



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**Análisis de la relación entre precipitación y
evapotranspiración en la hoya de Loja con fines de
pronostico**

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

Autor: Pullaguari Diaz, Ricardo Fabricio

Director: Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo

LOJA

2025



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2025

Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular

Loja, 14 de marzo de 2025

Magister.

Belizario Amador Zarate Torres

Director de la carrera de la carrera de Ingeniería Civil

Loja.-

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Integración Curricular denominado: Análisis de la relación entre precipitación y evapotranspiración en la hoya de Loja con fines de pronóstico realizado por Ricardo Fabricio Pullaguari Diaz ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la Universidad, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso, PhD.

C.I.: 1103123384

Correo electrónico: fronate@utpl.edu.ec

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Ricardo Fabricio Pullaguari Diaz, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: Análisis de la relación entre precipitación y evapotranspiración en la hoya de Loja con fines de pronóstico, de la carrera de ingeniería civil, específicamente de los contenidos comprendidos en: Capítulo I. Estado del Arte, Capítulo II. Materiales y métodos & Capítulo III Resultados y discusión, siendo Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso, director (a) del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual de este trabajo. Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”, en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

.....

Autor: Ricardo Fabricio Pullaguari Diaz

C.I.: 1150297289

Correo electrónico: rfpullaguari@utpl.edu.ec

Dedicatoria

A mi madre, por su sacrificio, amor incondicional y por ser mi mayor inspiración. Mamá, este logro es tan tuyo como mío, porque sin ti nada de esto habría sido posible.

A mi padre, por su presencia y apoyo en momentos clave. Aunque las circunstancias no siempre fueron fáciles, valoro tu esfuerzo y el papel que has tenido en mi vida.

A mis hermanas Alexandra, Glenda y Lorena, por su constante ánimo y cariño. En especial a Lorena, quien siempre ha estado cerca para darme su apoyo emocional en los momentos más difíciles.

Y a mi amada compañera Valeria Rivera, por estar a mi lado en cada obstáculo académico, por confiar en mí incluso cuando yo no lo hacía.

Agradecimiento

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por las bendiciones que he recibido a lo largo de mi vida, por darme la fortaleza para superar los momentos difíciles y por guiarme siempre en el camino correcto.

A mi madre, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo, dedicación y amor. Mamá, este logro refleja todo lo que has dado por mí, y no tengo palabras suficientes para agradecerte todo lo que has hecho para que yo llegue hasta aquí.

A mi padre, agradezco profundamente el apoyo que me brindaste en los momentos necesarios y los esfuerzos que realizaste para estar presente en mi vida.

A mis hermanas Lorena, Glenda y Alexandra, por estar siempre ahí para mí con palabras de aliento y apoyo.

A mi pareja, Valeria Rivera, por ser mi compañera en esta travesía, por su confianza, su amor y por estar siempre a mi lado en cada obstáculo que enfrenté.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Fernando Oñate Valdivieso. No solo ha sido un excelente tutor, sino también una persona de gran calidad humana. Su disposición constante para ayudar, su paciencia y su manera de guiarme en este proceso han sido esenciales para el éxito de este trabajo y estoy enormemente agradecido por todo su apoyo y enseñanza.

Índice de contenido

Portada.....	I
Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular.....	II
Declaración de autoría y cesión de derechos	III
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento	VI
Índice de contenido.....	VII
Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción	3
Capítulo uno: Estado del Arte.....	5
1.1 Generalidades.....	5
1.2 Marco Conceptual.....	5
1.2.1 <i>Evapotranspiración.</i>	5
1.2.2 <i>Tipos de Evapotranspiración</i>	6
1.3 Metodologías para el cálculo de la evapotranspiración.....	9
1.3.1 <i>Método de Penman-Monteith (FAO 56):</i>	9
1.3.2 <i>Método de Hargreaves y Samani:</i>	9
1.3.3 <i>Método de Thornthwaite:</i>	10
1.3.4 <i>Metodo de Turc:</i>	10
1.4 Métodos recolección de Datos Climáticos para el cálculo de la evapotranspiración.....	10
1.4.1 Estaciones Meteorológicas.....	10
1.4.2 <i>Redes de monitoreo climático.</i>	11
1.4.3 <i>Sensores Remotos.</i>	11
1.4.4 <i>Fuentes secundarias.</i>	11
Capítulo Dos Materiales y métodos	13

2.1 Generalidades.....	13
2.1.1 Área de Estudio	13
2.1.2 Radiación Solar	13
2.1.3 Temperatura media.....	14
2.1.4 Precipitación.....	14
2.1.5 Velocidad del viento	14
2.1.6 Hidrología	15
2.2 Materiales.....	16
2.3 Metodología	17
2.3.1 Recopilación de Información	17
2.3.2 Red de estaciones UTPL	17
2.3.3 Recopilación de información bibliográfica.	18
2.3.4 Cálculo de la ET	18
2.3.5 Desarrollo del modelo de regresión múltiple.....	25
Capítulo Tres Resultados y discusión	27
3.1 Análisis de las condiciones climáticas en la Hoya de Loja.....	27
3.2 Evapotranspiración calculada mediante el método de Penman – Monteith.	30
3.3 Análisis del modelo de regresión múltiple.....	31
3.3.1 Representación espacial de las variables climáticas.	33
3.3.2 Ecuaciones generadas por el modelo de regresión múltiple.....	37
3.3.3 Gráficos de comparación de evapotranspiración observada y estimada.....	38
Conclusiones.....	42
Recomendaciones.....	43
Referencias.....	44
Apéndice.....	47
Apéndice A. Tablas y resultados.....	47

Índice de Tablas

Tabla 1. Coordenadas geográficas y altitud de las estaciones meteorológicas en la Hoya de Loja.....	16
Tabla 2. Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL	27
Tabla 3. Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Militar.....	27
Tabla 4. Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Jipiro.....	27
Tabla 5. Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Villonaco... 	28
Tabla 6. Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Técnico	28
Tabla 7. Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Época.....	28
Tabla 8. Resumen de resultados de evapotranspiración diaria (mm día^{-1})	30
Tabla 9. Resumen del modelo de regresión múltiple ajustado para cada estación meteorológica.	32

Índice de Figuras

Figura 1. Área de Estudio – Hoya de Loja	13
Figura 2. Velocidad del viento en Loja de 2011 a 2023.....	15
Figura 3. Distribución espacial de la temperatura promedio en la hoya de Loja	34
Figura 4. Distribución espacial de la precipitación promedio en la hoya de Loja.....	35
Figura 5. Distribución espacial de la evapotranspiración promedio en la hoya de Loja	36
Figura 6. Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL.....	38
Figura 7. Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Militar.....	39
Figura 8. Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Jipiro	39
Figura 9. Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la	

estación UTPL Villonaco	40
Figura 10. Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Técnico.....	40
Figura 11. Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Época	41

Resumen

Se analiza la relación entre la precipitación y la evapotranspiración en la hoya de Loja evaluada durante los años 2022 y 2023, utilizando datos diarios de seis estaciones climáticas. La evapotranspiración se calculó mediante el método de Penman-Monteith, incorporando variables climáticas clave. Los resultados indicaron que la precipitación, aunque considerada en el cálculo inicial, no tuvo un impacto significativo en las ecuaciones finales para estimar la evapotranspiración diaria. En contraste, variables como la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento demostraron mayor influencia, siendo esta última el factor más determinante en dos de las estaciones analizadas. Las ecuaciones obtenidas presentan un alto nivel de certeza, con coeficientes de determinación entre el 93% y el 98%. Estos hallazgos contribuyen al desarrollo de modelos predictivos que pueden mejorar la gestión de los recursos hídricos en la región.

Palabras clave: precipitación, evapotranspiración, Penman-Monteith.

Abstract

The relationship between precipitation and evapotranspiration in the Loja basin was evaluated during 2022 and 2023, using daily data from six weather stations. Evapotranspiration was calculated using the Penman-Monteith method, incorporating key climatic variables. The results indicated that precipitation, although considered in the initial calculation, had no significant impact on the final equations for estimating daily evapotranspiration. In contrast, variables such as temperature, solar radiation, and wind speed showed greater influence, with wind speed being the most determining factor in two of the analyzed stations. The obtained equations showed a high level of accuracy, with adjusted determination coefficients ranging between 93% and 98%. These findings contribute to the development of predictive models that can improve water resource management in the region.

Keywords: precipitation, evapotranspiration, Penman-Monteith.

Introducción

La hoya de Loja, ubicada en el sur de Ecuador, se caracteriza por sus condiciones climáticas y geográficas particulares, que influyen directamente en el comportamiento de variables como la precipitación y la evapotranspiración. Estas variables son esenciales para entender los procesos atmosféricos y desarrollar herramientas predictivas que permitan proyectar la evapotranspiración en función de factores climáticos. Este análisis es especialmente relevante en una región donde la disponibilidad de datos meteorológicos confiables ofrece una oportunidad única para avanzar en el conocimiento científico y práctico de las dinámicas climáticas locales.

El presente estudio tiene como objetivo general determinar la relación entre la precipitación y la evapotranspiración en la hoya de Loja. Para ello, se plantearon tres objetivos específicos: analizar el comportamiento de la precipitación en el área de estudio, calcular la evapotranspiración de referencia diaria, y desarrollar una ecuación simplificada que permita estimar la evapotranspiración. Este enfoque busca no solo generar conocimiento académico, sino también ofrecer herramientas prácticas que puedan ser aplicadas en contextos similares.

La metodología utilizada en este trabajo se centró en el método Penman-Monteith, considerado el estándar internacional para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) debido a su precisión y capacidad para integrar variables climáticas clave (Allen et al., 2006).

Se recopilieron datos meteorológicos diarios de seis estaciones ubicadas en la hoya de Loja, abarcando los años 2022 y 2023. Estos datos fueron procesados y analizados utilizando Microsoft Excel y QGIS, permitiendo no solo realizar los cálculos necesarios, sino también identificar las variables climáticas más influyentes para desarrollar modelos de regresión múltiple que dieron como resultado altos coeficientes de determinación.

El análisis de los datos permitió detectar patrones específicos en las condiciones climáticas de la región, como la influencia de la radiación solar y la velocidad del viento en la evapotranspiración. Además, se obtuvieron ecuaciones simplificadas que reducen la

dependencia de herramientas complejas, lo que facilita su implementación en contextos con recursos limitados. Este trabajo incorpora un enfoque metodológico riguroso para asegurar que los resultados sean precisos y representativos de las condiciones locales.

El documento se estructura en tres capítulos principales. El primer capítulo, "Estado del arte", presenta una revisión exhaustiva de investigaciones previas relacionadas con la precipitación y la evapotranspiración. El segundo capítulo, "Materiales y métodos", describe el área de estudio, los datos recopilados y el uso del método Penman-Monteith como base del análisis. En el tercer capítulo, "Resultados y discusión", se analizan los hallazgos más relevantes, destacando las interacciones entre las variables climáticas y los modelos desarrollados.

Este trabajo tiene una relevancia significativa no solo por su aporte académico, sino también por su enfoque práctico. La metodología implementada y las herramientas predictivas desarrolladas son aplicables no solo en la hoya de Loja, sino también en otras regiones con características similares. Al ofrecer soluciones accesibles y ajustadas a las condiciones locales, esta investigación contribuye al análisis climático y promueve el uso eficiente de datos meteorológicos en la planificación regional.

Capítulo uno

Estado del Arte

1.1 Generalidades.

La relación entre precipitación y evapotranspiración es un componente fundamental en el estudio del ciclo hidrológico, ya que ambas variables influyen directamente en la disponibilidad de recursos hídricos y en los procesos de balance hídrico en cuencas hidrográficas. Su análisis permite no solo entender el comportamiento climático de una región, sino también desarrollar herramientas para el manejo eficiente del agua y la planificación de actividades relacionadas con la sostenibilidad de los ecosistemas.

El presente capítulo tiene como propósito establecer un marco teórico y metodológico que sustente el análisis de esta relación, tomando como base investigaciones previas, métodos de cálculo reconocidos y estudios aplicados en áreas con características similares a la hoya de Loja. Este análisis se centra en los métodos para estimar la evapotranspiración, la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, y los modelos que vinculan estas variables en contextos hidrológicos.

Además, se identifican brechas de conocimiento existentes, como la limitada integración entre precipitación y evapotranspiración en estudios de cuencas específicas, especialmente en regiones de los Andes ecuatorianos. Este análisis busca contextualizar la relevancia de la investigación y resaltar la necesidad de abordar estas brechas mediante el uso de metodologías estandarizadas, como el método FAO Penman-Monteith.

Con esta revisión se espera sentar las bases teóricas necesarias para comprender la importancia de estudiar la relación entre precipitación y evapotranspiración, contribuyendo a la generación de conocimiento aplicable en la hoya de Loja y en otras regiones con condiciones similares.

1.2 Marco Conceptual.

1.2.1 *Evapotranspiración.*

La estimación precisa de la evapotranspiración desempeña un papel fundamental en la gestión eficiente de los recursos hídricos. Este proceso permite maximizar la eficiencia en

el uso del agua, especialmente en sistemas de riego, al garantizar que las necesidades hídricas de los cultivos sean cubiertas de manera adecuada. Además, proporciona herramientas para anticipar períodos de sequía, lo que resulta crucial en la planificación de estrategias frente al cambio climático. Por último, esta información facilita el diseño de enfoques sostenibles para el manejo del agua en cuencas hidrográficas, asegurando un equilibrio entre las demandas agrícolas, ambientales y sociales (Allen et al., 2006).

1.2.2 Tipos de Evapotranspiración

Evapotranspiración Potencial (ETP): La ETP se define como la cantidad máxima de agua que podría evaporarse y transpirarse desde una superficie cubierta en su totalidad por vegetación, con un desarrollo óptimo y sin limitaciones hídricas. Este concepto, introducido por Thornthwaite en 1948, asume condiciones ideales donde la humedad del suelo es suficiente para satisfacer las demandas de la vegetación, dependiendo únicamente de factores climáticos como la radiación solar, temperatura, humedad relativa y viento (Rivas, 2004).

En la región andina, incluyendo áreas de características similares a la Hoya de Loja, la ETP se ha utilizado ampliamente para evaluar la disponibilidad hídrica y las necesidades de riego. Un estudio realizado en el cantón Loja empleó datos meteorológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y del portal CHELSA para analizar la distribución espacial de la ETP, encontrando que los patrones de evapotranspiración están altamente influenciados por la altitud y la exposición solar. Este tipo de análisis es esencial para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos en la región y garantizar una distribución eficiente del recurso hídrico (Imbaquingo, 2024).

Además, en una investigación desarrollada en la provincia de Huancavelica, Perú, se estimó la ETP del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) utilizando lisímetros superficiales, lo que permitió calcular coeficientes de cultivo específicos para esta zona andina. Los resultados destacaron la utilidad de la ETP como herramienta base para la planificación de riegos más eficientes, adaptados a las condiciones locales (Areche, 2019).

La ETP es fundamental para estimar la demanda hídrica en condiciones ideales, ya

que proporciona una referencia teórica clave en la gestión de recursos hídricos y la planificación agrícola. No obstante, una de sus principales limitaciones es que no incorpora las restricciones de humedad del suelo ni las variaciones en la cobertura vegetal, factores que influyen significativamente en los flujos de agua reales. Esto puede resultar en estimaciones superiores a las reales, especialmente en zonas áridas, semiáridas y en regiones montañosas con alta variabilidad climática. Por lo tanto, su aplicación debe ser complementada con metodologías que consideren las particularidades del entorno, como la evapotranspiración real (ETR), para obtener resultados más representativos.

Evapotranspiración Real (ETR): La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua que efectivamente se evapotranspira desde el suelo y la vegetación bajo condiciones actuales de humedad y disponibilidad de agua. A diferencia de la evapotranspiración potencial (ETP), la ETR refleja las restricciones impuestas por la capacidad del suelo para retener agua y las condiciones climáticas específicas de una región, lo que la convierte en una medida más representativa de las pérdidas hídricas en el entorno real (Allen et al., 2006).

En zonas andinas, la ETR se ha utilizado para comprender la dinámica hídrica bajo condiciones climáticas variables y su impacto en los recursos disponibles. En la cuenca del río Chinchiná, en Colombia, se llevó a cabo un análisis hidrológico que incluyó la evaluación de procesos como la evapotranspiración real (ETR) para comprender su impacto en el balance hídrico. Este estudio permitió identificar cómo los cambios en el uso y cobertura del suelo afectan la ETR, influenciando la disponibilidad de agua para actividades como riego y consumo humano. Los resultados contribuyeron al diseño de estrategias de gestión hídrica adaptadas a la dinámica estacional de los recursos disponibles (Patiño, 2018)

En otro estudio realizado en la microcuenca de Malacatos, en la provincia de Loja, se incluyó la ETR para evaluar el balance hídrico de la zona. Los hallazgos subrayaron que la evapotranspiración representa una de las principales salidas del sistema hídrico, con implicaciones directas para la recarga de acuíferos y la sostenibilidad de la agricultura en la región (Campoverde, 2019)

La ETR es útil porque permite evaluar las pérdidas hídricas reales en un sistema,

proporcionando datos esenciales para la gestión eficiente del recurso hídrico, especialmente en regiones con limitaciones de agua. Sin embargo, su estimación puede ser compleja debido a la necesidad de datos precisos sobre humedad del suelo y características de la vegetación.

Evapotranspiración de Referencia (ET_o): La evapotranspiración de referencia (ET_o) se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, representada por un cultivo hipotético de pasto con una altura uniforme de 12 cm, crecimiento activo y sin restricciones de agua. Este concepto, desarrollado y estandarizado por la FAO mediante el método Penman-Monteith, sirve como base para calcular la evapotranspiración de diferentes cultivos utilizando coeficientes de cultivo específicos (Allen et al., 2006)

En Colombia se evaluó las variaciones temporales y altitudinales de la ET_o en las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena. Utilizando el método Penman-Monteith, se observó una relación exponencial entre la ET_o y la altitud, lo que demuestra cómo los factores climáticos cambian significativamente con la altura. Este análisis permitió proponer una expresión empírica para estimar la ET_o en zonas con altitudes comprendidas entre 170 y 3,700 metros, siendo aplicable para estudios de zonificación climática en áreas montañosas (Jaramillo, 2007).

Asimismo, en un estudio comparativo en la región de Quevedo, Ecuador, se utilizó la ET_o como base para evaluar la eficiencia de sistemas de riego en cultivos de ciclo corto. Este análisis permitió determinar que una correcta estimación de la ET_o mejora significativamente la asignación de agua, reduciendo pérdidas y optimizando el rendimiento agrícola (Chávez, 2015).

Aunque la ET_o es una herramienta ampliamente aceptada y utilizada, su principal limitación radica en la necesidad de datos climáticos precisos, como radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. En regiones donde la infraestructura meteorológica es limitada, puede ser necesario complementar los datos con técnicas de interpolación o modelos satelitales. No obstante, su aplicabilidad en zonas andinas sigue siendo una de sus mayores fortalezas, dado que considera las variables climáticas más importantes para la estimación de la demanda hídrica.

1.3 Metodologías para el cálculo de la evapotranspiración.

La relación entre precipitación y evapotranspiración es un componente fundamental en el estudio del ciclo hidrológico, ya que ambas variables influyen directamente en la disponibilidad de recursos hídricos y en los procesos de balance hídrico en cuencas hidrográficas. Su análisis permite no solo entender el comportamiento climático de una región, sino también desarrollar herramientas para el manejo eficiente del agua y la planificación de actividades relacionadas con la sostenibilidad de los ecosistemas.

1.3.1 Método de Penman-Monteith (FAO 56):

Este método es ampliamente reconocido como el estándar internacional para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) debido a su precisión y capacidad para integrar variables climáticas clave, como radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) recomienda su uso para determinar ET_o, ya que se ajusta tanto a zonas áridas como templadas y tropicales (Allen et al., 2006).

En el Valle de Tumbaco, Ecuador, se realizó un estudio que evaluó varios métodos para determinar la evapotranspiración de referencia, concluyendo que el método FAO56 es el más adecuado para el entorno agroecológico de la zona y aunque ofrece resultados precisos, su principal limitación radica en la necesidad de datos climáticos completos, lo que restringe su uso en zonas con infraestructura meteorológica limitada. (Ortiz et al., 2020).

1.3.2 Método de Hargreaves y Samani:

Este método empírico utiliza principalmente datos de temperatura y radiación solar, lo que lo convierte en una alternativa práctica para regiones con datos climáticos limitados. Sin embargo, estudios han mostrado que presenta índices inferenciales pobres en ciertas condiciones, debido a que fue desarrollado para ambientes específicos, como los de Estados Unidos, que difieren de las condiciones ecuatorianas (Ortiz et al., 2020).

En la cuenca del río Ilave, Perú, se realizó una calibración del coeficiente de la ecuación de Hargreaves y Samani para estimar la evapotranspiración de referencia,

obteniendo valores confiables basados solo en datos de temperatura del aire. (Aguilar, 2023).

1.3.3 Método de Thornthwaite:

Basado en la temperatura media mensual y la duración del día, este modelo es particularmente relevante en regiones templadas. En la provincia de Huancavelica, Perú, su implementación facilitó el análisis de las necesidades hídricas de cultivos en zonas andinas, demostrando que su simplicidad lo convierte en una herramienta adecuada para estudios preliminares (Areche, 2019)

1.3.4 Método de Turc:

Diseñado para estimar la evapotranspiración integrando radiación solar y temperatura, este método es especialmente útil en estudios de balance hídrico. Fue desarrollado para el clima del oeste de Europa, lo que puede limitar su precisión en otras regiones sin las calibraciones adecuadas. En investigaciones realizadas en la cuenca del río Mantaro, Perú, Turc fue empleado para modelar el balance hídrico en cuencas hidrográficas, mostrando resultados satisfactorios en condiciones climáticas diversas (Madrid., 2019)

1.4 Métodos recolección de Datos Climáticos para el cálculo de la evapotranspiración.

La recolección de datos climáticos es un componente clave en estudios hidrológicos, ya que permite analizar las distintas variables climáticas. Diversos métodos han sido utilizados en investigaciones previas para garantizar la disponibilidad de datos confiables, dependiendo de la escala del estudio y las características del área de análisis.

1.4.1 Estaciones Meteorológicas.

Las estaciones meteorológicas son instalaciones equipadas con diversos instrumentos diseñados para medir parámetros climáticos esenciales. Estos datos son fundamentales para calcular la evapotranspiración mediante métodos como el de Penman-Monteith, reconocido por la FAO como estándar para determinar la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 2006)

Investigaciones han resaltado la importancia de la densidad y distribución de estas estaciones para obtener datos representativos. En el artículo desarrollado por (Mendoza et al., 2001) menciona cómo la escasez de estaciones en áreas remotas puede afectar la

precisión de los modelos hidrológicos.

1.4.2 Redes de monitoreo climático.

Las redes de monitoreo climático como el INAMHI en Ecuador consisten en sistemas integrados de estaciones meteorológicas que recopilan y transmiten datos en tiempo real o histórico. Estas redes, gestionadas por agencias meteorológicas nacionales o internacionales, ofrecen una cobertura geográfica amplia, facilitando el análisis climático a gran escala. Sin embargo, presentan limitaciones en regiones con baja densidad de estaciones, lo que puede comprometer la representatividad de los datos (Mendoza et al., 2001)

1.4.3 Sensores Remotos.

La teledetección, a través de satélites y drones, ha revolucionado la recolección de datos climáticos y del suelo. Estos sensores permiten estimar parámetros como la radiación solar, temperatura de la superficie y humedad del suelo en extensas áreas geográficas demostraron que los datos satelitales pueden integrarse en modelos de evapotranspiración para mejorar su precisión. La NASA destaca que los satélites proporcionan mediciones frecuentes y espacialmente continuas de variables biofísicas utilizadas para estimar la evapotranspiración a diferentes escalas espaciales, incluyendo radiación, temperaturas de la superficie terrestre y humedad del suelo (Podest et al., 2023).

1.4.4 Fuentes secundarias.

Las bases de datos climáticas globales, como ERA5 del Servicio de Cambio Climático de Copernicus, ofrecen datos climáticos históricos y modelados con alta resolución espacial y temporal. Estas fuentes son valiosas en ausencia de datos locales, proporcionando estimaciones coherentes a nivel global

Investigaciones han utilizado datos de ERA5 para analizar tendencias globales de evapotranspiración, demostrando su utilidad en estudios a gran escala. Como el estudio "Evaluación de la capacidad de los modelos CMIP6 para simular la evapotranspiración y precipitación en el norte de Suramérica" que utilizó datos de ERA5-Land como referencia para evaluar modelos climáticos en la región (Velásquez, 2021).

Sin embargo, es esencial considerar las limitaciones en la resolución espacial y posibles discrepancias con datos medidos localmente. La investigación "Procesamiento de datos meteorológicos del IDEAM con Python y validación con reanálisis ERA5" encontró sub y sobreestimaciones al comparar datos de ERA5 con mediciones in situ en Colombia, resaltando la importancia de validar estas fuentes secundarias con observaciones locales (Vásquez, 2021)

El análisis presentado en este capítulo ha proporcionado los fundamentos teóricos y metodológicos necesarios para entender la relación entre precipitación y evapotranspiración, así como las herramientas más adecuadas para su estudio en la cuenca de Loja. Este marco conceptual y metodológico sustenta las decisiones tomadas en el desarrollo de la investigación, sirviendo como punto de partida para la aplicación de los métodos y análisis que se describirán en los capítulos siguientes.

Capítulo Dos

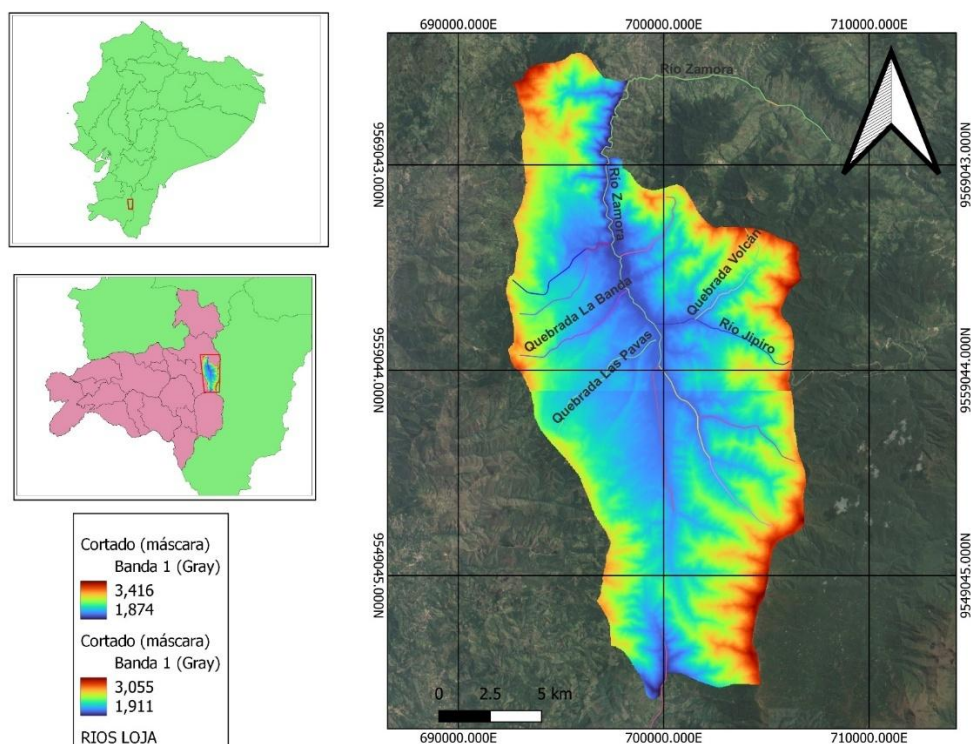
Materiales y métodos

2.1 Generalidades

2.1.1 Área de Estudio

La Hoya de Loja, ubicada en el sur de Ecuador, abarca una superficie de aproximadamente 5,186.6 hectáreas (52 km²) y está situada a 2,100 metros sobre el nivel del mar, a 4° de latitud sur (GEO LOJA, 2008). Esta cuenca hidrográfica es fundamental tanto ecológica como socioeconómicamente debido a su variada topografía, clima diverso y rica biodiversidad. La región presenta un clima que varía desde subtropical húmedo en las partes bajas hasta templado en las elevaciones más altas (Jiménez, 2019).

Figura 1
Área de Estudio – Hoya de Loja



2.1.2 Radiación Solar

La Hoya de Loja se caracteriza por una radiación solar que varía a lo largo del año, influenciada por factores como la latitud, altitud y nubosidad. Estudios preliminares en la provincia de Loja, utilizando el método de Hottel, estiman que la radiación solar oscila entre

4.5 kWh/m²/día en los meses de menor insolación y 6.5 kWh/m²/día en los meses de mayor insolación (Álvarez et al., 2014)

2.1.3 Temperatura media

La Hoya de Loja exhibe un clima templado con variaciones estacionales moderadas en la temperatura. Según datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la temperatura media anual en la región se sitúa alrededor de 16 °C. Los meses más cálidos suelen ser octubre y noviembre, con temperaturas promedio de 17 °C, mientras que los más fríos son julio y agosto, con promedios de 15 °C. (Chamba et al., 2011)

Es importante considerar que factores como la altitud y la topografía de la Hoya de Loja generan microclimas locales, lo que puede resultar en variaciones térmicas significativas en distancias relativamente cortas. Estos microclimas deben ser tomados en cuenta al planificar actividades agrícolas y de gestión de recursos naturales en la región (Chamba et al., 2011).

2.1.4 Precipitación

La hoya de Loja presenta una precipitación media anual de aproximadamente 900 mm, con una distribución relativamente homogénea a lo largo del año. Sin embargo, se observa una mayor concentración de lluvias en el período de enero a abril, representando el 49% del total anual, con marzo como el mes más lluvioso. En contraste, el período de junio a septiembre es más seco, acumulando solo el 22% de la precipitación anual, siendo septiembre el mes más seco. (GEO LOJA, 2008).

2.1.5 Velocidad del viento

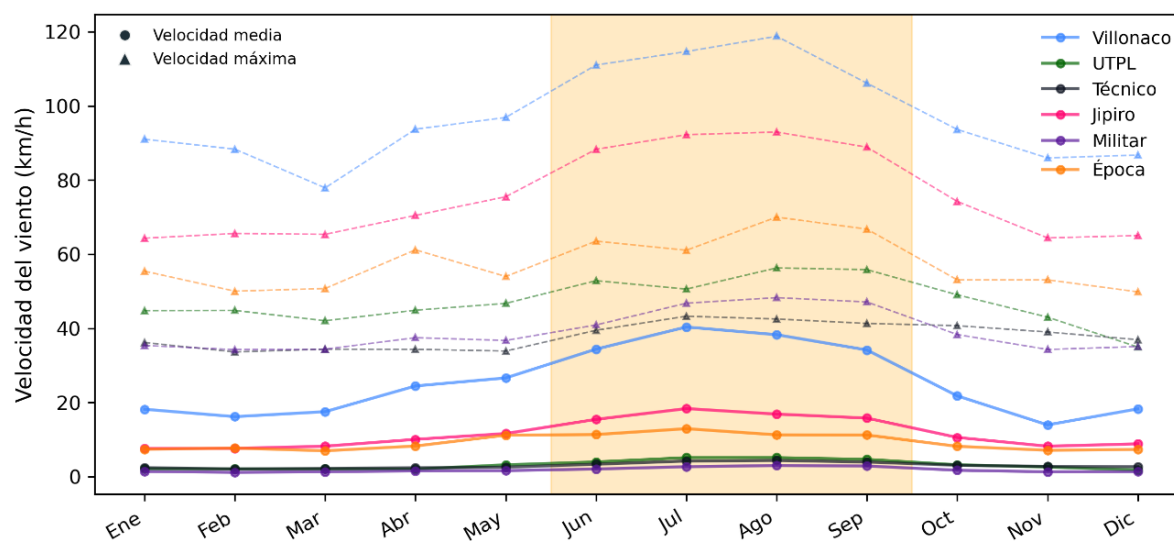
La velocidad del viento en la hoya de Loja varía a lo largo del año debido a factores topográficos y climáticos propios de la región. Según el análisis del viento realizado por la UTPL (2023), se registran velocidades promedio mensuales entre 5 km/h y 35 km/h, con valores máximos en los meses de julio, agosto y septiembre, correspondientes a la estación seca, cuando se alcanzan picos de hasta 120 km/h en la zona de Villonaco debido a la configuración geográfica de la región (Vinculación UTPL., 2023).

Durante la época seca, los vientos predominan desde el este y noreste, transportando

masas de aire más secas y acelerando el proceso de evapotranspiración, lo que tiene una incidencia directa en el balance hídrico de la zona. Los meses con menor velocidad de viento corresponden a marzo y abril, coincidiendo con la época lluviosa.

La siguiente gráfica muestra el comportamiento mensual de la velocidad media y máxima del viento en diferentes puntos de medición en Loja entre 2011 y 2023, destacando las variaciones estacionales:

Figura 2
Velocidad del viento en Loja de 2011 a 2023



Nota: Análisis del viento en Loja, periodo 2011 – 2023, adoptado de Vinculación UTPL, 2023, (<https://vinculacion.utpl.edu.ec/analisis-del-viento-en-loja-periodo-2011-2023>)

2.1.6 Hidrología

La Hoya de Loja presenta una red hidrográfica compleja constituida por microcuencas que responden de manera directa a la distribución espacial y temporal de la precipitación. La región cuenta con 45 microcuencas, distribuidas en el sector occidental y oriental, las cuales son fundamentales para el abastecimiento de agua y la regulación del balance hídrico en la ciudad (GEO LOJA, 2008).

Durante la temporada lluviosa (marzo y abril), las microcuencas incrementan sus caudales debido a la mayor precipitación, favoreciendo la infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo. Sin embargo, en la temporada seca (junio a septiembre), se reduce significativamente el caudal en las fuentes de captación, como se observa en las plantas de

tratamiento de Pucará y Curitroje, donde los caudales disminuyen de 300 a 180 l/s y de 53 a 35 l/s, respectivamente (Jaramillo, 2024).

En los meses secos, la combinación de baja precipitación, altas velocidades de viento y mayor radiación solar incrementa la demanda evaporativa, lo cual reduce la disponibilidad de agua en el suelo y en las microcuencas. Esta dinámica hidrológica genera un déficit hídrico que afecta los caudales de los sistemas de captación y, por ende, la disponibilidad del recurso hídrico para la hoya de Loja.

2.2 Materiales

Se recopilarán registros históricos de las siguientes variables meteorológicas de estaciones meteorológicas ubicadas estratégicamente dentro de la hoya de Loja:

- **Temperatura:** Datos diarios de temperatura máxima y mínima (°C).
- **Humedad relativa:** Porcentaje diario de humedad relativa (%).
- **Velocidad del viento:** Velocidad del viento a 2m del suelo (m/s).
- **Precipitación:** Precipitación diaria (mm).
- **Radiación solar:** Radiación solar diaria (W/m²).
- **Presión atmosférica:** Datos diarios de presión atmosférica (hPa).

El intervalo de los datos fue diario, y el período de los registros abarcará los años 2022 y 2023. Las estaciones meteorológicas específicas que se utilizarán para la recopilación de estos datos son:

Tabla 1.

Coordenadas geográficas y altitud de las estaciones meteorológicas en la Hoya de Loja

Nombre	UTMX	UTMY	Altura	Lat	Long
UTPL Militar	697901	9563240	2033	-3.9479	-79.2176
UTPL Jipiro	700975	9560679	2218	-3.9710	-79.1899
UTPL Técnico	694294	9558872	2377	-3.9875	-79.2500
UTLP Villonaco	692138	9559012	2952	-3.9863	-79.2694
UTPL	700210	9559009	2159	-3.9877	-79.1967
UTPL Época	698416	9555977	2203	-4.0152	-79.2128

Estos datos serán fundamentales para realizar el análisis de la relación entre la precipitación y la evapotranspiración en la zona de estudio. Los materiales necesarios para el desarrollo de este trabajo de integración curricular son los siguientes:

- **Excel:** Se empleará Microsoft Excel (Microsoft Corporation) para el procesamiento y análisis de datos, así como para la creación de gráficos y tablas que ayuden a visualizar y comprender los resultados obtenidos.

- **Estaciones meteorológicas:** Equipos utilizados para la recopilación de datos meteorológicos en las estaciones específicas de la hoya de Loja.

- **Estudio FAO 56:** La metodología de cálculo de la evapotranspiración se basará en el estudio de riego y drenaje FAO 56, el cual proporciona directrices para la determinación de los requisitos de agua de los cultivos (Allen et al., 2006)

- **QGIS:** Se utilizará el software de información geográfica QGIS (QGIS Development Team) para el análisis espacial de los datos meteorológicos y la representación cartográfica de la hoya de Loja.

2.3 Metodología

2.3.1 Recopilación de Información

En este estudio, se recopilarán datos históricos de diversas estaciones meteorológicas para evaluar la relación entre la precipitación y la evapotranspiración en la hoya de Loja. La información obtenida permitirá no solo describir las condiciones climáticas actuales y pasadas, sino también identificar patrones y tendencias que influyen la dinámica hídrica de la región.

2.3.2 Red de estaciones UTPL

Los datos meteorológicos fueron recopilados de las estaciones de la UTPL ubicadas en la hoya de Loja. Estas estaciones incluyen UTPL Militar, UTPL Jipiro, UTPL Técnico, UTPL Villonaco, UTPL y UTPL Época. Los mismos incluyen temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s), precipitación (mm), radiación solar (W/m^2) y presión atmosférica (hPa). El control de calidad de los datos se realizará mediante la verificación de la consistencia y la eliminación de valores atípicos.

2.3.3 Recopilación de información bibliográfica.

Se recopilaron fuentes relevantes sobre el procesamiento de datos y el cálculo de la evapotranspiración, especialmente relacionadas con el método Penman-Monteith. Estas referencias proporcionaron el marco teórico necesario para guiar los cálculos y validar los resultados.

2.3.4 Cálculo de la ET

La evapotranspiración se calculará utilizando la ecuación de Penman-Monteith modificada según las directrices del Estudio FAO 56. Esta metodología considera las variables meteorológicas recopiladas y proporciona una estimación precisa de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Los cálculos se realizarán en intervalos diarios para los años 2022 y 2023 permitiendo obtener resultados consistentes y adecuados a las condiciones específicas de la hoya de Loja.

Para garantizar la precisión y eficiencia en el procesamiento de los datos, se empleará Microsoft Excel como herramienta principal, optimizando la sistematización de los cálculos. Este método asegura un análisis detallado y reproducible, adecuado para evaluar la evapotranspiración de referencia (ETo).

2.3.4.1 Parámetros meteorológicos iniciales. Los datos meteorológicos recopilados incluyeron :

- Temperatura máxima y mínima (Tmax y Tmin, en C°)
- Humedad relativa máxima y mínima (HRmax y HRmin en %)
- Velocidad del viento (en m/s)
- Radiación solar (W/2, en Mj/m² día)
- Presión atmosférica (hPa, en kPa)
- Precipitación (en mm)

2.3.4.2 Ajuste y estandarización de datos. Las unidades de las variables fueron ajustadas para cumplir con los requisitos del método Penman-Monteith. La presión atmosférica fue convertida de hectopascales (hPa) a kilopascales (kPa) utilizando la relación

1hPa = 0.1 kPa. La radiación solar, medida en vatios por metro cuadrado (W/m^2), se transformó a megajulios por metro cuadrado por día ($MJ/m^2/día$) aplicando el factor de conversión $1 W/m^2 = 0.0864 MJ/m^2/día$. Las demás variables ya se encuentran en las unidades requeridas.

2.3.4.3 Procedimiento de Cálculo. El procedimiento para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) sigue las directrices propuestas en el Estudio FAO 56 (*Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Allen et al., 2006). Todas las ecuaciones y parámetros utilizados para este cálculo han sido tomados exclusivamente de este estudio, el cual es ampliamente reconocido y validado para estimaciones de (ET_o), y se han adaptado a las condiciones específicas de la Hoya de Loja.

2.3.4.3.1 Constante psicométrica (γ). La constante psicrométrica (γ) se calcula de forma simplificada como:

$$\gamma: 0.665 * 10^{-3} * P$$

Donde P es la presión atmosférica kilopascales (kPa).

2.3.4.3.2 Presión media de Vapor de saturación. Se determina la presión de saturación de vapor a partir de la temperatura del aire, La relación es no lineal debido a la dependencia exponencial de la temperatura (Allen et al., 2006).

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 * \exp \left[\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right]$$

Donde:

$e^{\circ}(T)$: Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire (kPa).

T: Temperatura del aire ($^{\circ}C$).

exp: Base del logaritmo natural elevada a la potencia correspondiente (2.7183).

Dado que la ecuación para $e^{\circ}(T)$ es no lineal, la presión media de saturación de vapor para un período específico (día, semana, mes) se obtiene como el promedio entre la presión

de saturación de vapor a la temperatura máxima y a la temperatura mínima, usando la ecuación:

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

Donde:

e_s : Presión media de saturación de vapor (kPa).

$e^\circ(T_{max})$: Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima (kPa).

$e^\circ(T_{min})$: Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima (kPa).

El cálculo de e_s garantiza una representación más precisa de la presión media de saturación de vapor al considerar tanto la temperatura máxima como la mínima. Esto evita subestimaciones en los resultados de evapotranspiración, ya que el uso exclusivo de la temperatura media podría generar errores significativos.

2.3.4.3.3 Pendiente de la curva de presión de saturación (Δ). La pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ) se determina a partir de la temperatura media del aire mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

Δ : Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (kPa °C⁻¹).

T : Temperatura media del aire (°C).

exp: Base del logaritmo natural elevada a la potencia correspondiente (2.7183).

El valor de Δ es esencial en la ecuación de Penman-Monteith, ya que representa la sensibilidad de la presión de saturación de vapor al cambio de temperatura, influenciando directamente el cálculo de la evapotranspiración.

2.3.4.3.4 Presión real de vapor. La presión real de vapor e_a se calculó a partir de la humedad relativa máxima HR_{max} y mínima HR_{min} mediante la siguiente expresión

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

Donde:

e_a : Presión real de vapor (kPa).

$e^\circ(T_{\min})$: Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria (kPa).

$e^\circ(T_{\max})$: Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria (kPa).

HR_{\min} : Humedad relativa máxima (%).

HR_{\max} : Humedad relativa mínima (%).

El uso de esta ecuación es adecuado cuando se dispone de datos diarios de humedad relativa máxima y mínima, ya que permite reflejar de forma más realista las condiciones de humedad en el ambiente, siendo un parámetro crucial en el cálculo de la evapotranspiración.

2.3.4.3.5 Déficit de la presión de vapor. El déficit de presión de vapor se calcula como la diferencia entre la presión de saturación de vapor (e_s) y la presión real de vapor (e_a) previamente obtenidas.

$$e_s - e_a$$

2.3.4.3.6 Radiación extraterrestre diaria. La radiación extraterrestre diaria (R_a) corresponde a la cantidad de radiación solar recibida fuera de la atmósfera terrestre en un día determinado, y su cálculo depende de la posición relativa entre la Tierra y el Sol, así como de la latitud del área de estudio. Para obtener (R_a), es necesario calcular previamente las variables que intervienen en su ecuación.

- **Distancia relativa Tierra – Sol.** - La distancia relativa entre la Tierra y el Sol se calcula mediante la siguiente expresión:

$$dr = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right)$$

Donde:

J: Número del día en el año (1 para el 1 de enero, hasta 365 para el 31 de diciembre).

- **Declinación Solar.** - La declinación solar (δ) representa el ángulo entre el plano del ecuador terrestre y la línea que conecta el centro del Sol con la Tierra. Se determina

con la ecuación:

$$\delta = 0.409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right)$$

- **Latitud en radianes.** - La latitud del área de estudio debe expresarse en radianes para ser utilizada en las funciones trigonométricas. La conversión se realiza con la fórmula:

$$[\text{Radianes}] = \frac{\pi}{180} [\text{Grados decimales}]$$

- **Ángulo de radiación solar a la puesta del sol.** - El ángulo horario a la hora de la puesta del sol se calcula con la siguiente ecuación:

$$w_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

Donde:

φ : Latitud en radianes.

δ : Declinación solar.

- **Radiación extraterrestre.** - Una vez obtenidas las variables anteriores, la radiación extraterrestre diaria (R_a) se calcula con la fórmula:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [w_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(w_s)]$$

Donde:

R_a : Radiación extraterrestre diaria en $MJ m^2 dia$

G_{sc} : Constante solar igual a **0.082** $MJ m^2 dia$

d_r : Distancia relativa Tierra-Sol.

w_s : Ángulo de radiación solar a la puesta del sol (radianes).

φ : Latitud en radianes

δ : Declinación solar (radianes).

2.3.4.3.7 Duración máxima de la insolación (N): La duración máxima de la insolación (N) se calculó utilizando la siguiente ecuación.

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

El valor de N representa el número máximo de horas de luz solar para un día específico, el cual depende de la latitud y de la declinación solar calculada previamente.

2.3.4.3.8 Radiación solar en un día despejado: La radiación solar en un día despejado se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$R_{so} = \left(0.75 + 2 * \frac{z}{100\ 000}\right) * R_a$$

Donde:

R_{so} : Radiación solar en un día despejado (MJ m² día).

z: Altitud del área de estudio sobre el nivel del mar (m).

R_a : Radiación extraterrestre diaria (MJ m² día).

2.3.4.3.9 Radiación neta solar de onda corta. La radiación neta solar de onda corta se calculó acorde a la siguiente ecuación:

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

Donde:

R_{ns} : Radiación neta solar de onda corta (MJ m² día).

α : Albedo cuyo valor es 0.23 para la superficie de referencia.

R_s : Radiación solar entrante medida o estimada (MJ m² día).

2.3.4.3.10 Radiación neta de onda larga (R_{nl}): La radiación neta de onda larga se calculó aplicando la siguiente expresión, basada en la ley de Stefan-Boltzmann:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

Donde:

R_{nl} : Radiación neta de onda larga (MJ m⁻² día⁻¹).

σ : Constante de Stefan-Boltzmann [4.093 x 10⁻⁹ MJ K⁻⁴ m⁻² día⁻¹]

$T_{max,K}$: Temperatura máxima absoluta en un período de 24 horas en grados kelvin (k)

$T_{min,K}$: Temperatura mínima absoluta en un período de 24 horas en grados kelvin (k)

e_a : Presión real de vapor (kPa).

R_s : Radiación solar medida o calculada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

R_{so} : Radiación solar en un día despejado ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

2.3.4.3.11 Radiación neta. La radiación neta (R_n) se calculó como la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}), utilizando la siguiente ecuación:

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

2.3.4.3.12 Evapotranspiración de referencia (ET_o). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó utilizando la ecuación de Penman-Monteith, que integra todas las variables climáticas evaluadas previamente:

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

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}).

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

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

G : Flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Para períodos diarios $G = 0$

T : Temperatura media del aire ($^\circ\text{C}$).

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

u_2 : Velocidad del viento a 2 metros de altura (m s^{-1}).

e_s : Presión de saturación de vapor (kPa).

e_a : Presión real de vapor (kPa).

$e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor (kPa).

El cálculo de ET_o combina el balance de radiación neta, el déficit de presión de vapor y el efecto del viento sobre la evapotranspiración, proporcionando un parámetro clave para analizar la interacción entre la precipitación y la evapotranspiración en la Hoya de Loja. Este

valor permitirá evaluar cómo las condiciones climáticas influyen en el balance hídrico de la región, contribuyendo al desarrollo de un modelo predictivo que relacione estas variables.

2.3.5 Desarrollo del modelo de regresión múltiple.

Se analizó la relación entre la evapotranspiración de referencia (ET_o) y las principales variables climáticas utilizando un modelo de regresión múltiple. Este enfoque permitió considerar, además de la precipitación, otras variables significativas como la temperatura promedio, la radiación solar, la humedad relativa media y la velocidad del viento, con el fin de desarrollar un modelo predictivo robusto y representativo para las condiciones de la Hoya de Loja.

Al incorporar variables adicionales, se identificaron patrones complejos y dependencias entre estas, ajustando un modelo con alta precisión para estimar (ET_o). Este enfoque representa una herramienta valiosa para interpretar la interacción de variables climáticas en la Hoya de Loja y proyectar la evapotranspiración en escenarios locales.

El procedimiento metodológico para el desarrollo del modelo se realizó de la siguiente manera:

2.3.5.1 Preparación de datos. Se calcularon valores diarios de (ET_o) para los años 2022 y 2023, mediante el método Penman-Monteith, de manera independiente para cada una de las seis estaciones meteorológicas de la Hoya de Loja. Para cinco de las estaciones (Militar, Jipiro, Villonaco, Técnico y Época) se calcularon 730 datos, mientras que para la estación UTPL se calcularon 716 datos debido a la disponibilidad específica de la información.

2.3.5.2 División del conjunto de datos. Para cada estación, el conjunto de datos se dividió en dos partes:

- 70% de los datos: Utilizados para desarrollar el modelo de regresión múltiple.
- 30% de los datos: Reservados para la validación del modelo.

2.3.5.3 Desarrollo del modelo. Se aplicó un análisis de regresión múltiple considerando las siguientes variables climáticas:

- Precipitación (mm).

- Temperatura promedio ($^{\circ}\text{C}$).
- Radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).
- Humedad relativa media (%).
- Velocidad del viento (m/s).

Este análisis generó una ecuación matemática ajustada para estimar ET_o en función de las variables independientes.

2.3.5.4 Validación del modelo. Las ecuaciones generadas para cada estación se aplicaron al 30% de los datos restantes, comparando los valores de ET_o estimados por la ecuación con los valores calculados por el método Penman-Monteith.

2.3.5.5 Evaluación metodológica. Se utilizó un gráfico de dispersión y herramientas estadísticas para analizar la correspondencia entre los valores de ET_o calculados y estimados. Este proceso permitió verificar la eficacia del modelo en diferentes condiciones climáticas locales.

Capítulo Tres

Resultados y discusión

3.1 Análisis de las condiciones climáticas en la Hoya de Loja

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos climáticos recopilados en seis estaciones meteorológicas ubicadas en la Hoya de Loja: UTPL, Militar, Jipiro, Villonaco, Técnico y Época. Las variables evaluadas incluyen temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, presión atmosférica, precipitación y radiación solar. Para cada estación, se determinaron los valores máximos, mínimos y promedio de estas variables, a fin de caracterizar las condiciones climáticas de la región y su influencia en los procesos de evapotranspiración.

Tabla 2

Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL

	Máximo	Mínimo	Medio
Temperatura (°C)	24.15	11.06	16.89
Humedad relativa (%)	96.18	52.11	77.28
Velocidad del Viento (m/s)	4.28	0.01	1.04
Presión Atmosférica (kPa)	101.78	100.45	101.08
Precipitación (mm)	28.67	0.00	1.94
Radiación Solar (MJ m⁻² día⁻¹)	38.43	0.25	13.79

Tabla 3

Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Militar

	Máximo	Mínimo	Medio
Temperatura (°C)	21.11	14.48	17.89
Humedad relativa (%)	92.38	61.90	78.47
Velocidad del Viento (m/s)	1.69	0.004	0.28
Presión Atmosférica (kPa)	102.53	101.30	101.89
Precipitación (mm)	41.15	0.00	1.85
Radiación Solar (MJ m⁻² día⁻¹)	26.65	1.61	12.87

Tabla 4

Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Jipiro

	Máximo	Mínimo	Medio
Temperatura (°C)	19.25	12.84	16.37
Humedad relativa (%)	92.64	63.04	80.55
Velocidad del Viento (m/s)	11.78	0.605	3.33
Presión Atmosférica (kpa)	101.76	100.74	101.17
Precipitación (mm)	41.38	0.00	1.97

Radiación Solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	29.34	2.53	13.64
---	-------	------	-------

Tabla 5

Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Villonaco

	Máximo	Mínimo	Medio
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	14.68	6.00	10.81
Humedad relativa (%)	100.00	72.75	96.30
Velocidad del Viento (m/s)	20.06	0.220	6.95
Presión Atmosférica (kPa)	102.02	100.86	101.33
Precipitación (mm)	67.54	0.00	2.27
Radiación Solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	27.25	1.52	11.80

Tabla 6

Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Técnico

	Máximo	Mínimo	Medio
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	18.85	11.57	15.57
Humedad relativa (%)	95.70	67.84	84.27
Velocidad del Viento (m/s)	2.64	0.051	0.69
Presión Atmosférica (kPa)	101.71	100.66	101.09
Precipitación (mm)	47.45	0.00	2.41
Radiación Solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	26.87	2.27	13.98

Tabla 7

Resumen de datos climáticos registrados en la estación UTPL Época

	Máximo	Mínimo	Medio
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	18.88	12.67	15.95
Humedad relativa (%)	92.21	58.93	77.31
Velocidad del Viento (m/s)	6.13	0.684	2.69
Presión Atmosférica (kPa)	102.73	102.09	102.39
Precipitación (mm)	36.10	0.00	2.96
Radiación Solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	26.23	1.49	12.50

Los datos climáticos registrados en las seis estaciones meteorológicas de la Hoya de Loja evidencian una notable variabilidad influenciada por factores geográficos y altitudinales. Este análisis contribuye a comprender cómo las condiciones locales afectan variables clave como la temperatura, la humedad, la radiación solar, la precipitación y la velocidad del viento, factores cruciales para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o).

En términos de temperatura promedio, se observa una variación marcada entre las estaciones. Villonaco, a 2952 m s.n.m., registró un promedio de 10.81 $^{\circ}\text{C}$, mientras que UTPL,

ubicada a 2159 m s.n.m., alcanzó los 16.89 °C. Estos valores son consistentes con el gradiente térmico altitudinal documentado por Sánchez Delgado (2015), quien reportó una disminución de temperatura con el incremento de altitud en la vertiente del Pacífico ecuatoriano (Sánchez, 2015).

En relación con la humedad relativa, Villonaco presentó los valores más altos (96.30 %), mientras que UTPL mostró un promedio más bajo (77.28 %). Esta diferencia se asocia con la mayor condensación de humedad en altitudes superiores, un fenómeno típico en regiones montañosas con altas tasas de humedad adiabática (Murga, 2020).

La velocidad del viento mostró una tendencia destacada en Villonaco, con un promedio de 6.95 m/s, siendo significativamente mayor que en las demás estaciones. Este comportamiento es consistente con estudios previos realizados por Vinculación UTPL (2023), que identificaron patrones de alta velocidad de viento en áreas expuestas a corrientes predominantes debido a su ubicación estratégica en cumbres montañosas. Por otro lado, la estación Militar registró la menor velocidad promedio (0.28 m/s), reflejando la influencia de condiciones geográficas más protegidas y menos expuestas a corrientes de aire (Vinculación UTPL, 2023).

En cuanto a la radiación solar, UTPL presentó el valor promedio más alto (13.79 MJ m⁻² día⁻¹), favorecida por una menor cobertura nubosa. Este resultado coincide con lo reportado por (Urdiales et al., 2018), quien observó patrones similares en estaciones con características geográficas análogas. Época, en cambio, mostró un promedio más bajo (11.80 MJ m⁻² día⁻¹), afectada por una mayor incidencia de nubosidad.

Finalmente, la precipitación diaria promedio varió entre 1.94 mm en UTPL y 2.27 mm en Época. Estas diferencias están alineadas con estudios previos que documentan efectos orográficos sobre las precipitaciones en regiones montañosas (Sánchez, 2015).

Estos resultados no solo confirman patrones previamente documentados en la Hoya de Loja, sino que también destacan las particularidades de cada estación meteorológica, lo cual es fundamental para desarrollar modelos precisos de estimación de evapotranspiración.

3.2 Evapotranspiración calculada mediante el método de Penman – Monteith.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) fue calculada para las seis estaciones meteorológicas de la Hoya de Loja utilizando el método Penman-Monteith (Allen et al., 2006). Los valores máximos, mínimo y promedio de ET_o para cada estación se resumen en la tabla 7. Estos resultados reflejan cómo las condiciones climáticas locales influyen en la evapotranspiración diaria.

Tabla 8
Resumen de resultados de evapotranspiración diaria ($mm\ día^{-1}$)

Estación	Máximo	Mínimo	Medio
UTPL	6.0	0.002	2.494
Militar	4.2	0.368	2.346
Jipiro	5.5	0.971	2.903
Villonaco	5.1	0.091	1.497
Técnico	4.4	0.585	2.456
Época	5.4	1.165	2.826

Los valores promedios de (ET_o) oscilaron entre $1.497\ mm\ día^{-1}$ en Villonaco y $2.903\ mm\ día^{-1}$ en Jipiro, evidenciando una variación asociada a factores climáticos como la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento. Las estaciones Jipiro y Época, que registraron valores más altos de (ET_o), también mostraron temperaturas promedio superiores a $15\ ^\circ C$ y altos niveles de radiación solar ($>12\ MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$). Estos resultados concuerdan con lo reportado por (Urdiales et al, 2018). quienes destacaron la radiación solar como un factor determinante en el balance energético para la evapotranspiración en zonas andinas.

En contraste, Villonaco presentó el valor más bajo de (ET_o), influenciado por una menor radiación solar promedio ($11.80\ MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$) y una humedad relativa más alta ($96.30\ \%$), lo que reduce el déficit de presión de vapor y, por ende, la tasa de evapotranspiración. Este comportamiento es consistente con los hallazgos de (Allen et al., 2006), que documentaron una relación inversa entre humedad relativa y (ET_o).

La velocidad del viento mostró una influencia significativa en estaciones como Villonaco y UTPL, donde se registraron valores máximos de $6.95\ m/s$ y $4.28\ m/s$, respectivamente. Estudios como el de (Hargreaves et al., 2003) resaltan el papel del viento

en el transporte de vapor de agua, especialmente en zonas con déficit de humedad. Sin embargo, en Villonaco, esta influencia fue contrarrestada por las bajas temperaturas y la limitada radiación solar, lo que evidencia la necesidad de analizar las variables de forma conjunta.

La precipitación, por su parte, no presentó una correlación directa con (ET_o), ya que su variabilidad no afecta de manera significativa los procesos de evapotranspiración. Esto refuerza la importancia de emplear modelos integradores como el de Penman-Monteith para obtener estimaciones precisas.

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con investigaciones previas realizadas en contextos similares. Por ejemplo, en la región andina del sur de Ecuador, se observó que la radiación solar es una variable clave en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Estudios han demostrado que la radiación solar, junto con otros factores climáticos, influye significativamente en los valores de (ET_o) en ecosistemas de páramo (Montenegro, 2015). De manera similar, se ha identificado que las temperaturas más altas y la radiación solar en estaciones de menor altitud generan un incremento notable en la evapotranspiración (Sánchez, 2015).

Por otro lado, la velocidad del viento también ha sido destacada en otros estudios como un factor relevante, especialmente en zonas con alta evaporación. Sin embargo, su efecto está condicionado por la interacción con otras variables climáticas, como la radiación solar y la humedad relativa (Hargreaves et al., 2003). Esto concuerda con los resultados observados en estaciones como Villonaco, donde la velocidad del viento fue elevada, pero el impacto en (ET_o) estuvo limitado por otros factores climáticos menos favorables.

En conjunto, estas comparaciones respaldan la validez de los resultados obtenidos en la Hoya de Loja y destacan la importancia de analizar las interacciones entre las distintas variables climáticas para obtener estimaciones precisas de evapotranspiración.

3.3 Análisis del modelo de regresión múltiple

En la Tabla 9 se presenta el resumen del modelo de regresión múltiple ajustado para cada estación meteorológica, incluyendo el coeficiente de determinación ajustado (R^2) y los

coeficientes asociados a cada variable climática. Los resultados muestran un alto nivel de ajuste del modelo en todas las estaciones, con valores de (R^2) que oscilan entre 0.952 y 0.991, indicando una fuerte relación entre las variables climáticas analizadas y la evapotranspiración de referencia (ET_o).

Tabla 9

Resumen del modelo de regresión múltiple ajustado para cada estación meteorológica

Estación	R ² ajustado	Precipitación	Temperatura	Radiación Solar	Humedad relativa	Velocidad del viento
UTPL	0.976	0.002	0.081	0.131	-0.015	0.260
MILITAR	0.991	0.001	0.082	0.135	0.003	0.397
JIPIRO	0.952	0.015	0.108	0.122	-0.058	-0.008
VILLONACO	0.957	0.001	0.088	0.085	-0.078	-0.060
TÉCNICO	0.986	0.003	0.077	0.130	-0.010	0.108
ÉPOCA	0.963	0.008	0.108	0.123	-0.043	0.054

Los valores obtenidos revelan que, para las estaciones UTPL y Militar, la velocidad del viento es la variable más influyente en la estimación de (ET_o), con coeficientes de 0.2596 y 0.3969, respectivamente. Este resultado supera la influencia de variables como la radiación solar o la temperatura, que generalmente son más significativas en otras estaciones.

El predominio de la velocidad del viento en las estaciones UTPL y Militar puede explicarse por las condiciones locales de dichas estaciones, caracterizadas **por una mayor exposición a corrientes de aire**. Según lo señalado por (Hargreaves et al., 2003), la velocidad del viento desempeña un papel clave en la transferencia de vapor de agua al aumentar la evaporación desde las superficies y reducir la resistencia aerodinámica. Este efecto es especialmente notable en regiones donde la radiación solar, aunque presente, no alcanza niveles extremos.

Además, estudios realizados en la región andina, como el de (Urdiales et al., 2018), corroboran que el viento puede ser la variable dominante en zonas con un gradiente de humedad alta y temperaturas moderadas, como ocurre en UTPL y Militar. En estas condiciones, el viento no solo facilita la transferencia de vapor de agua, sino que también modula la influencia de otras variables, como la radiación solar.

Por otro lado, en estaciones como Jipiro y Época, donde la radiación solar y la

temperatura tienen mayor peso, la velocidad del viento pasa a un segundo plano debido a la alta disponibilidad de energía para el proceso de evapotranspiración. Esto resalta la importancia de considerar las interacciones entre variables climáticas en la estimación de (ET_0).

3.3.1 Representación espacial de las variables climáticas.

La representación espacial de las variables climáticas constituye una herramienta fundamental para complementar los análisis numéricos y estadísticos, ya que permite visualizar patrones geográficos que de otra manera pasarían desapercibidos. En el presente estudio, se elaboraron mapas temáticos de temperatura, precipitación y evapotranspiración para la hoya de Loja, utilizando datos recopilados en seis estaciones meteorológicas durante los años 2022 y 2023. Estos mapas fueron generados mediante herramientas SIG, específicamente QGIS, empleando técnicas de interpolación para representar la variación espacial de estas variables en la zona de estudio.

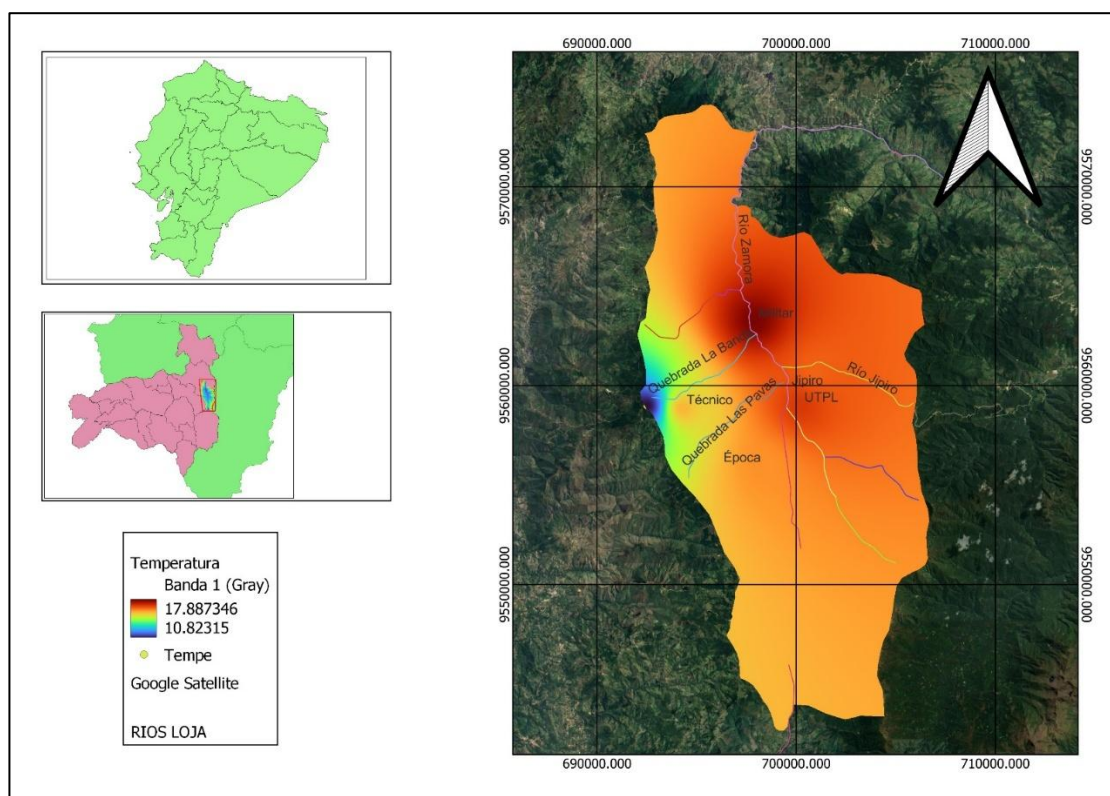
Los mapas proporcionan una visión clara de cómo las condiciones climáticas varían en función de factores como la altitud, la ubicación de las estaciones meteorológicas y las características geográficas de la cuenca. La información obtenida a partir de estas visualizaciones no solo refuerza los resultados obtenidos mediante los métodos estadísticos y analíticos, sino que también permite identificar áreas con características específicas que influyen en la dinámica de las variables estudiadas.

A continuación, se presenta la descripción detallada de cada uno de los mapas elaborados, destacando los patrones más relevantes y su relación con los resultados obtenidos en este trabajo.

Temperatura:

Figura 3

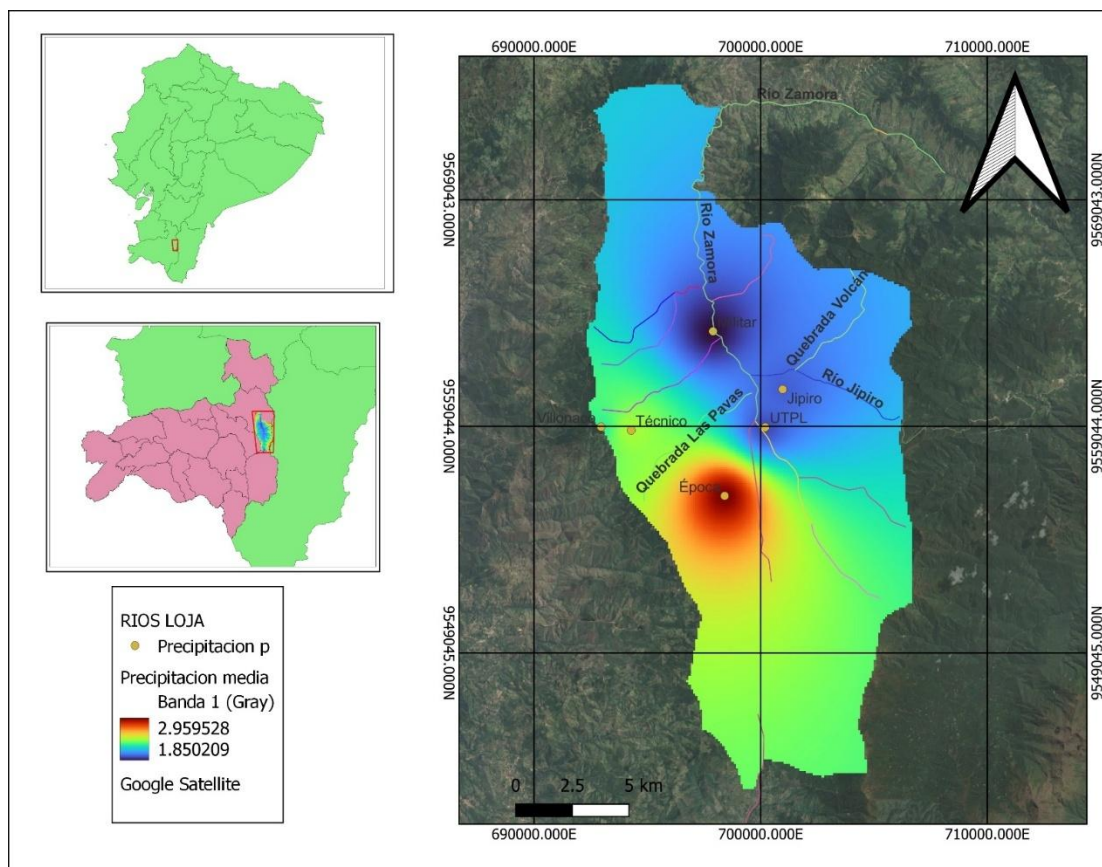
Distribución espacial de la temperatura promedio en la hoya de Loja



Precipitación:

Figura 4

Distribución espacial de la precipitación promedio en la hoya de Loja



El mapa de precipitación promedio en la hoya de Loja ilustra la distribución espacial de esta variable, evidenciando cómo factores geográficos y altitudinales influyen en los patrones de precipitación de la región. Los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas indican que la estación Época, situada a una altitud de 2203 m, registra mayores acumulaciones de precipitación en comparación con otras estaciones.

Este patrón puede atribuirse a la compleja interacción de factores orográficos y dinámicas atmosféricas locales. Aunque la proximidad de la estación UTPL a la cordillera oriental podría sugerir una mayor influencia de las masas de aire húmedo provenientes de la Amazonía, los datos indican que la estación Época, a una altitud ligeramente superior, recibe mayor precipitación. Este fenómeno está relacionado con microclimas locales y la orientación específica de las pendientes que favorecen la condensación y precipitación en esa zona.

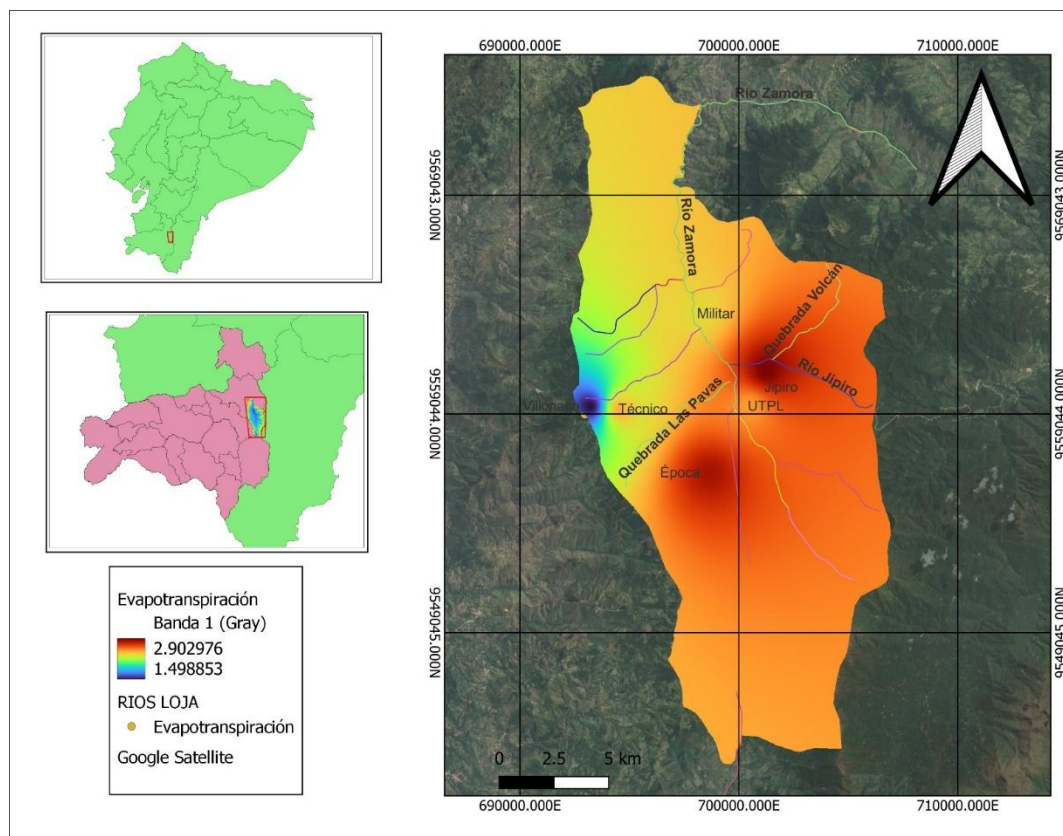
La representación espacial de la precipitación en el mapa complementa los análisis

numéricos previos, proporcionando una visión más integral de la distribución de este recurso hídrico esencial. Esta información es crucial para la planificación y gestión eficiente de los recursos hídricos en la hoya de Loja, permitiendo identificar áreas con mayor disponibilidad de agua y orientar estrategias de aprovechamiento sostenible.

Evapotranspiración.

Figura 5

Distribución espacial de la evapotranspiración promedio en la hoya de Loja



El mapa de evapotranspiración promedio en la hoya de Loja proporciona una representación visual de la distribución espacial de esta variable, basada en los datos calculados mediante el método de Penman-Monteith.

El aporte principal del mapa radica en su capacidad para visualizar de manera integrada los factores climáticos que influyen en la evapotranspiración, permitiendo identificar gradientes y diferencias que no son evidentes a partir de los datos numéricos aislados. Esta herramienta no solo refuerza los resultados discutidos previamente, sino que también facilita la identificación de zonas críticas para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la hoya de Loja.

3.3.2 Ecuaciones generadas por el modelo de regresión múltiple.

Las ecuaciones obtenidas para cada estación son las siguientes:

- Utpl

$$ET_0 = 0.406 + (0.0022 * P) + (0.0803 * T) + (0.1306 * R_s) + (-0.0153 * H_r) + (0.2596 * V_w)$$

- Militar

$$ET_0 = -1.219 + (0.00099 * P) + (0.08158 * T) + (0.1349 * R_s) + (0.0034 * H_r) + (0.3969 * V_w)$$

- Jipiro

$$ET_0 = 4.15 + (0.0152 * P) + (0.1077 * T) + (0.1219 * R_s) + (-0.0582 * H_r) + (-0.0077 * V_w)$$

- Villonaco

$$ET_0 = 7.4280 + (0.000945 * P) + (0.0883 * T) + (0.0853 * R) + (-0.0777 * H_r) + (-0.0601 * V_w)$$

- Técnico

$$ET_0 = 0.2227 + (0.0033 * P) + (0.0770 * T) + (0.1300 * R_s) + (-0.0102 * H_r) + (0.1076 * V_w)$$

- Época

$$ET_0 = 2.6896 + (0.0081 * P) + (0.1079 * T) + (0.1230 * R_s) + (-0.0427 * H_r) + (0.0544 * V_w)$$

Donde

ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

P : Precipitación (mm)

T : Temperatura (°C)

R_s : Radiación solar (MJ m⁻² día⁻¹).

H_r : Humedad relativa media (%)

V_w : Velocidad del viento (m/s)

Las ecuaciones obtenidas mediante el modelo de regresión múltiple sintetizan las relaciones cuantitativas entre la evapotranspiración de referencia (ET_0) y las variables climáticas evaluadas en cada estación meteorológica. Estas ecuaciones, presentadas en la sección anterior, reflejan los coeficientes específicos obtenidos para cada variable.

El principal aporte de estas ecuaciones radica en su capacidad para simplificar el cálculo de la (ET_0). Gracias a ellas, es posible estimar directamente la evapotranspiración diaria sin necesidad de realizar el extenso procedimiento que propone el método de Penman-

Monteith, lo que representa una herramienta práctica y eficiente para la gestión de recursos hídricos en la Hoya de Loja. Al basarse en variables climáticas fácilmente medibles, estas ecuaciones facilitan su aplicación en contextos donde los recursos o el tiempo para realizar cálculos complejos son limitados.

Además, estas ecuaciones adaptadas a cada estación meteorológica permiten capturar las particularidades climáticas locales, asegurando una estimación precisa de la (ET_0). Esto las convierte en un recurso valioso para el desarrollo de estrategias sostenibles en la gestión de recursos hídricos y agrícolas, alineadas con las condiciones específicas de la región.

3.3.3 Gráficos de comparación de evapotranspiración observada y estimada.

Se En las Figuras 6 a 11 se presentan los gráficos comparativos entre la evapotranspiración observada (ET_0) calculada mediante el método Penman-Monteith y la estimada por la ecuación generada por el modelo de regresión múltiple para cada estación. Estos gráficos muestran un alto nivel de ajuste, con valores de R^2 superiores a 0.95 en todas las estaciones, lo que indica una excelente capacidad predictiva del modelo.

Figura 6

Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL

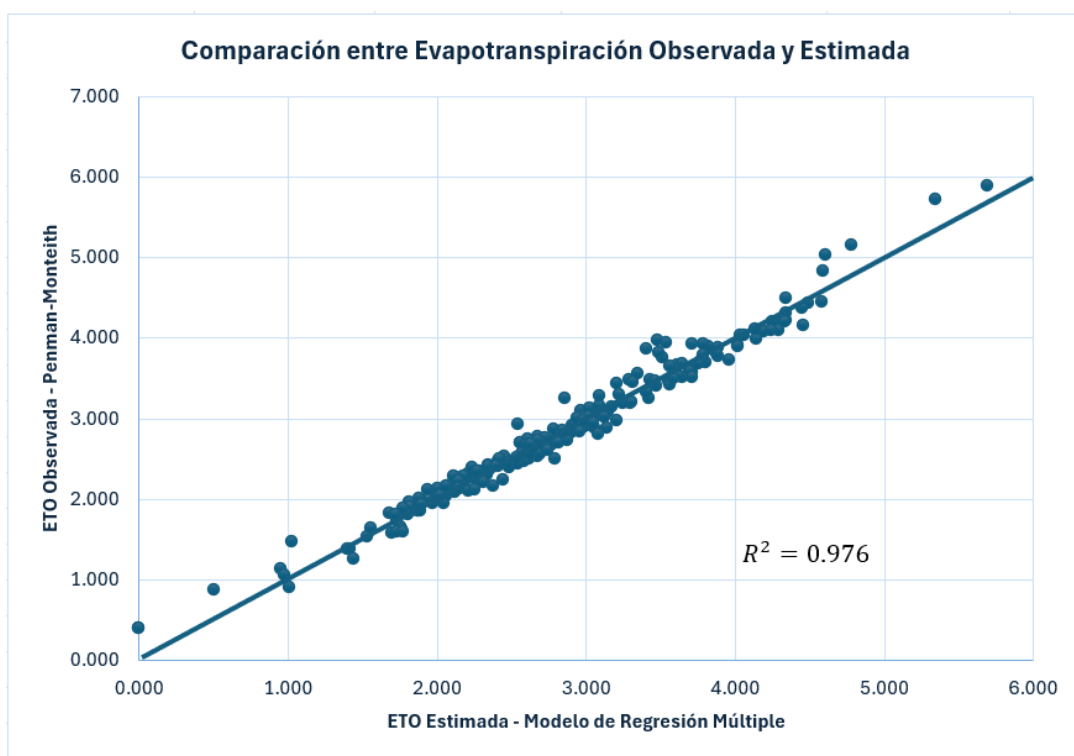
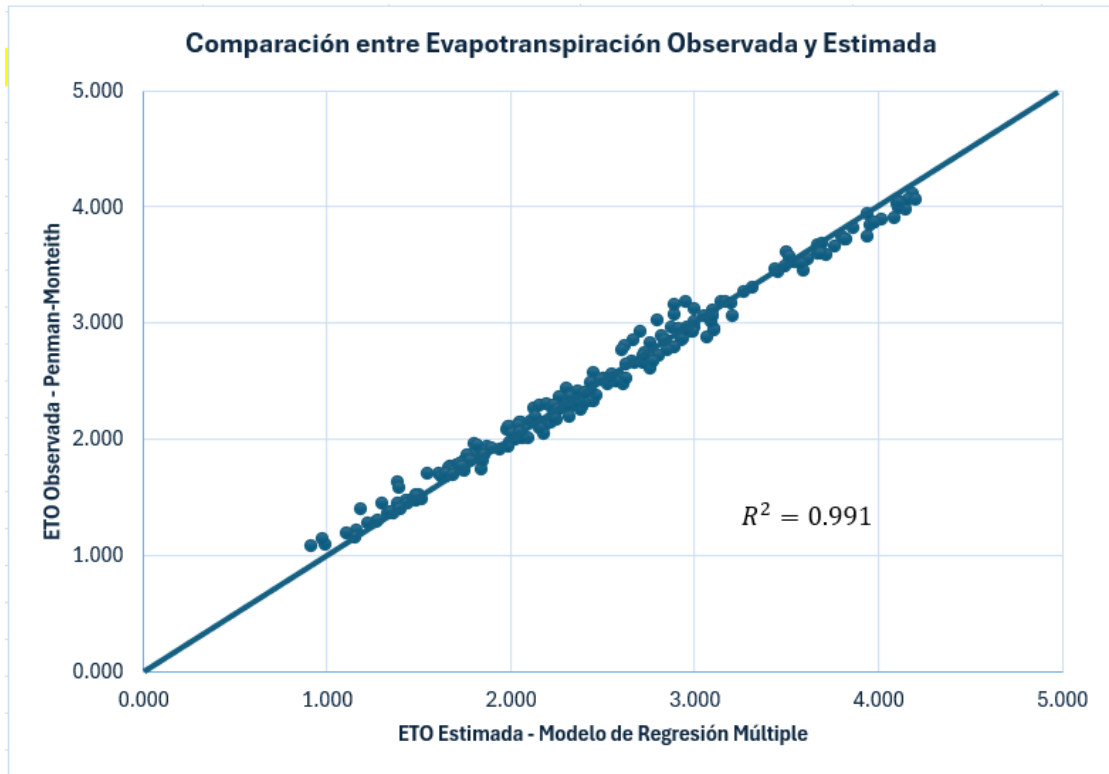


Figura 7

Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Militar

**Figura 8**

Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Jipiro

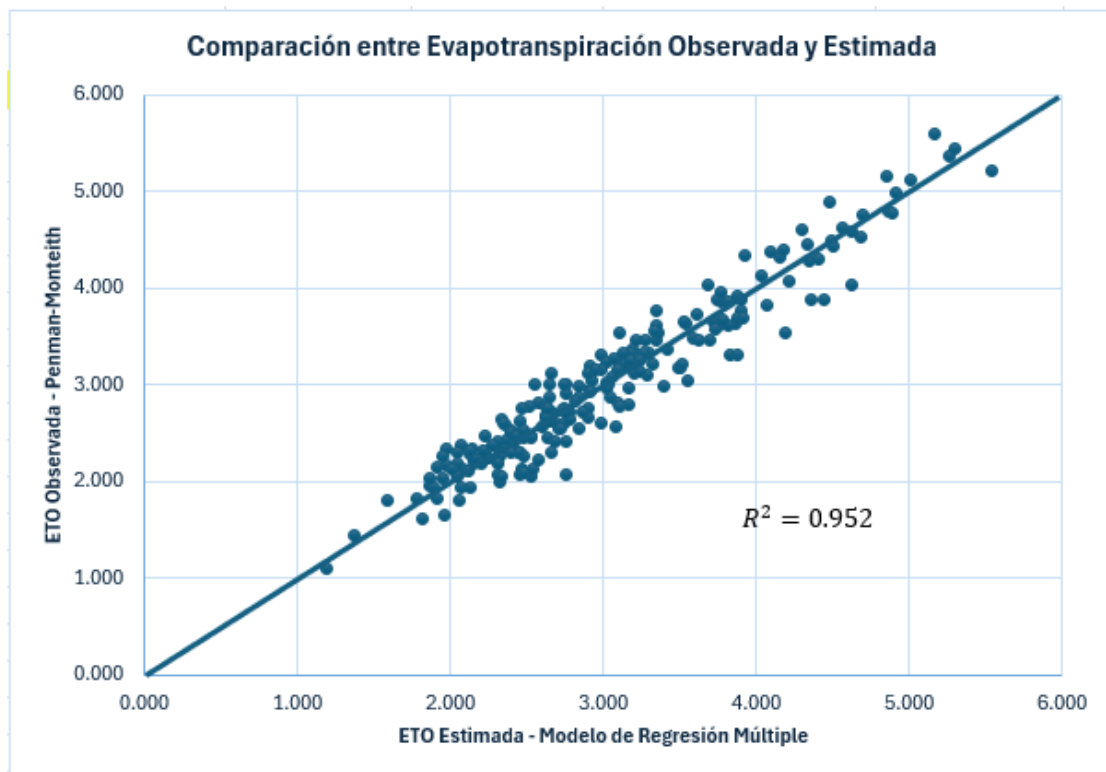
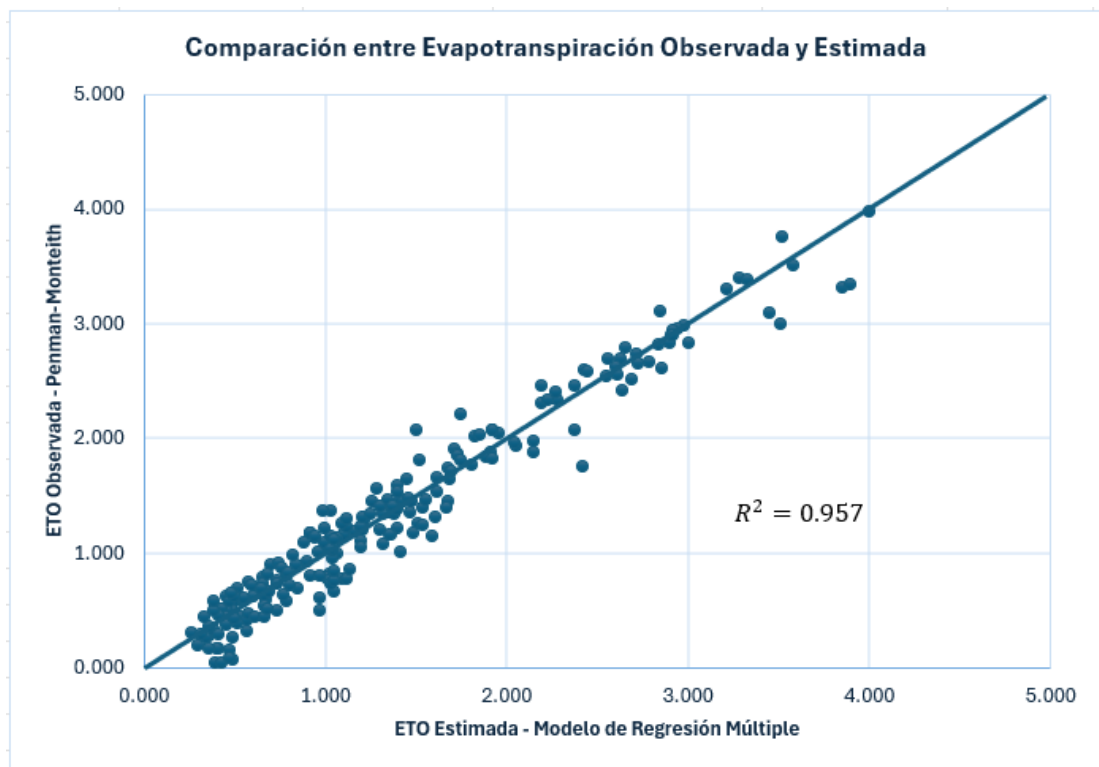


Figura 9

Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Villonaco

**Figura 10.**

Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Técnico

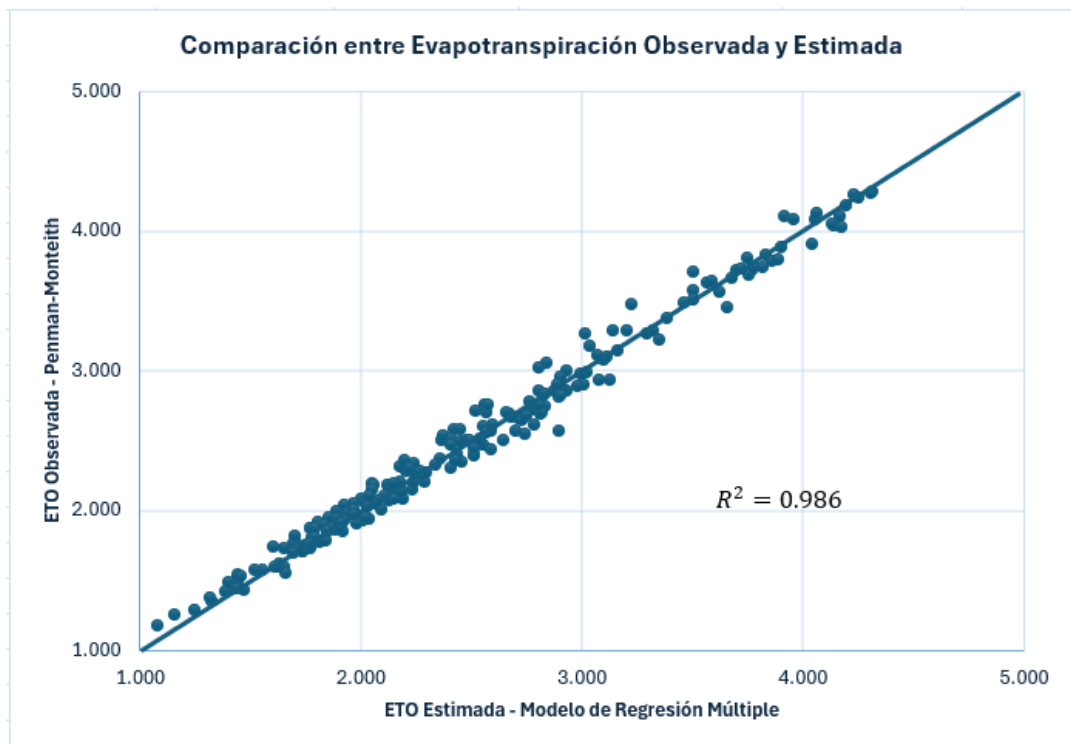
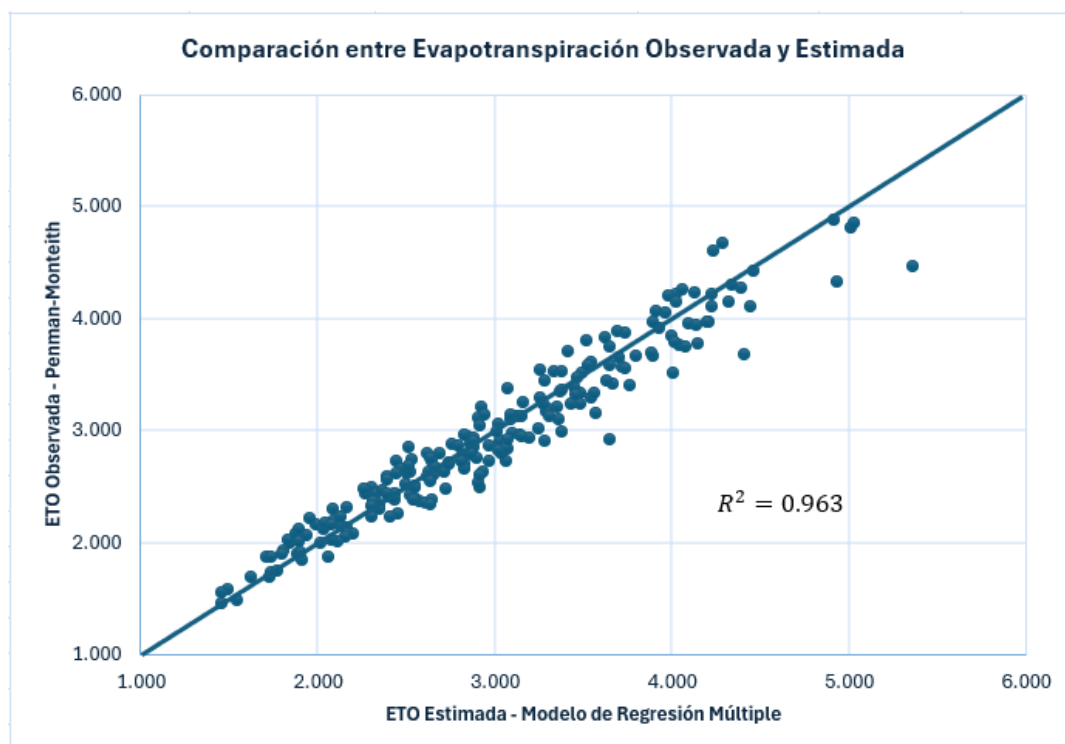


Figura 11.
Comparación entre evapotranspiración observada y estimada en la estación UTPL Época



Las figuras presentadas concluyen el análisis al comparar la evapotranspiración observada (ET_0), calculada mediante el método de Penman-Monteith, con los valores estimados por el modelo de regresión múltiple para cada estación. Los resultados reflejan un excelente nivel de ajuste, destacando la precisión del modelo en la estimación de (ET_0) bajo diversas condiciones climáticas.

La concordancia observada en las gráficas respalda la utilidad del modelo no solo como una herramienta predictiva confiable, sino también como una alternativa eficiente que simplifica el cálculo de la evapotranspiración al obviar procesos complejos asociados al método de Penman-Monteith. Esto refuerza el valor del modelo para su aplicación en estudios hidrológicos y la gestión de recursos hídricos, particularmente en regiones con condiciones climáticas variables como la Hoya de Loja.

Conclusiones

Los resultados evidencian que la velocidad del viento y la radiación solar fueron las variables climáticas más influyentes en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en la Hoya de Loja. Particularmente, en las estaciones UTPL y Militar, la velocidad del viento demostró un impacto predominante con coeficientes de 0.2596 y 0.3969, respectivamente. Este hallazgo destaca la importancia del viento en regiones con condiciones climáticas específicas.

El modelo de regresión múltiple desarrollado presenta un alto nivel de ajuste, con coeficientes de determinación ajustados (R^2) que oscilan entre 0.952 y 0.991. Esto indica una alta capacidad predictiva para estimar la ET_o utilizando variables climáticas más accesibles, simplificando los procesos asociados al método de Penman-Monteith.

Las ecuaciones generadas permiten estimar de manera eficiente la ET_o, evitando la necesidad de aplicar todo el procedimiento del método de Penman-Monteith. Esto constituye una herramienta valiosa para la gestión de recursos hídricos en zonas con recursos técnicos limitados.

La aplicación del modelo desarrollado en la Hoya de Loja ofrece una base sólida para planificar estrategias de manejo sostenible del agua. Además, los resultados obtenidos pueden ser adaptados a otras cuencas con características climáticas similares.

Aunque el modelo fue efectivo, se identificaron limitaciones relacionadas con la calidad y la disponibilidad de datos meteorológicos. La inclusión de más estaciones meteorológicas y un periodo de análisis más prolongado podría mejorar la precisión del modelo.

Recomendaciones

Es fundamental realizar estudios similares en cuencas con condiciones climáticas diferentes para validar la aplicabilidad del modelo desarrollado y las ecuaciones generadas en otros contextos.

Promover la implementación del modelo y las ecuaciones desarrolladas en proyectos de gestión hídrica y planificación agrícola en la Hoya de Loja, así como en programas de capacitación técnica para agricultores y gestores de recursos.

Realizar investigaciones adicionales sobre cómo las variables climáticas interactúan entre sí para influir en la evapotranspiración y cómo estas relaciones pueden variar según la región.

Referencias

- Rivas R., (2004), Propuesta de un modelo operativo para la estimación de la evapotranspiración. Obtenido de: <http://www.tdx.cat/TDX-0613105-171221>
- Imbaquingo M., (2024), Estudio de evapotranspiración potencial y precipitación efectiva del cantón Loja, Obtenido de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/30020>
- Areche L., (2019), Evaluación de la evapotranspiración potencial etp., del cultivo de papa (*solanum tuberosum* L.), en lisímetro superficial en la provincia y distrito de acobamba huancavelica, Obtenido de: <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3846>
- Patiño D., (2018), Respuesta hidrológica ante los cambios de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Chinchiná, Obtenido de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68927>
- Campoverde M., (2019), Balance hídrico diario de la microcuenca hidrográfica del río Malacatos en la provincia de Loja, Obtenido de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/22525>
- Chávez S., (2015), Cálculo de la evapotranspiración mediante tres métodos y determinación de las necesidades de riego en los cultivos de pepino y pimiento en la finca "La María", Obtenido de: <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/1278>
- Jaramillo R., (2007), Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia, Obtenido de: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/232>.
- Ortiz R., Chile M., (2020), Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco, Obtenido de: <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1450>
- Madrid L., Sabino H., (2019), Estimación de precipitación superficial utilizando cinco métodos como base para la determinación del balance hídrico en la Cuenca media y alta del Mantaro, Obtenido de: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4809>
- Aguilar C., (2023), EVALUACION DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MEDIANTE ECUACIONES BASADAS EN TEMPERATURA CALIBRADAS BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA CUENCA ILAVE Obtenido de:

<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/20019>

Mendoza M, Bocco G, Bravo M., (2001), Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas, Obtenido de: <https://doi.org/10.14350/rig.59164>

Podest K, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology Amita Mehta, Goodard Space Flight Center, La Teledetección de la Humedad del Suelo y la Evapotranspiración, Obtenido de: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/202305/Day1_D2_Esp.pdf?utm_source

Velásquez S., (2021), EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS MODELOS CMIP6 PARA SIMULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PRECIPITACIÓN EN EL NORTE DE SURAMÉRICA, Obtenido de: <https://hdl.handle.net/10495/20034>

R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de FAO.

GEO LOJA, (2008), Perspectivas del Medio Ambiente Urbano - GEO Loja. Obtenido de: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9269/->
Perspectivas_del_Medio_Ambiente_Urbano_-_GEO_Loja-2008GEO_Loja_2008_1.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Jiménez E., (2019), "DINÁMICA Y MODELAMIENTO FUTURO DE CAMBIOS Y FRAGMENTACIÓN EN LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA HOYA DE LOJA EN EL PERIODO 2001 – 2016", Obtenido de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/21833>

Vinculación UTPL, (2023), Análisis del viento en Loja, periodo 2011 – 2023, Obtenido de: <https://vinculacion.utpl.edu.ec/analisis-del-viento-en-loja-periodo-2011-2023>

- Álvarez O, Montaña T, Maldonado J., (2014), La radiación solar global en la provincia de Loja, evaluación preliminar utilizando el método de Hottel, Obtenido de: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8475>
- Chamba E, Chunchu J, (2011), "ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA, LIGADA AL CAMBIO CLIMÁTICO, EN LA PROVINCIA DE LOJA", Obtenido de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/5347>
- Chacón V., (2008), Las condiciones naturales en el proceso de urbanización de la ciudad de Loja y su influencia en los asentamientos no planificados - Caso particular "Reinaldo Espinoza, Obtenido de: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/1083>
- Jaramillo D., (2024), Caudales de captaciones de agua disminuyen a consecuencia del estiaje, Obtenido de: https://www.loja.gob.ec/noticia/2024-10/caudales-de-captaciones-de-agua-disminuyen-consecuencia-del-estiaje?utm_source
- Sánchez J., (2015), Comportamiento de las variables climáticas en una gradiente altitudinal de la vertiente del pacífico durante los años 2011-2014, Obtenido de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21633>
- Murga-Orrillo, H., Coronado Jorge, M. F., Abanto-Rodríguez, C., & Lobo, F. D. A. (2021). Gradiente altitudinal y su influencia en las características edafoclimáticas de los bosques tropicales. *Madera Y Bosques*, 27(3), e2732271. Obtenido de: <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732271>
- Urdiales H, Célleri R., (2018), Pronóstico de la ocurrencia de precipitación diaria en un gradiente altitudinal en el Sur del Ecuador, mediante un generador climático, Obtenido de: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n3.209>
- Montenegro P., (2015), ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y NETA A PARTIR DE LA TEMPERATURA EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO Y COMPARACIÓN CON SENSORES A NIVEL DEL SUELO, Obtenido de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21734>

Apéndice

Apéndice A. Tablas y resultados

Tabla 10.*Datos recopilados de la estación meteorológica UTPL.*

Fecha	Temperatura (°C)	Temperatura máx abs (°C)	Temperatura mín abs (°C)	Humedad Relativa (%)	Humedad Relativa mín (%)	Humedad Relativa máx (%)	Velocidad del Viento (m/s)	Presión atmosférica (hPa)	Presión atmosférica (kPa)	Precipitación (mm)	Radiación Solar (W/2)	Radiación Solar (Mj m2 día)
1/1/2022	16.67	20.60	13.60	77.91	61.10	90.10	1.46	1022.73	102.27	0.00	124.16	10.73
2/1/2022	16.33	20.10	14.00	84.84	64.40	95.70	1.15	1023.72	102.37	8.30	92.70	8.01
3/1/2022	16.11	20.30	13.10	80.85	57.30	94.10	1.47	1024.11	102.41	0.90	145.67	12.59
4/1/2022	15.76	21.30	11.20	77.13	56.80	91.80	1.98	1022.79	102.28	0.00	242.22	20.93
5/1/2022	16.60	22.20	13.30	77.32	50.40	89.30	1.83	1021.50	102.15	0.00	214.23	18.51
6/1/2022	16.20	19.60	14.20	77.54	56.50	94.10	2.10	1022.20	102.22	4.80	163.78	14.15
7/1/2022	16.77	20.90	12.60	67.62	47.20	82.90	2.94	1023.51	102.35	0.00	231.74	20.02
8/1/2022	15.49	22.70	10.20	75.77	40.80	91.40	2.22	1024.70	102.47	0.00	277.76	24.00
9/1/2022	15.94	20.30	12.60	77.82	55.90	89.20	1.97	1024.85	102.48	0.00	181.39	15.67
10/1/2022	15.14	19.20	12.10	80.17	58.50	92.00	1.69	1024.48	102.45	4.90	167.83	14.50
11/1/2022	16.26	21.40	12.00	76.77	49.70	92.10	1.94	1023.87	102.39	0.00	272.80	23.57
12/1/2022	15.37	21.50	12.00	77.92	47.30	90.20	1.97	1024.02	102.40	0.00	156.83	13.55
13/1/2022	16.31	22.20	12.30	76.78	48.00	94.30	2.00	1023.69	102.37	7.30	246.59	21.31
14/1/2022	16.23	20.50	12.90	74.20	50.90	94.90	3.01	1023.90	102.39	0.30	205.81	17.78
15/1/2022	14.68	16.90	13.10	79.63	70.50	89.10	2.62	1024.80	102.48	1.20	73.47	6.35
16/1/2022	14.00	16.30	11.10	79.26	70.60	92.80	3.11	1024.69	102.47	3.50	63.72	5.51
17/1/2022	14.94	20.60	9.80	76.93	53.60	97.30	2.22	1023.76	102.38	0.30	182.24	15.75
18/1/2022	15.66	21.20	10.10	74.42	55.00	92.90	2.49	1023.26	102.33	0.30	177.67	15.35
19/1/2022	15.77	17.40	14.40	77.84	70.80	86.00	3.71	1023.21	102.32	2.80	68.96	5.96
20/1/2022	14.60	15.90	13.80	83.72	75.20	90.80	4.64	1022.78	102.28	3.60	22.76	1.97
21/1/2022	15.09	17.60	13.10	84.84	74.50	95.10	1.68	1022.97	102.30	0.00	116.56	10.07
22/1/2022	16.21	21.20	12.40	80.38	58.80	97.00	1.69	1023.02	102.30	0.30	184.88	15.97
23/1/2022	16.74	21.20	13.40	74.91	53.10	92.10	1.99	1022.35	102.24	0.00	174.51	15.08
24/1/2022	16.67	20.80	13.80	77.51	57.70	93.00	2.18	1021.80	102.18	0.30	177.85	15.37
25/1/2022	16.02	19.60	14.20	84.71	63.80	96.00	1.76	1022.25	102.23	10.90	112.29	9.70
26/1/2022	15.05	18.10	13.70	89.95	70.90	96.20	0.72	1023.45	102.34	10.20	83.20	7.19
27/1/2022	15.58	21.00	13.60	86.18	59.80	95.00	1.25	1023.25	102.32	7.40	126.96	10.97
28/1/2022	15.13	20.50	13.20	86.63	61.60	96.20	2.30	1023.26	102.33	12.20	177.15	15.31
29/1/2022	14.67	17.00	13.20	86.54	77.80	93.20	2.59	1023.41	102.34	3.60	156.72	13.54
30/1/2022	14.29	16.10	12.90	87.54	80.10	95.80	2.17	1023.70	102.37	3.50	70.81	6.12
31/1/2022	15.31	19.90	12.70	82.83	61.90	94.70	2.06	1022.93	102.29	0.00	205.02	17.71

Tabla 11.
Resultado de Cálculo del Déficit de presión de vapor (es – ea)

Constante Psicometrica	e° (Tmax)	e° (Tmax)	es	Δ	ea	es - ea
0.068	2.427	1.558	1.992	0.1205	1.443	0.549
0.068	2.353	1.599	1.976	0.1183	1.523	0.453
0.068	2.382	1.508	1.945	0.1168	1.392	0.553
0.068	2.533	1.330	1.932	0.1146	1.330	0.602
0.068	2.676	1.527	2.102	0.1201	1.356	0.745
0.068	2.281	1.619	1.950	0.1174	1.406	0.544
0.068	2.472	1.459	1.965	0.1212	1.188	0.777
0.068	2.759	1.245	2.002	0.1128	1.132	0.870
0.068	2.382	1.459	1.921	0.1157	1.317	0.604
0.068	2.225	1.412	1.818	0.1107	1.300	0.518
0.068	2.549	1.403	1.976	0.1179	1.279	0.696
0.068	2.564	1.403	1.983	0.1121	1.239	0.744
0.068	2.676	1.431	2.053	0.1182	1.317	0.737
0.068	2.412	1.488	1.950	0.1176	1.320	0.630
0.068	1.925	1.508	1.717	0.1078	1.350	0.366
0.068	1.853	1.321	1.587	0.1037	1.267	0.320
0.068	2.427	1.212	1.819	0.1094	1.240	0.579
0.068	2.518	1.236	1.877	0.1139	1.267	0.610
0.068	1.987	1.641	1.814	0.1146	1.409	0.405
0.068	1.807	1.578	1.692	0.1073	1.396	0.297
0.068	2.013	1.508	1.760	0.1103	1.467	0.294
0.068	2.518	1.440	1.979	0.1175	1.439	0.540
0.068	2.518	1.537	2.028	0.1210	1.376	0.651
0.068	2.457	1.578	2.017	0.1205	1.442	0.575
0.068	2.281	1.619	1.950	0.1163	1.505	0.445
0.068	2.077	1.568	1.822	0.1101	1.490	0.332
0.068	2.487	1.558	2.022	0.1134	1.483	0.539
0.068	2.412	1.517	1.965	0.1106	1.473	0.492
0.068	1.938	1.517	1.728	0.1077	1.461	0.267
0.068	1.830	1.488	1.659	0.1055	1.446	0.213
0.068	2.324	1.469	1.896	0.1118	1.415	0.482

Tabla 12.
Resultado de Cálculo de Radiación extraterrestre (Ra)

J	dr	d	ws	Ra	N
1	1.033	-0.401	1.601	37.341	12.23
2	1.033	-0.400	1.600	37.357	12.23
3	1.033	-0.398	1.600	37.373	12.23
4	1.033	-0.396	1.600	37.390	12.22
5	1.033	-0.395	1.600	37.408	12.22
6	1.033	-0.393	1.600	37.427	12.22
7	1.033	-0.391	1.600	37.446	12.22
8	1.033	-0.388	1.600	37.467	12.22
9	1.033	-0.386	1.599	37.488	12.22
10	1.033	-0.384	1.599	37.509	12.22
11	1.032	-0.381	1.599	37.531	12.22
12	1.032	-0.379	1.599	37.554	12.21
13	1.032	-0.376	1.599	37.578	12.21
14	1.032	-0.373	1.598	37.601	12.21
15	1.032	-0.370	1.598	37.626	12.21
16	1.032	-0.367	1.598	37.650	12.21
17	1.032	-0.364	1.598	37.675	12.20
18	1.031	-0.361	1.597	37.701	12.20
19	1.031	-0.357	1.597	37.726	12.20
20	1.031	-0.354	1.597	37.752	12.20
21	1.031	-0.350	1.596	37.778	12.20
22	1.031	-0.347	1.596	37.804	12.19
23	1.030	-0.343	1.596	37.830	12.19
24	1.030	-0.339	1.596	37.856	12.19
25	1.030	-0.335	1.595	37.883	12.19
26	1.030	-0.331	1.595	37.909	12.18
27	1.029	-0.327	1.595	37.934	12.18
28	1.029	-0.322	1.594	37.960	12.18
29	1.029	-0.318	1.594	37.985	12.18
30	1.029	-0.314	1.594	38.010	12.17
31	1.028	-0.309	1.593	38.035	12.17

Tabla 13.
Resultado de Cálculo de Radiación Neta.

Rso	Rns	Rnl	Rn
29.651	8.260	0.828	7.432
29.663	6.167	0.084	6.083
29.676	9.691	1.348	8.343
29.690	16.114	3.701	12.413
29.704	14.252	3.056	11.196
29.719	10.896	1.769	9.127
29.735	15.417	3.633	11.784
29.751	18.479	4.884	13.595
29.767	12.067	2.234	9.833
29.785	11.166	1.892	9.274
29.802	18.149	4.519	13.630
29.820	10.434	1.683	8.751
29.839	16.405	3.847	12.559
29.858	13.692	2.818	10.874
29.877	4.888	0.000	4.888
29.897	4.239	0.000	4.239
29.916	12.124	2.255	9.869
29.937	11.820	2.135	9.685
29.957	4.588	0.000	4.588
29.977	1.514	0.000	1.514
29.998	7.755	0.598	7.157
30.019	12.299	2.200	10.099
30.040	11.610	2.012	9.598
30.060	11.832	2.042	9.791
30.081	7.471	0.499	6.972
30.102	5.535	0.000	5.535
30.122	8.446	0.838	7.608
30.143	11.785	1.981	9.804
30.163	10.426	1.481	8.946
30.183	4.711	0.000	4.711
30.202	13.640	2.641	10.999

Tabla 14.
Resultado de Evapotranspiración.

Evapotranspiración
2.407
1.897
2.603
3.646
3.632
2.902
4.141
4.459
3.123
2.777
4.079
3.152
3.945
3.617
1.773
1.607
3.120
3.225
1.985
1.271
1.966
3.016
3.182
3.123
2.207
1.536
2.354
2.944
2.292
1.347
3.131