



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA REGISTRADA POR LA
RED DE ESTACIONES DEL IIGE-UPS

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Civil

AUTOR: MARISOL ESTEFANIA ALVAREZ MANCILLA

TUTOR: ING. VICENTE MAURICIO IÑIGUEZ MORÁN, PhD

Cuenca - Ecuador

2025

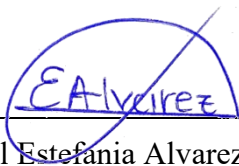
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Marisol Estefania Alvarez Mancilla con documento de identificación N° 0705614386 manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 31 de julio del 2025

Atentamente,



Marisol Estefania Alvarez Mancilla

0705614386

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Marisol Estefania Alvarez Mancilla con documento de identificación N° 0705614386, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Proyecto de investigación: “Análisis de la información climatológica registrada por la red de estaciones del IIGE-UPS”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 31 de julio del 2025

Atentamente,



Marisol Estefania Alvarez Mancilla

0705614386

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Vicente Mauricio Iñiguez Morán con documento de identificación N° 0102687191, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA REGISTRADA POR LA RED DE ESTACIONES DEL IIGE-UPS, realizado por Marisol Estefania Alvarez Mancilla con documento de identificación N° 0705614386, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 31 de julio del 2025

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**VICENTE MAURICIO
INIGUEZ MORAN**
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Vicente Mauricio Iñiguez Morán, PhD.

0102687191

Dedicatoria

Con el corazón lleno de gratitud y emoción, dedico este proyecto final a mis padres, *Gladys Mancilla y Roman Alvarez*, quienes han sido mi pilar constante a lo largo de este camino. A ustedes, que con amor, esfuerzo y sacrificio han sembrado en mí los valores que hoy me sostienen, les debo todo lo que soy y lo que he logrado. Gracias por su paciencia inagotable, por sus palabras de aliento en los momentos más difíciles y por enseñarme que los sueños se alcanzan con trabajo, fe y perseverancia.

A mis hermanos, *Gabriela Alvarez y Dilan Alvarez*, les dedico también este logro que no es solo mío, sino nuestro. A *Gabriela*, por estar presente, por su compañía constante y por ser ese apoyo firme en cada paso de este proceso. A *Dilan*, aunque la distancia física nos haya separado, sentí tu presencia acompañándome de corazón. De manera muy especial, agradezco a mi sobrino *Ian*, quien ha sido mi compañía incansable durante este trabajo. Con su ternura, su presencia constante y su apoyo hasta altas horas de la madrugada, logró que nunca me sintiera sola, dándome fuerza cuando más la necesitaba. A *Yordy*, quien ha sido un compañero invaluable en este camino. Su apoyo, comprensión y constante disposición para ayudarme hicieron la diferencia en muchos momentos clave. Gracias por estar presente, por acompañarme con paciencia, ánimo y entrega.

A través de este proceso he comprendido que los logros no se miden únicamente en títulos o metas alcanzadas, sino en las personas que caminan a nuestro lado, incluso desde lejos. A mi familia, que ha sido mi fuerza, mi refugio y mi inspiración, les entrego esta tesis como un testimonio de cuánto los amo y de cómo han marcado cada página de este trabajo con su presencia invisible pero profundamente sentida.

Finalmente, agradezco al ser más importante a Dios, por haberme dado la vida, la salud y la sabiduría para culminar esta etapa. En los momentos de incertidumbre, Su guía fue mi consuelo; en los momentos de alegría, Su amor fue mi compañía. A Él encomiendo este logro, como ofrenda de gratitud por permitirme avanzar con fe y con la esperanza firme de que, con Su bendición, lo mejor aún está por venir.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecerme a mí mismo por no haberme rendido, por mantenerme firme ante cada obstáculo que se presentó en el camino, y por haber tenido la valentía de seguir adelante aun cuando las circunstancias parecían adversas. Este proyecto final representa más que un requisito académico; es el reflejo de todo el esfuerzo, sacrificio y resiliencia que he cultivado en este proceso. Superar cada dificultad ha sido un acto de fe, disciplina y convicción personal, y hoy, con profunda satisfacción, puedo mirar atrás y reconocer lo lejos que he llegado.

Mi más sincero agradecimiento al ingeniero *Vicente Iñiguez*, tutor de este trabajo, quien ha sido un pilar fundamental para la culminación de este proyecto. Su orientación constante, su comprensión ante las circunstancias personales que atravesé y su compromiso como docente marcaron profundamente esta etapa. No fue solo un guía académico, sino también un ser humano empático, cuya disposición y apoyo hicieron posible que este trabajo avance con sentido y propósito.

Finalmente, agradezco a Dios, por haberme dado la cognición, la inteligencia y los ideales necesarios para llevar a cabo esta investigación. Ha sido Su luz la que me ha sostenido en los momentos más inciertos, y Su gracia la que me ha permitido culminar este proyecto con éxito.

Resumen

El presente proyecto de titulación tiene como finalidad analizar la información climatológica registrada por la red de estaciones meteorológicas del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) y la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), durante el periodo comprendido entre los años 2013 y 2021. La investigación responde a la creciente necesidad de comprender los patrones de variabilidad climática en la región andina sur del Ecuador, en un contexto donde el cambio climático global genera efectos significativos sobre la infraestructura, los recursos hídricos, la agricultura y la seguridad ambiental de ahí la importancia de este proyecto.

El estudio se desarrolla mediante la recolección, control de calidad, procesamiento y análisis de datos meteorológicos crudos registrados por 17 estaciones distribuidas en zonas urbanas y rurales de Cuenca. Entre las variables estudiadas se encuentran la precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Posteriormente, se realiza una estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o), elemento clave en el balance hídrico regional, mediante la aplicación de cuatro metodologías: Penman-Monteith FAO, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise y Makkink.

El procesamiento de los datos incluye el uso del Software RStudio para la imputación de valores y la elaboración de gráficos climáticos que representen de mejor manera los datos de cada estación. Sin embargo, para llegar a cumplir con lo mencionado anteriormente se cumplió con dos etapas, Etapa de trabajo 1: Se analizó el área de estudio y se identificaron vacíos y errores en las bases de datos originales con ayuda del Software Excel, Etapa del trabajo 2: Se llevó a cabo la imputación y cálculo de la ET_o por las diferentes metodologías.

Finalmente, este trabajo constituye un aporte técnico y científico para futuros estudios relacionados con el cambio climático en la región andina ecuatoriana, además de ser un insumo valioso para instituciones públicas, académicas y comunitarias que buscan tomar decisiones fundamentadas en datos meteorológicos precisos y actualizados.

Palabras Clave: Variabilidad climática, Evapotranspiración de referencia (ET_o), Estaciones meteorológicas, Cantón Cuenca y cambio climático.

Abstract

This degree project aims to analyze climatological data recorded by the network of meteorological stations from the Geological and Energy Research Institute (IIGE) and the Salesian Polytechnic University (UPS) during the period between 2013 and 2021. The research responds to the growing need to understand climate variability patterns in the southern Andean region of Ecuador, particularly in a context where global climate change is generating significant impacts on infrastructure, water resources, agriculture, and environmental security—underscoring the importance of this project.

The study is conducted through the collection, quality control, processing, and analysis of raw meteorological data recorded by 17 stations located in both urban and rural areas of Cuenca. The variables studied include precipitation, temperature, relative humidity, solar radiation, and wind speed. Subsequently, the reference evapotranspiration (ET_o), a key element in regional water balance studies, is estimated using four methodologies: Penman-Monteith FAO, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, and Makkink.

Data processing involves the use of RStudio software for value imputation and the generation of climate graphs that better represent the data from each station. However, to achieve these objectives, two key stages were completed: Work Stage 1 involved analyzing the study area and identifying gaps and errors in the original datasets using Excel; Work Stage 2 focused on value imputation and the calculation of ET_o using the different methodologies.

Ultimately, this project represents a technical and scientific contribution to future studies related to climate change in Ecuador's Andean region. It also serves as a valuable resource for public, academic, and community institutions aiming to make informed decisions based on accurate and updated meteorological data.

Keywords: Climate variability, Reference evapotranspiration (ET_o), Meteorological stations, Cuenca Canton and climate change.

Índice

1.	Introducción	1
2.	Antecedentes	3
2.1.	Importancia y Alcance	4
2.2.	Revisión de Literatura.....	5
2.2.1.	Características climáticas en los Andes del Norte	5
2.2.2.	Índices climáticos y su impacto en los Andes	5
2.2.3.	ETo y precipitación.....	6
2.2.4.	Factores que afectan la ETo.....	6
2.2.5.	Gráficos climáticos	6
2.2.6.	Análisis de Parámetros Climáticos del Austro Ecuatoriano	6
3.	Objetivos	7
3.1.	Objetivo General.....	7
3.2.	Objetivos Específicos	8
4.	Materiales y Métodos	8
4.1.	Materiales	8
4.1.1.	Programa Excel.....	8
4.1.2.	Datos Estaciones Pluviométricas	8
4.1.3.	Programa RStudio.....	9
4.1.4.	Fecha, hora y series temporales en R.....	9
4.1.4.1.	Función POSIXt	9
4.1.5.	Visualización de datos con Plotly en RStudio	10
4.1.6.	Función na.locf para reemplazo de datos.....	10
4.1.7.	Función match para supresión rangos de información	11
4.1.8.	Función write.table para generar un archivo.....	11
4.2.	Métodos	12
4.2.1.	Preprocesamiento de Datos Crudos	12
4.2.2.	Bitácoras de Preprocesamiento	12
4.2.1.	Imputación de Valores	13

4.2.2.	Bitácoras de Imputación de Valores	13
4.2.3.	Método de la FAO Penman-Monteith.....	13
4.2.4.	Método Hargreave Hargreave -Samani	18
4.2.5.	Método Jensen-Haise	18
4.2.6.	Método de Makkink.....	19
4.2.7.	Lectura del CSV posterior a la imputación.....	19
5.	Etapa de Trabajo 1	20
5.1.	Área de Estudio e Información Complementaria	20
5.2.	Preprocesamiento de Datos Crudos	22
5.3.	Bitácoras de Preprocesamiento.....	23
5.4.	Supresión de Estaciones	24
6.	Etapa de Trabajo 2	26
6.1.	Imputación de Valores	26
6.2.	Bitácoras de Imputación de Valores	36
6.3.	Cálculo de la ETo	37
6.3.1.	Método de la FAO Penman-Monteith.....	37
6.3.2.	Método Hargreaves Hargreaves -Samani	46
6.3.3.	Método Jensen-Haise	53
6.3.4.	Método de Makkink.....	60
7.	Resultados	68
7.1.	Descripción de resultados tras la comparación de los diferentes métodos versus el de la FAO Penman–Monteith	76
7.1.1.	ETo FAO Penman–Monteith vs Hargreaves-Samani	76
7.1.2.	ETo FAO Penman–Monteith vs Jensen-Haise	76
7.1.3.	ETo FAO Penman–Monteith vs Makkink	76
7.2.	Representación de Precipitación versus ETo – Referencial o Potencial	77
7.2.1.	Análisis comparativo: Dercon (1998) vs Estaciones actuales (2013–2021). 82	
7.2.2.	Análisis de la Precipitación media anual versus Altura de las Estaciones ... 83	
7.2.3.	Análisis de la Temperatura Media Anual versus Altura de las Estaciones... 85	

7.2.4.	Análisis de Estaciones Meteorológicas Ubicadas a lo Largo de un Transecto	87
7.2.5.	Análisis de la Precipitación y Temperatura Media Anual versus Altura de las Estaciones Involucradas en el Primer Transecto	92
7.2.6.	Análisis de la Precipitación y Temperatura Media Anual versus Altura de las Estaciones Involucradas en el Segundo Transecto	94
8.	Conclusiones	97
9.	Recomendaciones.....	98
10.	Bibliografía	100

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1	Duración del período del crecimiento en estación meteorológica Cuenca (2516 m.s.n.m)	7
Ilustración 2	Instalación de paquetería zoo y las librerías forecast.....	9
Ilustración 3	Fecha, hora y series temporales en R.....	10
Ilustración 4	Gráficas con Plotly	10
Ilustración 5	Reemplazo de datos con na.locf.....	11
Ilustración 6	Eliminación de información con la función match	11
Ilustración 7	Generación del archivo CSV.....	12
Ilustración 8	Tabla de datos con variables a utilizarse y vector tiempo.....	20
Ilustración 9	Estaciones meteorológicas del cantón Cuenca.....	21
Ilustración 10	Bitácora de preprocesamiento de la estación Llacao	24
Ilustración 11	Gráfico crudo – Presión Atmosférica.....	27
Ilustración 12	Corrección de anomalías – Presión Atmosférica	27
Ilustración 13	Gráfico de imputación de valores – Presión Atmosférica.....	28
Ilustración 14	Gráfico crudo - Humedad relativa máxima y mínima.....	28
Ilustración 15	Gráfico con corrección de anomalías - Humedad relativa máxima y mínima	29
Ilustración 16	Gráfico con la imputación de valores - Humedad relativa máxima.....	29
Ilustración 17	Gráfico con la imputación de valores - Humedad relativa mínima	30
Ilustración 18	Gráfico crudo - Temperatura de aire máxima y mínima.....	30
Ilustración 19	Gráfico con corrección de anomalías – Temperatura de aire máxima y mínima	31
Ilustración 20	Gráfico con la imputación de valores - Temperatura de aire máxima	31
Ilustración 21	Gráfico con la imputación de valores - Temperatura de aire mínima.....	32
Ilustración 22	Gráfico crudo - Radiación solar	32
Ilustración 23	Corrección de anomalías 1 – Radiación solar	33
Ilustración 24	Corrección de anomalías 2 – Radiación solar	33
Ilustración 25	Gráfico con la imputación de valores – Radiación solar.....	34
Ilustración 26	Gráfico crudo - Velocidad del viento.....	34
Ilustración 27	Gráfico con corrección de anomalías – Velocidad de viento.....	35
Ilustración 28	Gráfico con la imputación de valores – Velocidad de viento	35
Ilustración 29	Bitácora de imputación de valores – Baños	37
Ilustración 30	ETo FAO Penman – Monteith (Turi).....	38
Ilustración 31	ETo FAO Penman – Monteith (Baños).....	39
Ilustración 32	ETo FAO Penman – Monteith (Chauca).....	39
Ilustración 33	ETo FAO Penman – Monteith (CTS)	40
Ilustración 34	ETo FAO Penman – Monteith (Irquis)	40
Ilustración 35	ETo FAO Penman – Monteith (Llacao).....	41
Ilustración 36	ETo FAO Penman – Monteith (Molleturo).....	41

Ilustración 37	ETo FAO Penman – Monteith (San Joaquín)	42
Ilustración 38	ETo FAO Penman – Monteith (Sayausí)	42
Ilustración 39	ETo FAO Penman – Monteith (UPS)	43
Ilustración 40	ETo FAO Penman – Monteith (Santa Ana)	43
Ilustración 41	ETo FAO Penman – Monteith (Quingeo)	44
Ilustración 42	ETo FAO Penman – Monteith (Sinincay-Nero)	44
Ilustración 43	ETo FAO Penman – Monteith (Tixán)	45
Ilustración 44	ETo Hargreaves Hargreaves -Samani (Turi).....	46
Ilustración 45	ETo Hargreaves -Samani (Baños).....	46
Ilustración 46	ETo Hargreaves -Samani (Chaucha).....	47
Ilustración 47	ETo Hargreaves -Samani (CTS)	47
Ilustración 48	ETo Hargreaves -Samani (Irquis)	48
Ilustración 49	ETo Hargreaves -Samani (Llacao).....	48
Ilustración 50	ETo Hargreaves -Samani (Molleturo).....	49
Ilustración 51	ETo Hargreaves -Samani (San Joaquín)	49
Ilustración 52	ETo Hargreaves -Samani (Sayausí)	50
Ilustración 53	ETo Hargreaves -Samani (UPS)	50
Ilustración 54	ETo Hargreaves -Samani (Santa Ana)	51
Ilustración 55	ETo Hargreaves -Samani (Quingeo).....	51
Ilustración 56	ETo Hargreaves -Samani (Sinincay-Nero)	52
Ilustración 57	ETo Hargreaves -Samani (Tixán)	52
Ilustración 58	ETo Jensen-Haise (Turi)	53
Ilustración 59	ETo Jensen-Haise (Baños).....	53
Ilustración 60	ETo Jensen-Haise (Chaucha).....	54
Ilustración 61	ETo Jensen-Haise (CTS).....	54
Ilustración 62	ETo Jensen-Haise (Irquis).....	55
Ilustración 63	ETo Jensen-Haise (Llacao)	55
Ilustración 64	ETo Jensen-Haise (Molleturo)	56
Ilustración 65	ETo Jensen-Haise (San Joaquín).....	56
Ilustración 66	ETo Jensen-Haise (Sayausí).....	57
Ilustración 67	ETo Jensen-Haise UPS)	57
Ilustración 68	ETo Jensen-Haise (Santa Ana).....	58
Ilustración 69	ETo Jensen-Haise (Quingeo)	58
Ilustración 70	ETo Jensen-Haise (Sinincay-Nero).....	59
Ilustración 71	ETo Jensen-Haise (Tixán).....	59
Ilustración 72	ETo Makkink (Turi).....	60
Ilustración 73	ETo Makkink (Baños).....	60
Ilustración 74	ETo Makkink (Chaucha).....	61
Ilustración 75	ETo Makkink (CTS)	61
Ilustración 76	ETo Makkink (Irquis)	62

Ilustración 77	ETo Makkink (Llacao).....	62
Ilustración 78	ETo Makkink (Molleturo).....	63
Ilustración 79	ETo Makkink (San Joaquín)	63
Ilustración 80	ETo Makkink (Sayausí)	64
Ilustración 81	ETo Makkink (UPS)	64
Ilustración 82	ETo Makkink (Santa Ana)	65
Ilustración 83	ETo Makkink (Quingeo)	65
Ilustración 84	ETo Makkink (Sinincay-Nero)	66
Ilustración 85	ETo Makkink (Tixán)	66
Ilustración 86	Precipitación versus ETo (Turi)	77
Ilustración 87	Precipitación versus ETo (Baños)	78
Ilustración 88	Precipitación versus ETo (Chaucha)	78
Ilustración 89	Precipitación versus ETo (CTS).....	78
Ilustración 90	Precipitación versus ETo (Irquis).....	79
Ilustración 91	Precipitación versus ETo (Llacao)	79
Ilustración 92	Precipitación versus ETo (Molleturo)	79
Ilustración 93	Precipitación versus ETo (San Joaquín)	80
Ilustración 94	Precipitación versus ETo (Sayausí)	80
Ilustración 95	Precipitación versus ETo (UPS).....	80
Ilustración 96	Precipitación versus ETo (Santa Ana)	81
Ilustración 97	Precipitación versus ETo (Quingeo)	81
Ilustración 98	Precipitación versus ETo (Sinincay-Nero).....	81
Ilustración 99	Precipitación versus ETo (Tixán).....	82
Ilustración 100	Gráfica de dispersión Precipitación media anual vs Altura	84
Ilustración 101	Gráfica de dispersión Temperatura media anual vs Altura	86
Ilustración 102	Mapa de análisis climático a lo largo de un transecto (1)	88
Ilustración 103	Mapa de análisis climático a lo largo de un transecto (2)	90
Ilustración 104	Gráfica de dispersión Precipitación media anual vs Altura – Primer transecto	92
Ilustración 105	Gráfica de dispersión Temperatura media anual vs Altura – Primer transecto	93
Ilustración 106	Gráfica de dispersión Precipitación media anual vs Altura – Primer transecto	95
Ilustración 107	Gráfica de dispersión Temperatura media anual vs Altura – Primer transecto	95

Índice de Tablas

Tabla 1.	Resumen de años de información existentes por cada estación	21
Tabla 2.	Información cruda extraída del IIGE de la estación Tixán	22
Tabla 3.	Información posterior al preprocesamiento de la estación Tixán	23
Tabla 4.	Resumen de pérdida de información en cada variable.....	25
Tabla 5.	Comparación entre el método de cálculo de la ETo con la FAO Penman – Monteith Versus Hargreaves -Samani, Jensen-Haise y Makkink	68
Tabla 6.	Comparación resultados de: Dercon (1998) vs Estaciones actuales (2013– 2021)	82
Tabla 7.	Representación Precipitación media anual versus Altura	84
Tabla 8.	Representación Temperatura media anual versus Altura.....	85
Tabla 9.	Análisis del primer transecto.....	89
Tabla 10.	Análisis del segundo transecto	91
Tabla 11.	Representación Precipitación media anual versus Altura – Primer Transecto	92
Tabla 12.	Representación Temperatura media anual versus Altura – Primer Transecto	93
Tabla 13.	Representación Precipitación media anual versus Altura – Segundo Transecto	94
Tabla 14.	Representación Temperatura media anual versus Altura – Primer Transecto	95

1. Introducción

En el contexto de la creciente conciencia sobre el cambio climático, cada vez más se ha reconocido como uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI, dados los impactos cada vez más claros en el medio ambiente (por ejemplo, aumento de temperaturas), la sociedad (por ejemplo, medios de vida humanos, migración de refugiados causada por extremos climáticos), así como en la economía global.

En la realidad específica del territorio ecuatoriano, este fenómeno ha dirigido un mayor número de eventos de clima extremo como inundaciones, sequías y devastaciones de la tierra, afectando la infraestructura, la agricultura y la seguridad comunitaria. Esto requiere un conocimiento climático detallado a una escala geográfica más fina, especialmente en regiones expuestas como en el sur del país.

En el sur de la región andina de Ecuador, el clima ha cambiado, tanto en áreas urbanas como rurales, y se necesitan tomar acciones rápidamente. Sin embargo, la importancia de estos cambios no ha sido completamente analizada basándose en los datos históricos de las diferentes estaciones pluviométricas en esta área de estudio. Esto proporcionó datos valiosos para la caracterización y el clima de la región. La escasez de tales estudios es un obstáculo para esos conceptos, reduciendo la capacidad de desarrollar e implementar estrategias efectivas de adaptación y mitigación para abordar el riesgo que el cambio climático representa para las personas, la infraestructura y los recursos ecológicos.

Esta necesidad de información específica y local ha sido señalada por varios estudios regionales, por ejemplo, Condom et al. (2020), quienes muestran la escasez de información meteorológica para América del Sur, y principalmente en Ecuador, donde esta falta de monitoreo influye en la calidad de los estudios hidrológicos y climáticos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se sugiere analizar y tipificar la información meteorológica registrada en la red de observatorios del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) y las estaciones de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), entre el período 2013 - 2021. Los datos se obtienen de estaciones ubicadas en sitios urbanos y rurales

de la ciudad de Cuenca y consisten en: precipitación (P), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), humedad relativa máxima (HRmax), humedad relativa mínima (HRmin), radiación solar (RS) y velocidad del viento (U2m).

Basándose en estos datos, se intentó sacar conclusiones sobre la influencia del clima, para producir gráficos climáticos que puedan ayudar a obtener una visión rápida del desarrollo climático en el área durante el período de investigación. Este análisis será de gran ayuda para la planificación urbana y regional, la gestión de riesgos naturales y la formulación de políticas basadas en la ciencia.

El problema que motiva el presente estudio es que no se ha realizado un análisis detallado de los datos disponibles de la red IIGE – UPS para caracterizar la dinámica climática en esta parte del sur de Ecuador. La falta de estudios detallados sobre la variabilidad climática local ha significado que los eventos extremos no puedan preverse y el impacto en áreas como la agricultura, el diseño de infraestructura, la gestión ambiental y la prevención de desastres no se ha tenido en cuenta.

Para abordar tal problema, la investigación tiene como objetivo proporcionar una contribución a los estudios de variabilidad climática en el sur de Ecuador analizando las características climáticas, considerando los datos climatológicos registrados en la red de estaciones meteorológicas de IIGE – UPS. Para este propósito, los objetivos específicos son: llevar a cabo un control de calidad de los datos recopilados, estandarizando la información en diferentes escalas de tiempo; analizar el comportamiento espacial y temporal de las variables climáticas seleccionadas; y estimar la ET de referencia utilizando distintas metodologías, con el objetivo de enriquecer el conocimiento climático de la región.

Este estudio es el primer examen detallado de las bases de datos meteorológicos de los observatorios de IIGE y UPS en la provincia de Azuay, y se presenta como una contribución potencial a las políticas de adaptación y resiliencia al cambio climático. Además, tiene como objetivo proporcionar las bases para futuras investigaciones que puedan asegurar una organización territorial sostenible y una gestión más sostenible de los recursos ambientales, hídricos, agrícolas y urbanos en la región.

2. Antecedentes

Los efectos de los cambios en el clima se han convertido en un problema mundial urgente, ya que pueden ser catastróficos para el medio ambiente, la economía y la sociedad. En el caso de Ecuador, los eventos climáticos extremos de aparición rápida, como inundaciones, se han vuelto más frecuentes e intensos, lo que lleva a impactos adversos en la infraestructura, la producción agrícola y la seguridad alimentaria. El Instituto Geológico y Energético (IIGE) y la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) pusieron a disposición seis años de datos desde 2013 hasta 2021.

Para este análisis se utilizaron los datos de precipitación, temperatura, velocidad del viento, entre otros; dichos datos históricos de estaciones meteorológicas distribuidas en los sectores urbanos y rurales de la capital de la provincia de Azuay. El presente estudio se llevó a cabo con el fin de buscar algunas posibles tendencias climáticas futuras y determinar cómo era el clima en este período cubierto por este análisis, introduciendo mapas climáticos que permiten al público interesado reconocer los cambios climáticos y comprender la formación de microclimas y los patrones climáticos que pueden ser importantes en la agricultura, en la prevención de desastres naturales, en la planificación urbana y regional, como en la lluvia y probablemente en los días de lluvia. Sobre el tema, Tovar et al. (2022) afirma: "Por lo tanto, el cambio climático futuro es importante tanto para la conservación como para el bienestar humano en los Andes y las tierras bajas adyacentes" (párr. 1).

Lo más importante es que una iniciativa de caracterización y análisis climático enmarcaría este conocimiento dentro de la base empírica que es fundamental para comprender cómo está cambiando el clima y qué impactos puede tener esto en la comunidad, y permitiría la identificación e implementación de respuestas que ayudarán a reducir riesgos y maximizar oportunidades a medida que se presenten. Este tipo de análisis nunca se ha realizado para la provincia de Azuay, y es de importancia fundamental, ya que en los últimos años se ha registrado un cambio climático muy notorio. Pineda et al. (2023) en su artículo mencionan un solo evento de alta precipitación, debido a El Niño 2015/16, que ha alterado la precipitación de la temporada de invierno austral (marzo-abril). Este

cambio climático tiene un impacto muy importante en la costa de Ecuador. Notablemente, a finales del siglo XX, el calentamiento de la superficie del mar relacionado con El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) indujo lluvias e inundaciones anómalas, resultando en pérdidas económicas y humanas significativas.

Existen estudios comparables de toda la región andina de América del Sur, mientras que Condom et al. (2020) en su artículo, utilizando la Herramienta para la Evaluación de la Capacidad de los Sistemas de Observación (OSCAR), han demostrado que la densidad de datos meteorológicos e hidrológicos para América del Sur es baja y Ecuador figura como el tercer país, pero con 1,447 estaciones representando el 9.9 %, la falta de datos hidrológicos puede degradar la calidad de los resultados generados por modelos hidrológicos, haciendo que este estudio sea importante para esta región.

2.1. Importancia y Alcance

La presente investigación es altamente relevante, ya que proporciona un estudio riguroso y detallado basado en la información retrospectiva sobre la climatología observada en el sur de Ecuador, en varios lugares de la ciudad de Cuenca durante los años 2013-2021.

En un escenario de creciente influencia de los cambios climáticos, son necesarios estudios localizados que caractericen el comportamiento climático para la planificación territorial, la prevención de riesgos naturales y una gestión eficiente de los recursos hídricos y agrícolas. Este trabajo es complementario desde un punto de vista técnico y científico, con la primera referencia sobre las mediciones realizadas dentro de la red de estaciones IIGE – UPS que apoyan el conocimiento del clima regional.

El alcance de este estudio va más allá de analizar datos pasados, ya que tiene como objetivo producir productos útiles, como los resúmenes elaborados en forma de gráficos climáticos, que pueden ayudar a discernir patrones, así como las anomalías, de la evolución climática y que pueden ser utilizados para aumentar la conciencia sobre la variabilidad interanual y espacial del clima.

Estos hallazgos ayudarán a guiar a las organizaciones públicas, urbanistas, agricultores, ingenieros, responsables de políticas y a todos los interesados con los datos confiables que necesitan para estimar eventos extremos y formular estrategias adecuadas de mitigación y adaptación.

Además, la investigación creó una línea de marcha que puede ser replicada en otras partes del país, lo que ayudaría a establecer una red y, a mantener el sistema nacional de monitoreo climático. El proyecto es, por tanto, más que una ayuda instrumental para comprender el cambio climático a nivel local, ya que tiene como objetivo generar una cultura científica orientada a la sostenibilidad y al aumento de la resiliencia de las comunidades que enfrentan los peligros ambientales actuales y futuros.

2.2. Revisión de Literatura

2.2.1. Características climáticas en los Andes del Norte

La región de los Andes está definida con climas muy variados de los Andes, con las mayores variaciones en altitudes y circulación de la atmósfera. Tal variabilidad es evidente en las diferencias tanto en los patrones de precipitación como de temperatura a lo largo de los flancos orientales y occidentales de los Andes.

Es así como, con las existencia de diferentes fuentes de humedad (Océano Atlántico, Amazonas al este y Océano Pacífico al oeste) producen irregularidades climáticas.

Además, las pocas estaciones que tienen períodos de observación cortos, y los modelos climáticos generales y regionales (COM), debido a su baja resolución y la falta de registros históricos con los cuales se puedan comparar tales cambios climáticos significativos, generan informes con alta incertidumbre (Villarreal et al., 2023).

2.2.2. Índices climáticos y su impacto en los Andes

Los índices climáticos son herramientas utilizadas para describir patrones climáticos periódicos que influyen en las condiciones atmosféricas a nivel global o regional, el ENSO tiene dos fases principales: El Niño (calentamiento de las aguas del Pacífico) que induce

mayor riesgo de inundaciones y desbordamientos de ríos especialmente en Ecuador, Perú y Colombia, y como caso contrario La Niña que provoca sequías y un aumento de lluvias en otras partes de los Andes, como Bolivia (Tapia, 2024).

2.2.3. ETo y precipitación

La ETo, o evapotranspiración de referencia, es una medida que simboliza la cantidad de agua que se evapora de la superficie del suelo y transpira a través de las plantas en condiciones estándar. Mientras que la precipitación es la cantidad de agua que cae a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, granizo o aguanieve. Los mismo se relacionan para establecer el balance hídrico de una región, así mismo, el equilibrio de estos delimita si un área tiene exceso de agua o necesita ayudar con riego para mantener el crecimiento de la vegetación o los cultivos (Chen et al., 2017).

2.2.4. Factores que afectan la ETo

Entre los factores que afectan la ETo tenemos los siguientes: las variables climáticas como la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento, finalmente el manejo y condiciones ambientales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo.

2.2.5. Gráficos climáticos

Hu et al. (2019) define a los gráficos climáticos como herramientas visuales que permiten representar variables como la temperatura, la precipitación y la humedad en función del tiempo. Los mismos son útiles para analizar tendencias estacionales y comprender las variaciones a largo plazo en el clima.

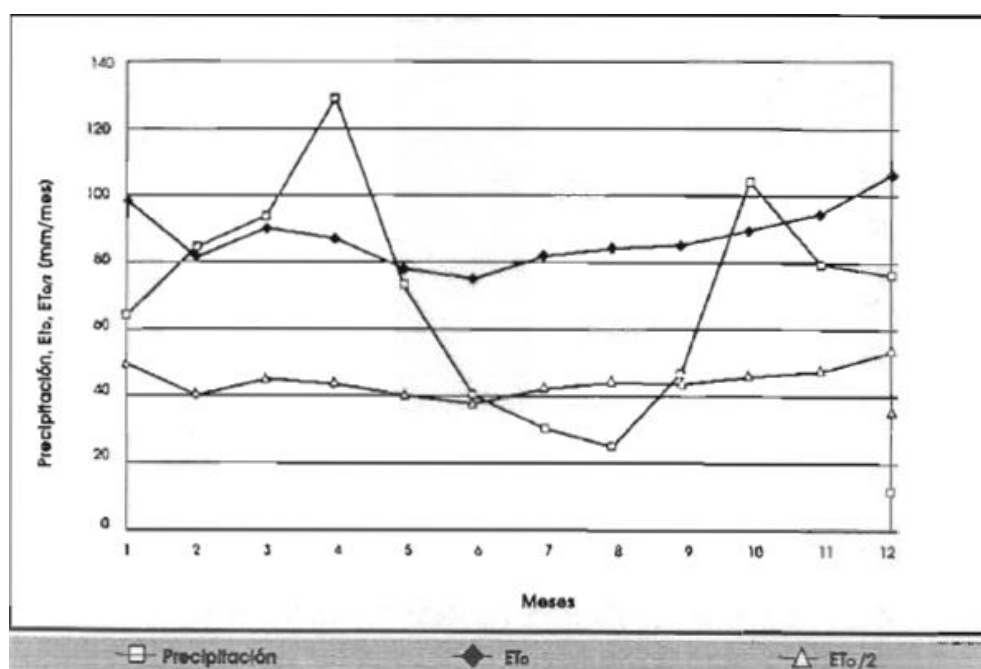
2.2.6. Análisis de Parámetros Climáticos del Austro Ecuatoriano

Dercon, (1998) en su libro analiza los parámetros climáticos del Austro Ecuatoriano, enfatiza en la diferencia entre las zonas climáticas debido a su ubicación con respecto al nivel del mar, dichas variaciones tiene como consecuencia gran variedad de temperaturas y precipitaciones, centrándonos plenamente en la región que nos compete, por tanto el clima de la Sierra es de vertiente seca que es un tipo de clima que se presenta en las laderas o vertientes

de montañas, por lo que reciben poca precipitación. En la siguiente grafica se observa que la mayor parte de las precipitaciones se producen con dos máximos, en abril y en octubre.

Para el interés de este proyecto, se utilizará este análisis como referencia principal, ya que proporciona información técnica y climáticamente relevante que resulta imprescindible para contrastar y contextualizar los resultados obtenidos en este estudio. Su contenido permite establecer comparaciones objetivas con los datos actuales, facilitando una mejor interpretación de las variaciones observadas y fortaleciendo la validez del análisis desarrollado en el presente trabajo.

Ilustración 1 Duración del período del crecimiento en estación meteorológica Cuenca (2516 m.s.n.m)



Fuente: (Dercon, 1998)

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Contribuir al conocimiento de la variabilidad climática en el sur del Ecuador en base a la información climatológica registrada por la red de estaciones del IIGE – UPS.

3.2. Objetivos Específicos

Realizar un control de calidad de la información recopilada por la red de estaciones del IIGE – UPS, esto incluye un procesamiento a diferentes escalas temporales.

Analizar temporal y espacialmente la información climatológica procesada en el objetivo anterior.

Estimar la evapotranspiración de referencia por medio de diferentes metodologías.

4. Materiales y Métodos

4.1. Materiales

4.1.1. Programa Excel

Pérez et al. (2022) en su artículo menciona la importancia del uso de hojas de cálculo de Excel en ingeniería misma que recalca debería ser una herramienta estándar y potente para automatizar cálculos y procesos relativamente complejos de forma eficiente, finalmente este estudio demuestra cómo Excel puede ser la plataforma central para desarrollar modelos hidrológicos relacionados con clima en ingeniería civil.

4.1.2. Datos Estaciones Pluviométricas

El Instituto de Investigación Geológico y Energético (2018) es un instituto de investigación científico-técnica adscrito al Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables de Ecuador, mismo que busca generar y promover conocimiento en geología y energía mediante investigación. Gracias al portal de datos abiertos del IIGE encontramos los “Registros de Estaciones Meteorológicas” y otros catálogos geológicos-energéticos, de aquí se obtuvo los datos de 16 estaciones pluviométricas ubicadas a largo de la región andina sur del Ecuador. Además, se suma los datos proporcionados por la estación meteorológica perteneciente a la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) sede Cuenca, dichos datos son proporcionados de forma cruda en formato .xlsx, que es el formato de libro de trabajo predeterminado para Excel.

4.1.3. Programa RStudio

El programa R es considerablemente utilizado en el análisis de datos climáticos, especialmente para modelado e interpolación. Existen paquetes en R como "sp", "gstat" y "rgdal" que permiten realizar interpolaciones espaciales, análisis de series temporales y crear mapas climáticos. Estos son instrumentales eficaces en el campo de la climatología para analizar grandes conjuntos de datos climáticos y realizar predicciones (Esse, 2015).

4.1.4. Fecha, hora y series temporales en R

R facilita el trabajo con datos de series temporales, aunque es importante considerar la clase de objeto utilizada, ya que esto afecta las funciones disponibles para procesar y analizar los datos. El objeto data.frame no es ideal para series temporales, por lo que existen paquetes especializados como ts, zoo, xts, lubridate y forecast. Aunque ts es la clase base para series temporales en R, sus limitaciones han impulsado el desarrollo de paquetes más completos que ofrecen nuevas formas de representación y análisis. (Linás, 2021).

Ilustración 2 Instalación de paquetería zoo y las librerías forecast

```
install.packages("zoo")
```

Error in install.packages : Updating loaded packages

Hide

```
library(forecast)
library(tseries)
```

Fuente: (Linás, 2021)

4.1.4.1. Función POSIXt

Teniendo en cuenta que los datos de las estaciones se tomaron día tras día tienen el formato de fecha y hora la función POSIXt en R permitió trabajar con fechas y horas considerando zonas horarias. Existen dos subclases principales: POSIXct y POSIXlt. Nos centramos en la subfunción POSIXct que almacena fechas y horas como el número de segundos transcurridos desde la medianoche del 1 de enero de 1970 en GMT (UTC).

La función as.POSIXct() permite convertir cadenas de texto con formato de fecha-hora (como "YYYY-mm-dd hh:mm:ss" o "YYYY/mm/dd hh:mm:ss") en objetos POSIXct. Los datos de hora, minuto y segundo son opcionales (Hartmann et al., 2023).

Ilustración 3 Fecha, hora y series temporales en R

```
string1 <- "14jan2019 14:17:30"

as.Date(string1, format = "%d%b%Y")

## [1] "2019-01-14"

as.POSIXct(string1, format = "%d%b%Y %H:%M:%S")

## [1] "2019-01-14 14:17:30 CST"
```

Fuente: (R Bootcamp, 2024)

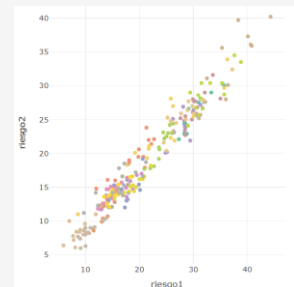
4.1.5. Visualización de datos con Plotly en RStudio

Plotly, en R, permite generar visualizaciones web interactivas a partir de gráficos creados con ggplot2 y ofrece una interfaz adaptada a la biblioteca JavaScript plotly.js. Esta herramienta se basa en los principios de la gramática de los gráficos, lo que simplifica el diseño de representaciones visuales interactivas y de alta calidad, con ayuda de la función “subplot” podemos visualizar múltiples gráficos en una sola vista (GeeksforGeeks., 2025).

Ilustración 4 Gráficas con Plotly

```
# cargamos las librerías
library(plotly)
library(ggplot2)

# cargamos los datos
library(readxl)
# Importemos el conjunto de datos
data <- read_excel("RiesgoPobrezaTasa.xls")
# un factor
plot_ly(data, x=~riesgo1, y=~riesgo2, type="scatter", mode = "markers+text", color=~ccaa)
```



Fuente: (Llinás, 2021)

4.1.6. Función na.locf para reemplazo de datos

La función na.locf() en R proviene del paquete “zoo” y se utiliza para reemplazar los valores faltantes (NA) en un vector o serie temporal utilizando el último valor no NA conocido (es decir, un forward fill o llenado hacia adelante) (Zach, 2024).

Ilustración 5 Reemplazo de datos con na.locf

```
#crear marco de datos
df <- data.frame(puntos=c(8, NA, 14, NA, 13, 28, 20, 24, 28, 30, 34, 40),
  asistencias=c(3, 8, 8, 6, 10, 14, 8, 17, 13, 9, 10, 11),
  rebotes=c(10, 8, NA, NA, 9, 5, 8, 6, 5, 4, 3, 3),
  roba=c(2, 4, 4, 5, 3, 6, 7, 5, 7, 7, 9, 12))

#ver marco de datos
df

  puntos asistencias rebotes robos
1 8 3 10 2
2 NA 8 8 4
3 14 8 NA 4
4 NA 6 NA 5
5 13 10 9 3
6 28 14 5 6
7 20 8 8 7
8 24 17 6 5
9 28 13 5 7
10 30 9 4 7
11 34 10 3 9
12 40 11 3 12
```

```
biblioteca (zoológico)

#reemplace los valores NA en cada columna con el valor más reciente disponible
na.locf(df)

  puntos asistencias rebotes robos
1 8 3 10 2
2 8 8 8 4
3 14 8 8 4
4 14 6 8 5
5 13 10 9 3
6 28 14 5 6
7 20 8 8 7
8 24 17 6 5
9 28 13 5 7
10 30 9 4 7
11 34 10 3 9
12 40 11 3 12
```

Fuente: (Zach, 2024)

4.1.7. Función match para supresión rangos de información

En RStudio, la función `match()` sirve para localizar las posiciones donde los elementos de un vector aparecen por primera vez en otro vector. Es decir, tomando dos vectores como entrada, esta función retorna un vector que indica la posición de la primera coincidencia de cada elemento del primer vector dentro del segundo. Si algún elemento del primer vector no se encuentra en el segundo, la función devuelve NA para ese elemento (Zach, 2021).

Ilustración 6 Eliminación de información con la función match

```
# R program to match the vectors

# Creating vectors
x1 <- c("a", "b", "c", "d", "e")
x2 <- c("d", "f", "g", "a", "e", "k")

# Calling match function
match(x1, x2)
```

Producción:

```
[1] 4 NA NA 1 5
```

Fuente: (Zach, 2021)

4.1.8. Función write.table para generar un archivo

Esta función se utiliza para exportar un dataframe o una matriz a un archivo en R, convierte un dataframe en un archivo de texto en R y permite escribir dataframes en diversos

archivos separados por espacios, como archivos CSV (valores separados por comas) (GeeksforGeeks, 2021).

Ilustración 7 Generación del archivo CSV

```
setwd("C:/Users/Raul Ortiz/Desktop/Proyectos R")

plantas = c(15,16,18,18,12,12,25,10,15,22,14,14,16,4,8,5,7,3,9,12) # Plantas nacidas por m2
tratamiento = c("s","s","s","s","s","s","s","s","s","s","n","n","n","n","n","n","n","n","n")

Datos = data.frame(tratamiento, plantas) # Creamos un df con los dos vectores.

write.csv(Datos, file="Prueba1.csv")
```

Fuente: (Ortiz, 2022)

4.2. Métodos

4.2.1. Preprocesamiento de Datos Crudos

Se desarrolló el preprocesamiento de los datos en estado crudo mismo que se detalla a mayor precisión en la etapa de trabajo 1. Con ayuda del software Excel se identificaron y organizaron las columnas correspondientes, se eliminaron datos innecesarios como columnas vacías, filas con estadísticas (promedios, máximos, mínimos), y campos como “Time” y “DC”. Además, se revisaron las fechas para detectar vacíos de información, se ajustó el formato de fecha y hora, y se estandarizaron los valores faltantes con “NA”. Finalmente, el archivo fue guardado en formato CSV para su posterior análisis.

4.2.2. Bitácoras de Preprocesamiento

Como parte del análisis de datos meteorológicos del IIGE, se elaboraron bitácoras de preprocesamiento para las 17 estaciones, donde se registraron inconsistencias como celdas vacías, fechas incongruentes y caracteres no válidos. Se utilizaron valores "NA" para reemplazar datos faltantes o erróneos, empleando herramientas de Excel para facilitar este proceso. Este paso fue fundamental para preparar los datos antes de la imputación, la cual requiere un tratamiento más riguroso mediante software especializado que garantice la coherencia y validez estadística de los registros.

4.2.1. Imputación de Valores

Durante la etapa de imputación de valores, se utilizó el software RStudio para verificar la calidad y estructura de los datos antes de aplicar los procedimientos de imputación. Se corrigieron errores de formato y se aseguró que cada archivo tuviera la estructura adecuada para su análisis.

Posteriormente, se realizaron controles de calidad e imputación para variables meteorológicas clave como presión atmosférica, humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar y velocidad del viento. Todo el proceso fue documentado gráficamente, lo que permitió identificar y tratar adecuadamente los vacíos e inconsistencias según las características de cada estación.

4.2.2. Bitácoras de Imputación de Valores

La bitácora de imputación de valores para cada una de las 17 estaciones meteorológicas recoge las anomalías detectadas en los datos ya preprocesados, detallando inconsistencias en variables como presión atmosférica, humedad relativa máxima y mínima, temperatura de aire máxima y mínima, radiación solar y velocidad de viento. Este análisis se apoyó en gráficos generados con R, que permitieron visualizar y documentar los errores y vacíos encontrados. Estas bitácoras tienen como finalidad ofrecer una evidencia clara del proceso de imputación, sirviendo como respaldo técnico para futuras investigaciones.

4.2.3. Método de la FAO Penman-Monteith

Penman-Monteith en 1948, combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento (Guevara, 2013).

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Donde:

ET_o : evapotranspiración de referencia ($mm \text{ día}^{-1}$)

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

R_a : radiación extraterrestre ($mm \text{ día}^{-1}$)

G : flujo del calor de suelo ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) = 0 para datos diarios

T : temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}C$)

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura ($m \text{ s}^{-1}$)

e_s : presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$: déficit de presión de vapor (kPa)

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}$)

γ : constante psicrométrica ($kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}$)

Para cada una de estas variables la Food and Agriculture Organization of the United Nations, (1998) establece como calcularlas, es así que para:

La presión atmosférica, (P) es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. Se puede emplear una simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de $20^{\circ}C$:

$$P = 101.3 \cdot \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26} [kPa]$$

Donde:

z : Elevación sobre el nivel del mar [m]

La constante psicrométrica, (γ), se calcula por:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} [kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}]$$

Donde:

λ : calor latente de vaporización, $2,45 [MJ \text{ kg}^{-1}]$

c_p : calor específico a presión constante, $1,013 \times 10^{-3} [MJ \text{ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}C^{-1}]$

ε : cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622

Para el cálculo de la temperatura media (T_{media}), tenemos:

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Donde:

T_{max} : Temperatura máxima = 17 °C

T_{min} : Temperatura mínima = 7 °C

La presión de saturación de vapor (e_s), puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2}$$

Donde:

$$e^o(T_{max}) = 0.6108 \cdot \exp \left[\frac{17.27 \cdot T_{max}}{T_{max} + 237.3} \right]$$

$$e^o(T_{min}) = 0.6108 \cdot \exp \left[\frac{17.27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right]$$

La Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ) a una temperatura dada se da por:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0.6108 \cdot \exp \left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

Donde:

exp: 2.7183 (base de logaritmo natural)

La Presión real de vapor (e_a) se puede también derivar de la humedad relativa. Dependiendo de la disponibilidad de datos de humedad, se calcula:

$$e_a = \frac{e^o(T_{min})HR_{max} + e^o(T_{max})\frac{HR_{min}}{100}}{2}$$

Donde:

HR_{max} : humedad relativa máxima [%] = 95

HR_{min} : humedad relativa mínima [%] = 65

La Radiación extraterrestre para periodos diarios (R_a) se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)]$$

$$G_{sc}: \text{constante solar} = 0,082 \text{ MJ m}^2 \text{ min}^{-1}$$

La distancia relativa inversa Tierra-Sol, (d_r), y la declinación solar, (δ), están dadas por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right)$$

Donde:

J : número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre)

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol, (w_s), se da por:

$$w_s = \text{arcos}[-\tan(\delta)\tan(\varphi)]$$

La duración máxima de la insolación (N), está dada por:

$$N = \frac{24}{\pi} w_s$$

La Radiación solar de onda corta (R_s) puede ser calculada a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a$$

Donde:

n : dato de entrada duración real de la insolación = 8 horas

a_s : constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados ($n = 0$)

$a_s + b_s$: fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ($n = N$).

Radiación solar en un día despejado (R_{so}), puede ser calculada de la siguiente forma:

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a$$

La radiación neta de onda corta (R_{ns}) resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada está dada por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

Donde:

α : albedo o coeficiente de reflexión del cultivo = 0,23

La Radiación neta de onda larga (R_{nl}) es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia, se calcula:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K^4} + T_{min,K^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

Donde:

σ : constante de Stefan – Boltzmann [$4,903 \times 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} día^{-1}$]

$T_{max,K}$: temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [K
= °C + 273,16]

$T_{min,K}$: temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [K
= °C + 273,16]

La radiación neta (R_n) es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

La velocidad del viento (u_2) a diversas alturas sobre la superficie del suelo tiene valores diferentes, se puede usar una relación logarítmica:

$$u_z = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)}$$

Donde:

u_z : velocidad del viento medida a z m sobre la superficie [$m s^{-1}$],

z : altura de medición sobre la superficie [m]

4.2.4. Método Hargreave Hargreave -Samani

Este método, propuesto por Hargreave & Samani, (1985), es una alternativa más simple en comparación con la ecuación de Penman-Monteith, que es el método estándar utilizado por la FAO para estimar la ET_o . Este método reduce la complejidad, ya que solo necesita ciertos parámetros meteorológicos más accesibles.

$$ET_o = 0.0135 \cdot KT \cdot R_a \cdot (T + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Donde:

KT : 0,162 por regiones internas y 0,19 para regiones costeras

R_a : radiación extraterrestre ($mm \text{ día}^{-1}$)

T : temperatura media ($^{\circ}C$)

T_{max} : temperatura máxima ($^{\circ}C$)

T_{min} : temperatura mínima ($^{\circ}C$)

4.2.5. Método Jensen-Haise

El método Jensen-Haise es útil especialmente para estimar la ET_o en zonas donde se dispone de datos de temperatura y radiación solar, pero se carece de información más detallada (como velocidad del viento o humedad relativa) que se requiere en métodos más complejos como el de Penman-Monteith (Ortiz C. & Chile A., 2020).

$$ET_o = R_s \cdot (0.0252 \cdot T + 0.078)$$

Donde:

R_s : radiación solar de onda corta ($MJ m^{-2} \text{ día}^{-1}$)

T : temperatura media ($^{\circ}C$)

4.2.6. Método de Makkink

Es un enfoque empírico para estimar la ET_o , basado principalmente en la radiación solar y la temperatura del aire. Es una simplificación del método de Penman, diseñada para proporcionar una estimación razonablemente precisa de la ET_o con un número reducido de parámetros, lo que lo hace especialmente útil en regiones donde no se dispone de datos meteorológicos completos (Cruz, 2014).

$$ET_o = 0.61 \cdot \frac{R_s}{\lambda} \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0.12$$

Donde:

R_s : radiación solar de onda corta ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

λ : calor latente de vaporización, 2,45 [$MJ kg^{-1}$]

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa °C^{-1}$)

γ : constante psicrométrica ($kPa °C^{-1}$)

4.2.7. Lectura del CSV posterior a la imputación

Se usó la función `read.table()` para leer archivos de texto y convertirlos en data frames, lo cual es muy útil para importar datos desde archivos .txt, .csv u otros formatos de texto delimitado, se realiza la lectura de nuestro archivo tomando en cuenta el formato de este. Además, se da lectura de fechas y horas según corresponda a cada estación.

Ilustración 8 Tabla de datos con variables a utilizarse y vector tiempo

PA	HRmax	HRmin	TAmx
Min. :747.6	Min. : 19.00	Min. : 16.00	Min. : 3.80
1st Qu.:752.7	1st Qu.: 61.00	1st Qu.: 53.00	1st Qu.:13.30
Median :753.8	Median : 77.00	Median : 69.00	Median :15.20
Mean :753.7	Mean : 75.05	Mean : 67.78	Mean :15.94
3rd Qu.:754.9	3rd Qu.: 89.00	3rd Qu.: 81.00	3rd Qu.:18.50
Max. :759.0	Max. :100.00	Max. :100.00	Max. :27.40
T Amin	SR	VV	VV2m
Min. : 2.50	Min. : 0.0	Min. :0.000	Min. :0.0000
1st Qu.:12.60	1st Qu.: 0.0	1st Qu.:0.800	1st Qu.:0.5984
Median :14.20	Median : 0.0	Median :1.300	Median :0.9723
Mean :14.72	Mean : 191.5	Mean :1.761	Mean :1.3173
3rd Qu.:16.80	3rd Qu.: 336.0	3rd Qu.:2.500	3rd Qu.:1.8699
Max. :25.20	Max. :1223.0	Max. :8.200	Max. :6.1332

```

>
> tiempo <- seq(as.POSIXct("2013-12-19 14:00:00", tz = "UTC"),
+             as.POSIXct("2021-01-12 20:00:00", tz = "UTC"),
+             by = "1 hour")
> str(tiempo)
POSIXct[1:61951]. format: "2013-12-19 14:00:00" "2013-12-19 15:00:00"

```

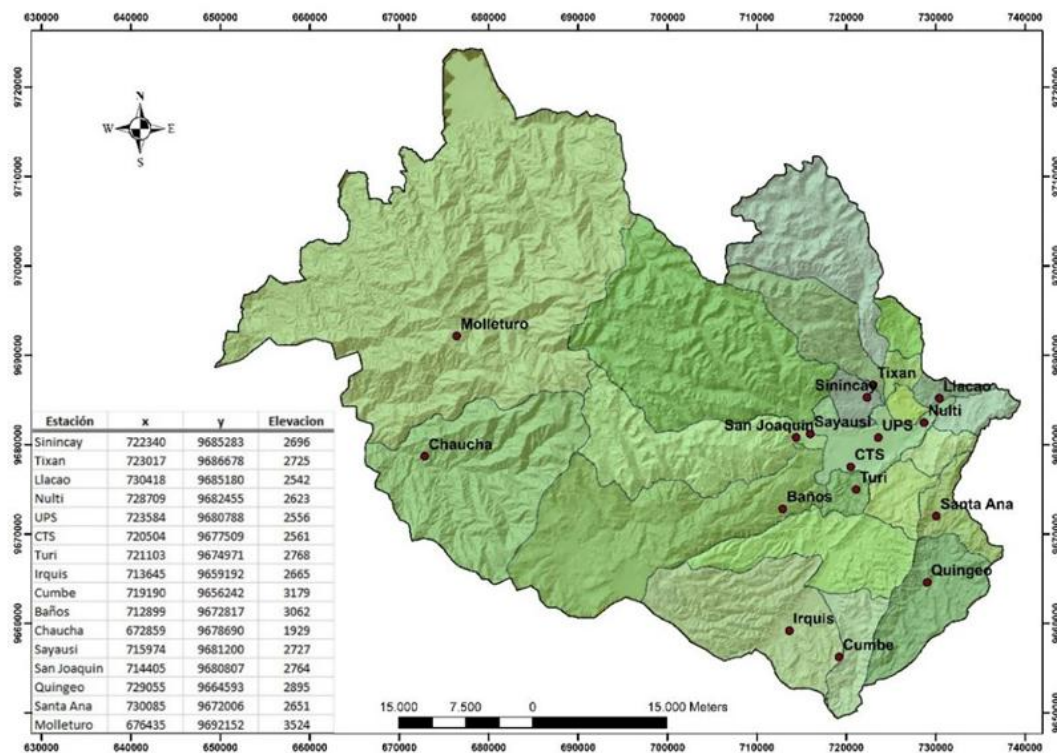
Fuente: Autor

5. Etapa de Trabajo 1

5.1. Área de Estudio e Información Complementaria

El presente análisis se extendió a lo largo de las 16 estaciones del IIGE y una de la UPS en los periodos de 2013 a 2021. Dichas estaciones estarían ubicadas en: Baños, Cajas, Chaucha, Cumbe, Irquis, Llacao, Molleturo, Nulti, Quingeo, San Joaquín, Santa Ana, Sayausí, Sinincay, Tixán, Turi, Colegio Técnico Salesiano (CTS) y en la UPS sede Cuenca.

Ilustración 9 Estaciones meteorológicas del cantón Cuenca



Fuente: (Delgado Orellana & Orellana Samaniego, 2015)

Conforme a la información anterior la siguiente tabla resume el rango de años de los que tenemos información en cada estación.

Tabla 1. Resumen de años de información existentes por cada estación

Nº	Estaciones Meteorológicas	Información existente en cada base									
		AÑOS									
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
1	Turi		X	X	X	X	X	X	X	X	
2	Baños	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
3	Cajas			X	X	X	X	X	X	X	
4	Chaucha		X	X	X	X	X	X	X	X	
5	CTS		X	X	X	X	X	X	X		
6	Cumbe	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
7	Irquis		X	X	X	X	X	X	X	X	
8	Llacao		X	X	X	X	X	X	X	X	
9	Molleturo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
10	Nulti	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
11	San Joaquín	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
12	Sayausi	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
13	UPS		X	X	X	X	X	X	X	X	
14	Santa Ana		X	X	X	X	X	X	X	X	
15	Quingeo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
16	Sinincay - Nero	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
17	Tixán	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Fuente: Autor

5.2. Preprocesamiento de Datos Crudos

Cuando los datos son recolectados por estaciones meteorológicas (automáticas o manuales), generalmente incluyen varias variables como temperatura, humedad, precipitación, velocidad del viento, radiación solar, etc., en formatos crudos. Para dar lugar a este preprocesamiento se hizo lo siguiente:

1. Se identificó cada variable en cada columna
2. En caso de existir columnas vacías eliminarlas.
3. Se eliminaron las filas de unidades y todas las que contienen promedio, máximos y mínimos.
4. Se eliminó la columna denominada “Time” y “DC”.
5. Se examinó detalladamente las fechas buscando posibles vacíos de información.
6. Se configuró al formato correcto la columna de fecha y hora.
7. Se reemplazó con “NA” cualquier celda en blanco o carácter diferente.
8. Se guardó el archivo Excel en formato CSV (valores separados por comas) para facilitar la lectura de datos en la siguiente etapa del trabajo.

Tabla 2. Información cruda extraída del IIGE de la estación Tixán

Date	Time	Local Time	DC	PAAVG1H	PAMAX1H	PAMIN1H	PRSUM1H	RHAVG1H	RHMAX1H
			V	hPa	hPa	hPa	mm	%	%
19/12/2013	19:00:00	14:00:00	13.1	735.5	735.7	735.4	0.0	/	/
19/12/2013	20:00:00	15:00:00	13.3	735.2	735.4	735.0	0.6	53.0	65.0
19/12/2013	21:00:00	16:00:00	13.2	735.1	735.2	735.0	0.0	67.0	71.0
19/12/2013	22:00:00	17:00:00	12.9	735.3	735.3	735.2	0.0	74.0	78.0
19/12/2013	23:00:00	18:00:00	12.8	735.4	735.6	735.3	0.0	79.0	83.0
20/12/2013	0:00:00	19:00:00	12.7	735.9	736.1	735.6	0.0	84.0	85.0
20/12/2013	1:00:00	20:00:00	12.6	736.4	736.7	736.1	0.0	85.0	87.0
20/12/2013	2:00:00	21:00:00	12.6	737.0	737.3	736.7	0.0	89.0	90.0
20/12/2013	3:00:00	22:00:00	12.6	737.4	737.5	737.2	0.0	87.0	88.0
20/12/2013	4:00:00	23:00:00	12.6	737.6	737.7	737.4	0.0	88.0	89.0
20/12/2013	5:00:00	0:00:00	12.6	737.6	737.6	737.4	0.0	88.0	89.0
PROMEDIO			12.8	736.2	736.4	736.0	0.1	79.4	82.5
MÁXIMO			13.3	737.6	737.7	737.4	0.6	89.0	90.0
MÍNIMO			12.6	735.1	735.2	735.0	0.0	53.0	65.0

Fuente: (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2024)

Tabla 3. Información posterior al preprocesamiento de la estación Tixán

Fecha y Hora	PAAVG1H	PAMAX1H	PAMIN1H	PRSUM1H	RHAVG1H	RHMAX1H
19/12/2013 14:00	735.5	735.7	735.4	0	NA	NA
19/12/2013 15:00	735.2	735.4	735	0.6	53	65
19/12/2013 16:00	735.1	735.2	735	0	67	71
19/12/2013 17:00	735.3	735.3	735.2	0	74	78
19/12/2013 18:00	735.4	735.6	735.3	0	79	83
19/12/2013 19:00	735.9	736.1	735.6	0	84	85
19/12/2013 20:00	736.4	736.7	736.1	0	85	87
19/12/2013 21:00	737	737.3	736.7	0	89	90
19/12/2013 22:00	737.4	737.5	737.2	0	87	88
19/12/2013 23:00	737.6	737.7	737.4	0	88	89
20/12/2013 0:00	737.6	737.6	737.4	0	88	89

Fuente: Autor

5.3. Bitácoras de Preprocesamiento

En el transcurso del desarrollo de los programas para analizar los datos meteorológicos recuperados del IIGE, se realizaron registros de preprocesamiento para cada una de las 17 estaciones. Estos registros documentaron inconsistencias para cada una de las bases de datos, como celdas en blanco, fechas que no tenían sentido, caracteres peculiares, etc. También se registró el número de celdas llenas con "NA" en caso de falta total de datos o cuando los valores no numéricos ingresados en las celdas no permitían un análisis cuantitativamente confiable.

Estos registros son un complemento técnico crítico para todo trabajo futuro que pretende utilizar esta tesis como referencia, ya que ofrecen una imagen clara y precisa del estado inicial de los datos y el tratamiento realizado. En este paso, se utilizaron los comandos de buscar y reemplazar de Excel, lo que ayudó a encontrar y reemplazar cada uno de los factores mencionados anteriormente. Este paso nos permite proceder al siguiente paso del trabajo; sin embargo, es importante reemplazar los valores "NA" generados durante el preprocesamiento por otro software que requiera un enfoque más estricto utilizando la lógica de continuidad temporal y coherencia estadística de las variables meteorológicas.

A continuación, se presenta una lista de hechos sobre lo mencionado anteriormente en la estación de Llaeo:

Ilustración 10 Bitácora de preprocesamiento de la estación Llaqueo

```

Bitácora de procesamiento de datos - Llaqueo

Para todas las bases de datos y todos los años se realizó lo siguiente:
1. Se eliminaron todas las filas que contienen promedio, máximo y mínimos.
2. Se eliminaron todas las columnas de "Time".
3. Se eliminaron todas las columnas de "DC".
4. Se eliminó la fila que contenía las unidades de medida.

Con ayuda de la opción de Buscar y reemplazar de Excel identificamos los siguientes
caracteres extraños y los reemplazamos con NA.
1. /
2. //
3. -
4. Celdas en blanco

Obtuve lo siguiente:
-----
Esta base de datos contiene información desde el 2014 al 2021.

Año 2014:
- / hubo 35 reemplazos.
- // hubo 6 reemplazos.
- - hubo 0 reemplazos.
- Celdas vacías hubo 288 reemplazos.
Se repiten los datos del 01/01/2015 1:00:00.
|
Año 2015:
- / hubo 0 reemplazos.
- // hubo 0 reemplazos.
- - hubo 3 reemplazos.
- Celdas vacías hubo 72 reemplazos.
Datos completos.

Año 2016:
- / hubo 0 reemplazos.
- // hubo 0 reemplazos.
- - hubo 0 reemplazos.
- Celdas vacías hubo 48 reemplazos.
Existen datos desde el 01/01/2016 1:00:00 pero culmina el 01/01/2016 18:00:00
directamente pasa a la información del 02/01/2016 19:00:00. Se repite lo mismo para todo el Año.

Año 2017:
- / hubo 166879 reemplazos.
- // hubo cero reemplazos.
- - hubo 3725 reemplazos.
- Celdas vacías hubo 336 reemplazos.
Para este Año se repite el mismo proceso que el Año 2016, los datos sólo
llegaban todos los días a tomarse hasta las 18:00:00 y pasaban al siguiente día desde las 19:00:00.

```

Fuente: Autor

5.4. Supresión de Estaciones

La eliminación de estaciones meteorológicas específicas de las 17 consideradas se considera estimando el porcentaje de pérdida de información en las variables necesarias para determinar la ETo. Cuando se reconoce una gran pérdida de datos que afecta variables básicas como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar o la velocidad del viento, y el reemplazo no fue lo suficientemente posible debido a la magnitud de las brechas de datos, se determina que tales estaciones debían ser eliminadas del análisis.

Esta decisión metodológica se justifica por el hecho de que algunas estaciones tenían registros con brechas debido a fallos prolongados de datos o desoperación, lo que comprometía la calidad y continuidad de la serie temporal. Aunque la razón exacta de estas pérdidas no se puede determinar con certeza y dicho análisis está más allá del alcance de este estudio, se obtuvo un enfoque confiable para el análisis, ya que se seleccionan la mayoría de

las estaciones con datos consistentes y, por lo tanto, resultados más precisos en el cálculo de la ETo utilizando los diversos métodos empleados. Se presenta una tabla resumen de la pérdida de información que se forma en cada estación.

Tabla 4. Resumen de pérdida de información en cada variable

Porcentaje de Pérdida de información de variables antes de la imputación de valores para el cálculo de la ETo							
Estaciones Meteorológicas	Variables						
	PA	HR (max)	HR (min)	RS	TA (max)	TA (min)	VV
Turi	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	10.8%
Baños	4.1%	4.1%	4.1%	4.1%	4.1%	4.2%	4.2%
Cajas	14.8%	14.8%	14.8%	14.8%	14.8%	14.8%	14.8%
Chauca	9.8%	9.8%	9.8%	10.1%	9.8%	9.8%	10.2%
CTS	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	22.7%
Cumbe	54.7%	54.7%	54.7%	54.7%	54.7%	54.7%	55.1%
Irquis	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	23.6%
Llacao	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%
Molleturo	6.4%	6.4%	6.4%	6.4%	6.4%	6.4%	6.7%
Nulti	4.4%	26.3%	26.3%	26.0%	4.4%	4.4%	17.5%
San Joaquín	4.1%	4.1%	4.1%	4.1%	4.1%	4.1%	14.2%
Sayausí	2.8%	2.8%	2.8%	2.8%	2.8%	2.8%	23.0%
UPS	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.1%
Santa Ana	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	27.2%
Quingeo	2.4%	2.4%	2.4%	2.4%	2.4%	2.4%	2.5%
Sinincay - Nero	11.1%	11.1%	11.1%	11.1%	11.1%	11.1%	11.2%
Tixán	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	4.8%	1.4%

Nota: PA: Presión atmosférica, HR(max): Humedad relativa máxima, HR(min): Humedad relativa mínima, RS: Radicación solar, TA(max): Temperatura de aire máxima, TA(min): Temperatura de aire

Fuente: Autor

Basado en los resultados presentados anteriormente, deducimos lo siguiente:

En el caso de las estaciones que están excluidas por pérdida de información, no podemos realizar el análisis y la estimación de la ETo para la estación "Cajas", porque la pérdida de información es del 14.8% de todas las variables.

En cuanto a la estación "Cumbe", tenemos un 54% a 55% de datos desperdiciados, y en la estación "Nulti" se supera el 15% de pérdida de información para las variables más importantes.

La exclusión de estas estaciones del presente análisis es razonable, ya que, en el paso siguiente, la imputación de valores resultaría poco confiable debido a la pérdida sustancial de información.

6. Etapa de Trabajo 2

6.1. Imputación de Valores

En la etapa de imputación de valores, se aplicó el software de código abierto RStudio para validar la calidad de los datos antes de la imputación. Se utilizó un script específico de R, que debía ser capaz de analizar las primeras 5 líneas de cada archivo, y al analizar cada archivo, debía reconocer la primera fila como nombres de variables (caracteres) y las otras columnas como datos numéricos. Para los protocolos que no se ajustaban a esta estructura, se agregaron líneas de código donde era necesario para normalizar problemas de formato o estructura, para facilitar la lectura e interpretación de los datos.

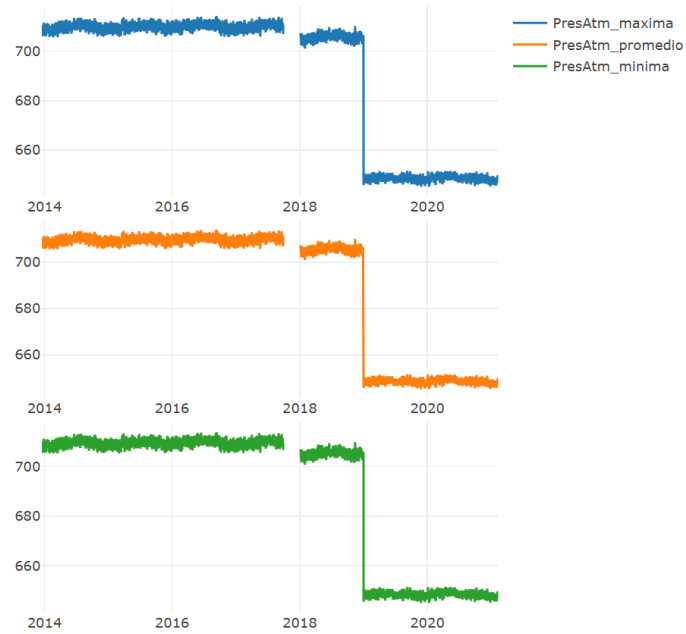
Después de verificar la veracidad estructural de los datos, se evaluó la longitud de los registros y se aplicaron controles de calidad e imputación de valores a cada variable meteorológica:

1. Presión atmosférica.
2. Humedad relativa (máxima y mínima).
3. Temperatura del aire (máxima y mínima).
4. Radiación solar global.
5. Velocidad del viento.

Para cada variable, las funciones de control de calidad identificaron y eliminaron valores atípicos o incorrectos y luego las funciones de imputación llenaron cualquier dato faltante mediante reemplazo condicional (es decir, con valores basados en los valores medidos). En el presente registro, en el que es tan importante describir gráficamente cada imputación, estos libros les permitirán visualizar sus datos e incluso determinar el tipo de tratamiento que deben recibir, dependiendo de sus propias características y la extensión de las observaciones faltantes en cada estación.

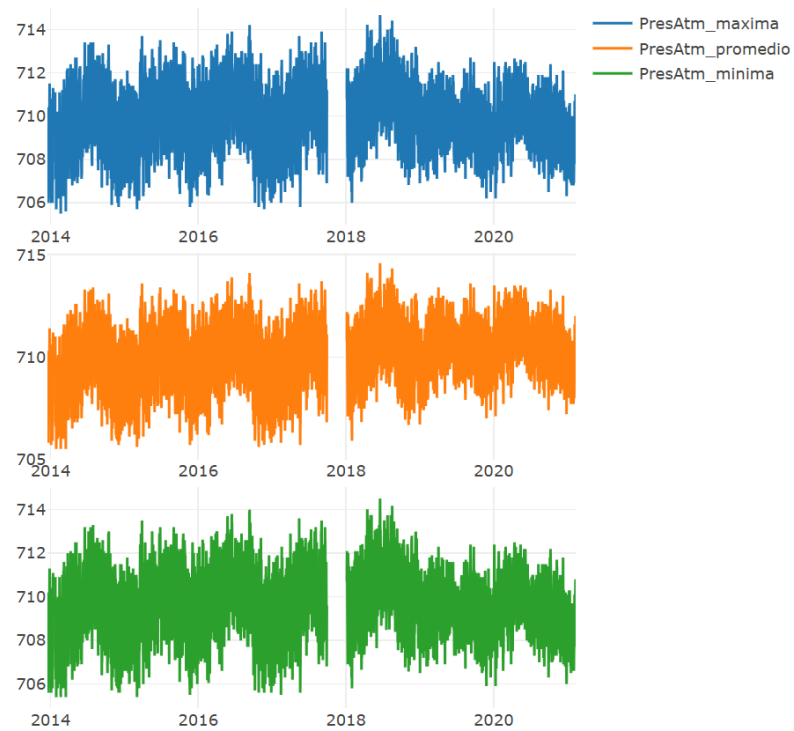
A continuación, se muestra un ejemplo gráfico de cómo se realiza la imputación de valores y la corrección de anomalías con la ejecución del código en RStudio para la estación de Baños.

Ilustración 11 Gráfico crudo – Presión Atmosférica



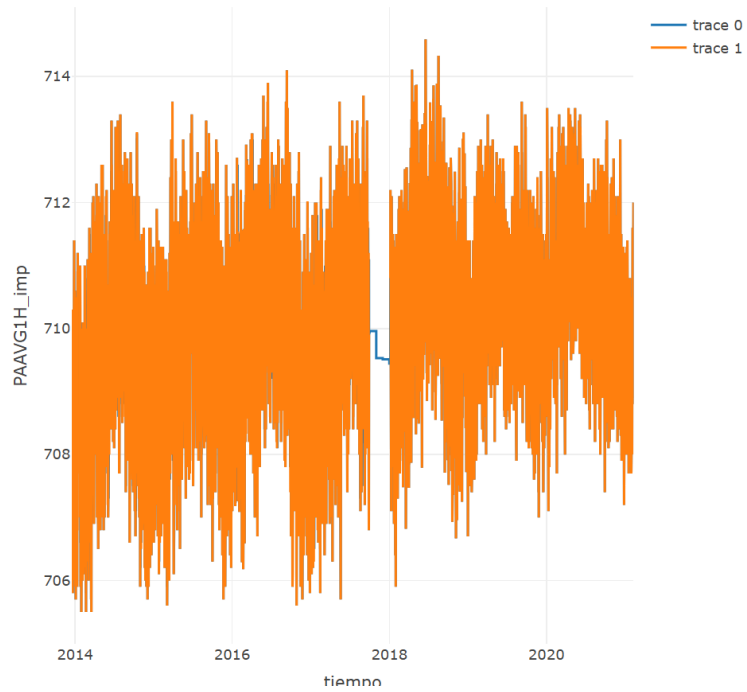
Fuente: Autor

Ilustración 12 Corrección de anomalías – Presión Atmosférica



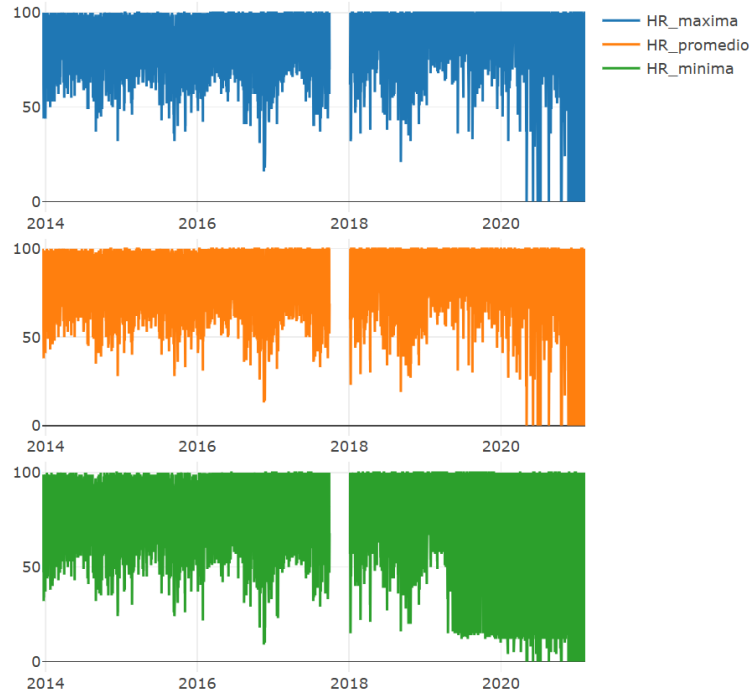
Fuente: Autor

Ilustración 13 Gráfico de imputación de valores – Presión Atmosférica



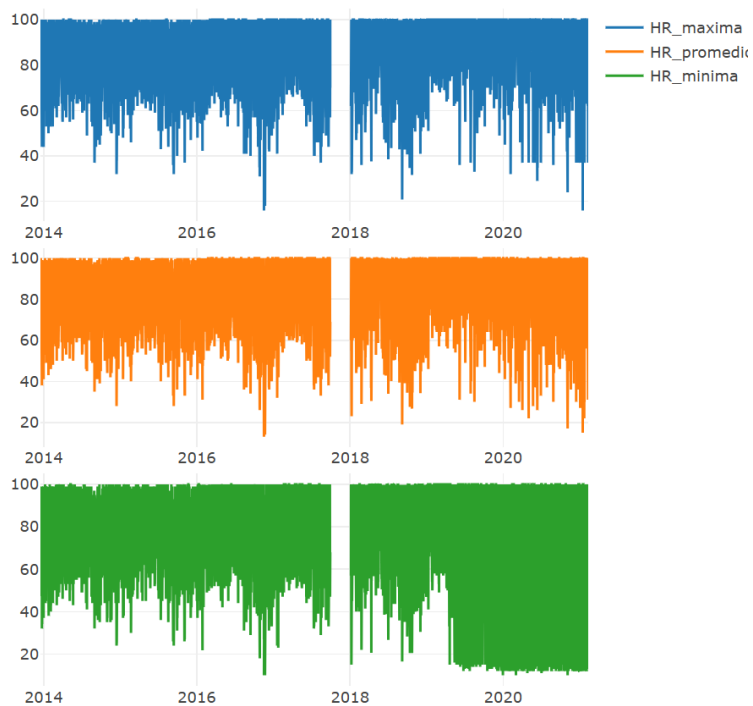
Fuente: Autor

Ilustración 14 Gráfico crudo - Humedad relativa máxima y mínima



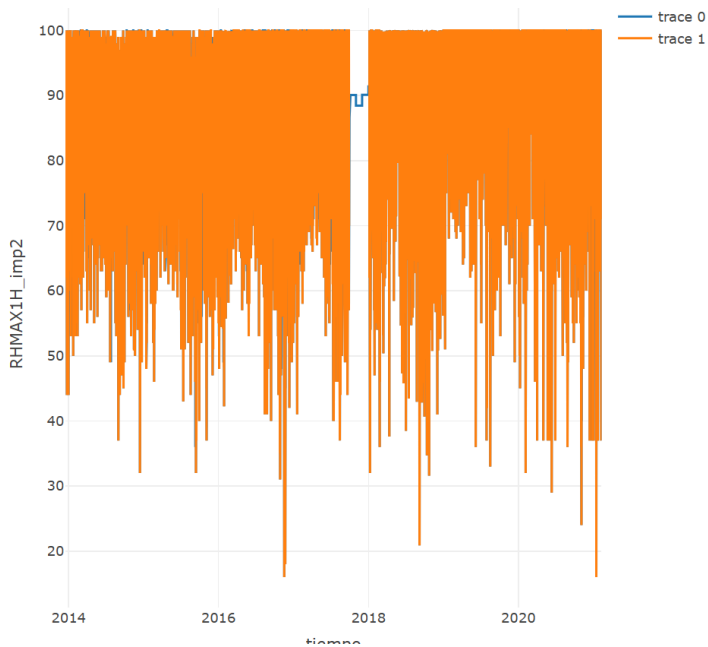
Fuente: Autor

Ilustración 15 Gráfico con corrección de anomalías - Humedad relativa máxima y mínima



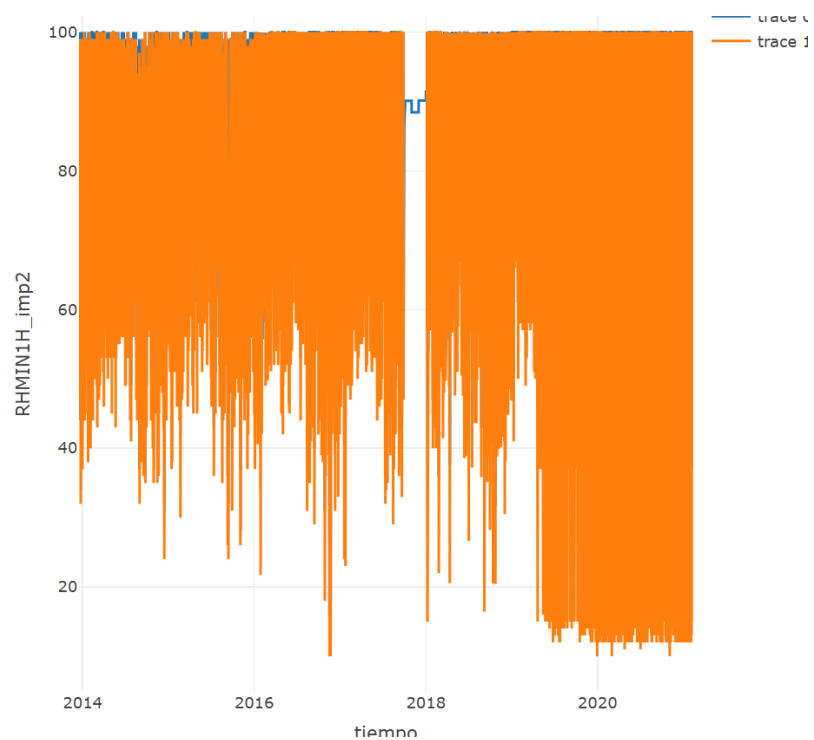
Fuente: Autor

Ilustración 16 Gráfico con la imputación de valores - Humedad relativa máxima



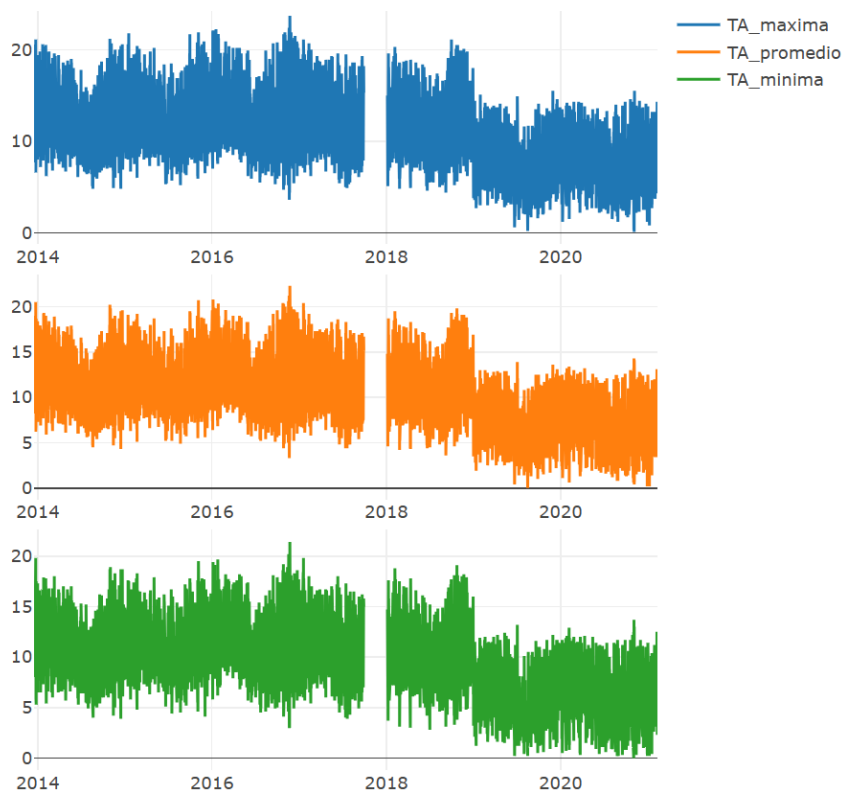
Fuente: Autor

Ilustración 17 Gráfico con la imputación de valores - Humedad relativa mínima



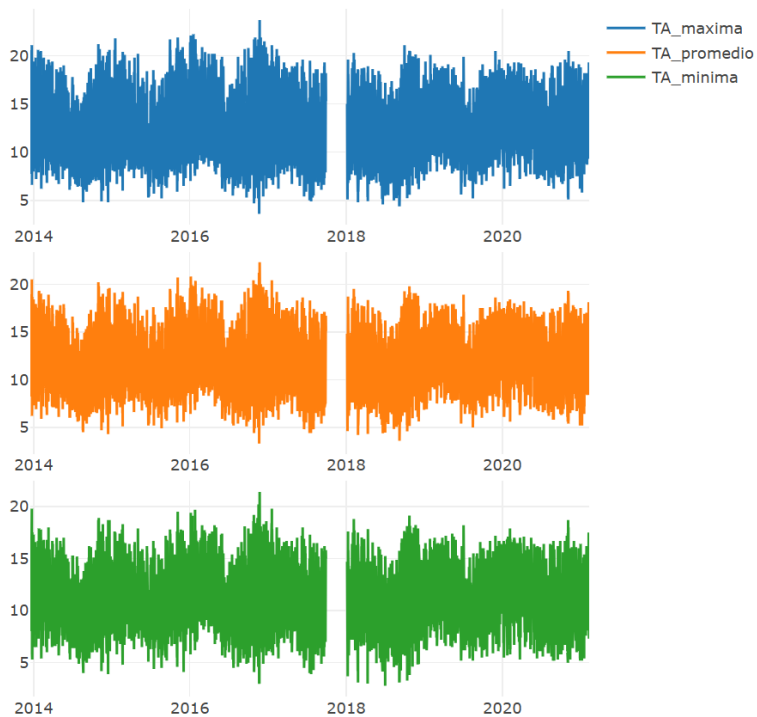
Fuente: Autor

Ilustración 18 Gráfico crudo - Temperatura de aire máxima y mínima



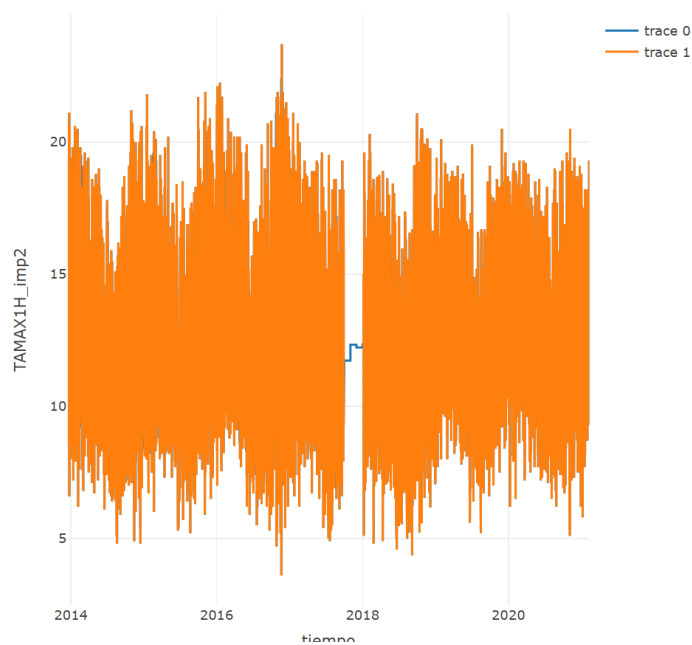
Fuente: Autor

Ilustración 19 Gráfico con corrección de anomalías – Temperatura de aire máxima y mínima



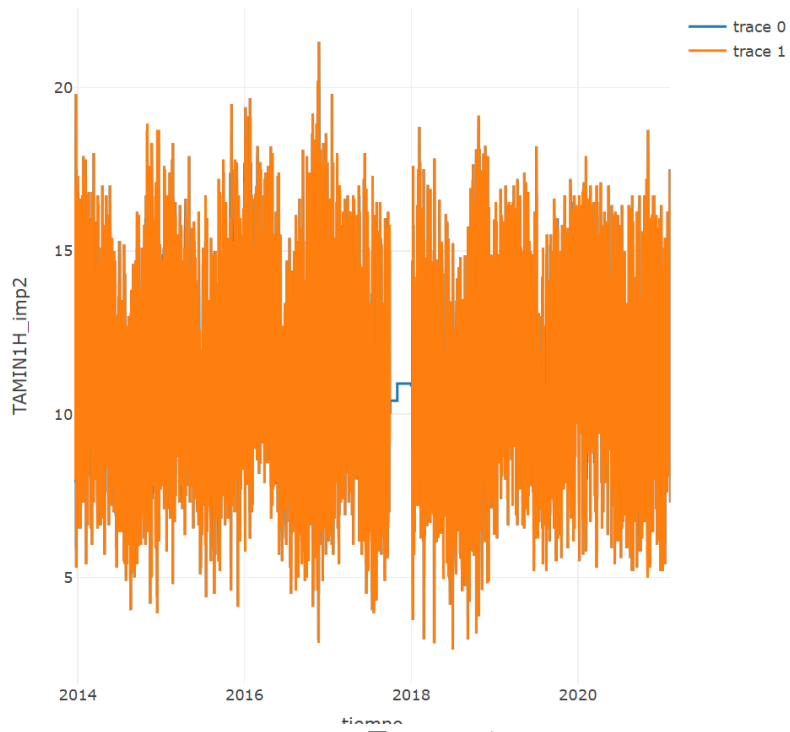
Fuente: Autor

Ilustración 20 Gráfico con la imputación de valores - Temperatura de aire máxima



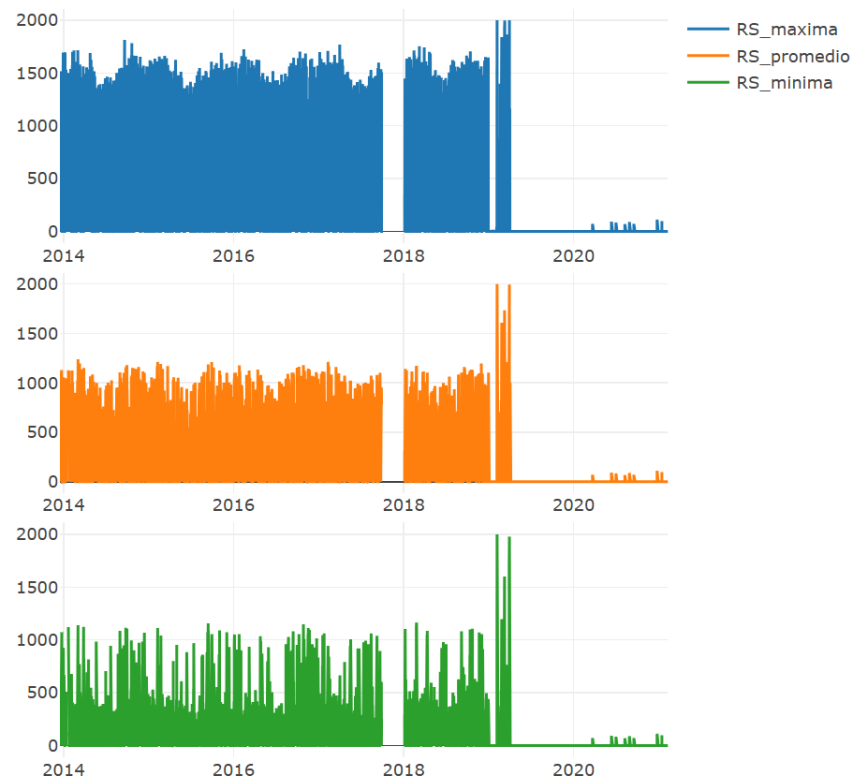
Fuente: Autor

Ilustración 21 Gráfico con la imputación de valores - Temperatura de aire mínima



Fuente: Autor

Ilustración 22 Gráfico crudo - Radiación solar



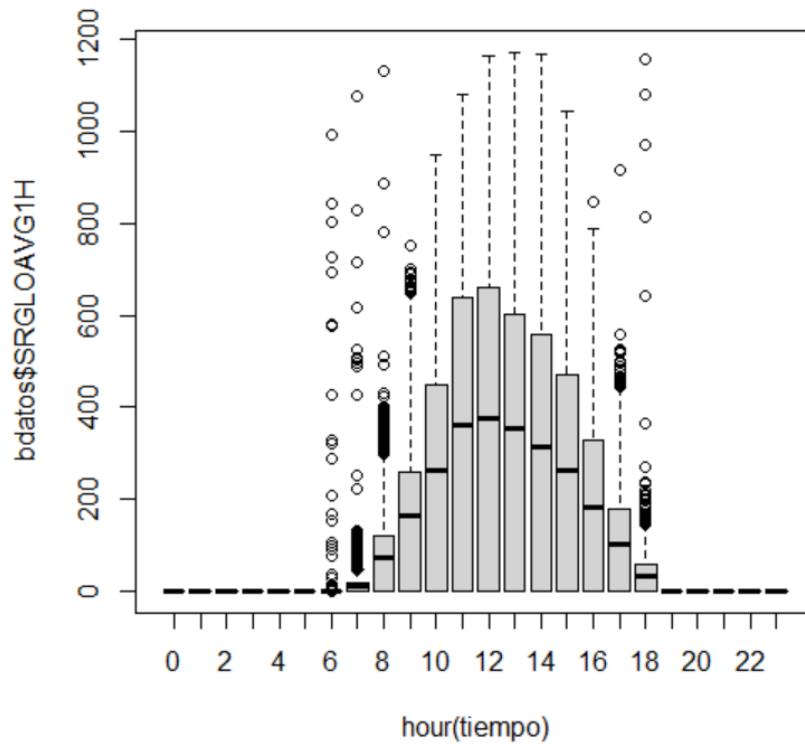
Fuente: Autor

Ilustración 23 Corrección de anomalías 1 – Radiación solar



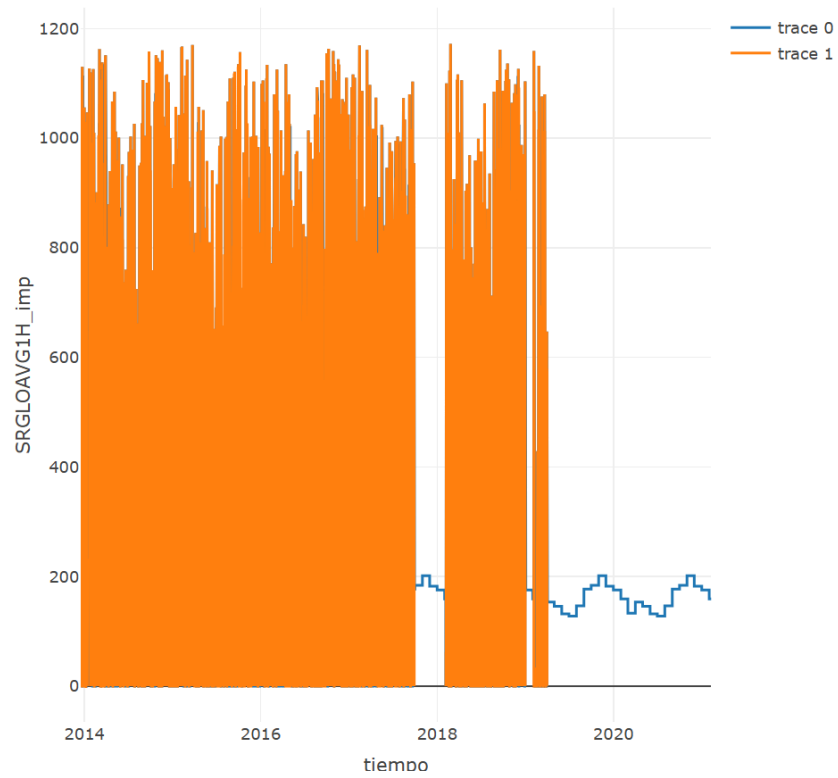
Fuente: Autor

Ilustración 24 Corrección de anomalías 2 – Radiación solar



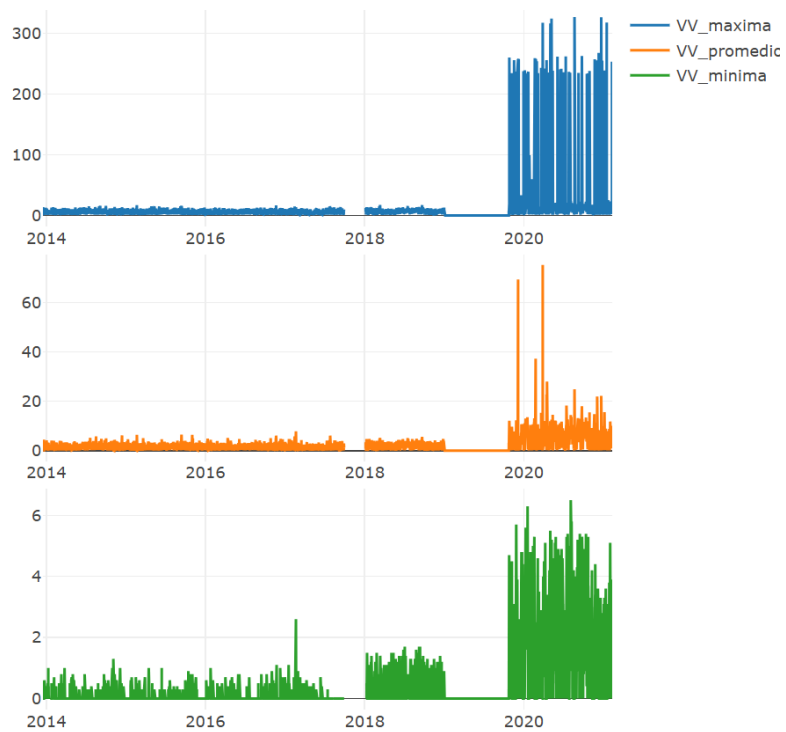
Fuente: Autor

Ilustración 25 Gráfico con la imputación de valores – Radiación solar



Fuente: Autor

Ilustración 26 Gráfico crudo - Velocidad del viento



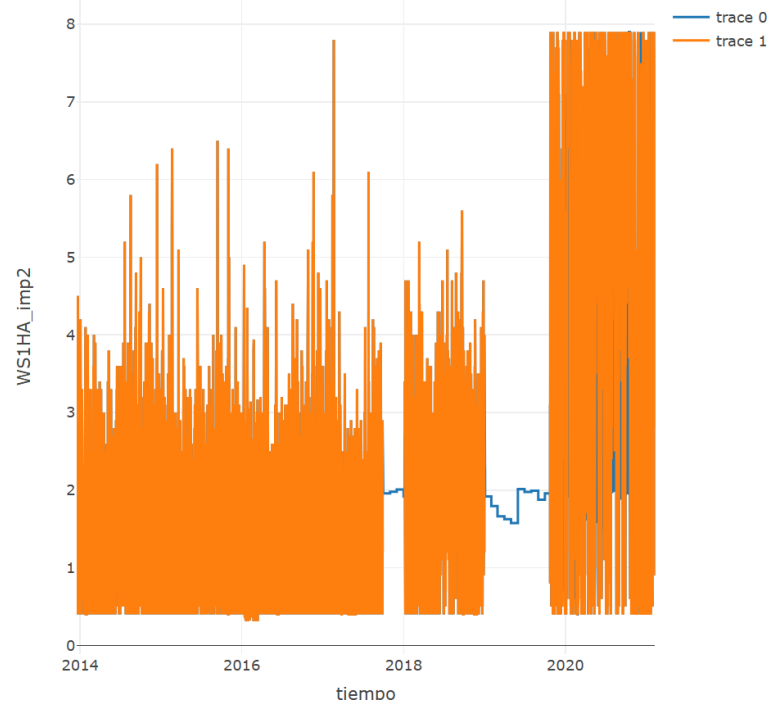
Fuente: Autor

Ilustración 27 Gráfico con corrección de anomalías – Velocidad de viento



Fuente: Autor

Ilustración 28 Gráfico con la imputación de valores – Velocidad de viento



Fuente: Autor

6.2. Bitácoras de Imputación de Valores

La bitácora de registro para los valores imputados, uno para cada una de las 14 estaciones agrometeorológicas, incluye notas sobre todas las anomalías descubiertas en los conjuntos de datos previamente procesados.

En cada variable, fue necesario detallar todas las inconsistencias de las variables meteorológicas analizadas (presión atmosférica, humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar y velocidad del viento). Estos procedimientos se facilitan utilizando scripts de R, de modo que las configuraciones atípicas, los datos faltantes y los valores atípicos puedan discernirse gráficamente.

El propósito de este libro de registro es reunir evidencia de tipo estructurada de los pasos realizados para la imputación. Los gráficos producidos con R permitieron una evaluación rápida del estado de los datos de un vistazo y facilitaron el registro de decisiones específicas para cada caso.

De esta manera, se asegura que el lector o investigador en el futuro tenga una buena base técnica que respalde la razón de la lógica aplicada en la imputación de valores y garantice la trazabilidad y confiabilidad del trabajo realizado.

A continuación, se muestra el libro de registro de imputación de la estación de Baños.

Ilustración 29 Bitácora de imputación de valores – Baños

Bitácora de imputación de datos y calidad de información - Baños

Para todas las bases de datos ya procesadas se utilizó el mismo código, pero se realizó el análisis minucioso de cada dato, además se verificó la calidad de información y se realizó la imputación de valores (NAS) según se de el caso.

Obtuve lo siguiente:

 Esta base de datos contiene información desde el 2013 al 2021.

1. Se revisó nuevamente la base de datos generada con fechas y horas debido a que no cumplía con la lectura con el código en R de:

- Primera fila caracteres "chr".
- Segunda columna "num".

2. Se cambió el código debido que al leer los datos no mostraban como "chr" la fila de fecha y hora y el resto de columnas no se mostraban como "num".

3. Se obtuvo una longitud de datos de 62691.

 1. CONTROL DE CALIDAD PRESION ATMOSFERICA

Se observa anomalías en la presión atmosférica promedio, existe además, un vacío de información extenso que deberá de ser llenado.

1.1 IMPUTACION DE VALORES, PRESION ATMOSFERICA

(Nota revisar la imputación de valores de la presión atmosférica)

2. CONTROL DE CALIDAD HUMEDAD RELATIVA max y min

Se observa mediante las graficas un vacío de información que será relleno utilizando el algoritmo proporcionado por el docente. DESCARTAMOS TODOS MENORES A CERO, INCLUIDO EL VALOR DE 4 % Y EN LA PRESION ATMOSFERICA MINIMA VALORES MENORES A 20%, PORQUE SE OBSERVA UNA TENDENCIA EN LOS VALORES INFERIORES A ESTE VALOR IRREAL.

2.1 IMPUTACION DE VALORES, humedad relativa |

Después de haber realizado la imputación de valores podemos observar que el vacío de información se relleno con un promedio lo que forma una línea.

3. CONTROL DE CALIDAD TEMPERATURA DEL AIRE MÁXIMA:

Mediante la grafica observamos la existencia de un vacío de información en el año 2018 que deberá de ser llenado con un proceso de imputación de valores diferente.

3.1. IMPUTACION DE VALORES, TEMPERATURA DEL AIRE MÁXIMA

Además, de los vacíos de información no tan extensos se hizo el relleno de datos con un promedio lo que formo una línea debido a la gran pérdida de información.

4. CONTROL DE CALIDAD TEMPERATURA DEL AIRE MÍNIMA:

Mediante la grafica observamos la existencia de un vacío de información en el año 2018 que deberá de ser llenado.

4.1. IMPUTACION DE VALORES, TEMPERATURA DEL AIRE MÍNIMA

Además de los vacíos de información no tan extensos se hizo el relleno de datos con un promedio lo que formo una línea debido a la gran pérdida de información.

5. CONTROL DE CALIDAD RADIACIÓN SOLAR GLOBAL:

Mediante la grafica observamos la existencia de varios vacíos de información en el año 2018 que deberá de ser llenado, además se observa que la radiación solar promedio en los años 2020 a 2021 es casi totalmente cero. Mediante el grafico separado de radiación solar máxima, promedio y mínima se observan valores de radiación en horas como 5 0.0 y 7 0.0 en adelante.

5.1. IMPUTACION DE VALORES, RADIACIÓN SOLAR GLOBAL

Además, de los vacíos de información tan extensos se hizo el relleno de datos con un promedio lo que formo una lineal debido a la gran pérdida de información.

6. CONTROL DE CALIDAD VELOCIDAD DEL VIENTO

Mediante la grafica observamos la existencia de un vacío de información en el año entre 2017 a 2018, en el año 2020 se observan valores anormales con velocidades de viento que no han existido hasta el momento.

6.1. IMPUTACION DE VALORES, RADIACIÓN SOLAR GLOBA

Se elimino los valores fuera de rango razonable tomando en cuenta los valores promedio que existían en la grafica de velocidad de viento promedio.

Fuente: Autor

6.3. Cálculo de la ETo

6.3.1. Método de la FAO Penman-Monteith

Se diseñó un código en RStudio a partir de las etapas previas de preprocesamiento y el proceso de imputación de valores, para calcular ETo automáticamente utilizando el Método 1 seleccionado.

Esta metodología incorpora la información meteorológica limpiada y completada para garantizar la uniformidad y continuidad de los datos requeridos para un resultado técnicamente adecuado y preciso.

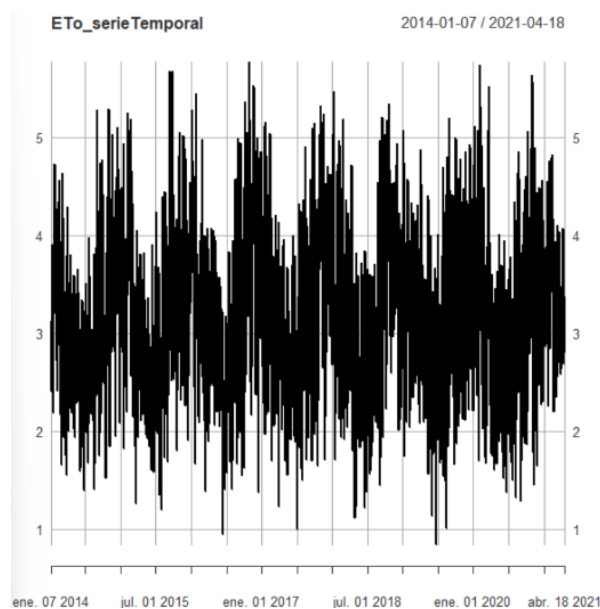
La automatización del cálculo permitió evitar errores operativos y normalizar el método de cálculo de ETo en cada una de las estaciones consideradas.

Esta herramienta constituye un avance en el desarrollo metodológico de esta investigación y permite el uso sistemático del método y la replicabilidad de los hallazgos en diferentes estudios.

El resultado demostrativo obtenido tras la implementación de este método se ilustra en los siguientes gráficos de ETo estimado para cada una de las estaciones, respectivamente.

1. Estación Turi

Ilustración 30 ETo FAO Penman – Monteith (Turi)

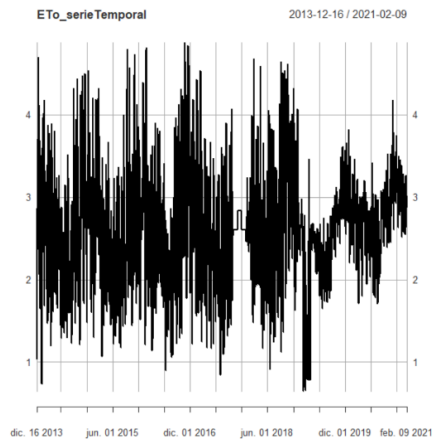


Fuente: Autor

La gráfica muestra la ETo calculada para Turi (2014 - 2021). Se observa un patrón estacional claro, con valores que oscilan entre 1 y 5.5 mm/día. La variación diaria es alta debido a cambios en las condiciones meteorológicas. El patrón anual refleja el clima andino de la zona, con temporadas secas y lluviosas, más que estaciones bien definidas como en climas de esta región.

2. Estación Baños

Ilustración 31 ETo FAO Penman –Monteith (Baños)

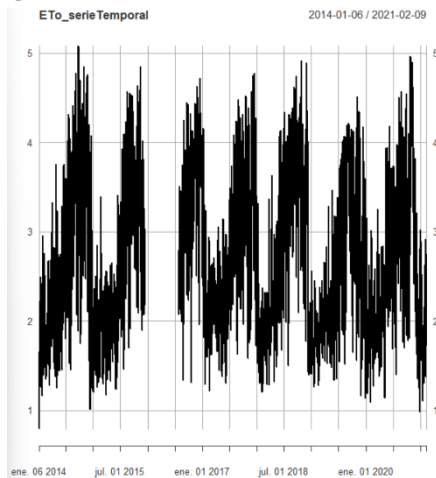


Fuente: Autor

La gráfica muestra la ETo calculada en Baños (2013 - 2021). Se observan valores entre 1 y 4.8 mm/día con variación diaria y un patrón estacional poco definido. Hay una interrupción de datos a finales de 2016-2017, y después de eso los valores se vuelven más estables y moderados. Esto se debe a que en esta estación existió una gran pérdida de información durante ese periodo.

3. Estación Chaucha

Ilustración 32 ETo FAO Penman – Monteith (Chaucha)



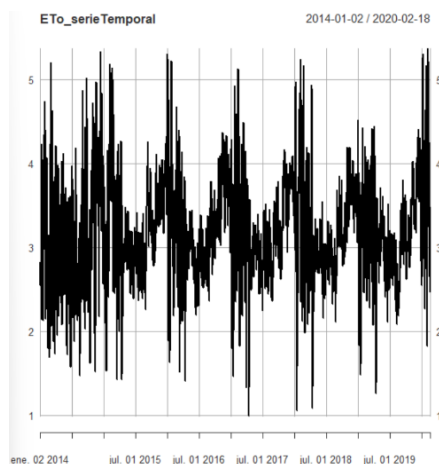
Fuente: Autor

La gráfica muestra la ETo calculada en Chaucha (2014–2021), con valores entre 0.8 y 5.2 mm/día y un patrón estacional bien definido. Se observa una interrupción en los datos

entre 2015 y 2016, debido a la gran pérdida de información entre estos años. Después, los datos se estabilizan y muestran una variación anual regular, típica del clima andino.

4. Estación CTS

Ilustración 33 ETo FAO Penman – Monteith (CTS)

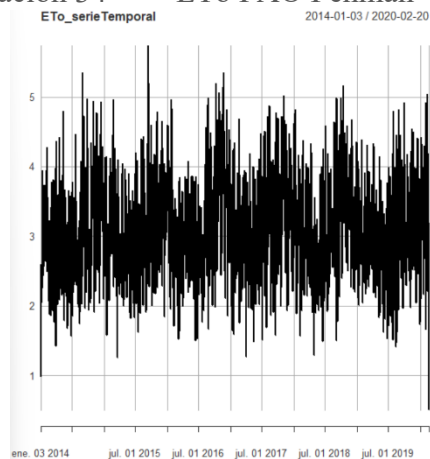


Fuente: Autor

La imagen muestra una serie temporal de la ETo calculada para la estación CTS (2014 – 2020). Se evidencia variaciones diarias marcadas, con valores que oscilan entre aproximadamente 1,5 y 5,5 mm/día, y presenta un comportamiento cíclico anual normal para esta zona del país.

5. Estación Irquis

Ilustración 34 ETo FAO Penman – Monteith (Irquis)

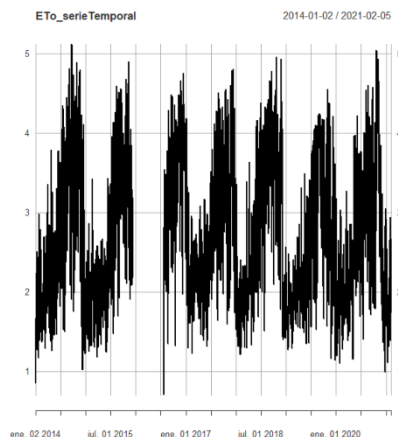


Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo calculada en la estación meteorológica del Irquis, (2014 – 2020). Se evidencia una marcada variabilidad diaria y un patrón estacional, con valores de ETo que oscilan entre 1 y 5 mm/día, encontrándose entre los valores normales de ETo.

6. Estación Llaqueo

Ilustración 35 ETo FAO Penman – Monteith (Llaqueo)

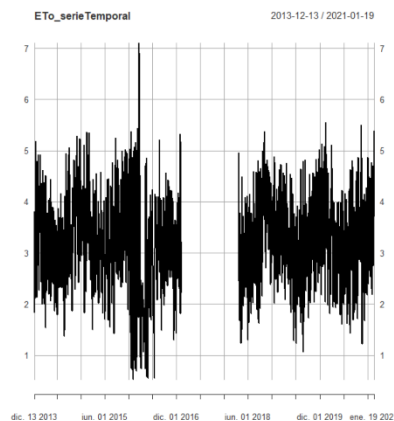


Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo calculada en la estación meteorológica de Llaqueo, (2014 – 2021). Se observan variaciones diarias de la ETo entre aproximadamente 1 y 5.2 mm/día, con un patrón estacional marcado. También se nota un periodo con datos atípicos o faltantes alrededor de 2015-2016, debido a la gran pérdida de información existente en ese año.

7. Estación Molleturo

Ilustración 36 ETo FAO Penman – Monteith (Molleturo)

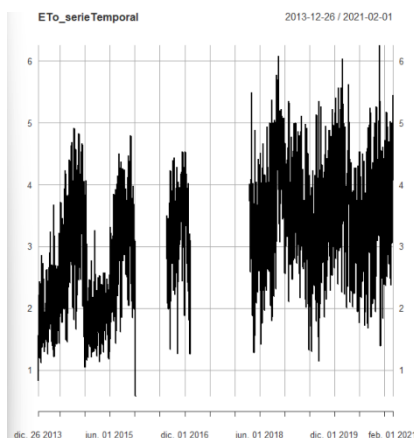


Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo en la estación meteorológica de Molleturo, (2013 – 2021). Los valores de ETo varían entre 0.5 y 7.1 mm/día, con un patrón estacional evidente. Se identifican interrupciones especialmente entre 2016 y 2017, debido a que en el proceso de imputación la gran pérdida de información no permitió un relleno de información oportuno.

8. Estación San Joaquín

Ilustración 37 ETo FAO Penman – Monteith (San Joaquín)

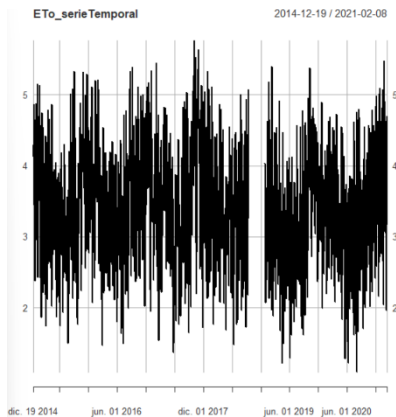


Fuente: Autor

La imagen muestra una serie temporal del cálculo de la ETo en la estación San Joaquín, (2013 – 2021). El gráfico presenta variaciones diarias de ETo en mm/día, con valores que oscilan entre aproximadamente 0.5 y 6.5 mm/día. Se observan fluctuaciones estacionales en el año 2018 debido a la gran pérdida de información existente en ese año.

9. Estación Sayausí

Ilustración 38 ETo FAO Penman – Monteith (Sayausí)

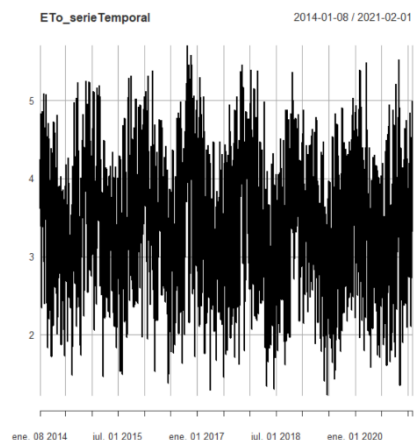


Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo en la estación Sayausí, (2014 – 2021). Los valores diarios de ETo varían entre 1.6 y 7 mm/día, con patrones estacionales visibles y fluctuaciones regulares. Se identifican periodos irregulares, particularmente entre 2018 y 2019 debido a que en esta estación se observó una gran pérdida de información

10. Estación UPS

Ilustración 39 ETo FAO Penman – Monteith (UPS)

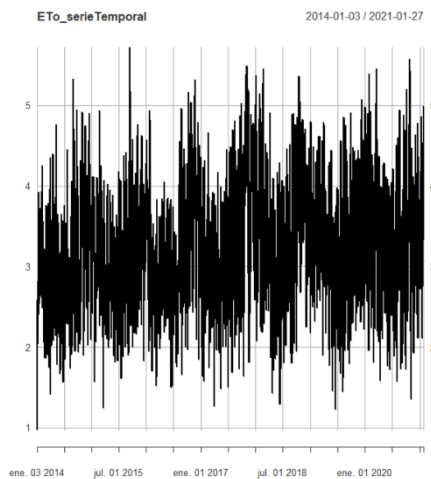


Fuente: Autor

La imagen presenta la serie temporal de la ETo en la estación de la Universidad Politécnica Salesiana, (2014 – 2021). Los valores diarios de ETo oscilan entre 1.5 y 5.7 mm/día, con un comportamiento estacional evidente y sin interrupciones notables en los datos, lo que indica una serie continua y estable. Con valores de ETo visiblemente normales.

11. Estación Santa Ana

Ilustración 40 ETo FAO Penman – Monteith (Santa Ana)

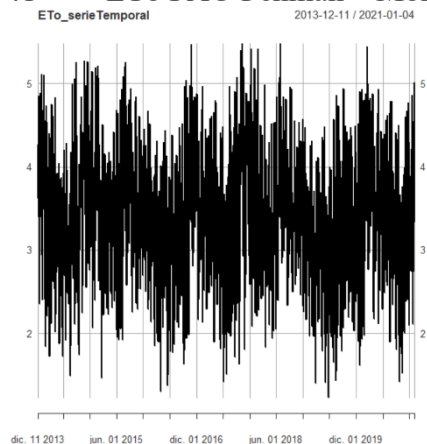


Fuente: Autor

La imagen muestra una serie temporal del cálculo de la ETo en la estación de Santa Ana, Cuenca, (2014 – 2021). Los valores de ETo fluctúan diariamente, con variaciones marcadas que reflejan la dinámica climática de la zona a lo largo de los años que oscilan entre 1 y 5.5 mm/día.

12. Estación Quingeo

Ilustración 41 ETo FAO Penman – Monteith (Quingeo)

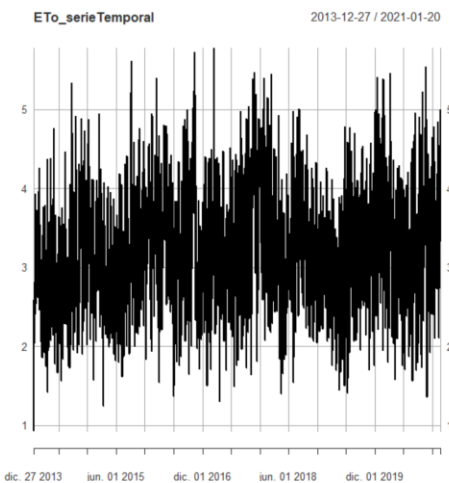


Fuente: Autor

La imagen muestra la ETo calculada para la estación de Quingeo, (2013 – 2021). Se observa una marcada variabilidad diaria y patrones estacionales, con valores que oscilan mayormente entre 1.5 y 5 mm/día, reflejando la influencia de factores climáticos locales sobre la demanda evaporativa a lo largo del tiempo.

13. Estación Sinincay – Nero

Ilustración 42 ETo FAO Penman – Monteith (Sinincay-Nero)

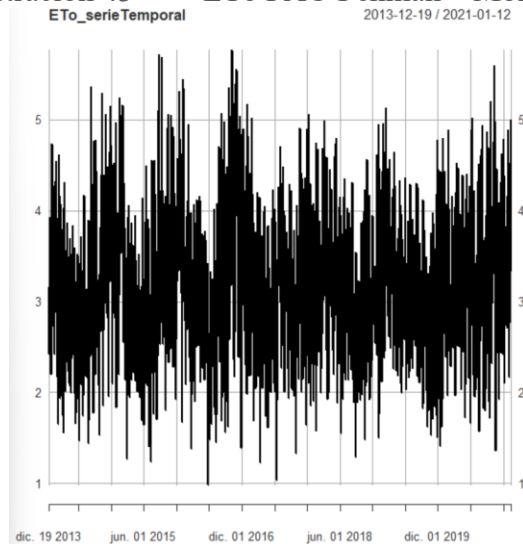


Fuente: Autor

La imagen presenta la serie temporal de la ETo calculado en la estación Sinincay – Nero, (2013 – 2021). Se evidencian fluctuaciones diarias con una variabilidad estacional marcada, donde los valores de ETo oscilan principalmente entre 1 y 5 mm/día, reflejando los cambios climáticos y patrones de demanda hídrica a lo largo del periodo analizado.

14. Estación Tixán

Ilustración 43 ETo FAO Penman – Monteith (Tixán)
ETo_serieTemporal 2013-12-19 / 2021-01-12



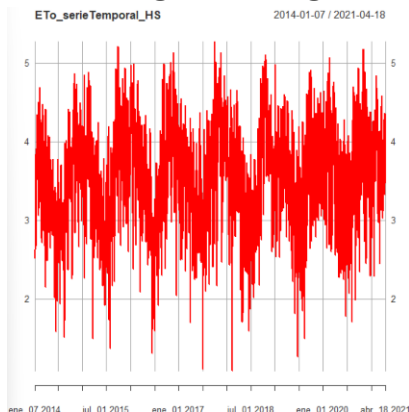
Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo en la estación Tixán, (2013 – 2021). Se observa una variabilidad diaria notable y un patrón estacional definido, con valores de ETo que oscilan entre aproximadamente 1 y 5 mm/día, lo que refleja las variaciones climáticas locales que influyen en la demanda evaporativa durante el periodo analizado.

6.3.2. Método Hargreaves Hargreaves -Samani

1. Estación Turi

Ilustración 44 ETo Hargreaves Hargreaves -Samani (Turi)

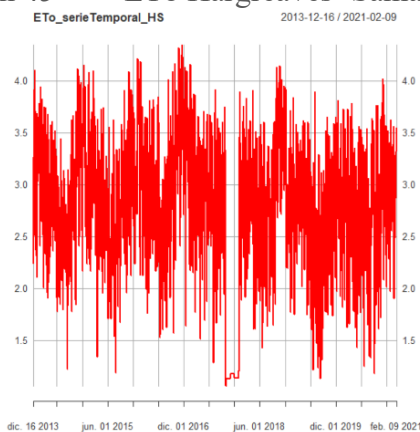


Fuente: Autor

La imagen presenta la serie temporal de la ETo calculada en la estación Turi. La gráfica, muestra una marcada variabilidad estacional con valores que oscilan principalmente entre 1.2 y 5.3 mm/día, reflejando los ciclos anuales de radiación solar y temperatura que afectan la demanda evaporativa en la zona.

2. Estación Baños

Ilustración 45 ETo Hargreaves -Samani (Baños)

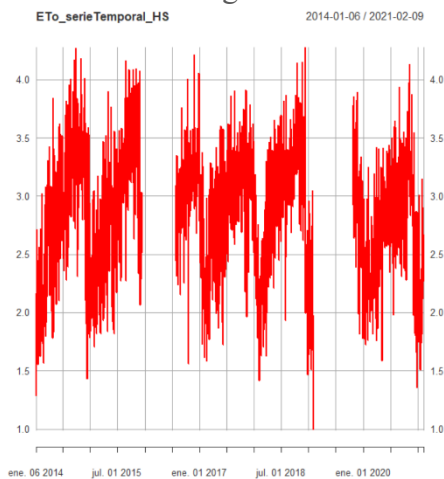


Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo estimada en la estación Baños. La gráfica evidencia una alta variabilidad diaria y estacional, con valores que fluctúan principalmente entre 1.2 y 4.7 mm/día. Se observa un breve periodo de datos atípicamente bajos o ausentes alrededor de 2017, debido a la pérdida de información en este año.

3. Estación Chaucha

Ilustración 46 ETo Hargreaves -Samani (Chaucha)

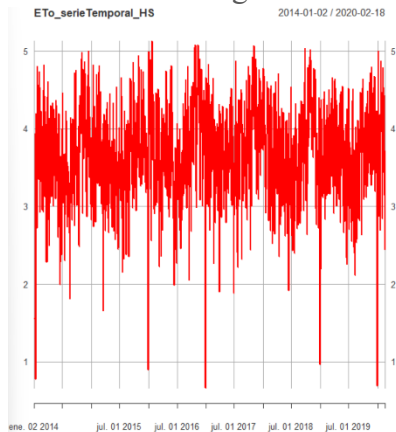


Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo en la estación Chaucha. La gráfica evidencia una fuerte estacionalidad, con valores que alcanzan hasta 4.8 mm/día durante los picos máximos. Se observan periodos con valores inusualmente bajos o constantes, especialmente entre fines de año, debido a la pérdida de información en estos años.

4. Estación CTS

Ilustración 47 ETo Hargreaves -Samani (CTS)

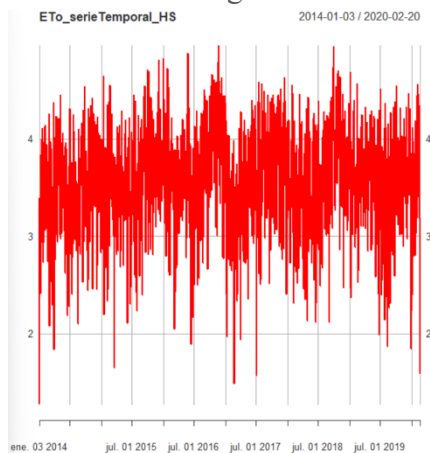


Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo estimada en la estación del CTS, (2014 – 2020). La serie evidencia una alta variabilidad diaria con valores que oscilan mayoritariamente entre 0.8 y 5.5 mm/día. Se observa una clara estacionalidad anual, con picos más altos en las estaciones secas y reducciones durante las épocas más húmedas.

5. Estación Irquis

Ilustración 48 ETo Hargreaves -Samani (Irquis)

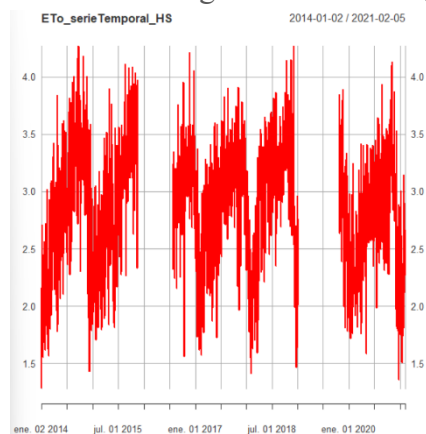


Fuente: Autor

La imagen muestra la serie temporal de la ETo estimada en la estación Irquis. La gráfica, exhibe una marcada variabilidad diaria y una clara estacionalidad anual. Los valores de ETo fluctúan principalmente entre 1.3 y 4.8 mm/día, con máximos más frecuentes en las estaciones secas. Se observa una tendencia cíclica coherente con los patrones climáticos.

6. Estación Llacao

Ilustración 49 ETo Hargreaves -Samani (Llacao)

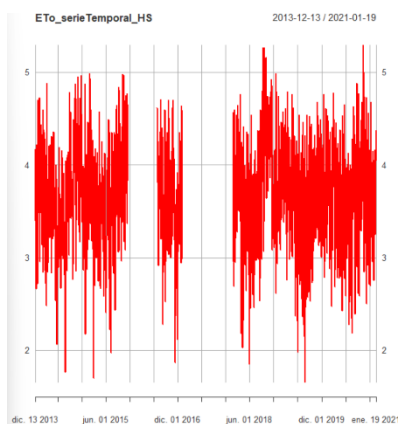


Fuente: Autor

La serie temporal muestra una alta variabilidad, con valores de ETo que oscilan entre aproximadamente 1.2 y 4.8 mm/día. Se observan picos pronunciados en varios periodos del año, se ve una notoria fluctuación interanual, con una mayor amplitud. Hay tramos de datos ausentes o inconsistentes, especialmente entre 2016 y 2019, donde se aprecian vacíos o valores atípicos, lo que podría indicar gran pérdida de información.

7. Estación Molleturo

Ilustración 50 ETo Hargreaves -Samani (Molleturo)

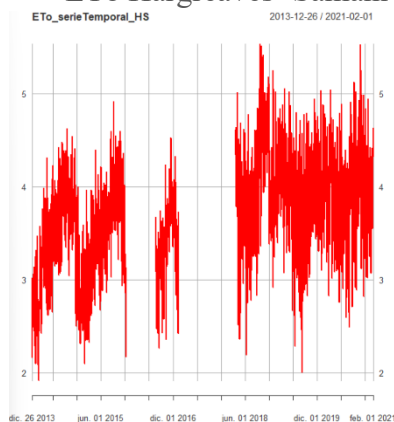


Fuente: Autor

La gráfica muestra la ETo estimada, con valores que oscilan aproximadamente entre 1.7 mm/día y 5.7 mm/día. También se nota una disminución de valores en ciertos periodos (como 2016 y 2017), lo que podría estar asociado a condiciones de nubosidad o menor insolación. La serie es densa y presenta una clara estacionalidad, con máximos que tienden a coincidir con los meses más secos y soleados.

8. Estación San Joaquín

Ilustración 51 ETo Hargreaves -Samani (San Joaquín)

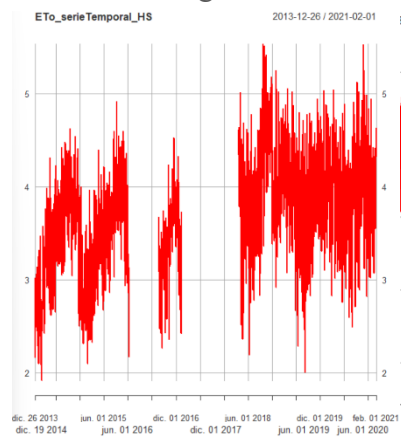


Fuente: Autor

La serie temporal la ETo calculada, con oscilaciones entre cerca de 1.8 a 5.4 mm/día. Se observan fluctuaciones marcadas a lo largo del periodo. Posteriormente, los valores tienden a incrementarse en el 2019, manteniendo un patrón de variabilidad intensa. Existen vacíos debido a pérdida o datos con anomalías dentro de los años 2016 y 2018.

9. Estación Sayausí

Ilustración 52 ETo Hargreaves -Samani (Sayausí)

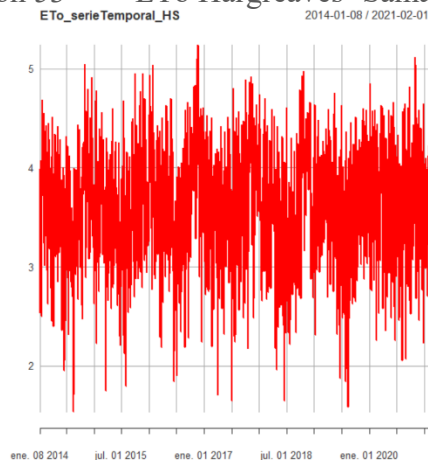


Fuente: Autor

La gráfica de la ETo calculada en la estación Sayausí muestra una alta variabilidad diaria de la evapotranspiración desde diciembre de 2014 hasta febrero de 2021, con valores que oscilan entre aproximadamente 0.7 y 5.5 mm/día. Se observa un patrón estacional claro, con picos más altos durante las épocas secas y valores más bajos durante las lluvias. Se denotan vacíos debido a pérdida o datos con anomalías dentro de los años 2016 y 2018.

10. Estación UPS

Ilustración 53 ETo Hargreaves -Samani (UPS)

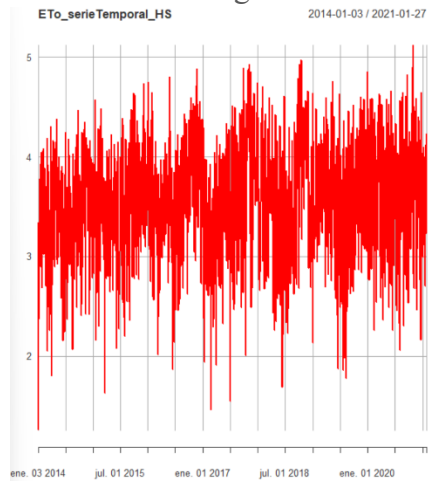


Fuente: Autor

En la estación UPS muestra una alta variabilidad diaria con valores que oscilan principalmente entre 1.4 y 5.3 mm/día. Se observa una estacionalidad marcada con máximos en los meses más cálidos.

11. Estación Santa Ana

Ilustración 54 ETo Hargreaves -Samani (Santa Ana)

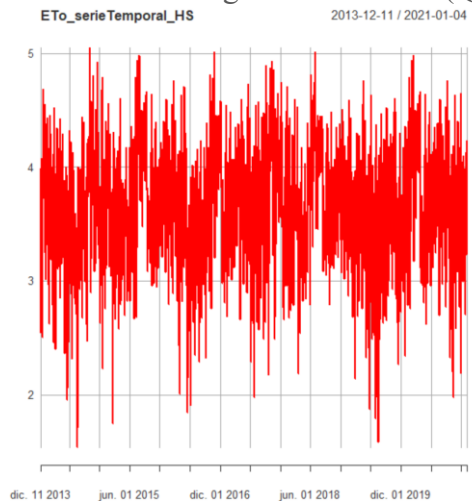


Fuente: Autor

La gráfica de ETo calculada muestra una marcada variabilidad diaria desde enero de 2014 hasta enero de 2021, con valores que oscilan principalmente entre 1.2 y 5.8 mm/día. lo cual indica una alta sensibilidad de este método a las fluctuaciones térmicas.

12. Estación Quingeo

Ilustración 55 ETo Hargreaves -Samani (Quingeo)

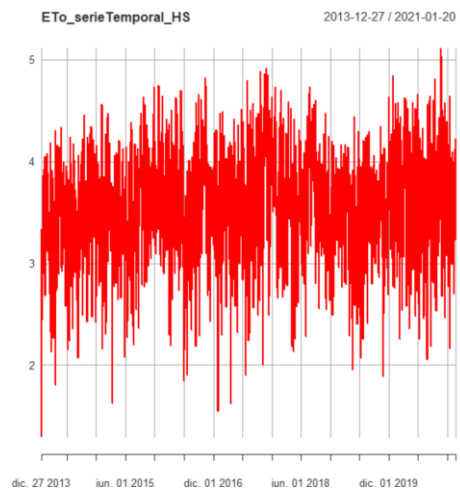


Fuente: Autor

La serie temporal muestra una considerable variabilidad diaria con valores que oscilan predominantemente entre 1.5 y 5.8 mm/día lo cual indica una alta sensibilidad de este método a las fluctuaciones térmicas. Las oscilaciones estacionales son notorias, con períodos de mayor ETo durante los meses más cálidos.

13. Estación Sinincay – Nero

Ilustración 56 ETo Hargreaves -Samani (Sinincay-Nero)

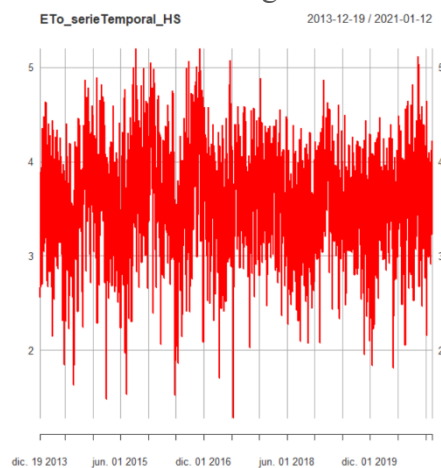


Fuente: Autor

La gráfica de la ETo calculada muestra una alta variabilidad diaria entre diciembre de 2013 y enero de 2021. Se observan fluctuaciones de 1.3 mm/día a 5.4 mm/día. Esta oscilación evidencia una fuerte influencia de las condiciones térmicas diarias, y sugiere una respuesta marcada a las variaciones estacionales y climatológicas de la región andina de Cuenca.

14. Estación Tixán

Ilustración 57 ETo Hargreaves -Samani (Tixán)



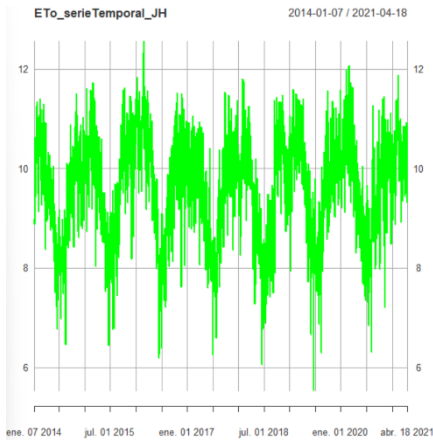
Fuente: Autor

La serie temporal muestra una alta variabilidad diaria, con valores que oscilan entre aproximadamente 1.4 y 5.8 mm/día, se refleja una fuerte sensibilidad del método a los cambios en la radiación solar y temperatura mínima. Se observan una distribución anual que sugiere estacionalidad en la ETo, con máximos más frecuentes en periodos de mayor radiación.

6.3.3. Método Jensen-Haise

1. Estación Turi

Ilustración 58 ETo Jensen-Haise (Turi)

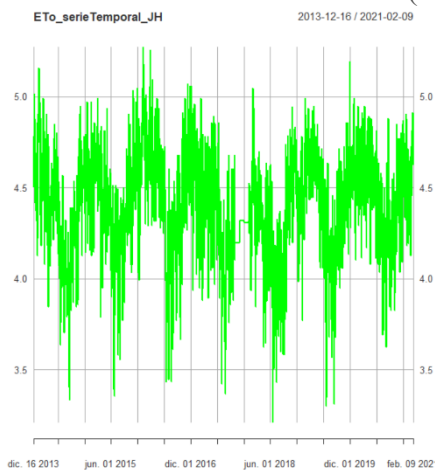


Fuente: Autor

La ETo calculada con este método varía principalmente entre 5.6 y 12 mm/día. Se observa una clara estacionalidad anual, con picos recurrentes en los meses secos del año. Este método refleja una mayor sensibilidad a las variaciones térmicas estacionales, presentando amplitudes moderadas y un comportamiento relativamente estable a lo largo de los años.

2. Estación Baños

Ilustración 59 ETo Jensen-Haise (Baños)



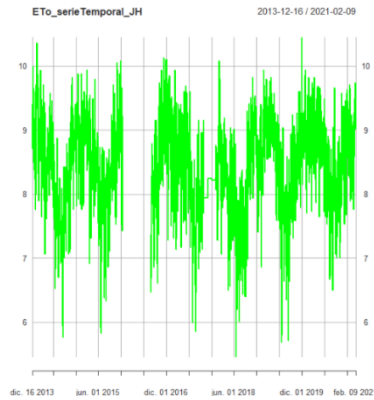
Fuente: Autor

La ETo varía en un rango más amplio, entre 3.2 y 5.8 mm/día, mostrando también una estacionalidad clara. Las fluctuaciones son más pronunciadas, lo cual es esperable dado que

este método es más sensible a la temperatura media diaria y puede amplificar las variaciones estacionales.

3. Estación Chaucha

Ilustración 60 ETo Jensen-Haise (Chaucha)

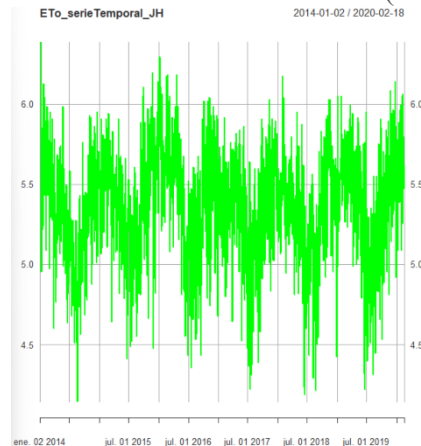


Fuente: Autor

La ETo estimada con este método oscila generalmente entre 5.7 y 10.2 mm/día. Se observa una marcada variabilidad estacional con picos más altos durante los periodos más cálidos del año. La serie presenta cierta estabilidad interanual, aunque con algunas fluctuaciones bruscas que pueden estar asociadas a cambios en la radiación solar o temperatura.

4. Estación CTS

Ilustración 61 ETo Jensen-Haise (CTS)



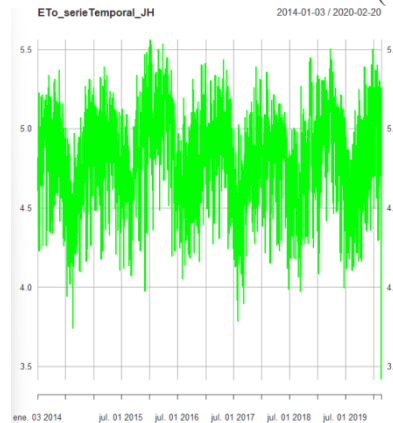
Fuente: Autor

La serie muestra una variabilidad más amplia y valores más elevados de ETo. Los valores se sitúan generalmente entre 4.1 mm/día y 6.8 mm/día, presenta un patrón estacional

claro, pero con mayor sensibilidad a las variaciones diarias, evidenciada por la mayor densidad de picos en la gráfica.

5. Estación Irquis

Ilustración 62 ETo Jensen-Haise (Irquis)

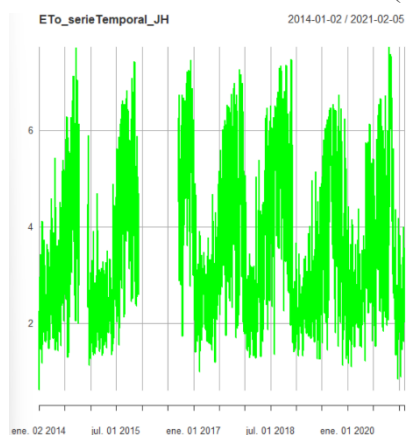


Fuente: Autor

Se observa una marcada estacionalidad, con oscilaciones repetitivas anualmente. Esto sugiere una fuerte influencia de la radiación solar y temperatura en la zona. Los valores de ETo oscilan entre aproximadamente 3.3 y 5.7 mm/día, siendo un rango amplio, característico de este método empírico que tiende a sobreestimar en comparación con otros métodos más conservadores.

6. Estación Llacao

Ilustración 63 ETo Jensen-Haise (Llacao)



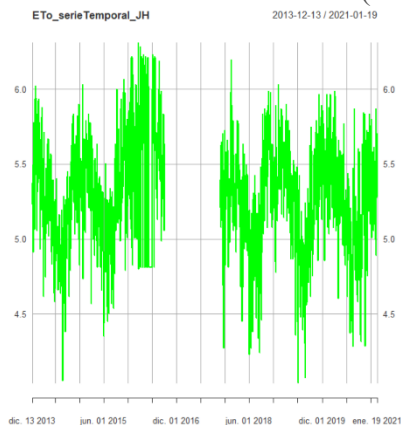
Fuente: Autor

Este método proporciona una ETo más estable, con valores diarios comprendidos entre aproximadamente 1.2 y 6.8 mm/día. La serie presenta una clara estacionalidad anual, con

picos regulares, lo que indica una fuerte relación con la temperatura media diaria. Se observa una interrupción en el registro entre mediados de 2015 y 2016 por pérdida de información.

7. Estación Molleturo

Ilustración 64 ETo Jensen-Haise (Molleturo)

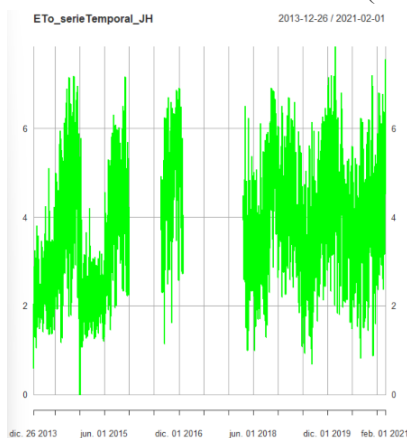


Fuente: Autor

La serie temporal calculada presenta un comportamiento más estable, con valores que fluctúan entre aproximadamente 3.2 mm/día y 6.8 mm/día, muestra una estacionalidad marcada, con picos anuales consistentes. Hay una notable reducción de datos durante el año 2016 y 2017.

8. Estación San Joaquín

Ilustración 65 ETo Jensen-Haise (San Joaquín)



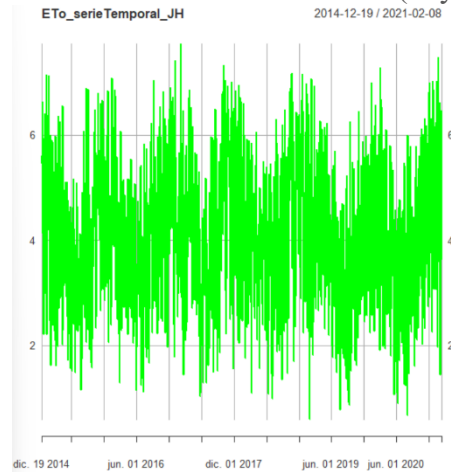
Fuente: Autor

La gráfica presenta una serie temporal con variaciones menos extremas, manteniéndose en un rango aproximado de 0 a 6,8 mm/día. Se evidencia una estacionalidad

cíclica con máximos y mínimos relativamente constantes cada año. Entre 2016 y 2017 se aprecia una reducción en la variabilidad.

9. Estación Sayausí

Ilustración 66 ETo Jensen-Haise (Sayausí)

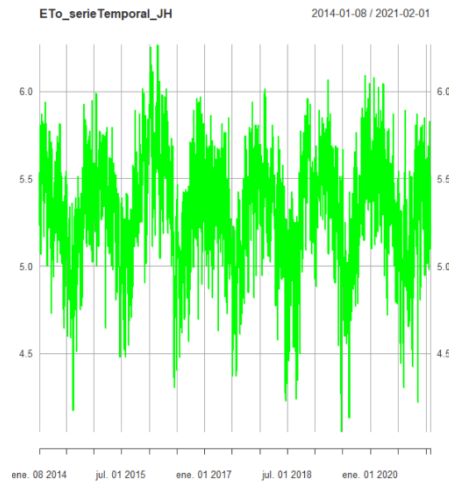


Fuente: Autor

La serie temporal de la ETo obtenida presenta una oscilación más suave entre 1.2 y 6.7 mm/día. Desde diciembre de 2014 hasta febrero de 2021, se evidencian ciclos estacionales definidos, con una periodicidad coherente con los patrones climáticos anuales de la región.

10. Estación UPS

Ilustración 67 ETo Jensen-Haise (UPS)

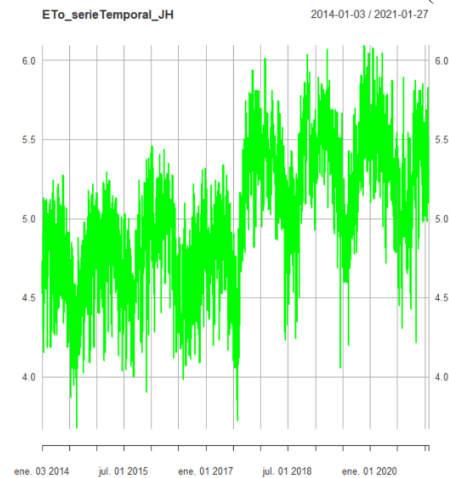


Fuente: Autor

La gráfica presenta una oscilación más moderada y regular, con valores entre 4.1 y 6.8 mm/día. A lo largo del tiempo, se mantiene una tendencia cíclica clara que refleja la estacionalidad climática, con mínimo en los primeros y últimos meses de cada año.

11. Estación Santa Ana

Ilustración 68 ETo Jensen-Haise (Santa Ana)

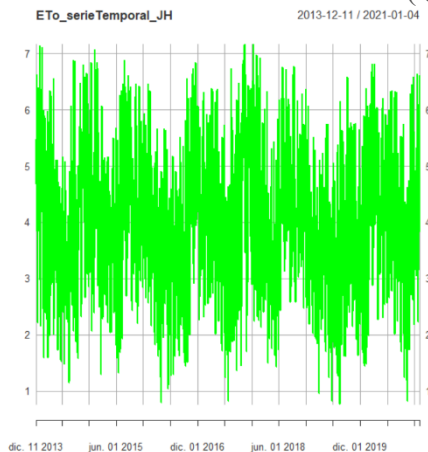


Fuente: Autor

La serie temporal de ETo calculada presenta una oscilación suave y regular entre aproximadamente 3.5 y 6.8 mm/día durante todo el periodo de análisis (2014-2021). Este método muestra una estacionalidad más marcada y con menor dispersión, lo que podría deberse a su menor sensibilidad a variaciones diarias extremas. Las ondulaciones anuales reflejan el comportamiento climático cíclico de la zona.

12. Estación Quingeo

Ilustración 69 ETo Jensen-Haise (Quingeo)

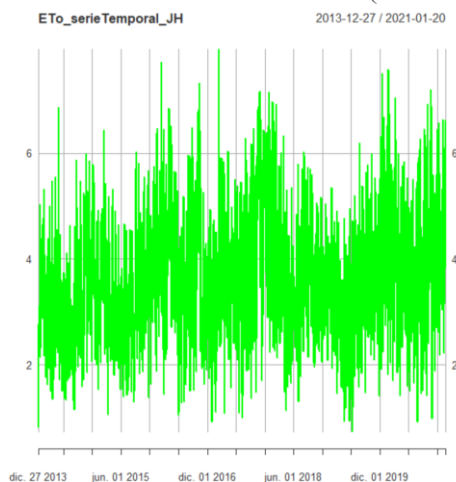


Fuente: Autor

El cálculo de la ETo presenta valores que generalmente oscilan entre 0.5 y 7.8 mm/día. Este método muestra un patrón claramente estacional, con ligeros descensos durante los meses húmedos y aumentos durante los periodos más secos.

13. Estación Sinincay – Nero

Ilustración 70 ETo Jensen-Haise (Sinincay-Nero)

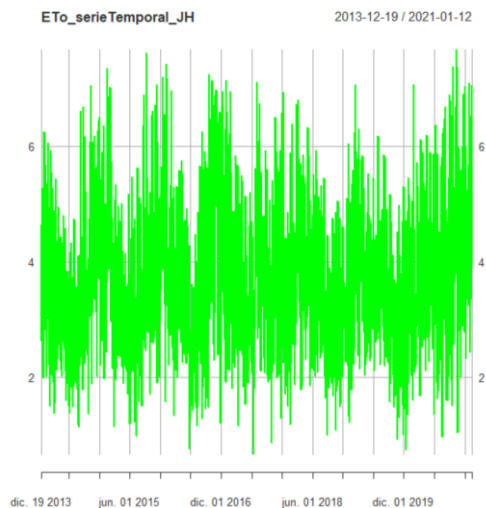


Fuente: Autor

La serie temporal presenta una ETo con valores comprendidos entre aproximadamente 1.2 y 7.8 mm/día, con patrones claramente estacionales. El comportamiento cíclico de la curva indica una respuesta estable al régimen climático anual.

14. Estación Tixán

Ilustración 71 ETo Jensen-Haise (Tixán)

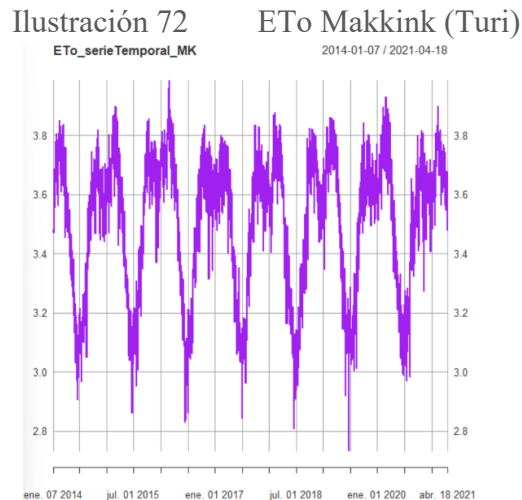


Fuente: Autor

La ETo estimada presenta una menor amplitud de variación, con valores comprendidos entre aproximadamente 1.2 y 8.3 mm/día. La serie temporal evidencia un patrón estacional bien definido.

6.3.4. Método de Makkink

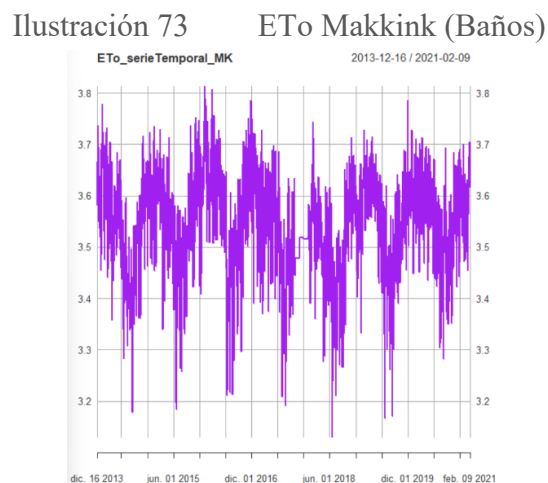
1. Estación Turi



Fuente: Autor

La ETo estimada oscila entre aproximadamente 2.5 y 3.8 mm/día. Esta serie también muestra una marcada estacionalidad anual, con patrones bien definidos y ciclos repetitivos, lo que es consistente con su dependencia más directa de la radiación solar y menor sensibilidad a la temperatura máxima.

2. Estación Baños

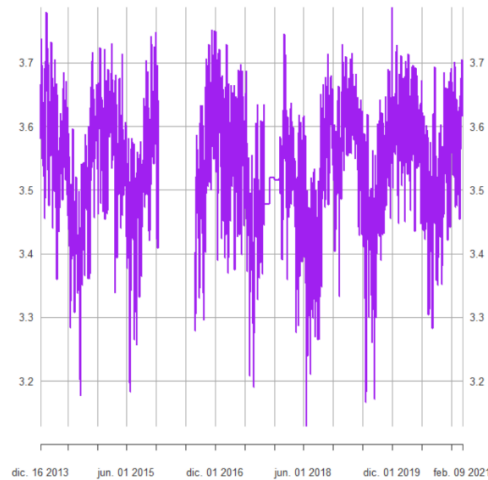


Fuente: Autor

La ETo presenta una variabilidad moderada entre valores de aproximadamente 3.1 y 3.8 mm/día, con una clara estacionalidad anual. El comportamiento de la curva es relativamente suave y consistente a lo largo del tiempo, que depende principalmente de la radiación solar y la temperatura.

3. Estación Chaucha

Ilustración 74 ETo Makkink (Chaucha)
ETo_serieTemporal_MK 2013-12-16 / 2021-02-09

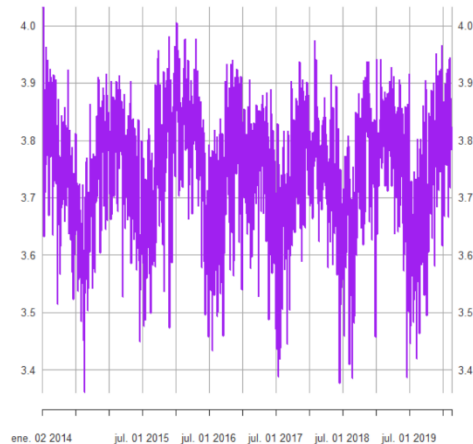


Fuente: Autor

La ETo calculada por el método de Makkink es considerablemente más baja, variando entre 3.1 y 3.8 mm/día. Esta menor variabilidad refleja la sensibilidad de este método, que depende principalmente de la radiación solar y temperatura.

4. Estación CTS

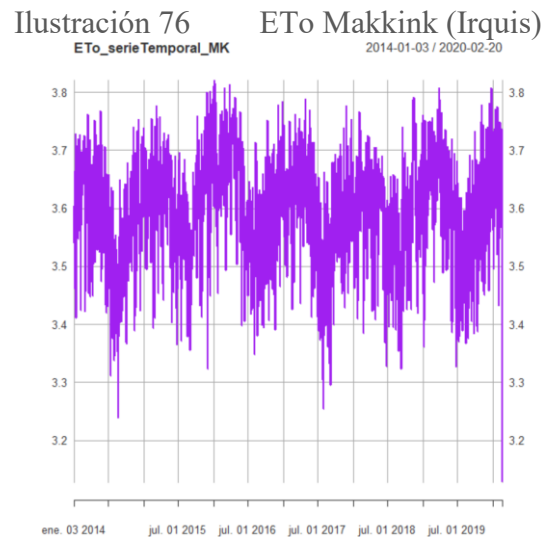
Ilustración 75 ETo Makkink (CTS)
ETo_serieTemporal_MK 2014-01-02 / 2020-02-18



Fuente: Autor

La serie temporal muestra los valores de ETo a lo largo del tiempo, con fluctuaciones claras que evidencian cierta estacionalidad anual, oscilan mayormente entre 3.6 y 4 mm/día, con picos cercanos a 4.2 mm/día y mínimos de 3.2 mm/día en algunos periodos.

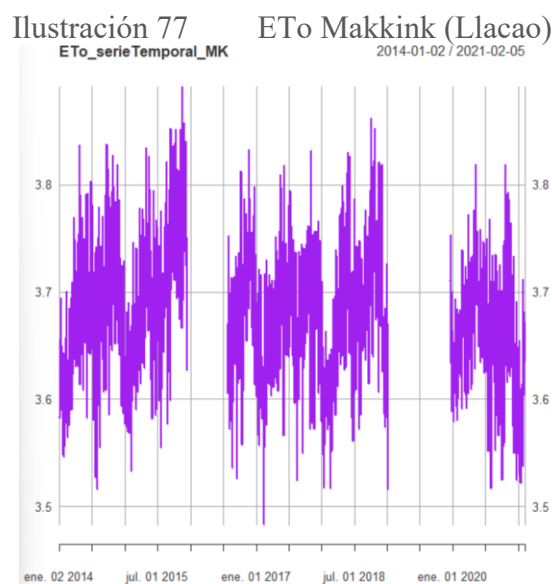
5. Estación Irquis



Fuente: Autor

Se presenta un patrón cíclico anual, pero con menores amplitudes de variación, los valores fluctúan entre aproximadamente 3,1 y 3,8 mm/día. No se observan tendencias evidentes de aumento o disminución a largo plazo.

6. Estación Llaeo

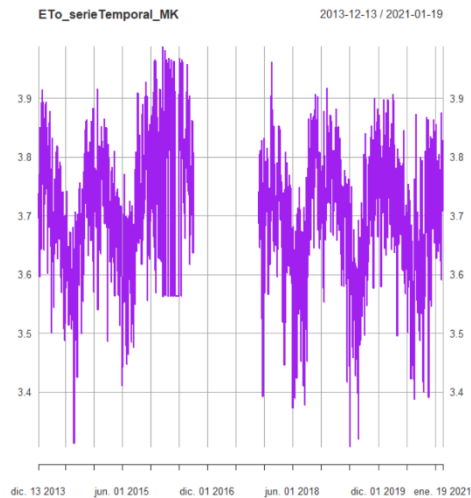


Fuente: Autor

La serie presenta valores de ETo entre aproximadamente 3.4 y 3.9 mm/día, siendo el método que reporta los valores más bajos y estables de los tres. Se observa una estacionalidad bien definida, con una clara repetición de picos anuales.

7. Estación Molleturo

Ilustración 78 ETo Makkink (Molleturo)

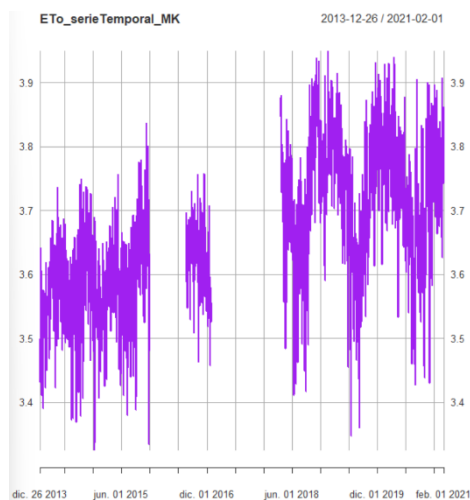


Fuente: Autor

La gráfica de ETo muestra valores considerablemente más bajos, con un rango que va aproximadamente de 3.3 mm/día a 3.9 mm/día, se observa una interrupción de datos durante 2016 y parte de 2017. La estacionalidad es evidente y consistente, reflejando los ciclos anuales de radiación solar.

8. Estación San Joaquín

Ilustración 79 ETo Makkink (San Joaquín)

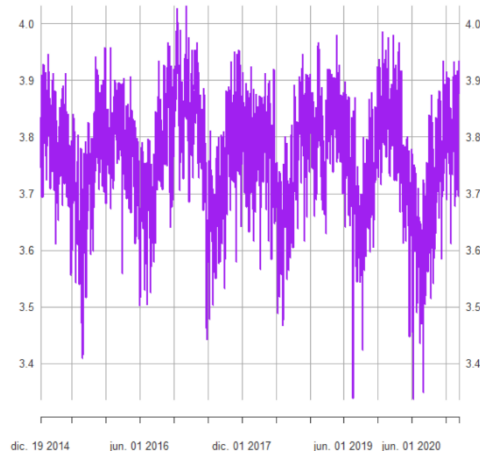


Fuente: Autor

La serie temporal exhibe los valores de ETo, oscilando entre 3.3 y 3.9 mm/día, se muestra un patrón cíclico con baja amplitud y menor variabilidad interanual. Se nota una leve reducción en la dispersión de los datos hacia 2016, pero el comportamiento general es uniforme y repetitivo.

9. Estación *Sayausi*

Ilustración 80 ETo Makkink (Sayausi)
ETo_serieTemporal_MK 2014-12-19 / 2021-02-08

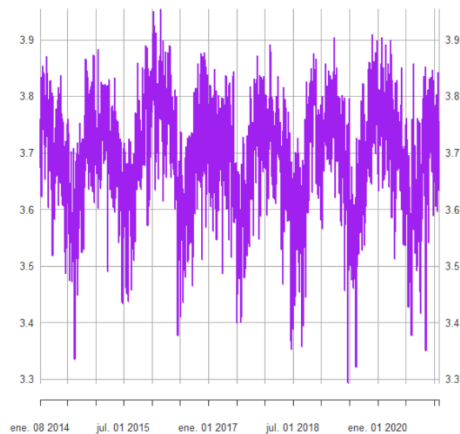


Fuente: Autor

Se muestra valores de ETo mucho menores, con un rango estrecho entre 3.3 y 4.0 mm/día, entre diciembre de 2014 y febrero de 2021 presenta una alta densidad de datos, con claros ciclos estacionales y una tendencia estable, aunque con algunas interrupciones visibles entre 2016 y 2018, que podrían estar relacionadas con la pérdida de información.

10. Estación *UPS*

Ilustración 81 ETo Makkink (UPS)
ETo_serieTemporal_MK 2014-01-08 / 2021-02-01

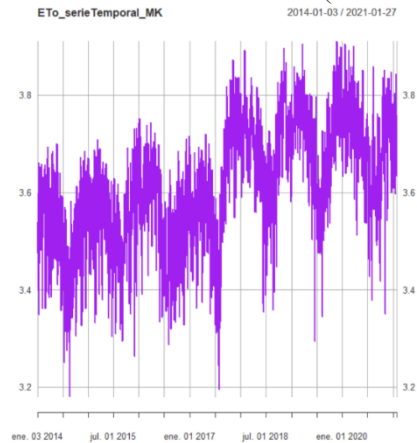


Fuente: Autor

En la serie los valores de ETo se sitúan entre 3.3 y 3.9 mm/día, con variaciones menos abruptas. Presenta una señal estacional bien definida. La consistencia de estos valores sugiere una menor sensibilidad a cambios extremos en las variables meteorológicas.

11. Estación Santa Ana

Ilustración 82 ETo Makkink (Santa Ana)

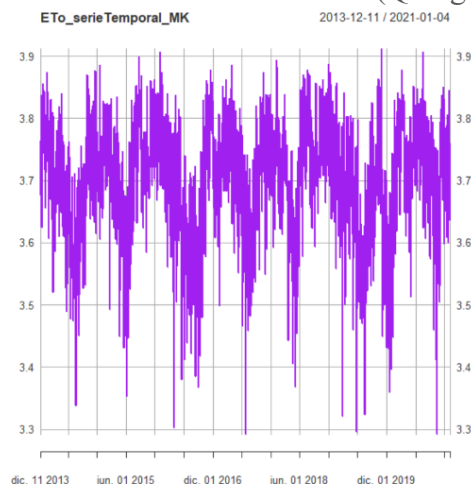


Fuente: Autor

La estimación de ETo muestra una serie temporal estable, con valores comprendidos entre aproximadamente 3.1 y 3.9 mm/día, se evidencia una marcada estacionalidad, donde se observa una disminución de ETo en ciertas épocas del año y repuntes en otras, siguiendo una tendencia más suavizada y continua.

12. Estación Quingeo

Ilustración 83 ETo Makkink (Quingeo)

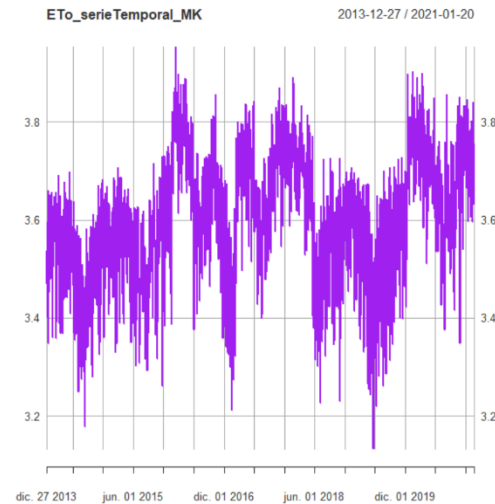


Fuente: Autor

La serie temporal se caracteriza por valores más bajos, situándose predominantemente entre 3.3 y 3.9 mm/día. Este método, muestra un comportamiento cíclico y estable, con variaciones suaves que reflejan las condiciones naturales locales.

13. Estación Sinincay – Nero

Ilustración 84 ETo Makkink (Sinincay-Nero)

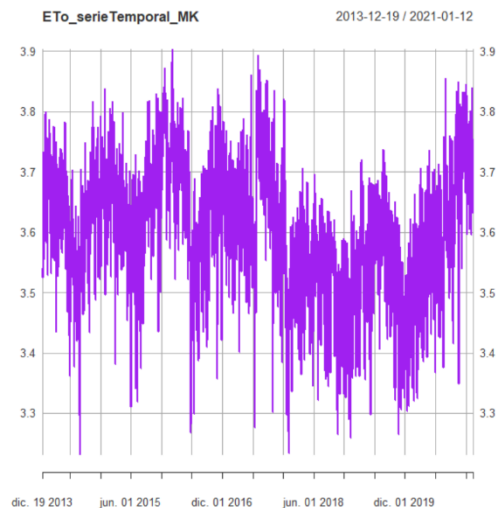


Fuente: Autor

La estimación de ETo fluctúa entre 3.1 y 3.9 mm/día, presentando una respuesta más atenuada a las fluctuaciones climáticas extremas, muestra un patrón estacional definido, con máximos recurrentes que coinciden con los meses de mayor radiación solar.

14. Estación Tixán

Ilustración 85 ETo Makkink (Tixán)

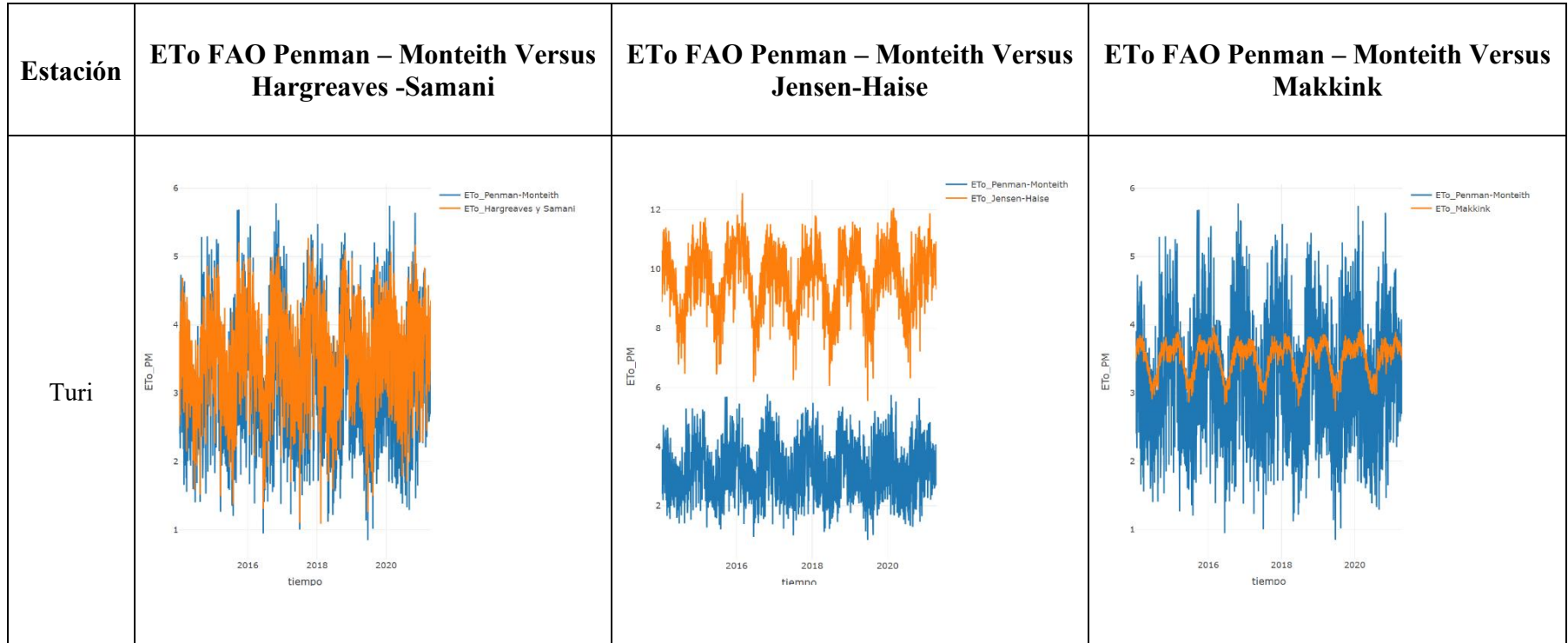


Fuente: Autor

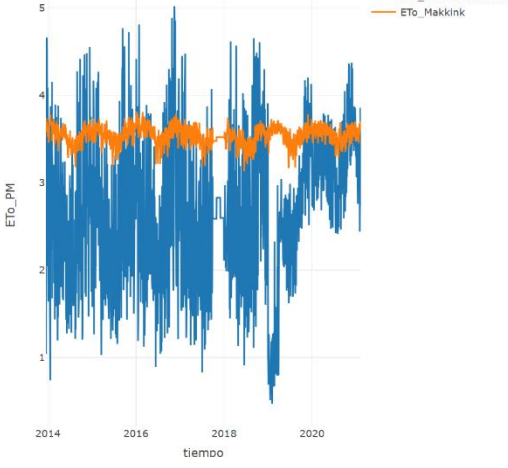
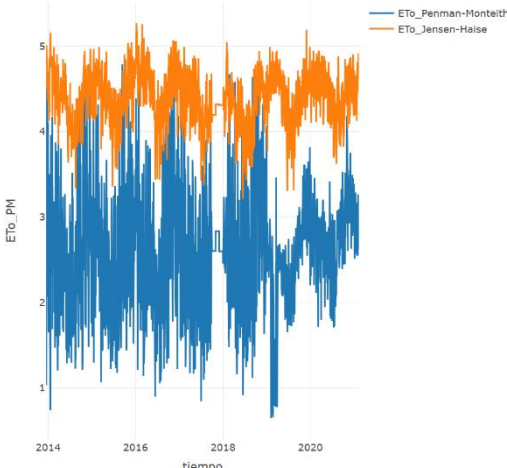
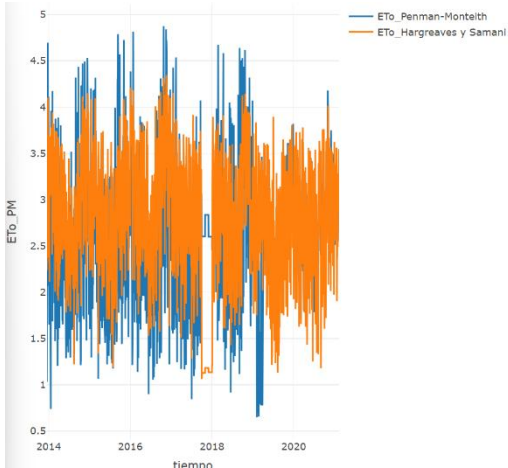
La serie temporal muestra valores de ETo entre 3.2 y 3.9 mm/día, presentando la menor variabilidad. La gráfica revela una marcada estacionalidad anual con ciclos relativamente estables. Dado su enfoque más conservador, este método puede subestimar la ETo en condiciones de alta demanda atmosférica, pero proporciona una representación sólida para climas húmedos como el de la Sierra ecuatoriana.

7. Resultados

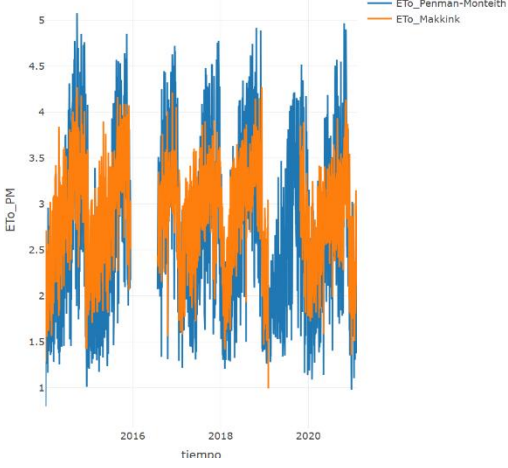
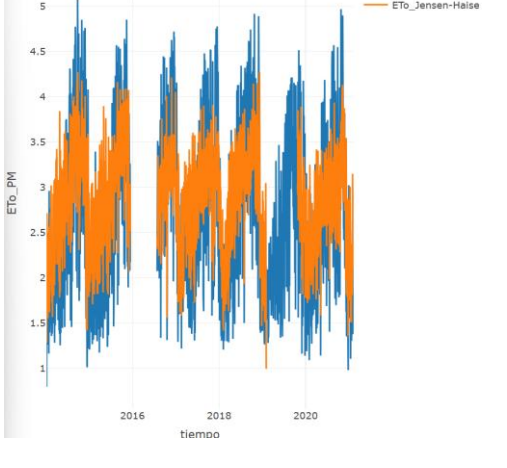
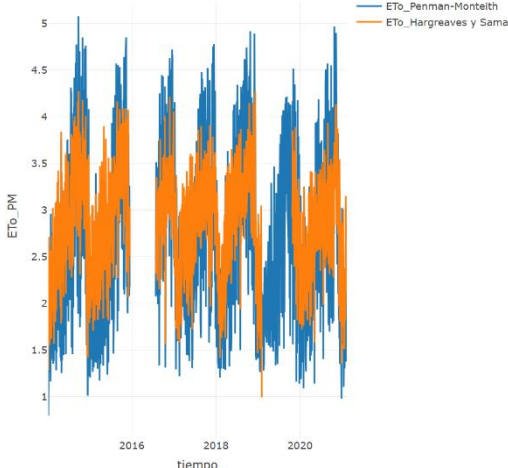
Tabla 5. Comparación entre el método de cálculo de la ETo con la FAO Penman – Monteith Versus Hargreaves -Samani, Jensen-Haise y Makkink

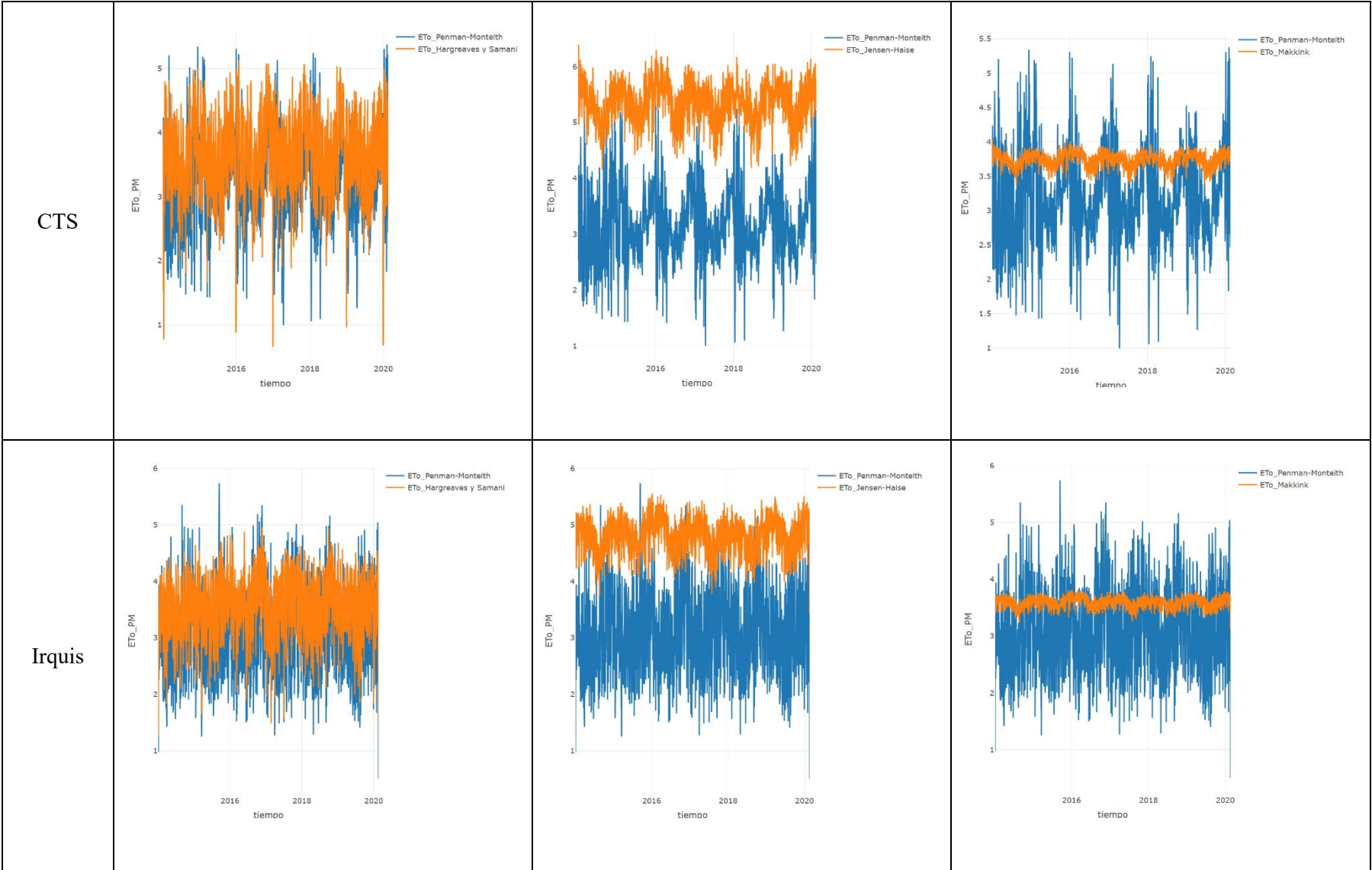


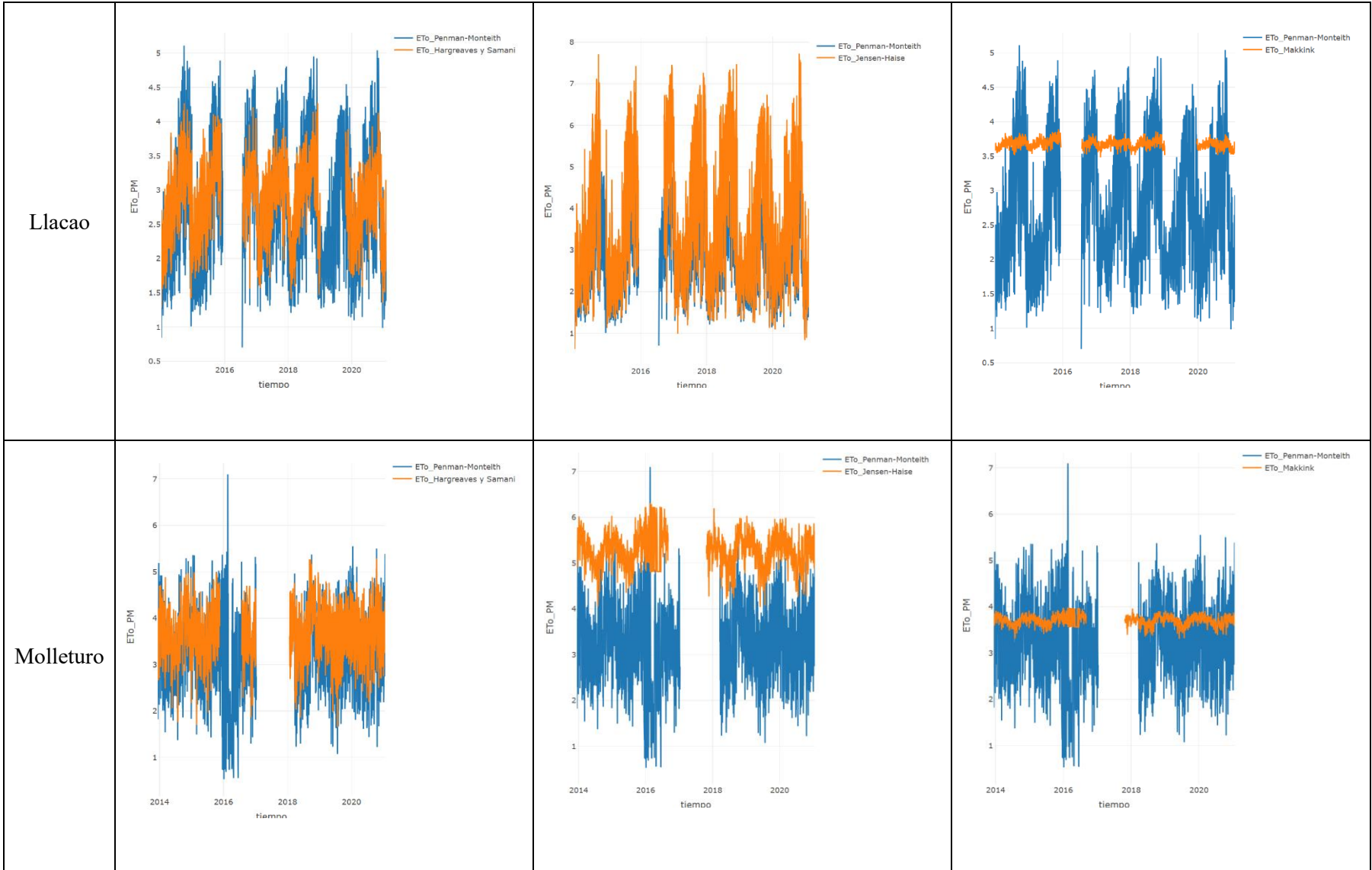
Baños

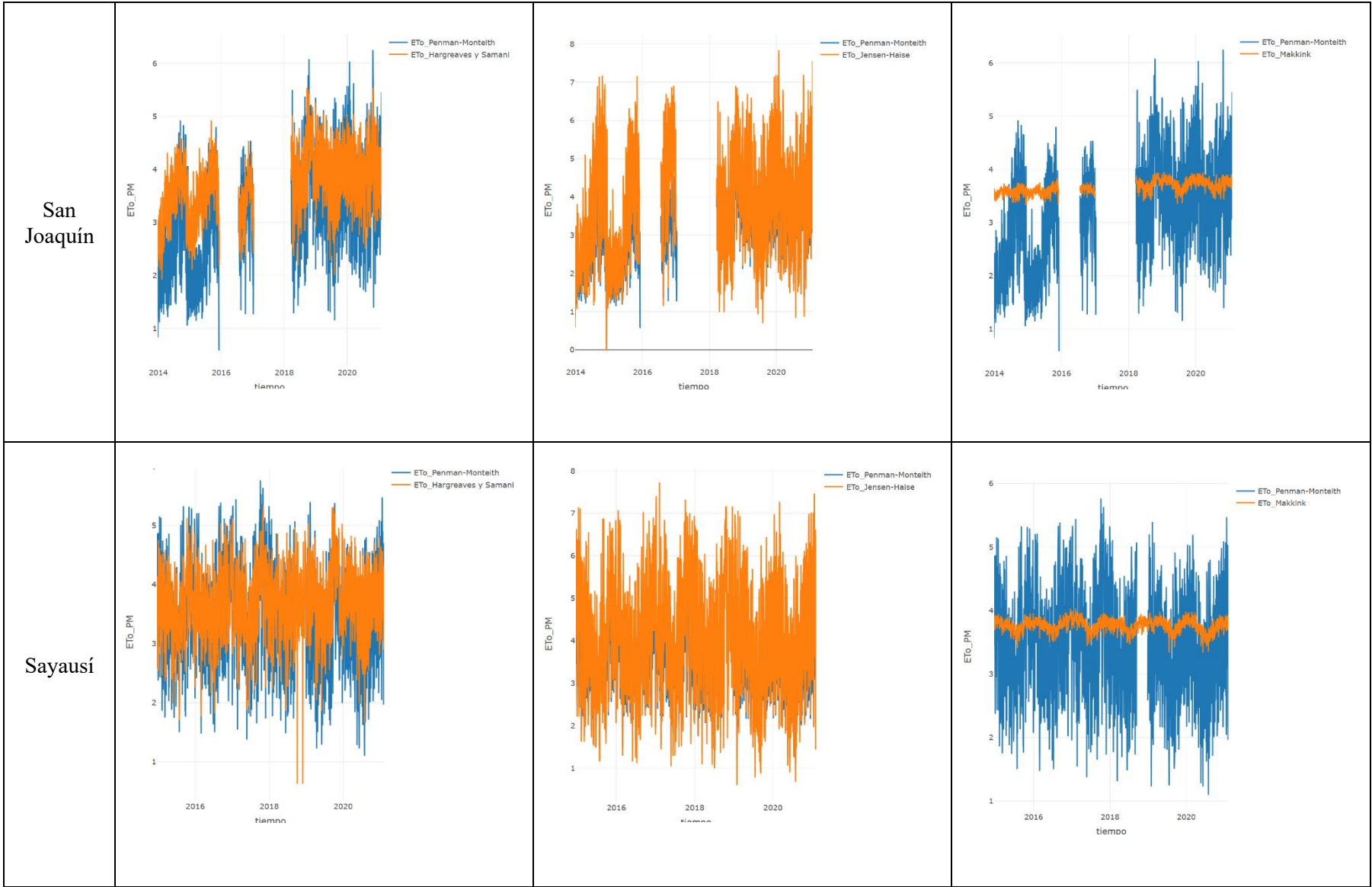


Chaucha

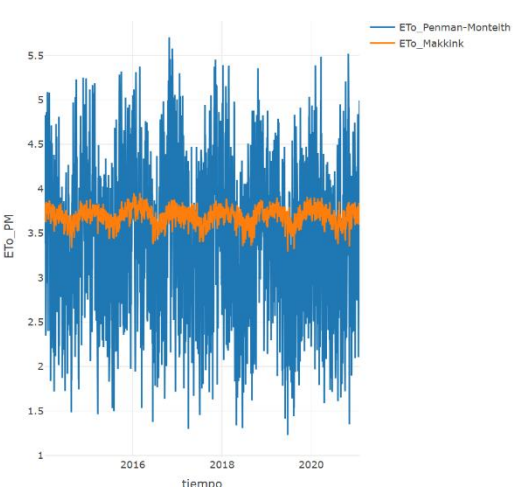
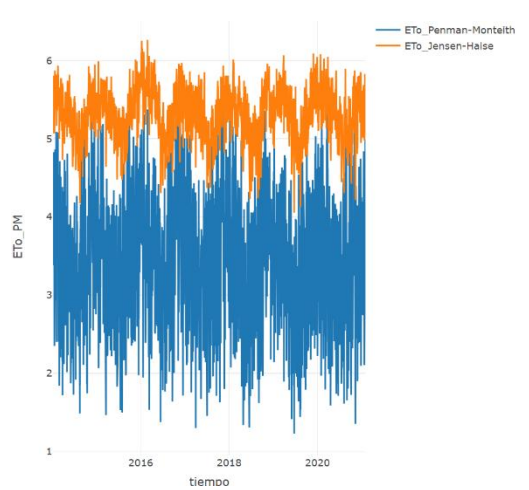
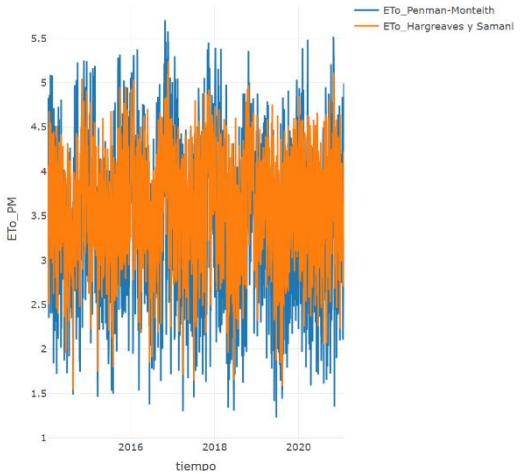




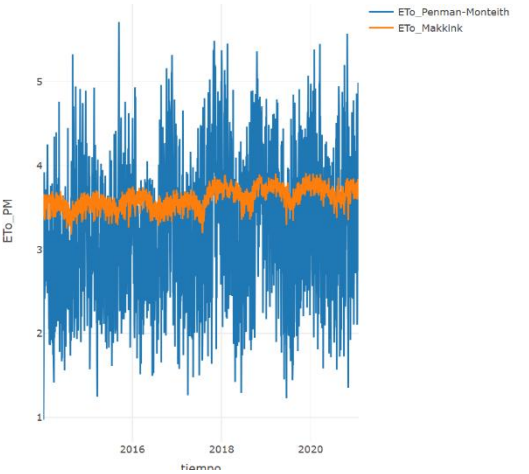
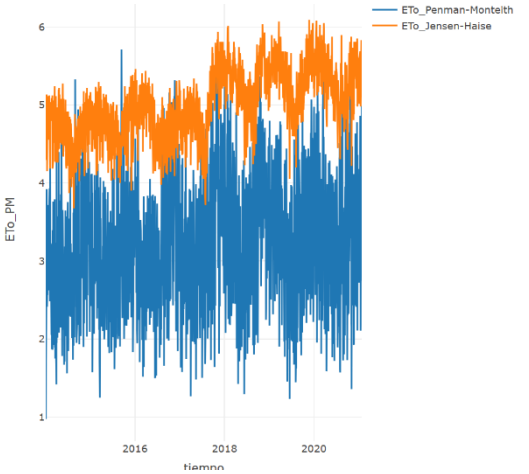
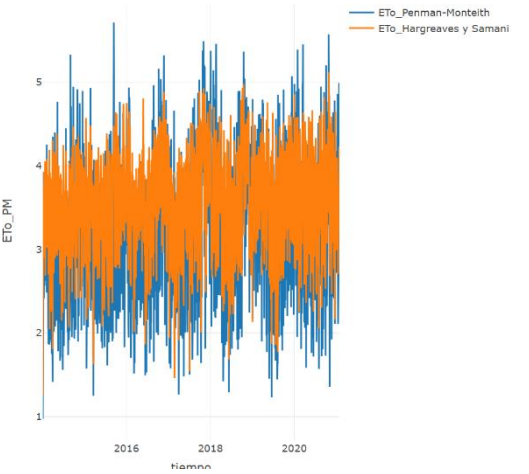


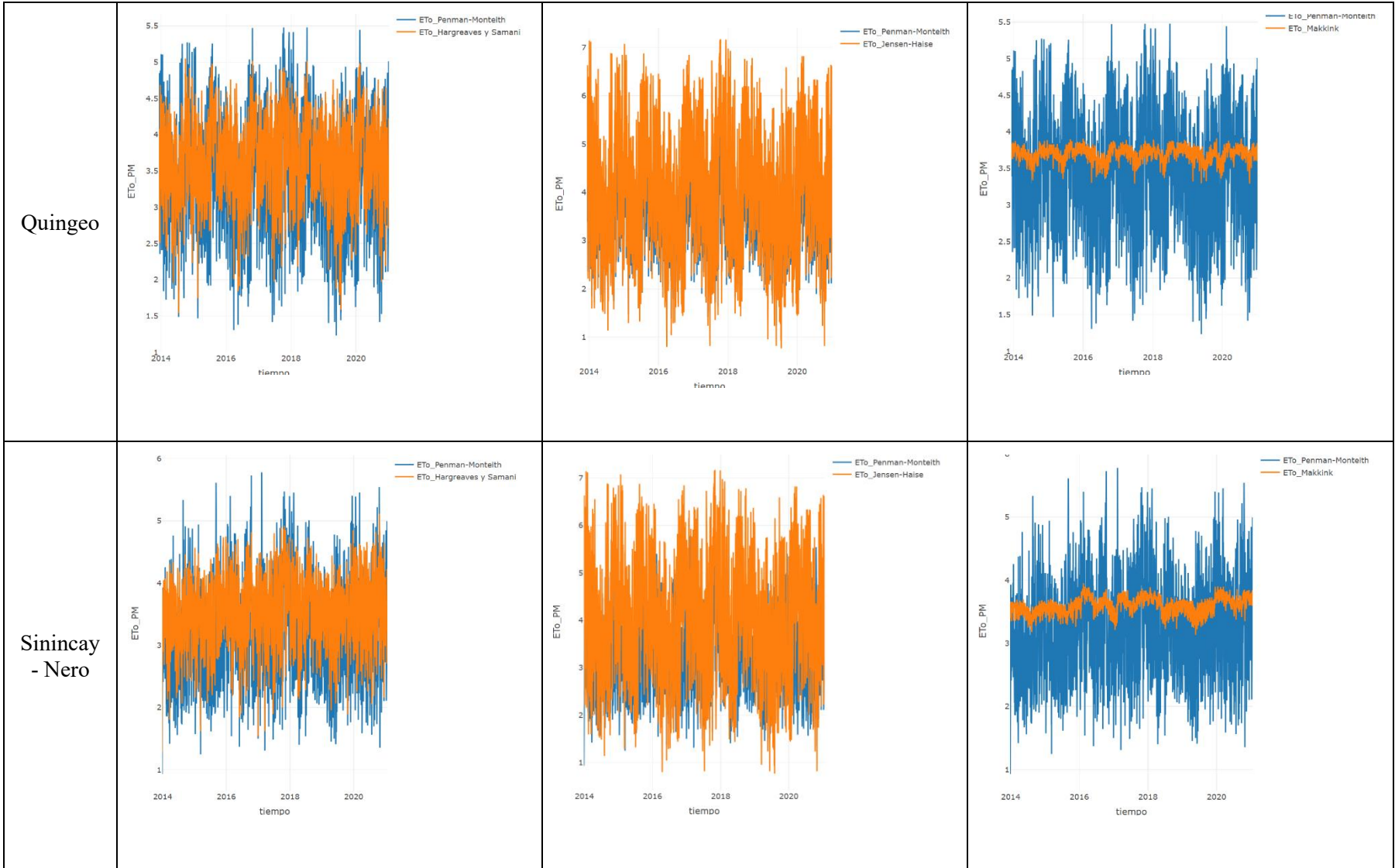


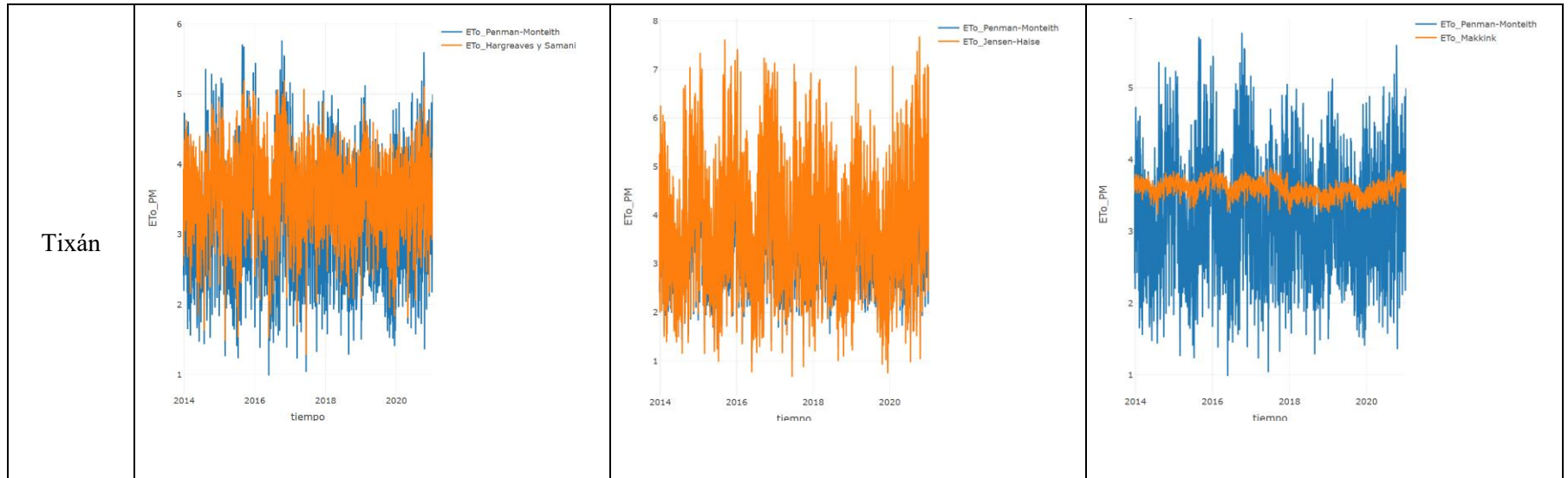
UPS



Santa Ana







Fuente: Autor

7.1. Descripción de resultados tras la comparación de los diferentes métodos versus el de la FAO Penman–Monteith

7.1.1. ETo FAO Penman–Monteith vs Hargreaves-Samani

- Ambos enfoques indican una alta variabilidad temporal del ETo y presentan patrones temporales bastante similares.
- La amplitud de las fluctuaciones calculadas por Hargreaves-Samani es similar a las fluctuaciones de FAO Penman–Monteith, particularmente en los valores máximos, y su dinámica climática permanece sin cambios.
- Hay una buena coincidencia tanto en el patrón estacional, indicando una buena reproducción de la variabilidad estacional por parte de Hargreaves-Samani, como en el comportamiento temporal del ETo en comparación con el método FAO Penman–Monteith..

7.1.2. ETo FAO Penman–Monteith vs Jensen-Haise

- Se observan dos bandas; en algunas de las estaciones se abren, en otras los valores son los mismos: el método Jensen-Haise presenta valores ligeramente más altos que en algunas de las estaciones analizadas por el método Penman-Monteith, mientras que en otras coinciden en algunas de las estaciones analizadas.
- Jensen-Haise sobreestima el ETo en algunas estaciones, pero esto ocurre en una proporción aún menor de estaciones que con Penman-Monteith.
- Esta evaluación significativa implica una compatibilidad aceptable de los dos métodos y muestra que el método Jensen-Haise, a pesar de que no toma en cuenta la humedad relativa o la velocidad del viento, es capaz de hacer una aproximación razonable al método FAO Penman-Monteith.

7.1.3. ETo FAO Penman–Monteith vs Makkink

- Makkink muestra que la subestimación de ETo es grande en comparación con Penman–Monteith.
- Los valores del método Makkink son menos dependientes de la estación, mientras que el método Penman–Monteith muestra una respuesta más dinámica a los cambios climáticos.

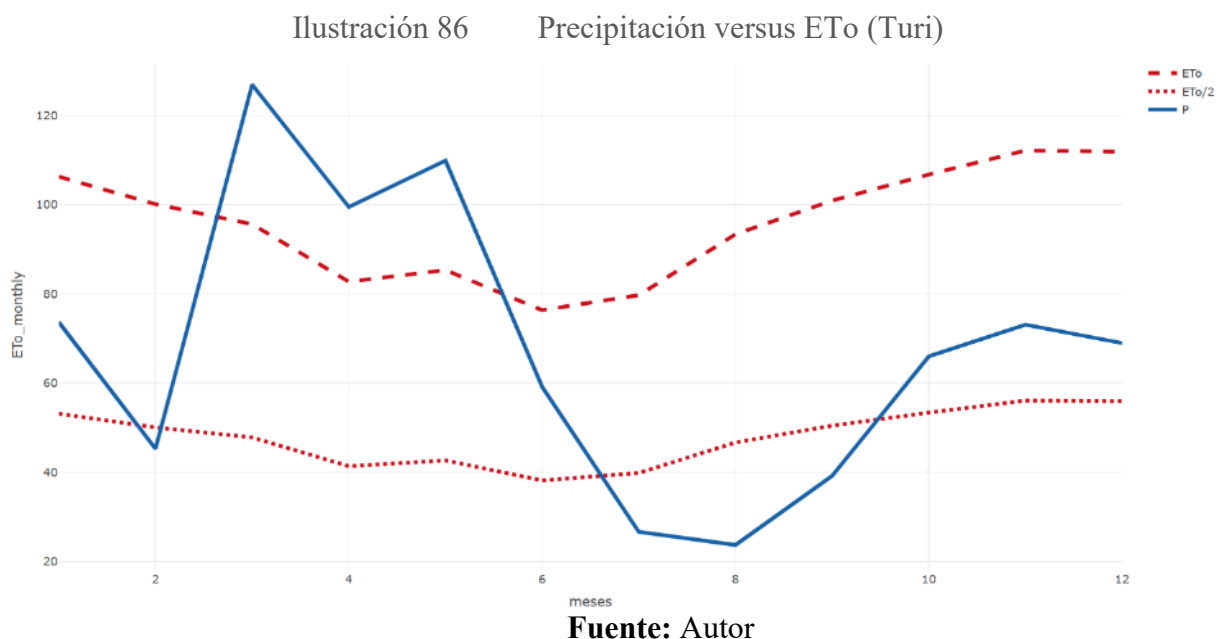
- Según el gráfico, Makkink no es capaz de captar los picos altos de evaporación en todas las estaciones, y sus valores generales en todas las estaciones son muy bajos en comparación con otros métodos.

Para concluir, el método FAO Penman–Monteith ahora se reconoce como una referencia al estimar ET, ya que tiene en cuenta plenamente los principales parámetros climáticos, es decir, la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento, y, además, se puede aplicar a varios cultivos y zonas agroclimáticas con pequeñas calibraciones.

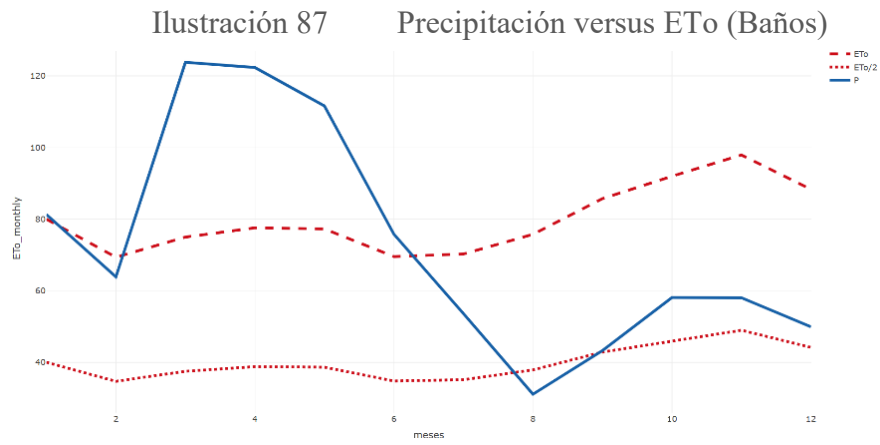
7.2. Representación de Precipitación versus ETo – Referencial o Potencial

Conforme a los gráficos de Precipitación versus ETo – Referencial o Potencial que obtuvimos de cada estación se realizó un análisis general con todos los resultados comparándolos con el análisis que realizó Dercon (1998) para la ciudad de Cuenca para poder cumplir con el problema que planteaba este proyecto ¿Estadísticamente hay cambio climático?, tomando en cuenta que el análisis que Gerd Dercon realizó tiene aproximadamente 23 años de diferencia con el análisis realizado actualmente con datos analizados desde el año 2013 al 2021 en la mayor parte de estaciones.

1. Estación Turi

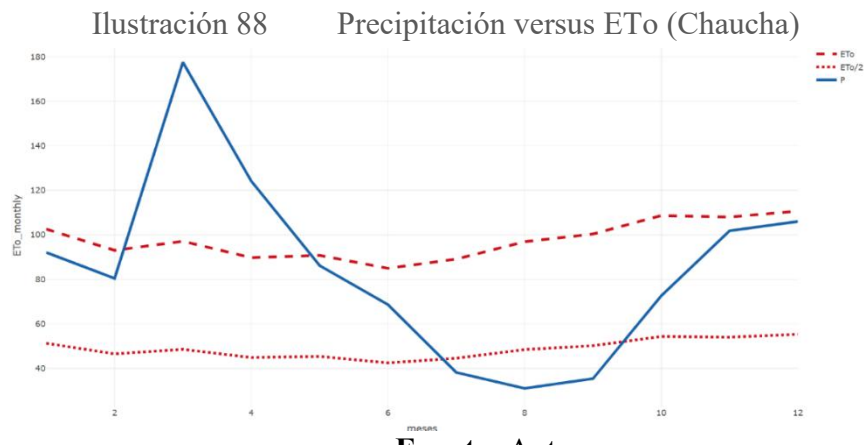


2. Estación Baños



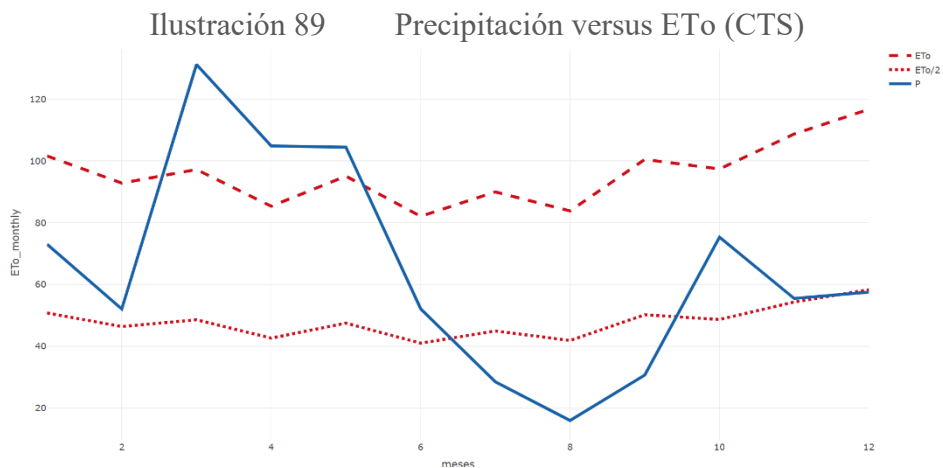
Fuente: Autor

3. Estación Chaucha



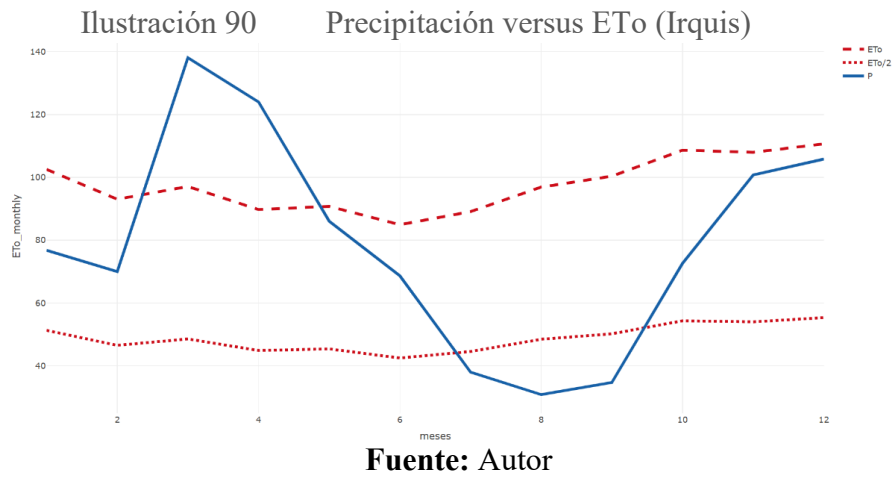
Fuente: Autor

4. Estación CTS

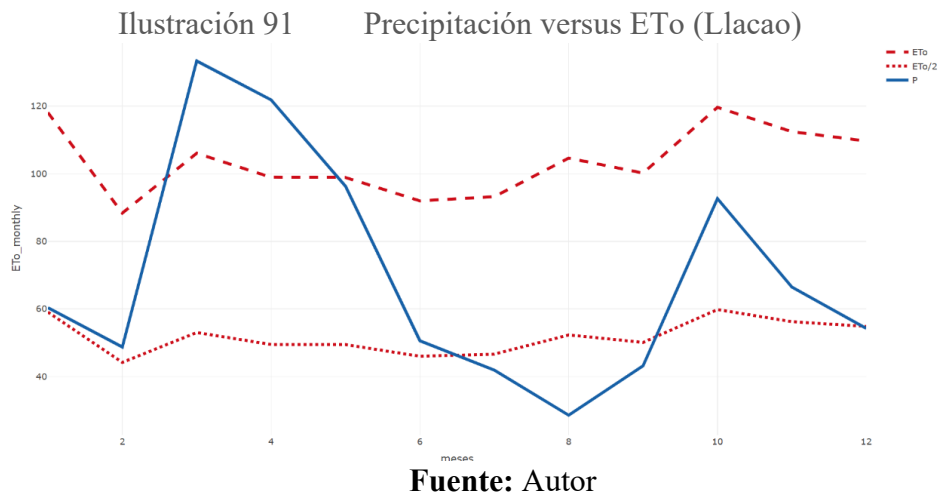


Fuente: Autor

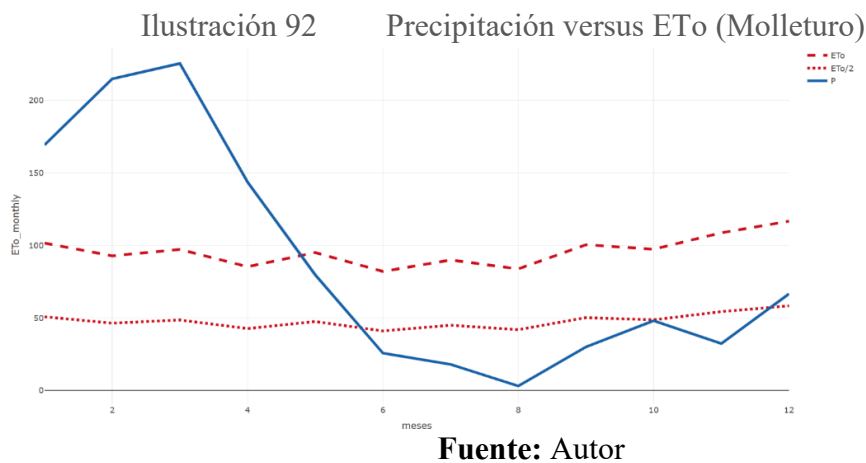
5. Estación Irquis



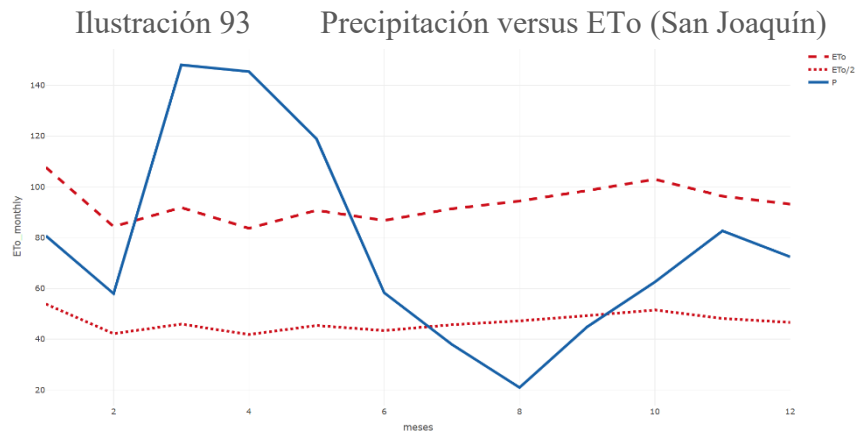
6. Estación Llaqueo



7. Estación Molleturo

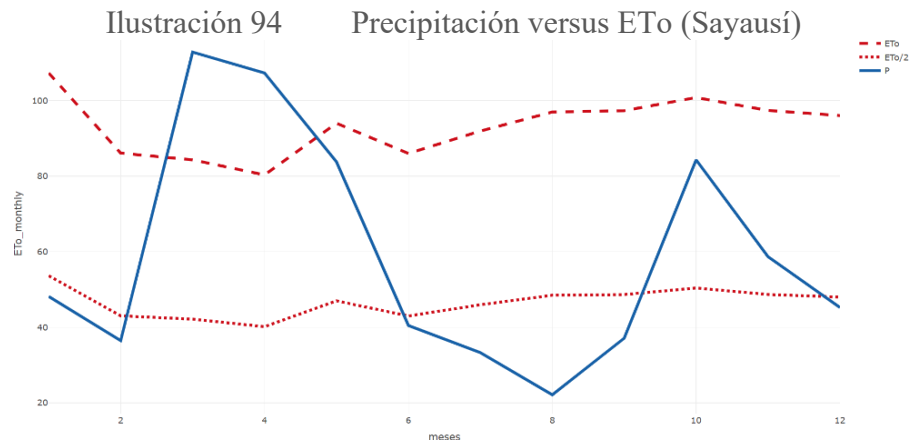


8. Estación San Joaquín



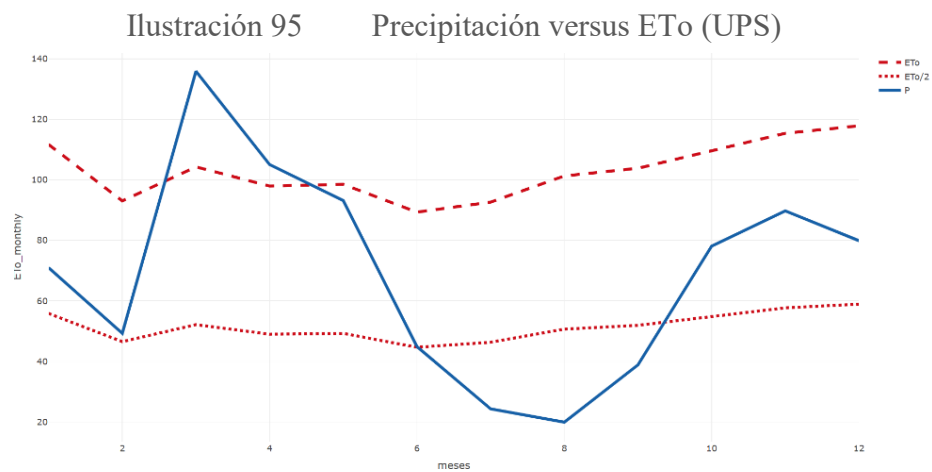
Fuente: Autor

9. Estación Sayausí



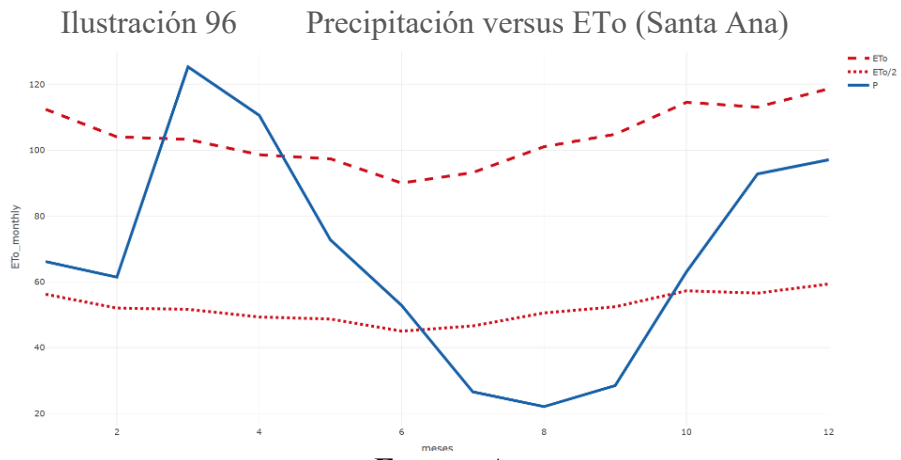
Fuente: Autor

10. Estación UPS



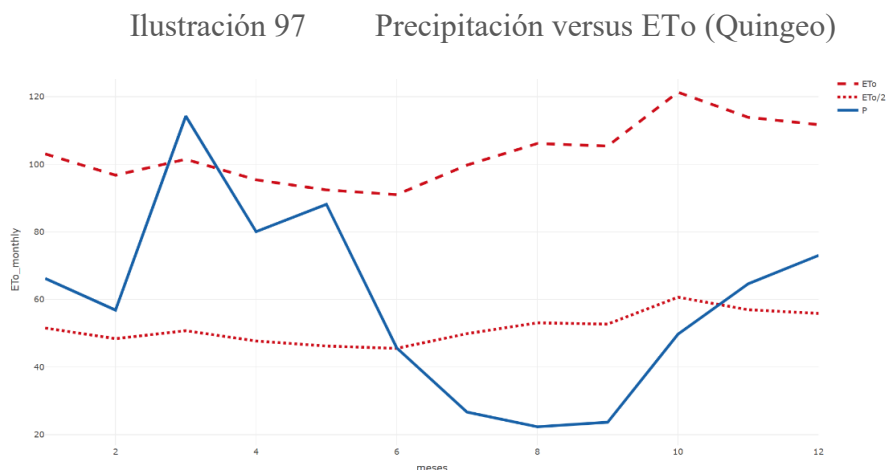
Fuente: Autor

11. Estación Santa Ana



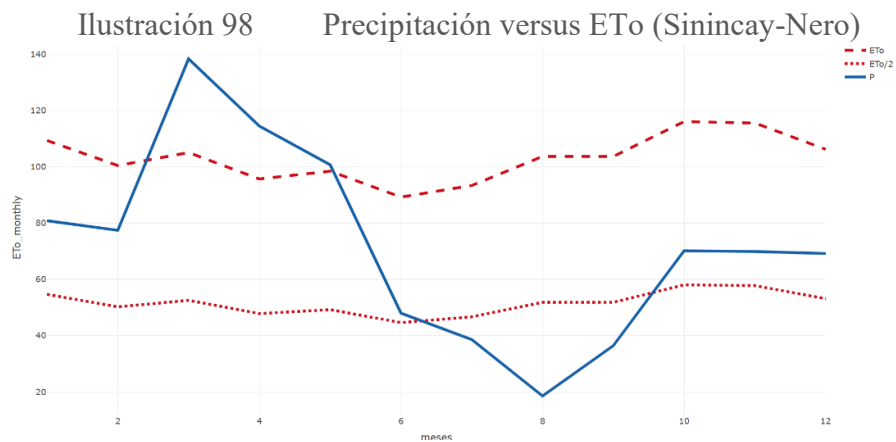
Fuente: Autor

12. Estación Quingeo



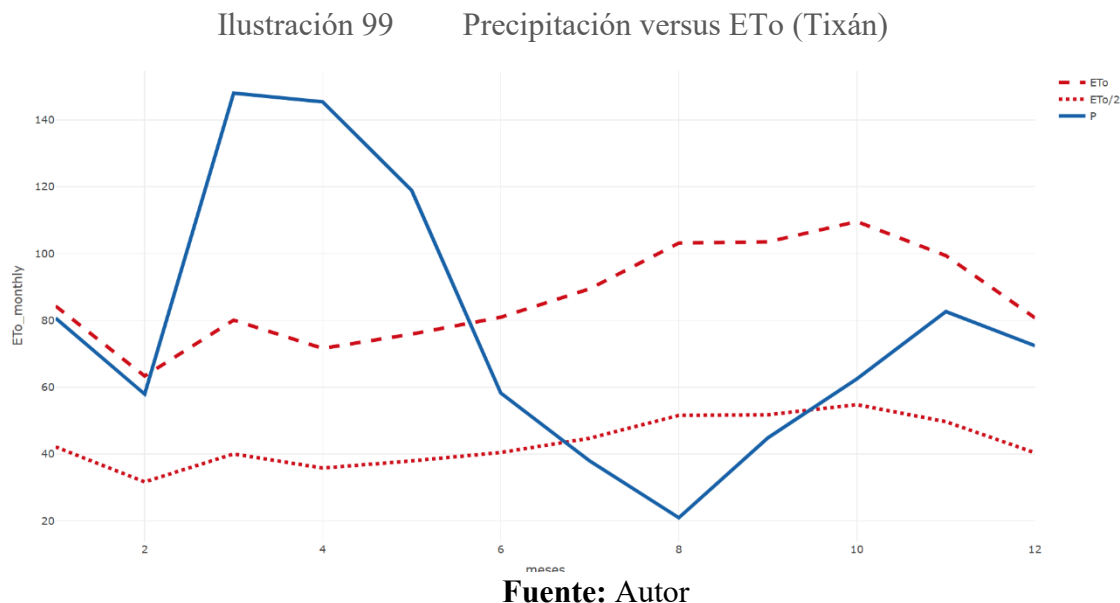
Fuente: Autor

13. Estación Sinincay – Nero



Fuente: Autor

14. Estación Tixán



7.2.1. Análisis comparativo: Dercon (1998) vs Estaciones actuales (2013–2021)

Tabla 6. Comparación resultados de: Dercon (1998) vs Estaciones actuales (2013–2021)

Patrón	Resultado Dercon (1998)	Resultado Estaciones actuales (2013–2021)
Precipitación (P)	<ul style="list-style-type: none"> - Máximo de precipitación en marzo (~130 mm). - Segundo pico en octubre (~105 mm). - Mínimos marcados entre junio y agosto (~35 mm). 	<ul style="list-style-type: none"> - En general, los picos de precipitación en marzo se mantienen. - También se observa el segundo pico de octubre, pero no es tan claro en todas las estaciones. - Aun así, los mínimos entre junio y agosto se mantienen, aunque la lluvia cae más precipitadamente en algunas estaciones. - Las estaciones actuales tienen más variabilidad entre meses. Algunos valores muy ruidosos son visibles en algunas estaciones.
Evapotranspiración (ETo)	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente estable entre 70–140 mm, con ligera tendencia creciente hacia diciembre. 	<ul style="list-style-type: none"> - La ETo tiene una tendencia generalmente creciente durante todo el año, con los valores más altos observados en los meses finales (octubre-diciembre).

	<ul style="list-style-type: none"> - Línea suave, sin grandes fluctuaciones mensuales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mientras que el patrón es similar entre las estaciones que para la precipitación. - Los valores más recientes de ETo son más cercanos en promedio, en meses particularmente secos (agosto y septiembre).
<p style="text-align: center;">Relación Precipitación vs ETo/2</p>	<ul style="list-style-type: none"> - En meses húmedos como marzo y octubre, la precipitación supera ampliamente ETo/2. - Entre junio y agosto, $P \approx ETo/2$, indicando balance hídrico más ajustado o incluso déficit. 	<ul style="list-style-type: none"> - En ciertas estaciones (algunas donde la precipitación está por debajo de ETo/2 en varios meses, especialmente entre mayo y septiembre), la pérdida de información es significativa en general. - Esto sugiere un estrés hídrico más fuerte en la mayoría de los meses del año, que no era tan fuerte en el análisis de 1998.

Fuente: Autor

7.2.2. Análisis de la Precipitación media anual versus Altura de las Estaciones

También se evaluó la precipitación media anual (mm), para la cual se realizó una primera tabulación utilizando datos diarios con el software RStudio. Con esta herramienta, los registros diarios se convirtieron en una serie de datos de valores anuales y promedios representativos, lo cual es más significativo del comportamiento de la lluvia en cada una de las 14 estaciones meteorológicas consideradas.

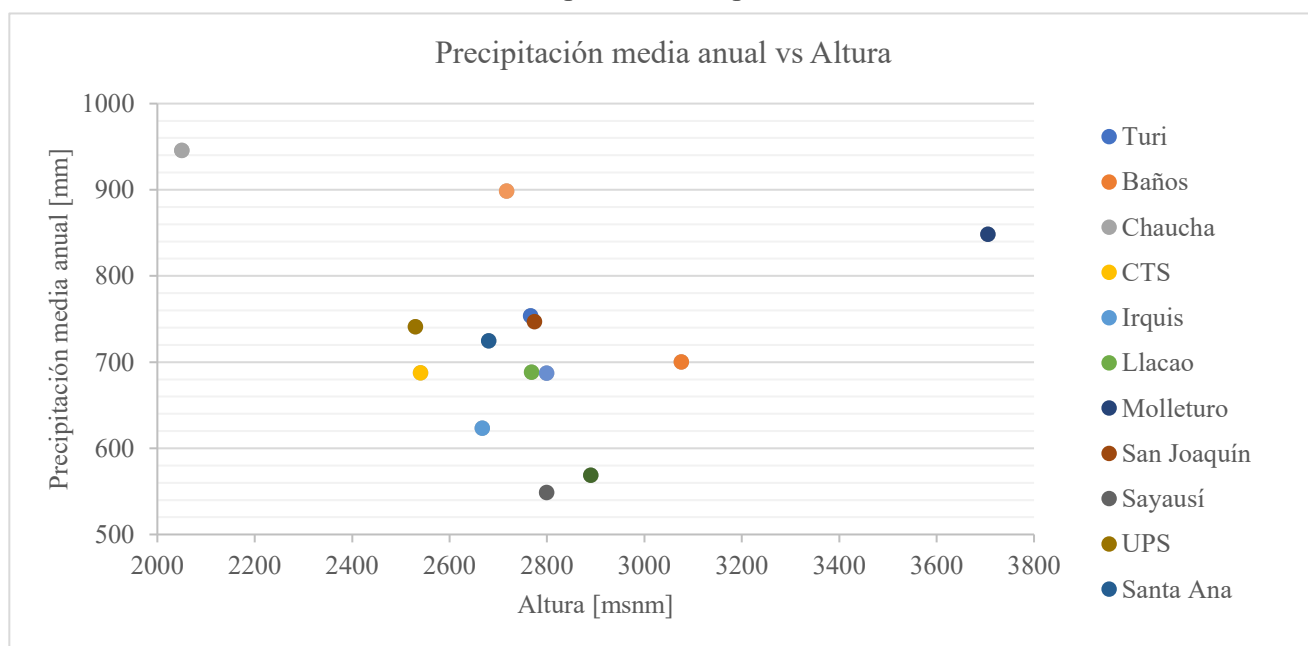
Además, se incluyó la elevación de cada estación (msnm), lo que nos permitió obtener el siguiente gráfico, donde se puede observar la posible relación entre precipitación y altitud.

Tabla 7. Representación Precipitación media anual versus Altura

Estaciones Meteorológicas	Precipitación media anual	Altura [msnm]
Turi	753.8	2766
Baños	700.4	3076
Chaucha	945.7	2050
CTS	687.7	2540
Irquis	623.2	2667
Llacao	688.5	2768
Molleturo	848.2	3705
San Joaquín	747.1	2774
Sayausí	548.6	2799
UPS	741.2	2530
Santa Ana	724.9	2680
Quingeo	568.6	2890
Sinincay - Nero	687.3	2799
Tixán	898.4	2717

Fuente: Autor

Ilustración 100 Gráfica de dispersión Precipitación media anual vs Altura



Fuente: Autor

En resumen, no existe una relación lineal estricta entre altitud y precipitación. Algunas estaciones a mayor altitud reciben menos recepción, y algunas a menor altitud reciben más, mostrando la naturaleza no uniforme e indirecta de la relación.

Observaciones del gráfico:

- Chaucha (2050 msnm), con uno de los niveles de precipitación más altos (945.7 mm), también fue la estación a menor altura entre el conjunto. Esto significa que probablemente haya un efecto de humedad más fuerte en esta parte baja.
- Sayausí (2799 msnm) y Quingeo (2829 msnm) muestran la menor precipitación (548.6 mm a 568.6 mm respectivamente), a pesar de sus altas altitudes.
- Molleturo (a 3705 msnm) y Tixán (a 2717 metros sobre el nivel del mar) tienen altos niveles de precipitación (848,2 mm y 898,4 mm); Esto contrasta con la posibilidad de que, a mayor elevación, debería haber menos precipitación.

No podemos determinar una relación simple directamente desde las altitudes de las estaciones hasta la precipitación promedio anual. Se podría suponer que la precipitación aumenta con la elevación debido a los efectos orográficos, pero en este caso, hay mucha dispersión, ya que los efectos locales como el terreno, etc., pueden influir en la precipitación.

7.2.3. Análisis de la Temperatura Media Anual versus Altura de las Estaciones

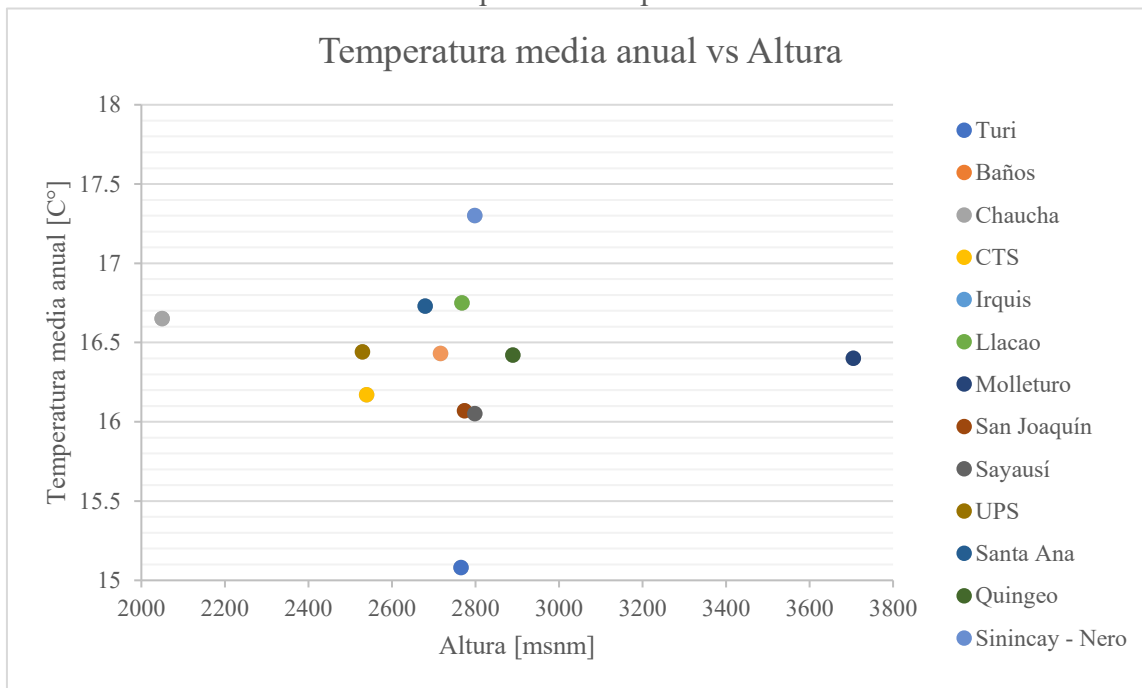
Otra de las comparaciones por analizar es la de la Temperatura media anual (C°) versus Altura de las estaciones (msnm), este análisis es especialmente importante en zonas montañosas como Cuenca, donde los cambios altitudinales son marcados en distancias cortas. Además, permite entender mejor la distribución espacial del clima, identificar patrones normales, etc.

Tabla 8. Representación Temperatura media anual versus Altura

Estaciones Meteorológicas	Temperatura media anual [C°]	Altura [msnm]
Turi	15.1	2766
Baños	13.7	3076
Chaucha	16.7	2050
CTS	16.2	2540
Irquis	14.6	2667
Llacao	16.8	2768
Molleturo	16.4	3705
San Joaquín	16.1	2774
Sayausí	16.1	2799
UPS	16.4	2530
Santa Ana	16.7	2680
Quingeo	16.4	2890
Sinincay - Nero	17.3	2799
Tixán	16.4	2717

Fuente: Autor

Ilustración 101 Gráfica de dispersión Temperatura media anual vs Altura



Fuente: Autor

Por lo tanto, podemos ver que el gráfico muestra una tendencia descendente de temperatura según la altura de cada estación; sin embargo, esto no refleja resultados perfectamente lineales. Hay cierta dispersión, pero en general esa tendencia refleja mayor altitud/menor temperatura según la ciencia de las atmósferas.

Observaciones del gráfico:

- Estaciones como Baños (3076 msnm) tienen una temperatura promedio baja (13.72 °C) debido a su mayor elevación.
- Por el contrario, Chauca (2050 msnm) presenta una de las temperaturas más altas (16.65 °C) y es el sitio más bajo entre ellos.
- Sininacay - Nero (2717 msnm) se destaca con la temperatura más alta (17.3 °C), lo que podría atribuirse a condiciones microclimáticas e idiosincrasias locales (por ejemplo, altitud y vegetación).
- Llacao (2768 msnm) también exhibe una temperatura alta (16.75 °C), más alta que las otras estaciones a mayores altitudes.

- La estación más alta (Molleturo, 3705 msnm) muestra una temperatura intermedia (16.4 °C) que no es atribuible a factores locales positivos.

En contraste con la distribución de la precipitación, la relación entre altitud y temperatura media anual es bastante pronunciada: a mayor altitud, menor temperatura media anual, con algunas excepciones locales debido a los factores mencionados anteriormente.

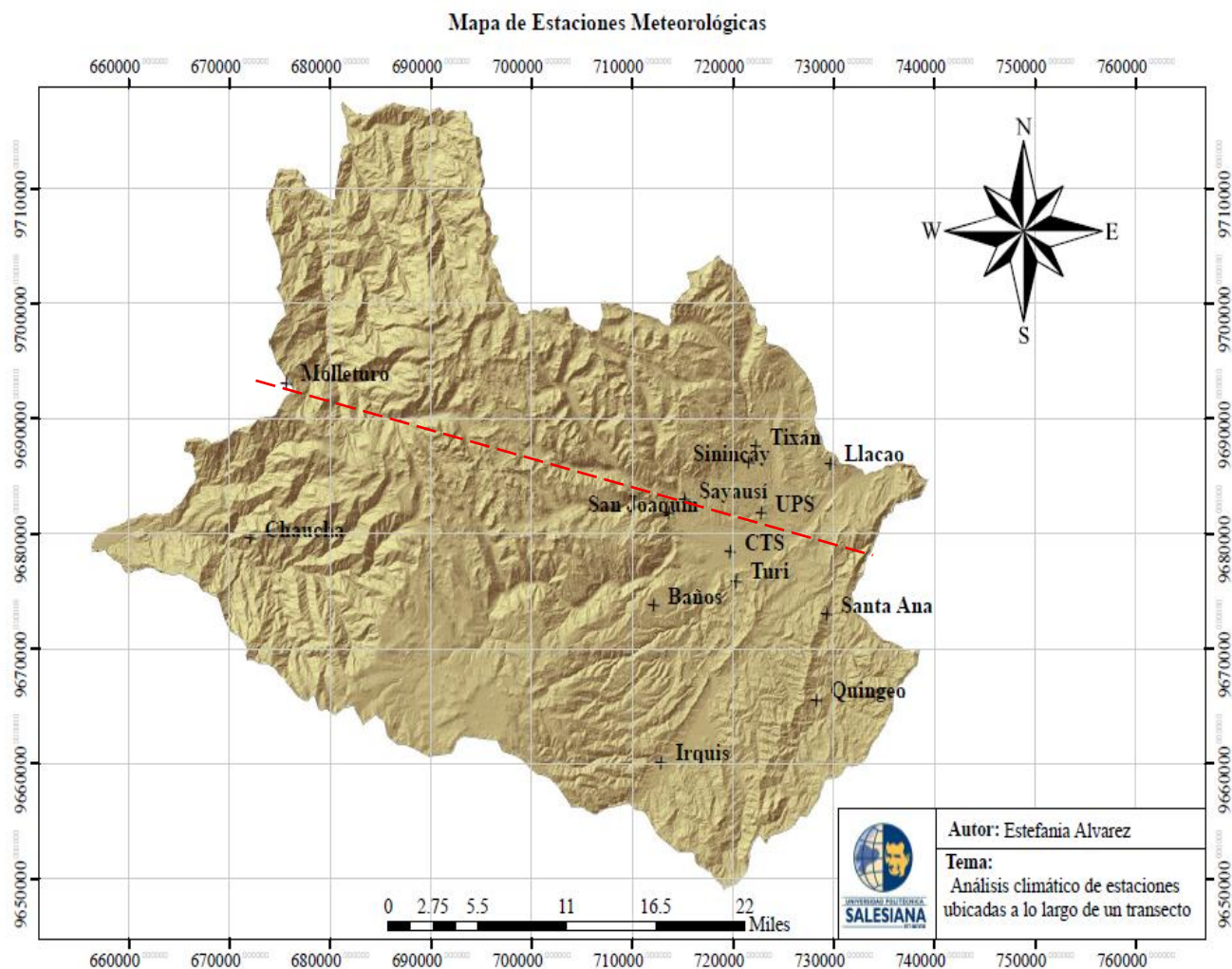
7.2.4. Análisis de Estaciones Meteorológicas Ubicadas a lo Largo de un Transecto

Se produjo un mapa espacial en ArcGIS que ilustra la posición espacial de las estaciones meteorológicas clasificadas espacialmente a lo largo de un gradiente altitudinal.

Para este enfoque, consideramos las estaciones meteorológicas alineadas espacialmente de manera continua a lo largo del tránsito, para analizar el cambio climático entre las estaciones que pertenecen a cada transecto climático.

Primer transecto:

Ilustración 102 Mapa de análisis climático a lo largo de un transecto (1)

**Fuente:** Autor

Para el primer transecto que se analizó se ven involucradas las estaciones: Molleturo, San Joaquín, Sayausí, UPS y CTS, se analizaron las siguientes variables climatológicas: precipitación, temperatura de aire, radiación solar y velocidad de viento. Se deduce lo siguiente:

Tabla 9. Análisis del primer transecto

Estación	Variables Analizadas			
	Precipitación	Temperatura de aire	Radiación solar	Velocidad de viento
Molleturo	Muestra alta variabilidad anual con dos máximos (abril y octubre). Presenta elevadas precipitaciones anuales, propias de zonas influenciadas.	Registra temperaturas más elevadas respecto a las estaciones más altas, con menor amplitud térmica.	Moderadamente elevada, influenciada por la menor nubosidad interanual en ciertos periodos secos.	Valores medios a altos, con eventos de viento más marcados entre junio y septiembre, reflejando la transición térmica.
San Joaquín	Régimen bimodal bien definido, aunque con valores de precipitación menores que Molleturo, indicando transición hacia zonas más secas (máximos en abril y octubre).	Temperatura intermedia. Se registra un descenso progresivo en comparación con Molleturo debido a mayor altitud.	Moderada, con disminuciones en meses lluviosos. Efecto de nubosidad visible en los picos reducidos de ETo.	Presenta una mayor oscilación, se observa mayor intensidad de vientos intensificados durante épocas secas.
Sayausí	Presenta régimen andino clásico con picos en abril y octubre. Se denota una elevada pluviosidad intermedia, menor que en Molleturo pero más que en zonas altas.	Más baja que San Joaquín, reflejo del ascenso altitudinal. Se evidencia mayor amplitud térmica diaria.	Se denota una buena disponibilidad de radiación con estacionalidad moderada.	Valores intermedios con ráfagas estacionales más marcadas durante épocas secas y lluviosas.
UPS	Ubicada en zona urbana central. Presenta una distribución regular con picos similares al resto de estaciones andinas, aunque con menor acumulado por efecto urbano.	Temperatura moderada, con influencia urbana que puede elevar levemente la temperatura mínima.	Esta estación presenta un buen registro continuo sin interrupciones, con valores estacionales bien marcados.	Menor que en zonas abiertas. Presenta fluctuaciones suaves.
CTS	Patrón similar al de la UPS, aunque con ligeramente mayor precipitación acumulada, posiblemente por menor urbanización inmediata.	Perfil térmico similar a la UPS, con picos ligeramente menores por el mismo efecto.	Presenta alta coherencia con estaciones adyacentes en cuanto a insolación.	Oscila entre valores bajos y medios, con presencia de vientos diarios moderados.

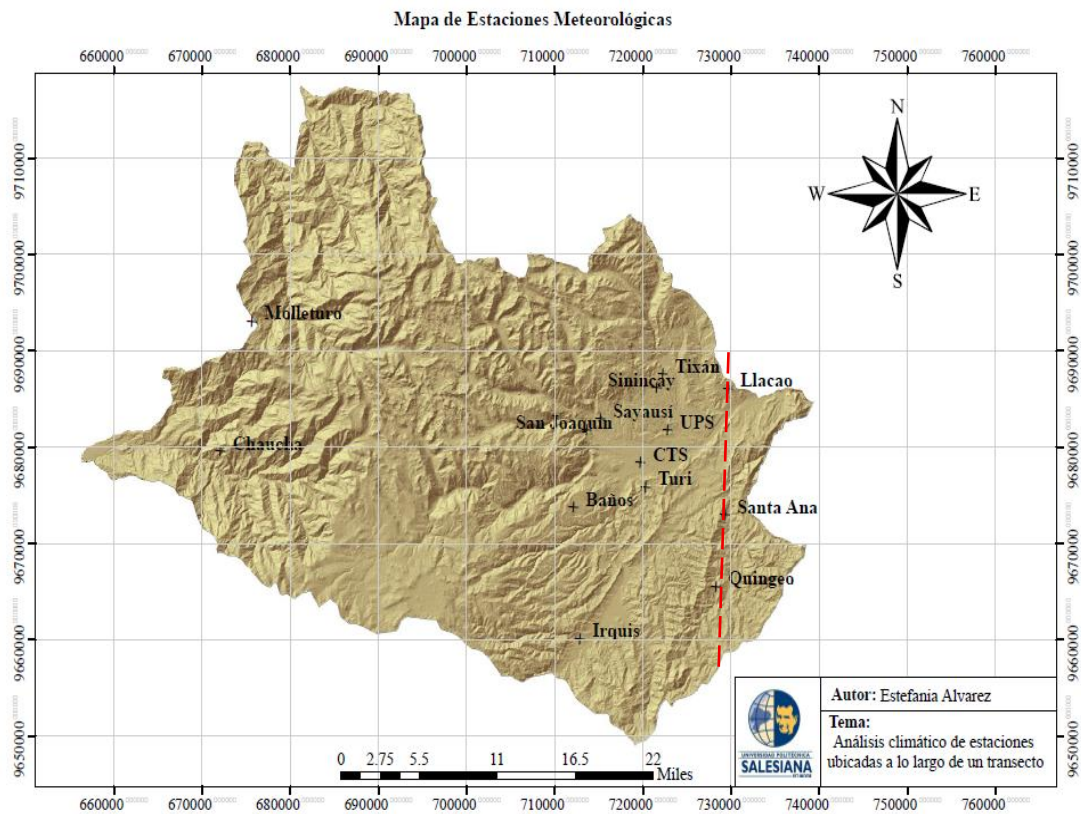
Fuente: Autor

Síntesis final:

- **Molleturo (zona baja)** = Alta precipitación y temperatura, alta ETo.
- **San Joaquín y Sayausí (zona media)** = Disminución continua de temperatura y precipitación, mayor variabilidad térmica.
- **UPS y CTS (zona urbana/alta)** = Moderación térmica, menor precipitación, radiación constante y viento atenuado.

Segundo transecto:

Ilustración 103 Mapa de análisis climático a lo largo de un transecto (2)



El segundo transecto que se analizó se ven involucradas las estaciones: Llaqueo, Santa Ana y Quingeo, Se deduce lo siguiente:

Tabla 10. Análisis del segundo transecto

Estación	Variables Analizadas			
	Precipitación	Temperatura de aire	Radiación solar	Velocidad de viento
Llacao	Presenta un régimen típico andino, con máximos en abril y octubre. La precipitación acumulada anual es intermedia, reflejando su posición geográfica entre zonas húmedas y secas.	Registra temperaturas moderadamente bajas, propias de su altitud. Existe una marcada amplitud térmica diaria, especialmente en estaciones secas.	Se observa buena disponibilidad solar a lo largo del año, aunque con variaciones asociadas a la nubosidad.	Viento con comportamiento irregular, aunque con tendencia a incrementarse en estaciones secas, influenciado por la topografía del valle.
Santa Ana	Comportamiento climático estable con precipitaciones bien distribuidas a lo largo del año, aunque con los picos típicos de la Sierra.	Se observan valores de temperatura media relativamente bajos, con amplitudes moderadas entre el día y la noche, propias de zonas altas del Austro ecuatoriano.	Alta disponibilidad solar con variabilidad cíclica anual clara. Se evidencian picos de radiación en los meses secos, coherente con la reducción de nubosidad.	Se registran vientos más constantes y estables, con menos picos extremos, lo que indica un entorno menos expuesto o protegido orográficamente.
Quingeo	Presenta un régimen de lluvias bien marcado, con dos máximos anuales. La acumulación total anual es ligeramente inferior a la de Santa Ana, lo cual se asocia a su ubicación más hacia el sur.	Registra valores bajos de temperatura media, típicos de zonas altas y expuestas, con mayor variabilidad térmica entre estaciones secas y húmedas.	Radiación estable y elevada, con respuesta clara a las variaciones estacionales, lo que sugiere cielo despejado frecuente durante la estación seca.	Se observan vientos moderadamente intensos, con episodios significativos durante la época seca.

Fuente: Autor

Síntesis final:

- **Temperatura:** Esta disminuye progresivamente de Llacao a Quingeo, claramente como una función de la elevación.
- **Precipitación:** Es bastante estable en los tres puntos, aunque Quingeo tiende a tener totales ligeramente más bajos.

- **Radiación solar:** Aumenta ligeramente hacia las partes más altas como Quingeo debido a la menor nubosidad.
- **Viento:** Hay un moderado aumento hasta Quingeo; sin embargo, Santa Ana es un poco más resguardada.

7.2.5. Análisis de la Precipitación y Temperatura Media Anual versus Altura de las Estaciones Involucradas en el Primer Transecto

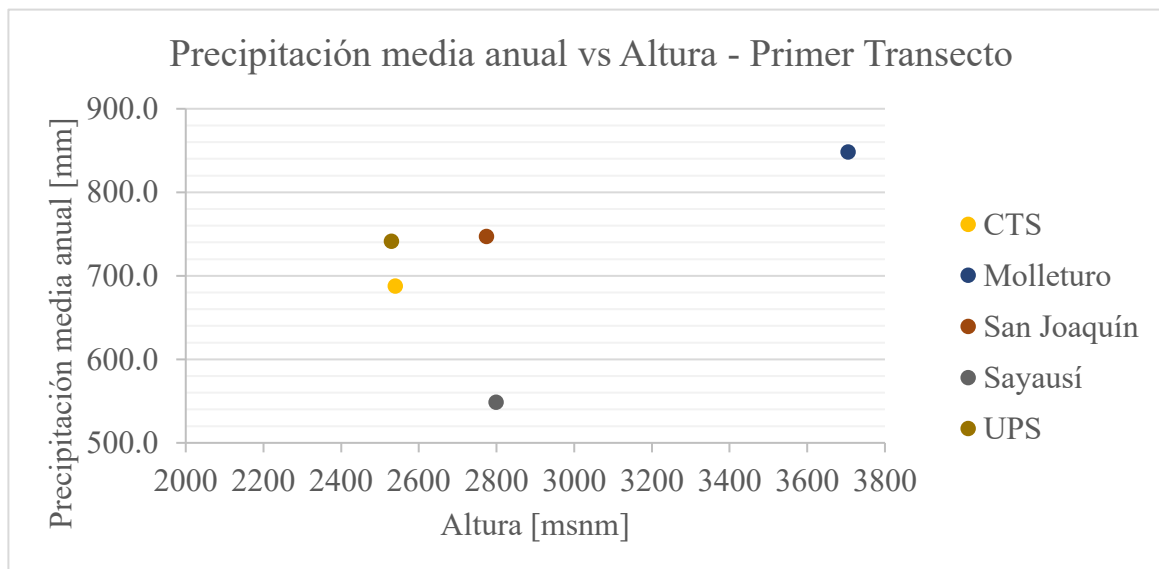
Se elaboró un gráfico de precipitación media anual (mm) y temperatura media anual (C°) versus altitud (msnm) utilizando los datos correspondientes a las estaciones meteorológicas involucradas en el primer transecto, específicamente: Molleturo, San Joaquín, Sayausí, UPS y CTS. Se obtuvo lo siguiente:

Tabla 11. Representación Precipitación media anual versus Altura – Primer Transecto

Análisis Primer Transecto		
Estaciones Meteorológicas	Precipitación media anual	Altura [msnm]
CTS	687.7	2540
Molleturo	848.2	3705
San Joaquín	747.1	2774
Sayausí	548.6	2799
UPS	741.2	2530

Fuente: Autor

Ilustración 104 Gráfica de dispersión Precipitación media anual vs Altura – Primer transecto



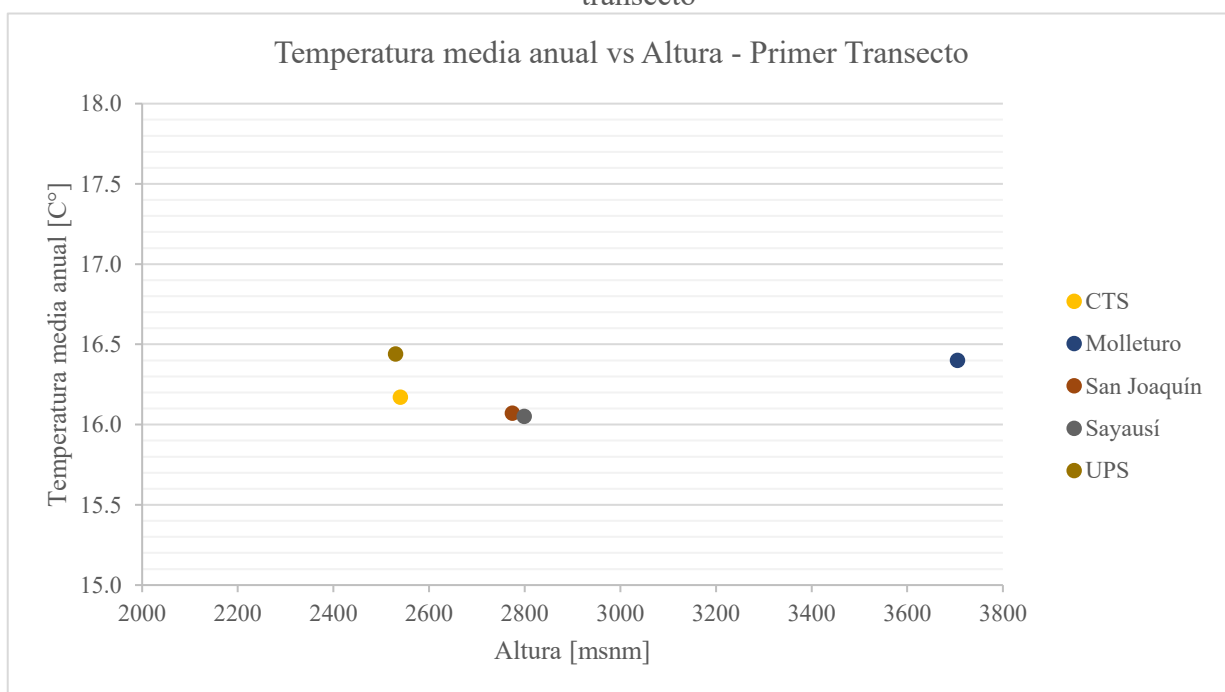
Fuente: Autor

Tabla 12. Representación Temperatura media anual versus Altura – Primer Transecto

Análisis Primer Transecto		
Estaciones Meteorológicas	Temperatura media anual [C°]	Altura [msnm]
CTS	16.2	2540
Molleturo	16.4	3705
San Joaquín	16.1	2774
Sayausí	16.1	2799
UPS	16.4	2530

Fuente: Autor

Ilustración 105 Gráfica de dispersión Temperatura media anual vs Altura – Primer transecto



Fuente: Autor

Observaciones de las gráficas:

- **Molleturo:** Este sitio registra la mayor P a lo largo del transecto (848.2 mm) y la temperatura más baja, lo cual está de acuerdo con su mayor altitud (3705 msnm). Es ciertamente una respuesta orográfica: más altura = más lluvia / menos temperatura.
- **San Joaquín:** Alta P (747.1 mm) y temperatura promedio, debido a su elevación intermedia (2774 msnm). Numéricamente, su comportamiento parece natural en ambas variables.

- **Sayausí:** Con una altitud cercana a San Joaquín, este registra el valor de P más baja (548.6 mm), con una temperatura también intermedia. La discrepancia de P es prominente, lo cual probablemente resulta del impacto local como la sombra orográfica.
- **UPS:** Tiene alta temperatura y P al igual que el pueblo con baja altitud dentro del municipio, San Joaquín (2530 msnm con 741.2 mm de P). Este efecto es exactamente lo que se anticipa de la correlación de altitud con el clima.
- **CTS:** Similar en elevación a UPS (2540 msnm), mayor temperatura y menor (687.7 mm). No es otra cosa que parte de esta tendencia.

En resumen, la temperatura disminuye uniformemente con la altitud y hay una clara tendencia en todas las estaciones. La cantidad de precipitación no está directamente relacionada con la elevación, ya que, en algunos casos, es directamente proporcional (por ejemplo, Molleturo), y en otros no (por ejemplo, Sayausí), mostrando así el efecto de las condiciones locales.

7.2.6. Análisis de la Precipitación y Temperatura Media Anual versus Altura de las Estaciones Involucradas en el Segundo Transecto

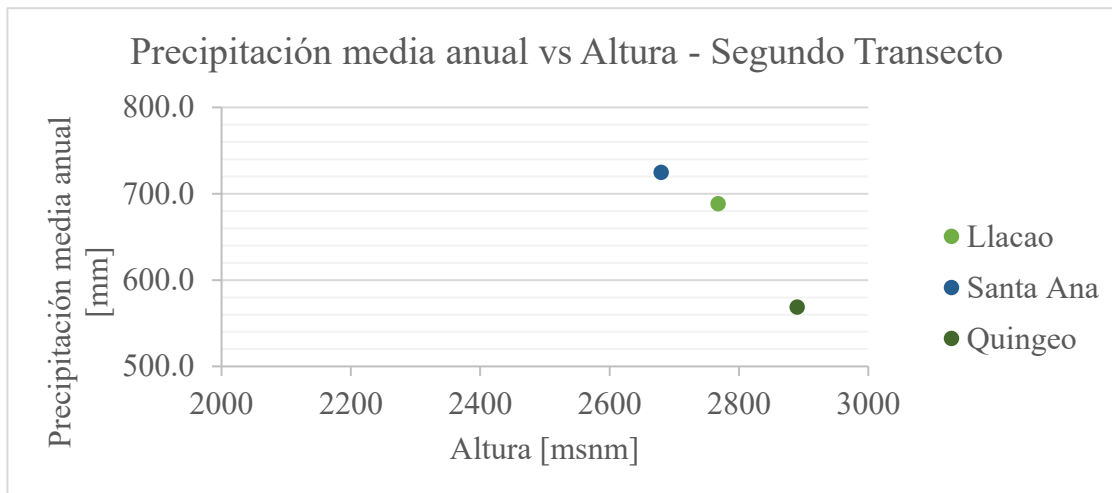
Se desarrolló un gráfico de precipitación media anual (mm) y temperatura media anual (C°) versus altitud (msnm) utilizando los datos correspondientes a las estaciones meteorológicas involucradas en el segundo transecto, específicamente: Llacao, Santa Ana y Quingeo. Se obtuvo lo siguiente:

Tabla 13. Representación Precipitación media anual versus Altura – Segundo Transecto

Análisis Segundo Transecto		
Estaciones Meteorológicas	Precipitación media anual	Altura [msnm]
Llacao	688.5	2768
Santa Ana	724.9	2680
Quingeo	568.6	2890

Fuente: Autor

Ilustración 106 Gráfica de dispersión Precipitación media anual vs Altura – Primer transecto



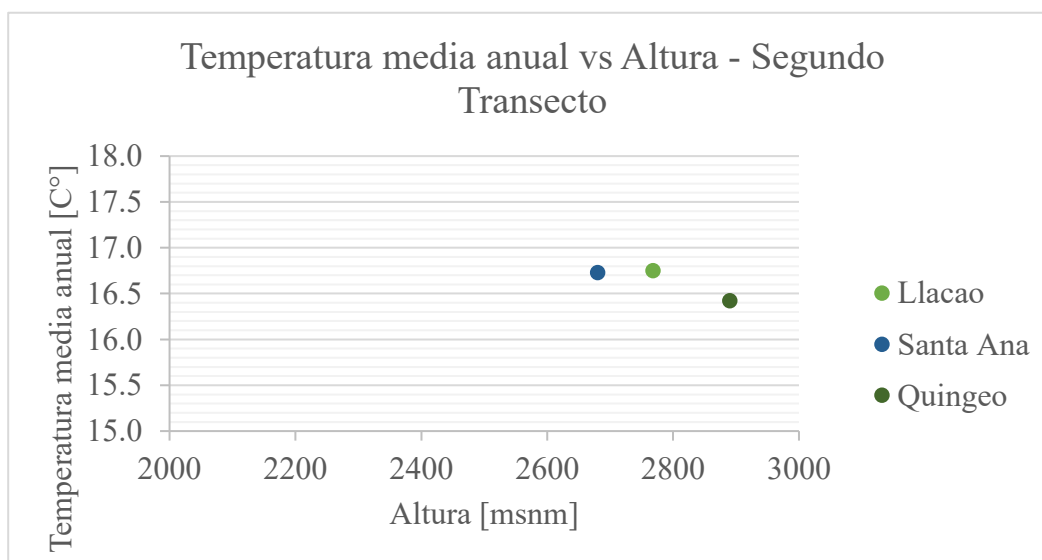
Fuente: Autor

Tabla 14. Representación Temperatura media anual versus Altura – Primer Transecto

Análisis Segundo Transecto		
Estaciones Meteorológicas	Temperatura media anual [C°]	Altura [msnm]
Llacao	16.8	2768
Santa Ana	16.7	2680
Quingeo	16.4	2890

Fuente: Autor

Ilustración 107 Gráfica de dispersión Temperatura media anual vs Altura – Primer transecto



Fuente: Autor

Observaciones de las gráficas:

- **Llacao:** Su precipitación es de 688.5 mm, su temperatura promedio es de 16.8°C y su altitud es de 2768 msnm. Su comportamiento es promedio o intermedio en ambas cantidades, correspondiente a su elevación. No se destacan discordancias en él.
- **Santa Ana:** Como la estación más baja (2680 msnm), obtuvo la precipitación más alta (724.9 mm) y una temperatura promedio de 16.7°C. Se comporta como se espera en cuanto a temperatura, pero destaca por su alta precipitación, lo que podría sugerir una influencia local de otros factores, como la precipitación en esta línea es la exposición al flujo orográfico u otras condiciones topográficas favorables.
- **Quingeo:** Es la estación más alta (2890 msnm), pero tiene menos precipitación (568.6 mm) y la temperatura también es más baja (16.4°C). La altitud lógica se sigue en términos de temperatura, sin embargo, su baja precipitación no entra en conflicto con la paradoja de la altura, y otros factores como la sombra orográfica o la mala exposición a la humedad ejercen una influencia.

En conclusión, la temperatura está relacionada inversamente con la altitud: Quingeo (la más alta) es la más fría y Santa Ana (la más baja) es un poco más cálida. En cuanto a la precipitación, no hay una compensación simple con la altitud. Santa Ana, siendo la más baja, es la más alta, Quingeo, por el contrario, es la más baja.

8. Conclusiones

El trabajo actual ha servido para caracterizar el clima en el cantón Cuenca, a través del examen y análisis de datos meteorológicos obtenidos entre 2013 y 2021, proporcionados por la red de estaciones de monitoreo del IIGE y UPS, y para compararlo con el estudio realizado en 1998 por Gerd Dercon. A través de un estricto proceso de preprocesamiento e imputación de datos, se mantuvo la integridad y continuidad estadística de la serie temporal, permitiendo un análisis climatológico confiable y replicable, con las siguientes conclusiones:

1. El régimen de precipitaciones observado en el análisis actual mantiene una distribución estacional similar al estudio realizado por Dercon. Se identifican máximos de precipitación en los meses de marzo y octubre, y mínimos en el trimestre junio–agosto, lo cual indica que la estacionalidad de las lluvias no ha sufrido alteraciones significativas en el periodo comparado.
2. Los valores mensuales de ETo obtenidos exponen una estabilidad general con los patrones históricos reportados en 1998. La ETo muestra un comportamiento relativamente constante a lo largo del año, con una leve tendencia ascendente hacia los últimos meses. No se evidencian aumentos estadísticamente significativos que puedan imputar a un cambio climático.
3. El balance hídrico ($ETo/2$), estimado refleja condiciones hídricas similares entre ambos periodos. El comportamiento general no indica un aumento continuo de estrés hídrico. No se observa un desplazamiento del balance hacia condiciones más secas o húmedas de forma extendida, lo cual refuerza la idea de estabilidad climática en el contexto del análisis realizado.

El análisis climático a lo largo de los dos transectos permitió determinar patrones de variación en las variables meteorológicas según la altitud. Se ha concluido que, a mayor altitud, la temperatura disminuye, la radiación solar avanza, la velocidad del viento se vuelve cada vez más variable, mientras que el precipitador muestra un proceso complicado, afectado no solo por la altitud, sino también por la exposición geográfica local y la orografía.

Este tipo de análisis es esencial porque muestra cómo la topografía de Cuenca moldea la composición de los microclimas. Además, la analogía con los perfiles de precipitación y

temperatura a altitudes crecientes contribuye a una mejor comprensión del proceso climático local y ofrece la posibilidad de validación empírica del perfil gradiométrico térmico y pluviométrico también.

En resumen, el análisis climático según los métodos mencionados anteriormente indica que en Cuenca no hay cambios claramente detectados en el clima para el período de datos analizados. Mientras se mantiene la ligera anisotropía en la precipitación y la ETo, la precipitación permanece con su patrón típico de alta en los meses lluviosos y baja en los meses secos tanto en el estudio original como en los datos actuales, y la ETo sigue también una distribución mensual similar entre ambos y tiene un pequeño incremento al final del año, no representa una reducción significativa o preocupante.

Finalmente, este trabajo representa un desarrollo relevante en términos de gestión climática en el sur de Ecuador, proporcionando un apoyo cuantitativo crucial para la simulación hidrológica, la planificación territorial y la adaptación al cambio climático. También define un protocolo metodológico replicable para otros estudios que pretenden la fusión de la ciencia de datos climáticos y la toma de decisiones basada en evidencia en el campo de la ingeniería civil, el análisis de recursos hídricos y la gestión ambiental.

9. Recomendaciones

Optimizar la densidad y cobertura de las estaciones meteorológicas dentro del cantón Cuenca (especialmente en áreas rurales de difícil acceso) para aumentar la resolución

espacial de sus registros climatológicos y disminuir las brechas de información que obstaculizan el escrutinio hidrometeorológico regional.

Estandarizar las acciones de control de calidad y mantenimiento de las estaciones automáticas para mantener los sensores y las series temporales de flujos de datos. Esto evitaría pérdidas de datos como las que afectan el cálculo de variables clave como la ETo.

Fomentar la aplicación de métodos alternativos para la estimación de ETo en estudios aplicados (por ejemplo, para proyectos de riego, modelado hidrológico o diseño de infraestructura hídrica) para permitir comparaciones cruzadas entre resultados y elegir el más adecuado según los datos disponibles y la calidad de los datos.

Crear y mantener una base de datos meteorológicos centralizada y actualizada que esté disponible para investigadores, tomadores de decisiones y organizaciones de planificación, e integrar datos limpios y verificados de numerosas fuentes, promoviendo la interoperabilidad entre instituciones como el IIGE, INAMHI, UPS y los GAD cantonales.

Utilizar los hallazgos de este estudio como valores de referencia para el modelado del balance hídrico, la gestión de cuencas, la zonificación agroclimática y en el diseño de infraestructura adaptable al cambio climático en referencia a la evapotranspiración efectiva.

10. Bibliografía

- Chen, T., Ren, L., Yuan, F., Yang, X., Jiang, S., Tang, T., Liu, Y., Zhao, C., & Zhang, L. (2017). Comparison of Spatial Interpolation Schemes for Rainfall Data and Application in Hydrological Modeling. *Water*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/w9050342>
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J. D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J. J., López, F., & Villacis, M. (2020a). Climatological and Hydrological Observations for the South American Andes: In situ Stations, Satellite, and Reanalysis Data Sets. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J. D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J. J., López, F., & Villacis, M. (2020b). Climatological and Hydrological Observations for the South American Andes: In situ Stations, Satellite, and Reanalysis Data Sets. *Frontiers in Earth Science*, 8, 92. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>
- Cruz, M. (2014). *Nuevas técnicas para la determinación de la evapotranspiración*.
- Delgado Orellana, G. J., & Orellana Samaniego, M. L. (2015). *Estimación de la radiación solar global diaria en el cantón Cuenca mediante la aplicación del modelo Bristow & Campbell* [B.S. thesis].
- Dercon, Gerd. (1998). Zonificación agroecológica del Austro ecuatoriano. En *Zonificación agroecológica del Austro ecuatoriano*. U Ediciones. <https://pdfcoffee.com/zonificacion-agroecologica-del-austro-ecuadoriano-pdf-pdf-free.html>
- Esse, C. (2015). *Estimación del índice de sitio en rodales de Nothofagus dombeyi a través de herramientas de teledetección espacial*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, (FAO). (1998). *Evapotranspiración del cultivo—Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- GeeksforGeeks. (2021). How to Use write.table in R? *GeeksforGeeks*. <https://www.geeksforgeeks.org/r->

language/how%E2%80%91to%E2%80%91use%E2%80%91write%E2%80%91table
%E2%80%91in%E2%80%91r/

- GeeksforGeeks. (2025). *Getting Started with Plotly in R*. <https://www.geeksforgeeks.org/r-language/getting-started-with-plotly-in-r/>
- Guevara, J. (2013). La fórmula Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra. Nueva Etapa*, 22(31), 31-72. https://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_terr/article/view/1296
- Hargreave, G., & Samani, Z. (1985). *Evapotranspiración de cultivos de referencia a partir de la temperatura*. 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hartmann, K., Krois, J., & Rudolph, A. (2023). *Estadística y análisis de datos geográficos con R (SOGA-R)*. <https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/soga-r/Introduction-to-R/Dates-times-and-time-series-in-R/index.html>
- Hu, Q., Li, Z., Wang, L., Huang, Y., Wang, Y., & Li, L. (2019). Rainfall Spatial Estimations: A Review from Spatial Interpolation to Multi-Source Data Merging. *Water*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030579>
- Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2018). *Misión, visión, principios y valores del IIGE*. <https://www.geoenergia.gob.ec/>
- Llinás, H. (2021). Software R - Instalación y carga de las librerías. *RPubs*. https://rpubs.com/hllinas/R_Librerias
- Ortiz C., R., & Chile A., M. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7, 1-10.
- Ortiz, R. (2022). *Exportar datos de R*. <https://rpubs.com/Rortizdu/140124>
- Pérez, J., Senent, J., & Jimeno, P. (2022). The application of spreadsheets for teaching hydrological modeling and climate change impacts on streamflow. *Computer Applications in Engineering Education*, 30(5), 1510-1525. <https://doi.org/10.1002/cae.22541>

- Pineda, L. E., Changoluisa, J. A., & Muñoz, Á. G. (2023). Early onset of heavy rainfall on the northern coast of Ecuador in the aftermath of El Niño 2015/2016. *Frontiers in Earth Science*, *11*. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1027609>
- R Bootcamp. (2024). *Clases de fecha y hora RStudio*. <https://bookdown.org/yundai09/rbootcamp/dates-and-times.html>
- Tapia, J. E. Z. (2024). Camus, Pablo y Jaksic, Fabián. Clima y sociedad: El fenómeno El Niño y La Niña en la Historia de Chile. *Historia* *396*, *13*(2), 565-569.
- Tovar, C., Carril, A. F., Gutiérrez, A. G., Ahrends, A., Fita, L., Zaninelli, P., Flombaum, P., Abarzúa, A. M., Alarcón, D., Aschero, V., Báez, S., Barros, A., Carilla, J., Ferrero, M. E., Flantua, S. G. A., Gonzáles, P., Menéndez, C. G., Pérez-Escobar, O. A., Pauchard, A., ... Hollingsworth, P. M. (2022). Understanding climate change impacts on biome and plant distributions in the Andes: Challenges and opportunities. *Journal of Biogeography*, *49*(8), 1420-1442. <https://doi.org/10.1111/jbi.14389>
- Zach, B. (2021). How to Use match() Function in R. *Statology*. <https://www.statology.org/match-function-in-r/>
- Zach, B. (2024). How to Use the na.locf() Function in R. *Statology*. <https://www.statology.org/r-na-locf/>