15.75  | 3.62     | 1.18       | 0.82  | Temp   | 6.54   | 7.84    | 8.63     | 8.57   | 9.32   | 10.33  | 3.79     | 1.47       | 0.94  |
|                         | Precip | 9.10   | 25.60   | 68.60    | 75.56  | 103.35 | 254.10 | 245.00   | 77.75      | 57.12 | Precip | 38.20  | 70.95   | 94.80    | 106.47 | 134.10 | 218.30 | 180.10   | 63.15      | 46.78 |
|                         | HR     | 70.45  | 76.13   | 79.01    | 78.91  | 81.96  | 87.80  | 17.35    | 5.83       | 4.14  | HR     | 78.74  | 88.23   | 90.94    | 90.54  | 93.64  | 95.66  | 16.91    | 5.42       | 3.83  |
|                         | Rad    | 128.59 | 154.55  | 165.91   | 171.43 | 192.06 | 227.77 | 99.18    | 37.52      | 27.00 | Rad    | 85.34  | 120.77  | 135.81   | 139.15 | 157.49 | 205.59 | 120.25   | 36.72      | 27.34 |
|                         | Pres   | 737.34 | 738.16  | 739.03   | 738.78 | 739.38 | 740.19 | 2.85     | 1.23       | 0.79  | Pres   | 677.24 | 677.93  | 678.71   | 678.46 | 678.93 | 679.62 | 2.38     | 1.00       | 0.63  |
|                         | V.V.   | 0.66   | 0.86    | 0.98     | 1.02   | 1.16   | 1.34   | 0.68     | 0.30       | 0.18  | V.V.   | 1.21   | 1.41    | 1.54     | 1.56   | 1.67   | 2.02   | 0.80     | 0.26       | 0.20  |
|                         | D.V.   | 137.16 | 150.20  | 161.11   | 159.29 | 167.29 | 176.27 | 39.11    | 17.09      | 11.11 | D.V.   | 88.30  | 112.93  | 128.04   | 124.76 | 136.10 | 156.56 | 68.26    | 23.16      | 17.65 |
| <b>Tixán_UPS</b>        | Temp   | 11.86  | 13.04   | 13.61    | 13.66  | 14.08  | 15.29  | 3.43     | 1.04       | 0.76  | Temp   | 4.64   | 5.99    | 6.55     | 6.49   | 6.92   | 8.10   | 3.46     | 0.93       | 0.79  |
|                         | Precip | 8.30   | 23.70   | 57.90    | 70.58  | 101.60 | 232.40 | 224.10   | 77.90      | 53.62 | Precip | 19.30  | 42.60   | 68.40    | 74.28  | 95.80  | 185.00 | 165.70   | 53.20      | 39.74 |
|                         | HR     | 67.52  | 74.28   | 77.00    | 77.25  | 80.69  | 87.60  | 20.08    | 6.41       | 4.52  | HR     | 77.76  | 86.87   | 88.97    | 88.64  | 90.96  | 93.69  | 15.94    | 4.09       | 3.37  |
|                         | Rad    | 128.68 | 152.05  | 170.13   | 174.16 | 193.86 | 227.49 | 98.81    | 41.82      | 27.31 | Rad    | 100.54 | 134.68  | 150.45   | 155.79 | 173.29 | 223.34 | 122.81   | 38.61      | 29.16 |
|                         | Pres   | 737.47 | 738.24  | 739.07   | 738.84 | 739.43 | 740.31 | 2.83     | 1.18       | 0.79  | Pres   | 651.53 | 652.30  | 652.89   | 652.73 | 653.08 | 653.82 | 2.28     | 0.78       | 0.52  |
|                         | V.V.   | 0.62   | 0.82    | 0.96     | 0.98   | 1.14   | 1.38   | 0.76     | 0.32       | 0.20  | V.V.   | 1.79   | 2.24    | 2.40     | 2.52   | 2.81   | 3.44   | 1.66     | 0.57       | 0.41  |
|                         | D.V.   | 118.58 | 147.94  | 165.33   | 160.32 | 170.17 | 184.84 | 66.26    | 22.23      | 16.22 | D.V.   | 90.92  | 106.51  | 128.06   | 130.39 | 153.39 | 177.42 | 86.50    | 46.89      | 25.97 |
| <b>El Labrado_ETAPA</b> | Temp   | 11.18  | 12.47   | 12.89    | 12.97  | 13.43  | 14.79  | 3.60     | 0.96       | 0.79  | Temp   | 11.18  | 12.47   | 12.89    | 12.97  | 13.43  | 14.79  | 3.60     | 0.96       | 0.79  |
|                         | Precip | 14.80  | 40.10   | 80.80    | 83.86  | 103.50 | 261.50 | 246.70   | 63.40      | 57.83 | Precip | 14.80  | 40.10   | 80.80    | 83.86  | 103.50 | 261.50 | 246.70   | 63.40      | 57.83 |
|                         | HR     | 74.29  | 81.85   | 83.78    | 83.99  | 86.65  | 91.05  | 16.76    | 4.80       | 3.87  | HR     | 74.29  | 81.85   | 83.78    | 83.99  | 86.65  | 91.05  | 16.76    | 4.80       | 3.87  |
|                         | Rad    | 106.83 | 138.05  | 152.42   | 152.32 | 163.13 | 217.14 | 110.32   | 25.08      | 23.43 | Rad    | 106.83 | 138.05  | 152.42   | 152.32 | 163.13 | 217.14 | 110.32   | 25.08      | 23.43 |
|                         | Pres   | 726.31 | 727.13  | 727.92   | 727.71 | 728.28 | 729.01 | 2.71     | 1.14       | 0.75  | Pres   | 726.31 | 727.13  | 727.92   | 727.71 | 728.28 | 729.01 | 2.71     | 1.14       | 0.75  |
|                         | V.V.   | 0.47   | 0.55    | 0.60     | 0.60   | 0.64   | 0.77   | 0.30     | 0.09       | 0.07  | V.V.   | 0.47   | 0.55    | 0.60     | 0.60   | 0.64   | 0.77   | 0.30     | 0.09       | 0.07  |
|                         | D.V.   | 163.56 | 171.96  | 175.89   | 175.42 | 178.53 | 187.13 | 23.57    | 6.57       | 6.20  | D.V.   | 163.56 | 171.96  | 175.89   | 175.42 | 178.53 | 187.13 | 23.57    | 6.57       | 6.20  |
| <b>Quingeo_UPS</b>      | Temp   | 10.18  | 11.46   | 12.29    | 12.09  | 12.66  | 13.86  | 3.68     | 1.20       | 0.83  | Temp   | 10.18  | 11.46   | 12.29    | 12.09  | 12.66  | 13.86  | 3.68     | 1.20       | 0.83  |
|                         | Precip | 6.90   | 28.95   | 45.00    | 57.30  | 87.20  | 170.90 | 164.00   | 58.25      | 40.52 | Precip | 6.90   | 28.95   | 45.00    | 57.30  | 87.20  | 170.90 | 164.00   | 58.25      | 40.52 |
|                         | HR     | 73.21  | 79.30   | 82.62    | 82.35  | 85.11  | 90.86  | 17.66    | 5.81       | 4.27  | HR     | 73.21  | 79.30   | 82.62    | 82.35  | 85.11  | 90.86  | 17.66    | 5.81       | 4.27  |
|                         | Rad    | 151.75 | 165.53  | 179.28   | 180.84 | 193.00 | 217.99 | 66.24    | 27.46      | 17.98 | Rad    | 151.75 | 165.53  | 179.28   | 180.84 | 193.00 | 217.99 | 66.24    | 27.46      | 17.98 |
|                         | Pres   | 722.02 | 722.79  | 723.60   | 723.36 | 723.90 | 724.63 | 2.61     | 1.12       | 0.73  | Pres   | 722.02 | 722.79  | 723.60   | 723.36 | 723.90 | 724.63 | 2.61     | 1.12       | 0.73  |
|                         | V.V.   | 1.57   |         |          |        |        |        |          |            |       |        |        |         |          |        |        |        |          |            |       |

Apéndice D. Resultados de las pruebas de Normalidad Lilliefors y Kolmogorov-Smirnov

|         | Ucu_E        |      | UPS UPS |      | CTS_U |      | Ceb_E |      | Tix_E |      | Tix_U |      | Say_E |      | Qui_U |      | Mac_E |      | Cum_U |      | Ela_E |      | Izh_E |      |      |
|---------|--------------|------|---------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|
|         | L            | KS   | L       | KS   | L     | KS   | L     | KS   | L     | KS   | L     | KS   | L     | KS   | L     | KS   | L     | KS   | L     | KS   | L     | KS   | L     | KS   |      |
| Horaria | T-hora       | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | Precipt-hora | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | Hum-hora     | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | Rad-hora     | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | Pres-hora    | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | VV-hora      | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | DV-hora      | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | T_dia        | 0.12 | 0.53    | 0.08 | 0.45  | 0.20 | 0.64  | 0.41 | 0.81  | 0.01 | 0.17  | 0.06 | 0.40  | 0.19 | 0.63  | 0.00 | 0.08  | 0.01 | 0.17  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.02  | 0.02 | 0.26 |
| Diaria  | Precipt-dia  | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | Hum-dia      | 0.19 | 0.62    | 0.03 | 0.30  | 0.05 | 0.38  | 0.01 | 0.21  | 0.00 | 0.01  | 0.00 | 0.13  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | Rad-dia      | 0.01 | 0.22    | 0.01 | 0.18  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.11  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | Pres-dia     | 0.00 | 0.13    | 0.02 | 0.25  | 0.01 | 0.24  | 0.02 | 0.29  | 0.00 | 0.13  | 0.00 | 0.09  | 0.01 | 0.22  | 0.01 | 0.22  | 0.00 | 0.12  | 0.19 | 0.63  | 0.07 | 0.43  | 0.29 | 0.73 |
|         | VV-dia       | 0.00 | 0.05    | 0.07 | 0.43  | 0.05 | 0.37  | 0.03 | 0.30  | 0.00 | 0.01  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.03  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.04  | 0.00 | 0.14  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | DV-dia       | 0.00 | 0.14    | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.09 | 0.46  | 0.00 | 0.11  | 0.00 | 0.05  | 0.00 | 0.00  | 0.01 | 0.18  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 |
|         | T-mes        | 0.93 | 0.99    | 0.77 | 0.95  | 0.83 | 0.97  | 0.76 | 0.95  | 0.29 | 0.70  | 0.54 | 0.86  | 0.83 | 0.97  | 0.13 | 0.53  | 0.86 | 0.97  | 0.15 | 0.56  | 0.74 | 0.94  | 0.79 | 0.95 |
|         | Precipt-mes  | 0.05 | 0.39    | 0.05 | 0.43  | 0.08 | 0.48  | 0.06 | 0.44  | 0.11 | 0.54  | 0.11 | 0.50  | 0.01 | 0.27  | 0.00 | 0.15  | 0.33 | 0.73  | 0.16 | 0.62  | 0.17 | 0.62  | 0.01 | 0.19 |
| Mensual | Hum-mes      | 0.87 | 0.98    | 0.71 | 0.93  | 0.14 | 0.55  | 0.85 | 0.97  | 0.42 | 0.80  | 0.67 | 0.92  | 0.97 | 1.00  | 0.78 | 0.95  | 0.32 | 0.72  | 0.01 | 0.18  | 0.48 | 0.83  | 0.43 | 0.80 |
|         | Rad-mes      | 0.14 | 0.54    | 0.62 | 0.90  | 0.12 | 0.52  | 0.10 | 0.49  | 0.14 | 0.55  | 0.47 | 0.82  | 0.09 | 0.47  | 0.14 | 0.54  | 0.82 | 0.96  | 0.84 | 0.97  | 0.63 | 0.90  | 0.11 | 0.50 |
|         | Pres-mes     | 0.04 | 0.35    | 0.04 | 0.36  | 0.05 | 0.37  | 0.04 | 0.35  | 0.03 | 0.34  | 0.05 | 0.38  | 0.05 | 0.38  | 0.03 | 0.33  | 0.02 | 0.27  | 0.01 | 0.22  | 0.01 | 0.18  | 0.02 | 0.30 |
|         | VV-mes       | 0.27 | 0.69    | 0.08 | 0.45  | 0.20 | 0.62  | 0.85 | 0.97  | 0.12 | 0.53  | 0.18 | 0.60  | 0.97 | 1.00  | 0.35 | 0.75  | 0.98 | 1.00  | 0.17 | 0.58  | 0.16 | 0.58  | 0.04 | 0.35 |
|         | DV-mes       | 0.39 | 0.78    | 0.19 | 0.61  | 0.38 | 0.77  | 0.46 | 0.82  | 0.05 | 0.40  | 0.03 | 0.31  | 0.72 | 0.93  | 0.23 | 0.65  | 0.00 | 0.03  | 0.02 | 0.30  | 0.58 | 0.88  | 0.12 | 0.52 |

**Nota.** Nomenclatura: L= Prueba de Lilliefors; KS= Kolmogorov-Smirnov; Ucu\_E= Ucubamba ETAPA EP; UPS\_UPS= Estación Universidad Politécnica Salesiana; CTS\_U= estación Colegio Técnico Salesiano; Ceb\_E=Cebollar ETAPA EP; Tix\_E=Tixán ETAPA EP, Tix\_U=Tixán UPS; Say\_E=Sayausí ETAPA EP; Qui\_U=Quingeo UPS; Mach\_E=Machángara DJ Chulco; Cum\_U=Cumbe UPS; Ela\_E=El Labrado ETAPA EP; Izh\_E=Izhcayrrumi ETAPA EP.

Los datos sombreados corresponden a valores en donde se acepta la hipótesis nula; es decir, donde los datos siguieron una distribución normal. Los valores encerrados por un rectángulo corresponden a las pruebas donde ambas pruebas tuvieron resultados contrarios.