



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE PRODUCTOS  
SATELITALES EN LA ZONA SUR DEL ECUADOR, 1990-2013

CARDENAS TORRES MARCO ANDRES  
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA  
2021



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE  
PRODUCTOS SATELITALES EN LA ZONA SUR DEL ECUADOR,  
1990-2013

CARDENAS TORRES MARCO ANDRES  
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA  
2021



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

TRABAJO TITULACIÓN  
TRABAJO EXPERIMENTAL

EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES  
EN LA ZONA SUR DEL ECUADOR, 1990-2013

CARDENAS TORRES MARCO ANDRES  
INGENIERO AGRÓNOMO

LUNA ROMERO ANGEL EDUARDO

MACHALA, 26 DE ABRIL DE 2021

MACHALA  
2021

# EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES EN LA ZONA SUR DEL ECUADOR, 1990-2013

## INFORME DE ORIGINALIDAD

2%

EN

INDICE DE SIMILITUD

%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

- 1 M.N. Omar, A.T. Taha, A.A. Samak, M.H. Keshek, E.M. Gomaa, S.F. Elsis. "Simulation and validation model of cooling greenhouse by solar energy (P V) integrated with painting its cover and its effect on the cucumber production", *Renewable Energy*, 2021  
Publicación 1%
- 2 Stojče Dimov Ilčev. "Chapter 5 Satellite Meteorological Parameters", Springer Science and Business Media LLC, 2018  
Publicación 1%
- 3 Xiaolin Yang, Wangsheng Gao, Quanhong Shi, Fu Chen, Qingquan Chu. "Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region", *Agricultural Water Management*, 2013  
Publicación 1%
- 4 András Jung, Péter Kardeván, László Tókei. "Detection of urban effect on vegetation in a less built-up Hungarian city by hyperspectral <1%

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

El que suscribe, CARDENAS TORRES MARCO ANDRES, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES EN LA ZONA SUR DEL ECUADOR, 1990-2013, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

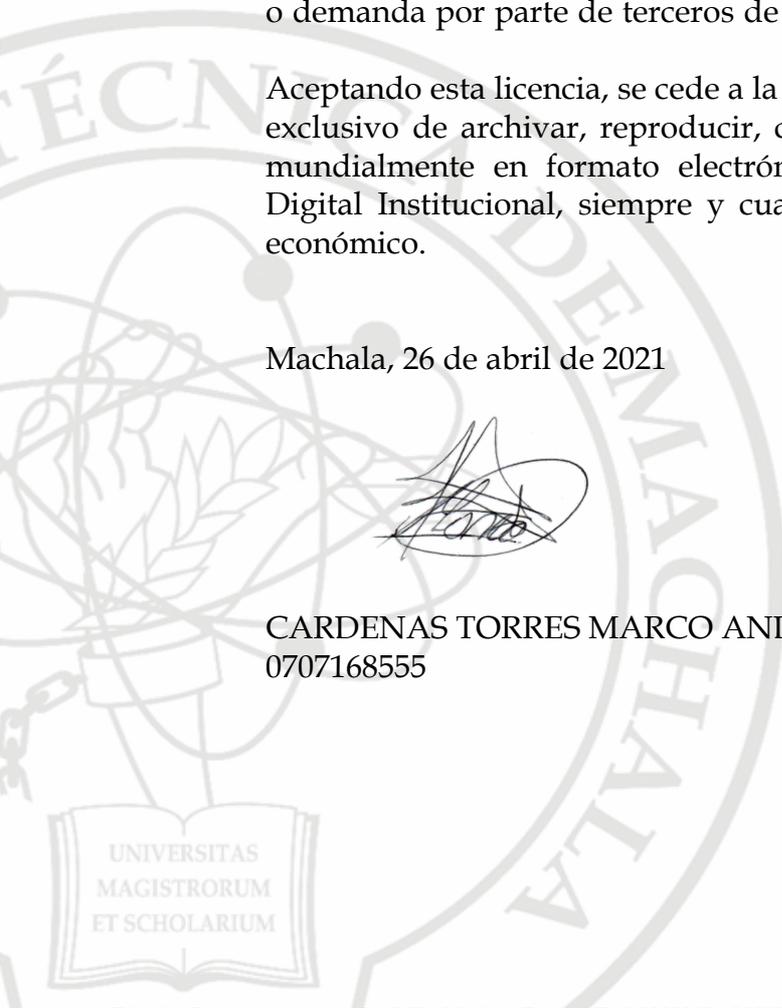
El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 26 de abril de 2021



CARDENAS TORRES MARCO ANDRES  
0707168555



UNIVERSITAS  
MAGISTRORUM  
ET SCHOLARIUM

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación se lo dedico en especial a mis padres, hermanos y abuelita, por brindarme sus consejos y su apoyo incondicional.

A mi familia en general que siempre estuvo allí aconsejándome, a los amigos que encontré en la Universidad que siempre me brindaron de su ayuda cuando más necesité, que compartí de gratos momentos en el transcurso de los años en la vida académica y fuera de la Universidad.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres: Yudy Torres y Jaime Garzón, doy gracias a su esfuerzo y sacrificio el cual me ha permitido alcanzar una nueva meta académica. A mi abuelita Julia Rivera que siempre estuvo pendiente de mí, me supo aconsejar y motivar durante todo mi periodo académico para que nunca me rinda. A mis tíos y familia en general, y amigos que siempre me dieron consejos.

Al ing Ángel Luna, tutor de mi trabajo de titulación que siempre estuvo ayudándome, dando su guía y apoyo durante todo el desarrollo del trabajo de investigación, y por compartir de sus enseñanzas y conocimiento.

# **EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES EN LA ZONA SUR DEL ECUADOR, 1990-2013**

**Autor**

Marco Andrés Cárdenas Torres

**Tutor**

Ing. Agron. Luna Romero Ángel Eduardo, Mgs.

## **RESUMEN**

En el transcurso de los años, el uso indiscriminado del agua dulce ha disminuido las reservas naturales del planeta y la agricultura convencional es partícipe de ese abuso, para poder controlar en cierta parte este hecho, se utiliza los cálculos de las necesidades hídricas y con ello el método más popular es el cálculo de evapotranspiración (ET<sub>o</sub>) que permite controlar el riego y conservar el agua para la agricultura. El método de Hargreaves permite estimar la ET<sub>o</sub>, utiliza la temperatura del aire y la radiación extraterrestre. En general la ecuación de Hargreaves se recomienda para cálculos semanales o incluso que abarquen periodos mucho más largos, aunque se han dado casos en las que se encuentra estimaciones diarias de ET<sub>o</sub> muy precisas. Las imágenes satelitales se obtienen a través de numerosos sensores remotos, existe un sensor que se utiliza con mucha frecuencia que ese el de MODIS, permite estimar a partir de diversos insumos tales como: el tipo de cobertura del suelo, índice de área foliar, albedo, entre otros. La investigación tiene como objetivo general: evaluar la evapotranspiración de productos satelitales en la zona sur del Ecuador, periodo 1990-2013, usando como referencia Hargreaves (HG) para la estimación de la correlación y eficiencia de la información de sensoramiento remoto. La investigación abarco el estudio de 15 estaciones meteorológicas para la determinación de ET<sub>o</sub> por medio de Hargreaves y MODIS, las mismas que se encuentran en la zona sur del Ecuador. Geográficamente se encuentra localizada entre los paralelos de 3° y 5° de latitud sur y los meridianos de 78° y 81° de longitud oeste. La zona sur del Ecuador, comprende el Archipiélago de Jambelí, la zona costera de la provincia de El Oro, pasa por la Sierra pasando por la provincia de Loja y tiene parte amazónico perteneciente a la provincia de Zamora Chinchipe. Se tomo información de los anuarios de la página oficial del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), los datos a escala mensual se digitalizaron en la serie

temporal del año de 1990 a 2013, donde se consideraron variables de temperatura máxima y mínima, de la cual se derivó la temperatura promedio que parte como variable necesaria para realizar el cálculo de evapotranspiración. La extracción de datos se la realizó mediante MODISTools, se descargó NDVI y EVI a 500m<sup>2</sup> de resolución y con una buena fiabilidad de píxeles para permitir el control de calidad antes del análisis. Para el cálculo de ETo se utilizó la ecuación de Hargreaves (HG), método que se basa en el uso temperatura y de la Radiación solar. El análisis exploratorio de los elementos climáticos de las estaciones meteorológicas se lo realizó mediante un estudio donde se analizaron 15 estaciones de las cuales 4 se encuentran en la provincia de El Oro, 10 en la provincia de Loja y la restante en la provincia de Zamora Chinchipe, se logró mediante la descripción de gráficos generados en ArcMap donde se denota una línea divisora la cual corresponde a la zona andina del Ecuador, el cual está por arriba de los 1000 msnm donde el 62.5% de las estaciones están distribuidas en este territorio. Se estimó la evapotranspiración potencial mediante Hargreaves de forma anual donde se agruparon los gráficos de dispersión por provincias para un mejor entendimiento del comportamiento de los valores de ETo en el transcurso de los años, donde se presentaron notables fluctuaciones y vacíos de valores. Se mostró la correlación existente entre la ETo de la ecuación de Hargreaves y MODIS, se presenta un coeficiente de correlación de Pearson positivo débil con un valor de 0.31, el p-valor del análisis de varianza es de 0.001; en consecuencia, hay una relación significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%. Además, que el coeficiente de determinación o bondad de ajuste solo explica el 10 de la variabilidad entre HG y MODIS, dando a entender una relación débil entre las variables. El valor de RMSE indica que la desviación estándar de la ETo es de 1.01 mm/día, también se obtiene un Bias o sesgo subestimado de -11.52.

**Palabras claves:** Evapotranspiración, Hargreaves, MODIS, temperatura, Ecuador.

# **EVALUATION OF EVAPOTRANSPIRATION FROM SATELLITE PRODUCTS IN THE SOUTHERN ZONE OF ECUADOR, 1990-2013**

**Autor**

Marco Andrés Cárdenas Torres

**Tutor**

Ing. Agron. Luna Romero Ángel Eduardo, Mgs.

## **ABSTRAC**

Over the years, the indiscriminate use of fresh water has diminished the planet's natural reserves and conventional agriculture is a participant in this abuse. In order to control this fact to some extent, calculations of water needs are used and the most popular method is the calculation of evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), which allows controlling irrigation and conserving water for agriculture. The Hargreaves method allows estimating ET<sub>o</sub>, using air temperature and extraterrestrial radiation. In general, the Hargreaves equation is recommended for weekly calculations or even for much longer periods, although there have been cases in which very accurate daily ET<sub>o</sub> estimates have been found. Satellite images are obtained through numerous remote sensors, there is a sensor that is used very frequently which is MODIS, it allows estimating from various inputs such as: the type of soil cover, leaf area index, albedo, among others. The general objective of the research is to evaluate the evapotranspiration of satellite products in the southern zone of Ecuador, period 1990-2013, using Hargreaves (HG) as a reference for the estimation of correlation and efficiency of remote sensing information. The research included the study of 15 meteorological stations for ET<sub>o</sub> determination by means of Hargreaves and MODIS, which are located in the southern part of Ecuador. Geographically, it is located between the parallels of 3° and 5° south latitude and the meridians of 78° and 81° west longitude. The southern zone of Ecuador includes the Jambelí Archipelago, the coastal zone of the province of El Oro, the highlands passing through the province of Loja and the Amazonian part belonging to the province of Zamora Chinchipe. Information was taken from the yearbooks of the official website of INAMHI (National Institute of Meteorology and Hydrology), the monthly scale data were digitized in the time series from 1990 to 2013, where variables of maximum and minimum temperature were considered, from which the average temperature was derived as a necessary variable for the calculation of

evapotranspiration. Data extraction was performed using MODISTools, NDVI and EVI were downloaded at 500m<sup>2</sup> resolution and with a good pixel reliability to allow quality control before analysis. The Hargreaves (HG) equation was used to calculate ETo, a method based on the use of temperature and solar radiation. The exploratory analysis of the climatic elements of the meteorological stations was carried out through a study where 15 stations were analyzed, 4 of which are located in the province of El Oro, 10 in the province of Loja and the remaining one in the province of Zamora Chinchipe. This was achieved through the description of graphics generated in ArcMap where a dividing line is denoted which corresponds to the Andean zone of Ecuador, which is above 1000 meters above sea level where 62.5% of the stations are distributed in this territory. Potential evapotranspiration was estimated by Hargreaves on an annual basis where scatter plots were grouped by provinces for a better understanding of the behavior of ETo values over the years, where there were significant fluctuations and gaps in values. The correlation between ETo from the Hargreaves equation and MODIS showed a weak positive Pearson correlation coefficient with a value of 0.31, the p-value of the analysis of variance is 0.001; consequently, there is a significant relationship between the variables with a confidence level of 95%. Furthermore, the coefficient of determination or goodness of fit only explains 10 of the variability between HG and MODIS, implying a weak relationship between the variables. The RMSE value indicates that the standard deviation of ETo is 1.01 mm/day, also a Bias or underestimated bias of -11.52 is obtained.

**Key words:** Evapotranspiration, Hargreaves, MODIS, temperature, Ecuador.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>13</b>
<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Conceptualización de evapotranspiración .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.1. Evapotranspiración Real (ETR).....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2. Evapotranspiración Potencial (ETP) .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Factores que influyen en la Evapotranspiración.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1. Factor climático.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2. Factores de cultivo .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.3. Manejo y condiciones ambientales .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Medición de Evapotranspiración.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.1. Método del Tanque evaporímetro.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.2. Lisímetro.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4. Estimación de Evapotranspiración.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.1. Métodos empíricos .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.2. Método de Hargreaves (HG).....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.3. Productos de satélites.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5. Percepción Remota.....</b>	<b>20</b>
<b>2.5.1. El espectro electromagnético .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5.2. Reflectancia espectral .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5.3. Resolución.....</b>	<b>22</b>
<b>2.6. MODIS .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6.1. MOD16.....</b>	<b>24</b>
<b>2.6.2. MOD16A2 V6.....</b>	<b>25</b>

2.6.3.	MODISTools.....	26
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
3.1.	Área de estudio .....	27
3.2.	Los datos meteorológicos.....	28
3.3.	La adquisición de datos de Modis con MODISTools.....	29
3.3.1.	Caracterización de la ETo MODIS16A2 .....	29
3.4.	Estadística descriptiva .....	29
3.4.1.	Análisis exploratorio de datos.....	30
3.4.2.	Climatología de las variables climáticas .....	30
3.5.	Cálculo de ETo con Hargreaves (HG).....	31
3.6.	Evaluación estadística de MODIS .....	32
3.6.1.	Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) .....	32
3.6.2.	Error Cuadrático medio (RMSE) .....	33
3.6.3.	Sesgo (BIAS).....	34
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>35</b>
4.1.	Análisis exploratorio de los elementos climáticos de las estaciones meteorológicas.....	35
4.2.	Cálculo de evapotranspiración con la ecuación de Hargreaves (HG).....	39
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>49</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>54</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Representación del tanque evaporímetro tanto para el tipo A como para el tipo B	17
<b>Figura 2.</b>	Características del lisímetro empleado en campo.....	18
<b>Figura 3.</b>	Componentes de un sistema de Teledetección .....	20
<b>Figura 4.</b>	Energía electromagnética emitida por diferentes longitudes de onda .....	21
<b>Figura 5.</b>	Diagrama de flujo del algoritmo MOD16 ET mejorado.....	24
<b>Figura 6.</b>	Comparación de MOD16A2 para 8 días de 2008281 entre la colección NTSG5 y la colección operativa de la NASA6 .....	26
<b>Figura 7.</b>	a) Ecuador en Sudamérica, b) Zona sur del Ecuador, c) ubicación de las estaciones meteorológicas estudiadas de la zona sur del Ecuador.....	27
<b>Figura 8.</b>	Distribución de temperatura máxima de la serie temporal de 1990-2013 de las estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador. La región andina sobre los 1000 m.s.n.m. está delimitada por la línea de color azul .....	35
<b>Figura 9.</b>	Temperaturas Máximas a escala mensual de la estación M0292 .....	36
<b>Figura 10.</b>	Distribución de temperatura mínima de la serie temporal de 1990-2013 de las estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador. La región andina sobre los 1000 m.s.n.m. está delimitada por la línea de color azul .....	37
<b>Figura 11.</b>	Temperaturas Mínimas a escala mensual de la estación M0142 .....	37
<b>Figura 12.</b>	Distribución de temperatura media de la serie temporal de 1990-2013 de las estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador. La región andina sobre los 1000 m.s.n.m. está delimitada por la línea de color azul .....	38
<b>Figura 13.</b>	Temperaturas Mínimas a escala mensual de la estación M0180 .....	39
<b>Figura 14.</b>	ETo de 4 estaciones meteorológicas en la provincia de El Oro en la serie temporal de 1990-2013.....	40
<b>Figura 15.</b>	ETo de 10 estaciones meteorológicas en la provincia de Loja en la serie temporal de 1990-2013.....	41

<b>Figura 16.</b>	ETo de una estación meteorológica en la provincia de Zamora Chinchipe de la serie temporal de 1990-2013.....	41
<b>Figura 17.</b>	Diagrama de dispersión entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, para la serie temporal 2001 a 2013. ....	43
<b>Figura 18.</b>	Correlación entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, para la serie temporal 2001 a 2013. Los triángulos color negro representan la correlación positiva significativa, los triángulos color morado muestran la correlación no significativa y los triángulos invertidos color negro y morado representan la correlación negativa. La región andina sobre los 1000 m.s.n.m. está delimitada por la línea de color azul .....	44
<b>Figura 19.</b>	Diagramas de dispersión entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, en a) 2001 al 2013 (M0033); b) 2001 al 2013 (M0143); c) 2001 al 2013 (M0147); d) 2001 al 2013 (M0190). Donde el * indica la correlación significativa al 5%. ....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Información detallada sobre conjuntos de datos científicos en MOD16A2. 25
<b>Tabla 2.</b>	Estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador ..... 28
<b>Tabla 3.</b>	Estadísticos de las estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador... 44

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b>	Tabla de Hargreaves para calculo ra.....	54
<b>Anexo 2.</b>	Figuras de caja y sesgo de temperatura máxima, mínima y promedio .....	55
<b>Anexo 3.</b>	Diagramas de dispersión entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, para la serie temporal 2001 a 2013 del resto de estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador. ....	61

## INTRODUCCIÓN

El mayor consumidor de agua a nivel mundial es la agricultura (Gontia & Tiwari, 2010). El mal uso del agua en los controles de riego son contraproducentes por el hecho que con el pasar de los años el agua dulce va disminuyendo, para poder controlar en cierta medida este hecho, se emplea los cálculos de necesidades hídricas, el método común es el cálculo de evapotranspiración (ET<sub>o</sub>) que permite controlar el riego y conservar el agua para la agricultura (Allen et al., 2007).

Se sabe que, a parte de la escorrentía, la precipitación y la evapotranspiración cumplen un rol primordial en el ciclo hidrológico, por ejemplo: como parámetro para caracterizar las zonas áridas y semiáridas, a través del índice de aridez, también se lo utiliza como referencia en el control de los recursos hídricos que se emplean en diversas zonas con características adversas con climas áridos o húmedos (Gao et al., 2008).

Para los distintos escenarios climatológicos, hidrológicos, agrícolas o forestales el cálculo de la evapotranspiración es un factor de gran relevancia, en su mayoría las estimaciones de este factor se realizan por medio de métodos empíricos (fórmulas) con la finalidad de tener valores referenciales. También existen nuevas tecnologías, como las imágenes satelitales de alta resolución espacial, que estiman la evapotranspiración, pero por el hecho de tener altos costos no es factible su adquisición; sin embargo, se puede optar por imágenes satelitales de una moderada resolución, tales como: MODIS, Landsat, Sentinel, entre otros (Melesse et al., 2007).

Existen dos procesos de pérdida de agua desde la superficie del suelo hacia la atmósfera, los cuales son la evaporación y transpiración. Donde la evaporación se entiende como la transformación del agua de estado líquido a vapor de agua y desaparece de las fuentes de vegetación húmeda, cuerpos de agua temporales, etc. La transpiración vaporiza el agua que se encuentra en las plantas la cual sale a través de los estomas de las hojas. Los niveles de transpiración de las plantas varían según el tipo de cultivo y hasta del desarrollo que atraviesa en sus etapas morfológicas, factores que deben ser tomados en cuenta para estimar la transpiración (Allen et al., 1998).

La ecuación de Hargreaves permite estimar la ETo, basándose en datos que se encuentran con mayor facilidad como son la temperatura del aire y la radiación extraterrestre (George & Zohrab, 1985). Con los datos de temperatura máxima y mínima se obtiene los valores de temperatura promedio, estos datos se registran desde las estaciones meteorológicas (Allen et al., 1998). En general la ecuación de Hargreaves se recomienda para cálculos semanales o incluso que abarquen periodos mucho más largos, aunque se han dado casos en las que se encuentra estimaciones diarias de ETo muy precisas (Hargreaves & Allen, 2003).

Con el pasar de los años, se ha intensificado el uso de información de sensoramiento remoto que presenta una fiable estimación y alternativa para estimar diferentes variables tanto de la superficie terrestre como de la atmósfera, en este último se han mejorado los modelos de algoritmos para estimar la evapotranspiración asegurando información continua en diferentes escalas espacio-temporales (Wang & Dickinson, 2012).

Las imágenes se obtienen a través de numerosos sensores remotos, como es el caso de Landsat de resolución espacial de 30 m ETM (Enhanced Thematic Mapper), MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) y AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) (Wang & Dickinson, 2012). Entre toda esta gama de sensores, existe uno que se emplea con más frecuencia que es MODIS, es un sensor que permite estimar a partir de diversos insumos tales como: el tipo de cobertura del suelo, índice de área foliar, albedo, entre otros (Yang et al., 2015).

En el presente trabajo de investigación se aborda la utilidad de la estimación de la evapotranspiración mediante sensoramiento remoto (imágenes satelitales), los cuales se han vuelto una útil herramienta para estimar el uso del agua de los cultivos en la agricultura. Sin embargo, es necesario evaluar los datos de sensoramiento remoto con valores referenciales de ETo a partir de datos registrados en las estaciones meteorológicas; por tanto, Hargreaves es un método confiable al proporcionar estimaciones aceptables con los datos de entrada limitados (Lavado et al., 2015) y se lo utiliza como un buen indicador de Eto ya que ha sido documentado por diferentes autores (por ejemplo Allen et al., 1998; Gavilán et al., 2006; Zornitsa Popova et al., 2006; entre

otros), que permitió la determinación de la eficiencia de la Evapotranspiración de MODIS en la zona sur del Ecuador, con ello se plantearon los siguientes objetivos:

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la evapotranspiración de productos satelitales en la zona sur del Ecuador, periodo 1990-2013, usando como referencia Hargreaves (HG) para la estimación de la correlación y eficiencia de la información de sensoramiento remoto.

### **Objetivos específicos**

- Realizar la estadística descriptiva de los datos meteorológicos con el uso de gráficos y cuadros para la caracterización de las variables.
- Estimar la evapotranspiración con la ecuación de Hargreaves (HG) para que sirvan como valores de referencia
- Evaluar la correlación y eficiencia entre el producto satelital derivado del sensor MODIS y los valores de Hargreaves (HG) para la zona sur del Ecuador, periodo 1990-2013

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Conceptualización de evapotranspiración**

La evapotranspiración es considerada como uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y se lo define como la sumatoria entre la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Como referencia mundial se tiene que aproximadamente más del 80% de las precipitaciones es agua que llega desde la evapotranspiración (reciclaje de la lluvia) que representa un gran aporte para la agricultura, hidrología, climatología, etc. (Fisher et al., 2017).

Según la (Allen et al., 1998) en su documento: “Evapotranspiración de cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”, se menciona que las unidades de evapotranspiración regularmente se expresan en milímetros (mm) con respecto a unidades de tiempo que puede ser: hora, mes, año o incluso el periodo completo del cultivo. Se llega a emplear estas unidades para reflejar el agua que se perdió sobre la superficie de algún cultivo en unidades de altura de agua. Por ejemplo, en una hectárea existe una superficie de 10000 m<sup>2</sup> y 1 mm es igual a 0,001 m, entonces una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m<sup>3</sup> de agua por hectárea.

#### **2.1.1. Evapotranspiración Real (ETR)**

La evapotranspiración real (ETR) se produce cuando la humedad del suelo es inferior a la capacidad de campo (CC) y seguirá disminuyendo a medida que el estrés hídrico aumente, por ello se refiere a la cantidad de agua que podría evapotranspirarse dependiendo de las disponibilidades de agua, entonces la evapotranspiración que se llega a reflejar es la situación real en la que se encuentra la zona del cultivo (Marini et al., 2017). Se determina la evapotranspiración real de un cultivo para determinar la ETo en ambientes controlados con la utilización de un método empírico que brinde confiabilidad (Baille, 1999).

### **2.1.2. Evapotranspiración Potencial (ETP)**

La evapotranspiración potencial (ETP) se produce cuando se evapora una gran cantidad de agua en un clima dado con una cobertura vegetal en equilibrio (agua-vegetación-suelo) bien dotada de agua en un estado óptimo, entonces la evapotranspiración es el proceso opuesto de las precipitaciones, y es de suma importancia e interés para la planificación y desarrollo de labores agrícolas al conocer este fenómeno y el punto en el que satisfacen las necesidades de agua en un área determinado (Marini et al., 2017).

## **2.2. Factores que influyen en la Evapotranspiración**

Según (Allen et al., 1998), existen diversos factores que afectan la evapotranspiración entre los principales resaltan el factor climatológico, las propias características del cultivo y el manejo y condiciones ambientales, los mismos que se detallan a continuación:

### **2.2.1. Factor climático**

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar.

### **2.2.2. Factores de cultivo**

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET<sub>o</sub> en diversos tipos de cultivos, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

### **2.2.3. Manejo y condiciones ambientales**

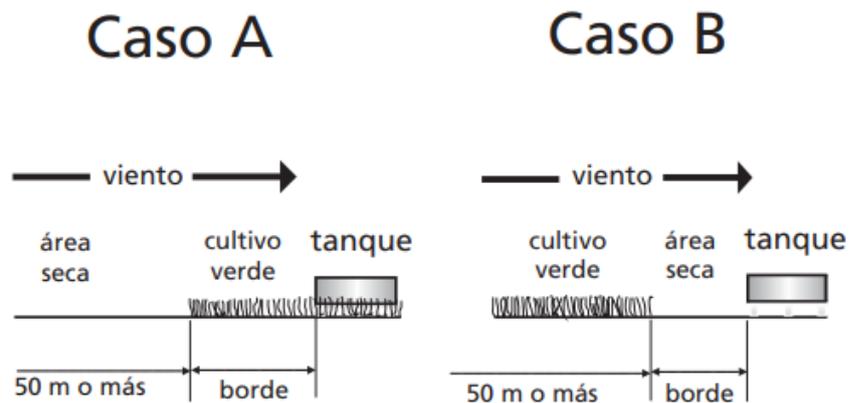
Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ETo son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ETo está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo.

### **2.3. Medición de Evapotranspiración**

Contemporáneamente es complicado la estimación directa de evapotranspiración de extensiones representativas. No obstante, se han desarrollado métodos empíricos o indirectos que reflejan datos aceptables. Para tomar la medida directa en embalses, parcelas de cultivos o en cuencas pequeñas se puede utilizar el método del tanque evaporímetro y el lisímetro (Allen et al., 1998).

#### **2.3.1. Método del Tanque evaporímetro.**

Este es uno de los principales métodos que se emplea en la estimación de evapotranspiración por ser una técnica económica y simple (Jumah, 1995), que por lo general se emplea el tanque tipo A (**Figura 1**). La medición de agua desde un tanque evaporímetro es correlacional con la evapotranspiración (Allen et al., 1998), por ende son de gran importancia en la mayoría de las estaciones meteorológicas para usos con fines agrícolas. Puede ser expresada con la siguiente ecuación (González & Hernández, 2000): En el método del tanque evaporímetro, el coeficiente  $K_p$  es un valor de corrección que integra los factores como el viento, humedad relativa y distancia del cultivo al tanque; que están inmersos en la evapotranspiración, dado que la evaporación registrada del tanque es un valor inanimado y no refleja las características de almacenamiento de calor de un cultivo (González & Hernández, 2000).



**Figura 1.** Representación del tanque evaporímetro tanto para el tipo A como para el tipo B

**Fuente:** (Allen et al., 1998)

$$E_{to} = K_p * E_p$$

**Donde:**

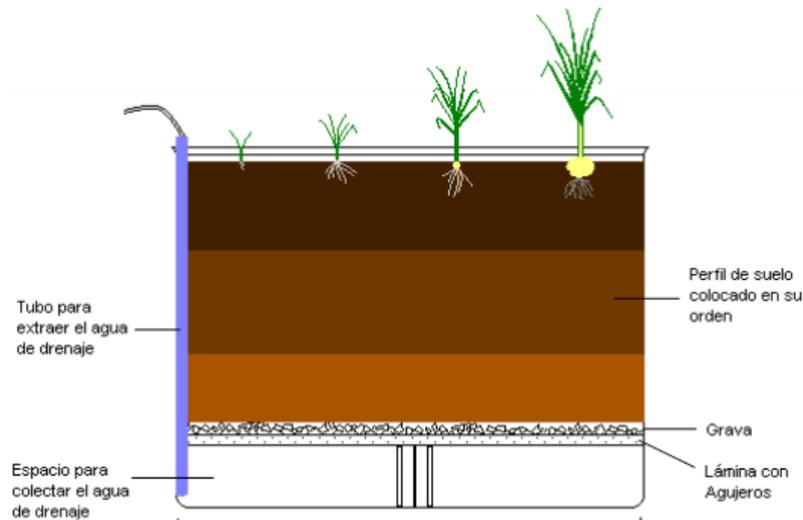
**$E_p$**  = Evaporación del tanque evaporímetro ( $\text{mm día}^{-1}$ )

**$K_p$**  = Coeficiente del tanque evaporímetro (adimensional)

**$E_{To}$**  = Evaporación del cultivo de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ )

### 2.3.2. Lisímetro

El lisímetro es un instrumento que se utiliza para medir el consumo real de agua de la planta y el contenido de agua en el suelo, conformado por un tanque con una superficie entre  $4\text{m}^2$  a  $10\text{m}^2$ , la profundidad varía en función del cultivo, lo recomendable es de 1 m a 1.2 m; al rellenarse se inicia colocando una capa cascajo, la siguiente con arena fina y luego se coloca el suelo siguiendo las capas del perfil del suelo sobre el que se está trabajando. Por último, se siembra un cultivo cuya pérdida continua de agua se desea conocer, el cual nos permite estimar la evapotranspiración real (**figura 2**). Es un método directo para determinar la evapotranspiración y es muy utilizado en los estudios climatológicos para valorar los diferentes métodos que hacen estimaciones de evapotranspiración (García & Briones, 1997).



**Figura 2.** Características del lisímetro empleado en campo.

**Fuente:** (GISSAT, 2009)

## 2.4. Estimación de Evapotranspiración

Para estimar la evapotranspiración de forma indirecta se emplean diversos métodos, entre los que se destacan los empíricos y productos de satélites:

### 2.4.1. Métodos empíricos

Entre los principales métodos empíricos se tiene al de Blanney-Criddle, el cual utiliza la temperatura, el coeficiente del cultivo y el porcentaje de horas luz, esto varía según la latitud de la zona en la que se desarrolle el estudio (Doorenbos & Pruitt, 1976). Otro método muy utilizado es Thornthwaite, que utiliza principalmente la temperatura mensual (Thornthwaite, 1948). En la actualidad, el método de FAO Penman-Monteith (PM) destaca entre los más precisos para estimar la Evapotranspiración, este utiliza variables como la radiación neta en la superficie, densidad de flujo de calor del suelo, temperatura media, velocidad del viento a 2 m, presión de saturación de vapor y presión actual de vapor (Allen et al., 1998) sin embargo, demanda mucha información meteorológica, la misma que es limitada en muchas regiones por la deficiente red de monitoreo.

#### **2.4.2. Método de Hargreaves (HG)**

Para estimar la Evapotranspiración, la ecuación de Hargreaves (HG) necesita datos como la temperatura del aire (máxima y mínima), también se requiere de valores calculados de la radiación extraterrestre, HG es uno de los métodos más sencillos y robustos de entre los otros métodos empíricos para estimar ETo (Jensen et al., 1997). Según (Allen et al., 1998), la ecuación de HG presenta buenos resultados en varios estudios realizados en diferentes ubicaciones geográficas, al brindar estimaciones aceptables de ETo.

Bajo este contexto, HG se ha puesto a prueba en varias investigaciones a escala de tiempo diario que también refleja buenos resultados pero con márgenes de error (Di Stefano & Ferro, 1997). En este sentido, Hargreaves y Allen (2003) recomendaron que para obtener estimaciones con mayor exactitud se debe esperar a partir de lapsus de cinco días o más, ya que los cálculos diarios están propensos a tener una mayor variabilidad a causa de diferentes factores como el movimiento de frentes, fluctuaciones en la velocidad del viento y la nubosidad.

#### **2.4.3. Productos de satélites**

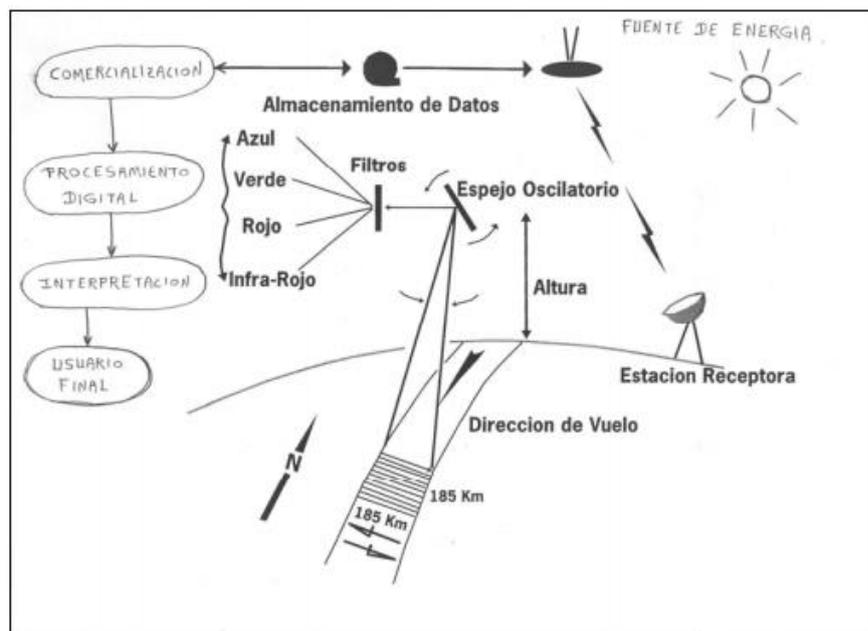
Las imágenes satelitales facilitan la obtención de información de la superficie terrestre y de la atmósfera, de un seguimiento global, regional y local de los cambios espacio-temporales (Brendel et al., 2019). Es de suma importancia su aplicabilidad por su capacidad de monitorear los espacios de manera constante y va en dependencia de su resolución espacial y temporal (Manandhar et al., 2009).

En los últimos años, el desarrollo de la tecnología ha permitido obtener diversos productos entre los cuales se tienen la precipitación a escala cuasi global, derivados de los sensores a bordo de los satélites (Chen & Li, 2016). Para la obtención de diferentes productos, derivados de las misiones satelitales están en función las mediciones del infrarrojo y microondas, se emplean una gran gama de técnicas de fusión. En el caso de los satélites Geoestacionarios los sensores infrarrojos capturan información de precipitación a altas resoluciones temporales (de hasta 15 minutos en algunas plataformas). Sin embargo, los sensores microondas (satélites de órbita polar) siguen

siendo el instrumento de elección para medir la precipitación ya que las firmas radiactivas están más directamente relacionadas con las partículas precipitantes (Hou et al., 2014).

## 2.5. Percepción Remota

La percepción remota se define como la ciencia que captura información desde un punto remoto, con la utilización de sensores que no llevan contacto físico con el objeto observado, abarca una amplia gama de observaciones como aéreas, satelitales, entre otros; se limita a los métodos que detectan y miden la energía electromagnética (Espinoza, 2018). La teledetección o percepción remota es una alternativa viable y en cierta parte complementaria, que gestiona datos en un amplio rango de la zona geográfica a estudiar (Quispe, 2015). En la **figura 3** se puede observar los elementos de un sistema de teledetección los cuales son: una fuente de energía, la superficie terrestre, el sistema del sensor, entre otros (Villegas, 2008).



**Figura 3.** Componentes de un sistema de Teledetección

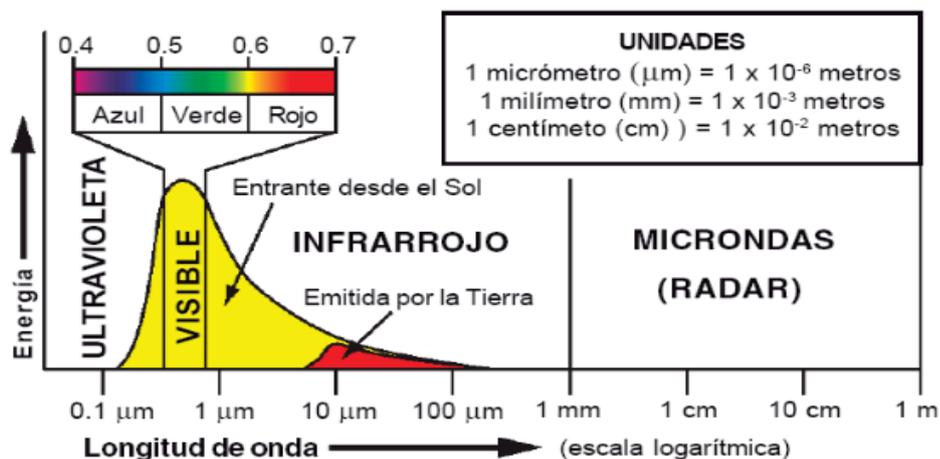
**Fuente:** (Villegas, 2008)

Mediante avances tecnológico el hombre desarrollo sensores que calculan las variaciones espectrales y temporales en los campos energéticos. Estos sensores son capaces de detectar cambios periódicos de los paisajes del planeta con la ayuda de la luz del sol, la atmósfera y la energía reflejada, estos ayudan a construir el principio básico de la

adquisición de datos de la percepción remota (Montoya, 1982). En su mayoría las imágenes del planeta a nivel regional que se utilizan están dentro del rango del espectro electromagnético usados en la fotografía; por ejemplo, el Ultravioleta (3nanómetros a 0,4 micrómetros), el Visible (0,4 a 0,7 micrómetros), el Infrarrojo (0,7 a 14 micrómetros) (Mather, 1990).

### 2.5.1. El espectro electromagnético

La primera información obtenida bajo el concepto de percepción remota inició con imágenes aéreas, con el uso de la luz del sol como fuente de energía, fundamentadas en la captura de información en el rango de luz visible, que es solamente una pequeña porción del espectro electromagnético, donde el espectro se extiende desde una alta energía u onda corta de rayos gamma, hasta una baja energía o longitud de ondas largas de radio. En la **figura 4**, se representa el rango del espectro electromagnético, denotando en color amarillo la luz visible y en rojo el rango de onda larga correspondiente al infrarrojo (Huaman, 2015).



**Figura 4.** Energía electromagnética emitida por diferentes longitudes de onda

**Fuente:** (Huaman, 2015)

La longitud de onda de la luz visible oscila entre los valores de 0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ , se sabe que el planeta Tierra es iluminada por la radiación electromagnética originaria del sol. La luz visible abarca el rango completo de colores vistos en un arco iris, también se tiene una subdivisión más simple en longitudes de onda del azul, verde y rojo que son suficientes en varios estudios de percepción remota (Roman & Vargas, 2015).

### **2.5.2. Reflectancia espectral**

La reflectancia varía según la longitud de onda para la mayoría de las superficies de los objetos, por lo que la energía en puntos específicos de longitudes de onda se dispersa en varios grados. La espectroscopia de luz reflejada como la propiedad fundamental que se quiere obtener es la reflectancia espectral. Los rangos de longitud de onda son marcados por debajo de las desviaciones de las curvas espectrales en donde los materiales absorben energía incidente de manera selectiva y también son llamadas como bandas de absorción (Roman & Vargas, 2015).

### **2.5.3. Resolución**

El uso de las imágenes satelitales está en función de las diferentes resoluciones. La resolución espacial consiste en el tamaño del píxel, siendo el píxel la unidad de las imágenes, para estudios que buscan un alto detalle de variación espacial deben usar imágenes con alta resolución. La manera más común de determinar esta resolución, es mediante su "campo instantáneo de observación" (Instant Field of View - IFOV). Este campo está determinado por las propiedades geométricas del sistema sensor, y define el área de terreno captado, que es vista por el instrumento de teledetección a una altitud y un momento dados (Chuvieco, 1990).

La resolución espectral, se puede definir por el número de bandas espectrales que contenga el sistema de un sensor, y por el ancho del intervalo de longitud de onda que se encuentra inmerso en cada una. Cuando tienen muchas bandas los intervalos reducen el ancho y proporcionan una mayor resolución espectral. Por ejemplo: Landsat inició con 3 bandas y actualmente cuenta con 12 (NASA, 2000).

La resolución radiométrica hace referencia a la capacidad que tiene el sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Consiste en el número de niveles digitales, proyectando en diferentes tonos de gris, usados para expresar los datos colectados por el sistema de teleobservación. Cuanto mayor es el número de niveles, mayor es la resolución radiométrica. Por ejemplo: en la comparación de dos imágenes la primera con dos niveles (blanco y negro) y la segunda con 32 tonos de gris, la cantidad de detalles perceptibles en la segunda será mayor que en la primera, y por lo tanto la

segunda imagen tendrá una mejor resolución radiométrica. Por último, la resolución temporal hace referencia a la periodicidad con la que un sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de apertura (Chuvieco, 1990).

## **2.6.MODIS**

El Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas inglés) es un instrumento clave en monitoreo de los principales elementos de la Tierra, que está a bordo del satélite Terra (originalmente conocido como EOS AM-1) y el satélite Aqua (originalmente conocido como EOS PM-1). Terra gira alrededor del planeta y está programado para sondear de norte a sur a través de la línea ecuatorial, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador por la tarde. Terra MODIS y Aqua MODIS pasan por toda la superficie del planeta cada día o 2 días, toman datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda. Datos que ayudan a entender la dinámica y procesos globales que suceden en el planeta (MODIS, 2021).

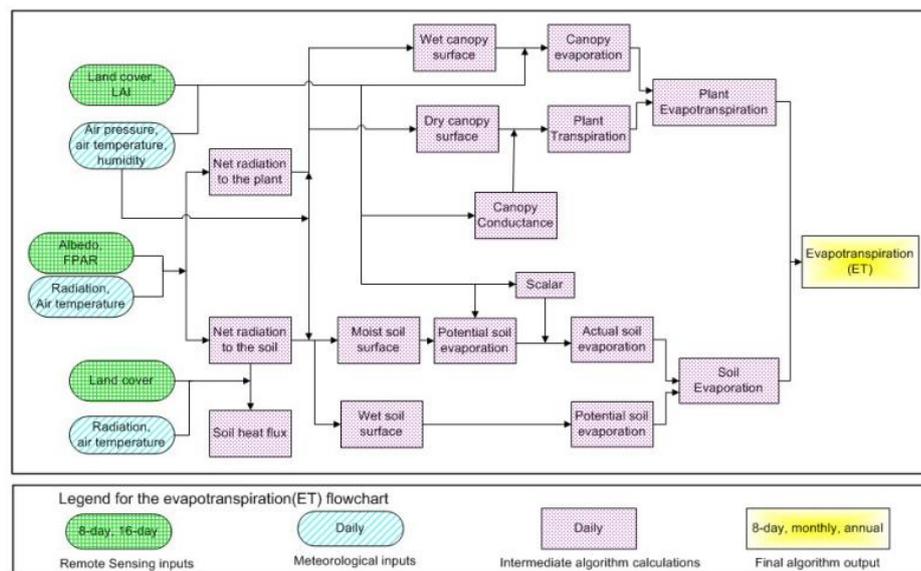
MODIS tiene una resolución radiométrica de 12 bits, con un juego de 36 bandas comprendidas entre una longitud de onda de 0,4  $\mu\text{m}$  a 14,4  $\mu\text{m}$ , en cuanto a la resolución espacial proporciona dos bandas de 250 m, cinco de 500 m y las 29 bandas restantes con una resolución de un kilómetro. La combinación o composición de colores permite al usuario identificar ciertas propiedades de la superficie terrestre. El escaneo satelital a 705 km alcanza a monitorear una franja de 2 330 km por 10 km.

El sistema óptico permite captar información de las siguiente regiones espectrales: luz visible (VIS, por sus siglas en inglés), Infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), infrarrojo cercano onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés), infrarrojo cercano de onda media (MWIR, por sus siglas en inglés) e infrarrojo cercano de onda larga (LWIR, por sus siglas en inglés) (MODIS, 2021).

### 2.6.1. MOD16

Se calcula la ETo en un paso a diario por medio del algoritmo MOD16, esto se genera a través de datos meteorológicos diarios, donde se incluyen la temperatura máxima, mínima y promedio del aire, la radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR, por sus siglas en ingles) y la humedad específica. Estos datos son obtenidos por la Oficina de Asimilación y Modelado Global de la NASA (GMAO o MERRA GMAO), una rama de la NASA (Schubert et al., 1993).

Son datos generados cada seis horas, se obtienen utilizando un modelo de circulación global (GCM), que integra observaciones terrestres y satelitales. Estos datos se distribuyen a una resolución de  $0,5^\circ \times 0,6^\circ$  (MERRA GMAO) o  $1,00^\circ \times 1,25^\circ$  en contraste con las salidas MOD16 cuadriculadas de 0,5 km. Se supone que los datos meteorológicos de resolución aproximada proporcionan una descripción precisa de las condiciones del terreno y son homogéneos dentro de la extensión espacial de cada celda, a continuación se muestra la **figura 5** la cual describe el flujo del algoritmo de MODIS (Schubert et al., 1993).



**Figura 5.** Diagrama de flujo del algoritmo MOD16 ET mejorado.

**Fuente:** (Schubert et al., 1993)

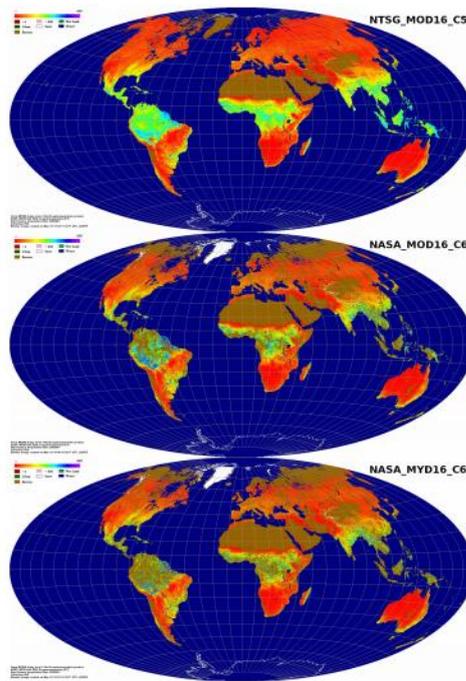
## 2.6.2. MOD16A2 V6

La información que se detalla a continuación se desprende de los documentos guías y manuales del producto, que están disponibles en la misma página de MODIS (Running et al., 2019). El producto MOD16A2 Versión 6 (V6) Evapotranspiración / Flujo de calor latente es un conjunto de datos compuesto de 8 días producido a una resolución de píxeles de 500 metros (m). El algoritmo utilizado para la recopilación de productos de datos MOD16 se basa en la lógica de la ecuación de Penman-Monteith, que incluye entradas de datos de reanálisis meteorológicos diarios junto con productos de datos de detección remota del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), como la dinámica de las propiedades de la vegetación, el albedo, y cobertura terrestre. Como se muestra en la **Tabla 1**, enumera los conjuntos de datos científicos en MOD16A2 o MOD16A2GF de 8 días. ET\_500m y ET potencial (PET), PET\_500m, son la suma de pérdida total de agua de 8 días a través de ET (0,1 kg/ m<sup>2</sup> / 8 días)

**Tabla 1.** Información detallada sobre conjuntos de datos científicos en MOD16A2

Conjuntos de datos	Sentido	Unidades	Fecha Tipo	Rango válido	Factor de escala
ET_500m	ET total de 8 días	kg / m <sup>2</sup> / 8d	int16	- 32767 ~ 32700	0,1
LE_500m	LE promedio de 8 días	J / m <sup>2</sup> / D	int16	- 32767 ~ 32700	10000
PET_500m	PET total de 8 días	kg / m <sup>2</sup> / 8d	int16	- 32767 ~ 32700	0,1
PLE_500m	PLE promedio de 8 días	J / m <sup>2</sup> / D	int16	- 32767 ~ 32700	10000
<u>ET_QC_500m</u>	Control de calidad	ninguno	uint8	0 ~ 254	ninguno

En el producto MOD16A2 se proporcionan capas para Evapotranspiración (ET), Flujo de calor latente (LE), ET potencial (PET) y LE potencial (PLE) junto con una capa de control de calidad. También están disponibles dos imágenes de exploración de baja resolución, ET y LE, para cada gránulo MOD16A2, en la **figura 6** se compara la colección NTSG5 y la colección operativa de la NASA6 cada 8 días.



**Figura 6.** Comparación de MOD16A2 para 8 días de 2008281 entre la colección NTSG5 y la colección operativa de la NASA6

**Fuente:** (Running et al., 2019)

Los valores de píxeles para las dos capas de evapotranspiración (ET y PET) son la suma de los ocho días dentro del período compuesto y los valores de píxeles para las dos capas de calor latente (LE y PLE) son el promedio de los ocho días dentro del período compuesto. Tenga en cuenta que el último período de adquisición de cada año es un período compuesto de 5 o 6 días, según el año(Running et al., 2019).

### 2.6.3. MODISTools

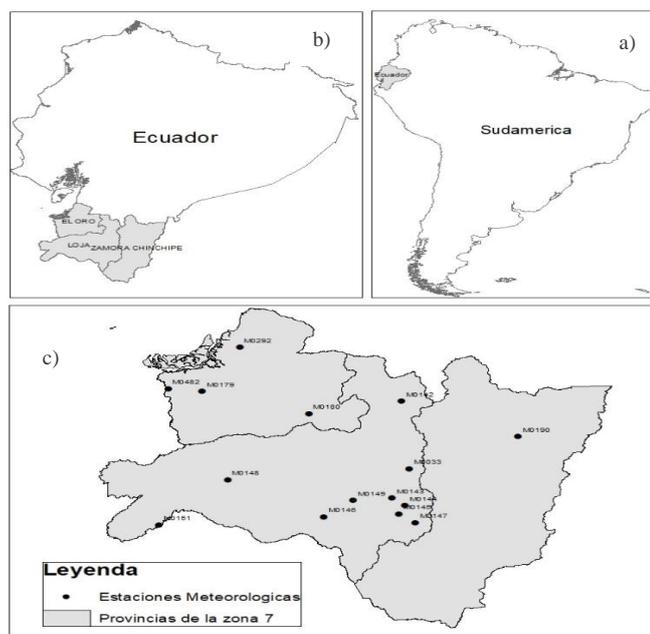
MODISTools es un paquete programático para los servicios web de los subconjuntos de productos terrestres MODIS para R Statistical Computing Language, permite al usuario descargar y guardar datos MODIS de múltiples locaciones, lapsos de tiempo y productos utilizando una sola línea de código R. Los datos se obtienen de forma sencilla y precisa para poder manipularla, brinda funciones para procesar datos descargados y fusionar estos datos con los datos de respuesta ecológica del usuario, lo que hace posible aplicar datos MODIS a preguntas de investigación con un esfuerzo mínimo. MODISTools completa todo el funcionamiento dentro del entorno R sin necesidad de software externo (Koen, 2020).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudio

El presente trabajo de investigación abarco el estudio de 15 estaciones meteorológicas para la determinación de Eto por medio de Hargreaves y MODIS, las mismas que se encuentran en la zona sur del Ecuador. Geográficamente se encuentra localizada entre los paralelos de 3° y 5° de latitud sur y los meridianos de 78° y 81° de longitud oeste. La zona sur del Ecuador, comprende el Archipiélago de Jambelí, la zona costera de la provincia de El Oro, pasa por la Sierra pasando por la provincia de Loja y tiene parte amazónico perteneciente a la provincia de Zamora Chinchipe como se muestra en la **figura 7** (Castillo, 1997).

La zona sur del Ecuador limita al norte con las provincias del Guayas, Azuay y Morona Santiago; al sur y este con la República del Perú; y, al oeste con el Océano Pacífico. La superficie continental de la zona es de aproximadamente 40.000 km<sup>2</sup>, equivalentes a más del 14% de la superficie del País. De estos 40.000 km<sup>2</sup>, 2.750 km<sup>2</sup> corresponden a la superficie agrícola, lo que constituye el 14% de la superficie agrícola total del País (PREDESUR, 1998).



**Figura 7.** a) Ecuador en Sudamérica, b) Zona sur del Ecuador, c) ubicación de las estaciones meteorológicas estudiadas de la zona sur del Ecuador.

### 3.2.Los datos meteorológicos

Los datos a escala mensual se digitalizaron de los anuarios de la página oficial del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) en la serie temporal del año de 1990 al 2013, donde las variables que se llegaron a considerar fueron temperatura máxima y mínima, de la cual se derivó la temperatura promedio que parte como variable necesaria para realizar el cálculo de evapotranspiración. En la **tabla 2** se detalla la ubicación de las estaciones meteorológicas estudiadas, en la cual se las caracterizo por código (COD) al nombre de la estación (EST), en la ubicación de cada una se la preciso por medio de la provincia (PROV), latitud (LAT), longitud (LON) y altura (ALT) correspondientemente.

**Tabla 2.** Estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador

CÓD	PROV	EST	LAT	LON	ALT
M0292	El Oro	Granja Sta.Ines(utmach)	-3.2878	-79.9014	5
M0179	El Oro	Arenillas	-3.5603	-80.0561	60
M0482	El Oro	Chacras	-3.5436	-80.1981	60
M0142	Loja	Saraguro	-3.6206	-79.2322	2525
M0180	El Oro	Zaruma	-3.6969	-79.6161	1100
M0148	Loja	Celica	-4.1047	-79.9514	1984
M0151	Loja	Zapotillo	-4.3825	-80.2364	223
M0149	Loja	Gonzanama	-4.2303	-79.4311	2042
M0146	Loja	Cariamanga	-4.3333	-79.5544	1950
M0143	Loja	Malacatos	-4.2161	-79.2711	1453
M0144	Loja	Vilcabamba	-4.2628	-79.2178	1563
M0145	Loja	Quinara Inamhi	-4.3139	-79.2433	1560
M0147	Loja	Yangana	-4.3681	-79.1747	1835
M0033	Loja	La Argelia-Loja	-4.0364	-79.2011	2160
M0190	Zamora Chinchipe	Yanzatza	-3.8375	-78.7503	830

### **3.3.La adquisición de datos de Modis con MODISTools**

MODISTools nos permite hacer la adquisición de los datos se descargó NDVI y EVI a  $500\text{m}^2$  de resolución y con una buena fiabilidad de píxeles que permitan el control de calidad antes del análisis. La principal ventaja es que permite al usuario especificar simplemente una lista de coordenadas para las cuales se descargan una serie de tiempo y se guardan como simples archivos, evitando el almacenamiento de grandes cantidades de datos como archivos ráster, sea el caso que el investigador este interesado en pequeñas ubicaciones (Tuck et al., 2014).

#### **3.3.1. Caracterización de la ETo MODIS16A2**

Se extrajeron las imágenes por un periodo de estudio entre 2001 al 2013, por lo que esta amplitud de tiempo en el periodo seleccionado, permitió tener años climáticamente diversos. La ETo del producto Global Evapotranspiration Project-MOD16, obtiene datos de satélites al combinarlos. MODIS con datos de reanálisis meteorológicos global (Running et al., 2019). Se usó una resolución espacial de  $500\text{m}^2$  y con una resolución temporal anual.

Para extracción de información de las imágenes de MODIS se utilizó el paquete estadístico de Rstudio, donde se cargaron los archivos las cuales serían 13 imágenes por los 13 años, se cargaron las estaciones con sus coordenadas, se pasó información con coordenadas para la extracción de los Ráster (imágenes satelitales), se obtienen valores mediante funciones teniendo en cuenta las unidades de descarga que trabaja MODIS16A2 ( $\text{Kg}/\text{m}^2/8\text{días}$ ) y se realiza una conversión con la densidad del agua. Extrae información de los Ráster se combina con las estaciones y se generan una nueva base de datos con la estación, año y ETo de MODIS.

### **3.4.Estadística descriptiva**

La estadística descriptiva es la rama de la estadística donde desarrolla una serie de técnicas sobre cómo resumir la información en cuadros o tablas, gráficas o figuras (Rendón et al., 2016). También forma técnicas que estudia la sujeción que pueden llegar

a existir entre 2 o más características observadas en una serie de individuos, las cuales son técnicas de regresión y correlación (Fernández et al., 2002).

### **3.4.1. Análisis exploratorio de datos**

El análisis exploratorio de datos son técnicas en su mayoría gráficas donde se analizan valores atípicos para poder descartar datos con una desviación estándar de 3.5 como valor, también conocido por sus siglas en inglés EDA (Exploratory Data Analysis) tiene como finalidad examinar los datos previamente a la utilización de alguna técnica estadística, se lo considera como un conjunto de procedimientos que se apoya en un planteamiento descriptivo y se ejecuta sin la necesidad de aceptar ideas previas del contenido informativo de los datos, con una mentalidad “exploratoria” (Gonzalez & Ortiz, 2017).

El análisis exploratorio de datos brinda de métodos simples para organizar y preparar los datos, como medidas de tendencia central se tiene a la media, mediana y desviación estándar, coeficientes de sesgos, curtosis, varianza como medidas de dispersión, etc. Detecta fallos en el diseño y recolección de los datos, tratamiento y evaluación de datos ausentes, identificación de casos atípicos y comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas multivariantes (Salvador & Gargallo, 2013).

### **3.4.2. Climatología de las variables climáticas**

A la climatología se la define como la ciencia que se encarga del estudio de los climas y las interacciones que ocurren entre ellos en la Tierra, también se dice que es una parte de la Física que estudia los fenómenos que se producen en la atmósfera terrestre. Por lo general cuando se habla de climatología se hace referencia a “el tiempo”, pero va más allá de proporcionar respuestas mucho más profundas. No solo se encarga del estudio predictivo del tiempo, sino que se intenta dar razón de causalidad que desencadenan estos fenómenos (Inzunza, 2000), por ello la climatología es la representación del promedio de una serie temporal, donde representaremos datos de temperatura de forma estacional de Enero a Diciembre.

### 3.5. Cálculo de ETo con Hargreaves (HG)

La ecuación de Hargreaves (HG) se utiliza para estimar la evapotranspiración potencial con el uso de datos de temperatura y de la Radiación solar (George & Zohrab, 1985).

La ecuación es la siguiente:

$$ETo = 0,0135(Tmed + 17.78)Rs$$

**Donde:**

**ETo** = Evapotranspiración potencial (mm/día)

**Tmed** = Temperatura media (°C)

**Rs** = Radiación solar incidente (mm/día)

La radiación solar incidente, se comprueba por medio de la radiación solar extraterrestre la cual es la que llega hacia la parte externa de la atmosfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera. Según el autor se puede expresar como Ro o Ra, y se lo interpreta en las tablas en función de la latitud del área de estudio y del mes.

#### 3.5.1. Ecuación de la Radiación solar Incidente (Rs)

(Samani, 2000) propone la siguiente fórmula:

$$Rs = Ro * KT * (Tmax - Tmin)^{0.5}$$

**Donde:**

**Rs** = Radiación solar incidente

**Ro** = Radiación solar extraterrestre (tabla en anexos), (Allen et al., 1998).

**KT** = Coeficiente

**Tmax** = Temperatura máxima

**Tmin** = Temperatura mínima

Dado que los datos de Ro se encuentran tabulados y que las temperaturas máximas y mínimas son valores de fácil acceso, la dificultad que se presenta al aplicar la formula se da cuando al escoger el coeficiente de KT, la radiación solar extraterrestre se comprueba

mediante tablas, las cuales están en función de la latitud y longitud del lugar de estudio. El KT es un coeficiente empírico que se obtiene de un cálculo a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves recomienda  $KT = 0,162$  para regiones del interior y  $KT = 0,19$  para regiones costeras (Samani, 2000).

### **3.6.Evaluación estadística de MODIS**

La evaluación estadística de los datos con MODIS se lo obtiene mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error cuadrático medio (RMSE), eficiencia (NASH), sesgo (BIAS), etc.

#### **3.6.1. Coeficiente de determinación ( $R^2$ )**

Es la proporción de variabilidad de la variable Y, por lo que es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, y da la proporción de variación de la variable Y que es explicada por la variable X. Si la proporción es igual a 0, significa que la variable predictora no tiene capacidad predictiva de la variable a predecir (Y). Cuanto mayor sea la proporción, mejor será la predicción. Si llegara a ser igual a 1 la variable predictora explicaría toda la variación de Y, y las predicciones no serían un error. Entonces se dice que el coeficiente de determinación coge valores de entre 0 y 1, y cuanto más se aproxime a 1 mejor será el ajuste y por lo tanto mayor la fiabilidad de las predicciones de los supuestos que se estén realizando (Wayne & Vilamizar, 1988).

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2}$$

**Donde:**

$R^2$ = Coeficiente de determinación,

$\sigma_r^2$ = varianza residual,

$\sigma^2$ =varianza.

$$\sigma = \sqrt{\text{varianza}}$$

$$varianza = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})$$

**Donde:**

n = Número de elementos,

$x_i$  = cada uno de los datos,

$\bar{x}$  = media aritmética.

### 3.6.2. Error Cuadrático medio (RMSE)

El error cuadrático medio o RMSE por sus siglas en inglés, pondera las estimaciones que están más alejadas del valor medido, Su resultado está en unidades al cuadrado de la variable medida. Estima la cantidad de error que se encuentre entre dos grupos de datos, es decir, que compara un valor predictivo y valor observado, también se lo encuentra como la Raíz de la Desviación Cuadrática Media y es de las estadísticas más utilizadas (Karamirad et al., 2013).

$$MSE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

**Donde:**

MSE= error cuadrático medio,

n = número de puntos de datos,

$y_i$  = es el resultado real esperado,

$\hat{y}_i$  = es la predicción del modelo.

Como valores de referencia se tiene que NS=0 representa un ajuste insuficiente donde la media de los valores modelamos es equivalente a los valores observados, 0.4<NS<0.5 aceptable, 0.5<NS<0.65 satisfactorio, 0.65<NS<0.75 bueno, y 1>NS>0.8 muy bueno (CVC et al., 2018).

### 3.6.3. Sesgo (BIAS)

El sesgo de BIAS es la diferencia entre las predicción esperada del modelo y los valores verdaderos, nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable y nos cuantifica el error sistemático del modelo, se estima mediante la siguiente ecuación (Pielke, 1984):

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - O_i)}{N}$$

**Donde:**

**Pi:** es el valor pronosticado para la celda i

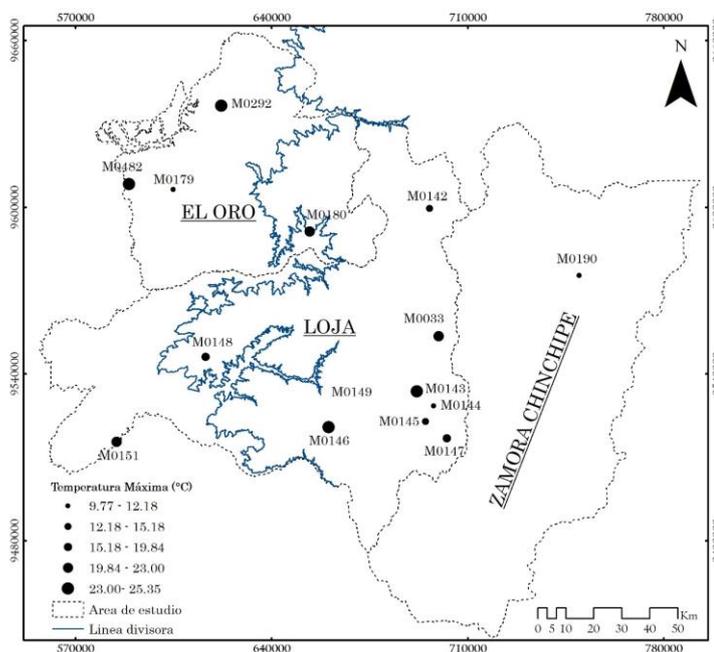
**Oi:** es el valor observado para la celda i

**N:** es el número de valores analizado

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Análisis exploratorio de los elementos climáticos de las estaciones meteorológicas

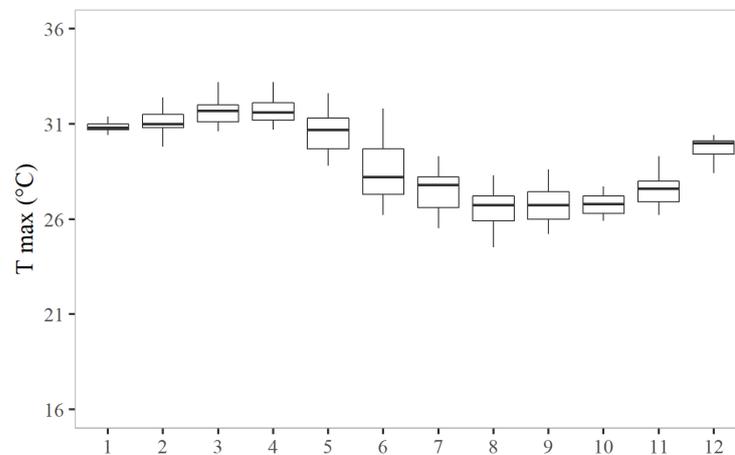
En el presente estudio se analizaron 15 estaciones de las cuales 4 se encuentran en la provincia de El Oro, 10 en la provincia de Loja y la restante en la provincia de Zamora Chinchipe. En la **figura 8** de temperaturas máximas, se puede observar una línea divisora de color azul la cual corresponde a la zona andina del Ecuador el cual está por arriba de los 1000 msnm donde el 62.5% de las estaciones están distribuidas en este territorio, En la figura de manera exploratoria y visual demuestra que la temperatura máxima promedio de la serie temporal de 1990-2013 que se encuentra en diversas proporciones por cuartiles y se aprecia que en la provincia de El Oro y parte de Zamora Chinchipe es donde existe una mayor concentración de altas temperaturas con valores de 23 °C a 25.345 °C de máxima promedio.



**Figura 8.** Distribución de temperatura máxima de la serie temporal de 1990-2013 de las estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador. La región andina sobre los 1000 m.s.n.m. está delimitada por la línea de color azul

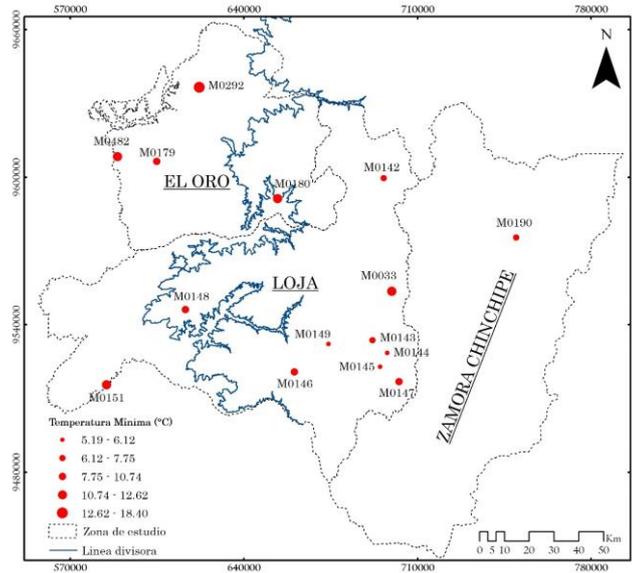
En el contexto exploratorio se realizaron, los diagramas de cajas y sesgos permiten resumir la información de cada estación meteorológica, como se aprecia en el siguiente Figura 9 de temperatura máxima donde se tiene a la estación M0292 a escala mensual

como mayor representante, tiene altas concentraciones de temperaturas en los primeros meses del año con temperaturas que sobrepasan los 30°C que es donde también se genera las mayores cantidades de lluvias del año. Valores que son muy similares a los de (Galvez & Regalado, 2007) que en la zona sur de la costa del Ecuador las temperaturas máximas alcanzan ocasionalmente los 36°C en los primeros meses del año y una sobre los 26°C.



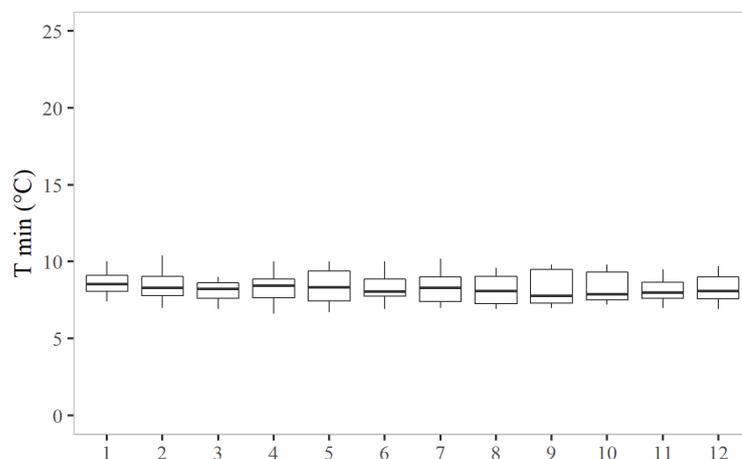
**Figura 9.** Temperaturas Máximas a escala mensual de la estación M0292

En la **figura 10** de temperaturas mínimas se puede observar una línea divisora de color azul la cual corresponde a la zona andina del Ecuador y está por arriba de los 1000 msnm donde el 62.5% de las estaciones están distribuidas en este territorio, En la figura de manera exploratoria y visual se demuestra que la temperatura mínima promedio de la serie temporal de 1990-2013 que se encuentra en diversas proporciones por cuartiles y se aprecia que en la provincia de Loja es donde existe mayor presencia de bajas temperaturas con valores de 5.187 °C a 6.119 °C de mínimos promedios.



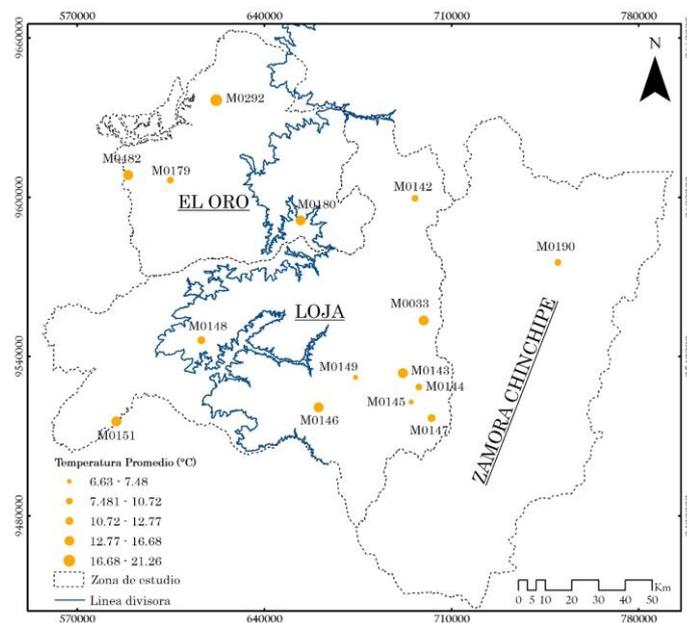
**Figura 10.** Distribución de temperatura mínima de la serie temporal de 1990-2013 de las estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador. La región andina sobre los 1000 m.s.n.m. está delimitada por la línea de color azul

En el contexto exploratorio se realizaron, los diagramas de cajas y sesgos permiten resumir la información de cada estación meteorológica, como se aprecia en el siguiente **Figura 11** de temperatura mínima donde se tiene a la estación M0142 a escala mensual como mayor representante, la cual muestra un flujo de bajas temperaturas constante a lo largo de los meses del año con temperaturas que se encuentran entre los 5 °C a 10 °C, valores que discrepan con los obtenidos con (Urdiales & Célleri, 2018) que determinaron temperaturas mínimas en el sur de la parte altitudinal del Ecuador con valores de 0°C a 5°C en el que aclara que estos valores se alcanzan con días secos y húmedos.



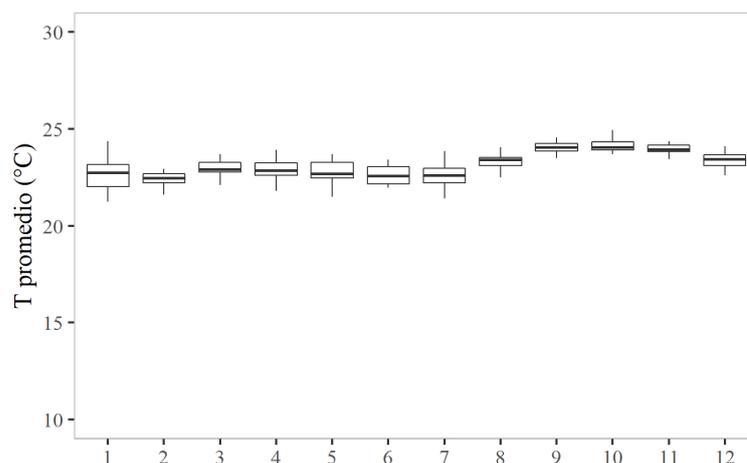
**Figura 11.** Temperaturas Mínimas a escala mensual de la estación M0142

En la **figura 12** de temperaturas promedio se puede observar una línea divisora de color azul la cual corresponde a la zona andina del Ecuador y está por arriba de los 1000 msnm donde el 62.5% de las estaciones están distribuidas en este territorio, En la figura de manera exploratoria y visual se demuestra que la temperatura promedio de la serie temporal de 1990-2013 que se encuentra en diversas proporciones por cuartiles y se aprecia que en las temperaturas promedios se encuentran distribuidos en la provincia de El Oro y parte de la provincia de Loja como valores promedios máximos que van de 16.684 °C a 21.262 °C



**Figura 12.** Distribución de temperatura media de la serie temporal de 1990-2013 de las estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador. La región andina sobre los 1000 m.s.n.m. está delimitada por la línea de color azul

En el contexto exploratorio se realizaron, los diagramas de cajas y sesgos permiten resumir la información de cada estación meteorológica, como se aprecia en el siguiente **Figura 13** de temperatura promedio donde se tiene a la estación M0180 con valores a escala mensual como mayor representante, la cual muestra un flujo de temperaturas poco intermitente. Mientras que un estudio realizado por (Viteri & Guerrero, 2013) que determinaron un año meteorológico con variables de temperatura y velocidad del viento en las 3 regiones (Costa, Sierra y Amazonia) del Ecuador, obteniendo medias similares en el sur del Ecuador.

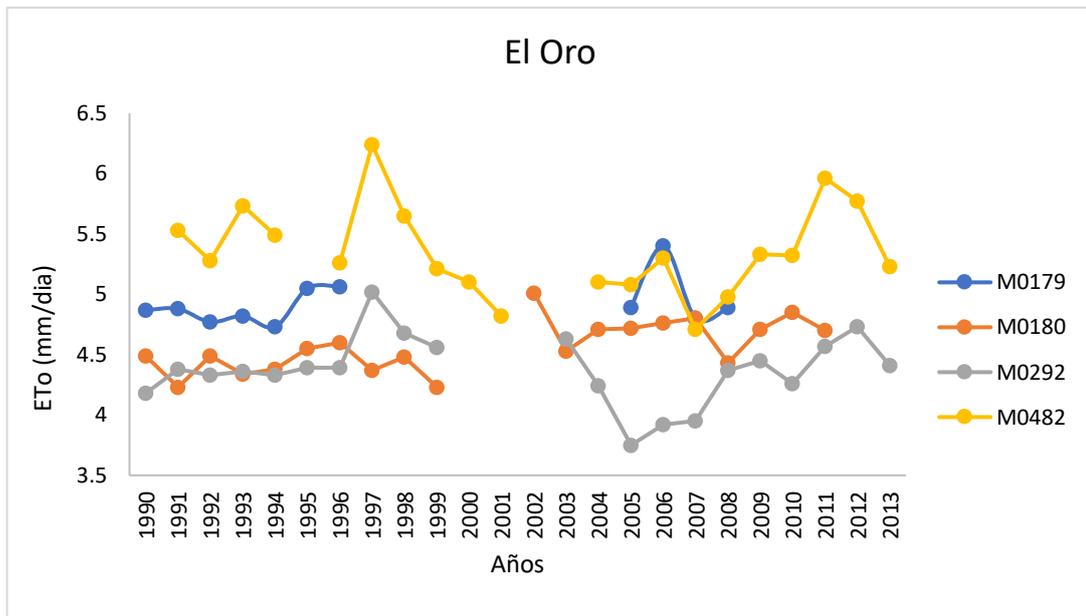


**Figura 13.** Temperaturas Mínimas a escala mensual de la estación M0180

#### 4.2.Cálculo de evapotranspiración con la ecuación de Hargreaves (HG)

En la **figura 14** se muestra el comportamiento de la ETo anual de 4 estaciones meteorológicas que se encuentran en la provincia de El Oro perteneciente a la zona sur del Ecuador en la serie temporal de 1990-2013. En general, se denota diferencias considerables entre las estaciones meteorológicas en el transcurso de los años teniendo a la estación M0482 con los picos más altos entre los años de 1996 al 1999 y se repiten estas alzas de ETo en el 2010 al 2012 por el contrario, la estación M0292 presenta valores de ETo más bajos en comparación a las otras estaciones en especial entre los años de 2003 al 2008. El valor de ETo de la ecuación de Hargreaves puede variar según la zona climática y se puede observar la ausencia importante de datos en ciertos años para cada estación por lo que se rompe el flujo de línea, esto se debe a la poca disponibilidad de registros en la base de datos meteorológicos del INAMHI.

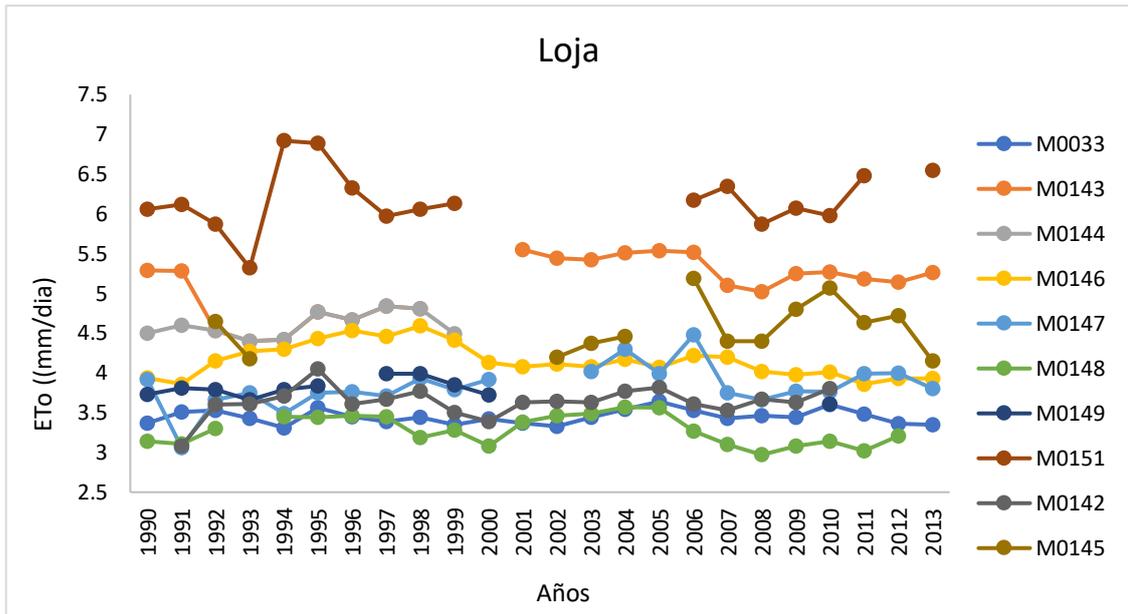
Estos valores son muy similares a los obtenidos con (Oñate et al., 2020) que determinaron ETo mediante la ecuación de Hargreaves en la provincia de el Oro y Loja. En la provincia de El Oro se observan similitudes entre los registros en especial con la estación de Zaruma (M0180) que muestra diferencias poco significativas



**Figura 14.** ETo de 4 estaciones meteorológicas en la provincia de El Oro en la serie temporal de 1990-2013.

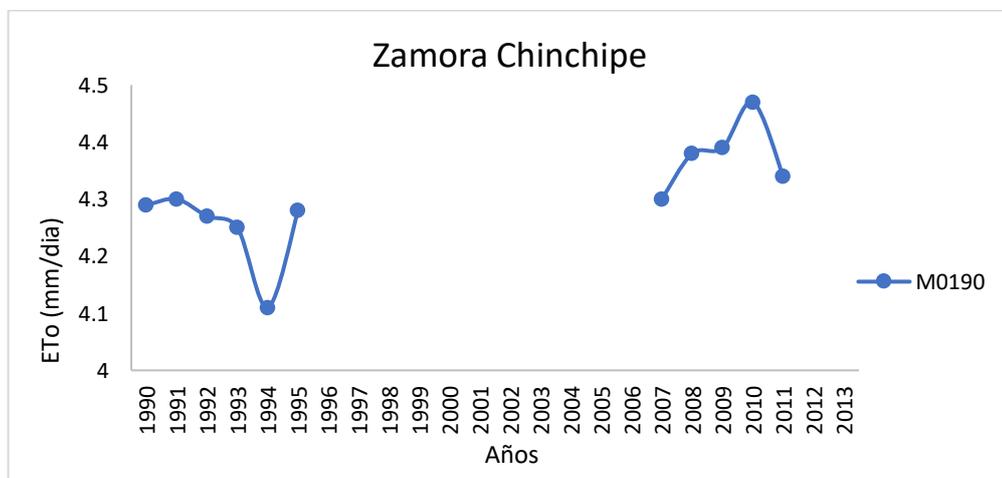
En la **Figura 15** se muestra el comportamiento de la ETo anual de 10 estaciones meteorológicas que se encuentran en la provincia de Loja perteneciente a la zona sur del Ecuador en la serie temporal de 1990-2013. En general, se denotan diferencias considerables entre las estaciones meteorológicas con el transcurso de los años teniendo a la estación M0151 con los picos más altos de ETo entre los años de 1993 al 1997 por el contrario, la estación M0148 presenta valores de ETo más bajos en comparación a las otras estaciones y las estaciones restantes mantienen valores con el pasar de los años. El valor de ETo de la ecuación de Hargreaves puede variar según la zona climática y se puede observar la ausencia de valores en ciertos años para cada estación por lo que se rompe el flujo de línea, esto se debe a que no se encontraron datos en los anuarios del INAMHI.

Estos valores son muy similares a los obtenidos con (Oñate et al., 2020) que determinaron ETo mediante la ecuación de Hargreaves en la provincia de El Oro y Loja. En la provincia de Loja se observan que existe un incremento significativo que para la estación Yangana (M0147) alcanza el mayor incremento, la misma tendencia se observa en las estaciones Cariamanga (M0146) y La Argelia (M0033), aunque en menor proporción, de allí el resto de valores se asemejan, aunque el ciclo temporal discrepa un poco.



**Figura 15.** ETo de 10 estaciones meteorológicas en la provincia de Loja en la serie temporal de 1990-2013.

En la **Figura 16** se muestra el comportamiento de la ETo anual de una estación meteorológica que se encuentra en la provincia amazónica de Zamora Chinchipe perteneciente a la zona sur del Ecuador en la serie temporal de 1990-2013. En general, la ETo varía con el pasar de los años, teniendo que en los inicios de la serie temporal los valores de ETo son inferiores a comparación a los últimos años registrados donde ha ido aumentando y se puede observar una amplia ausencia de valores entre los años de 1997 al 2006 por lo que se rompe el flujo de línea, esto se debe a que no se encontraron datos en los anuarios del INAMHI.

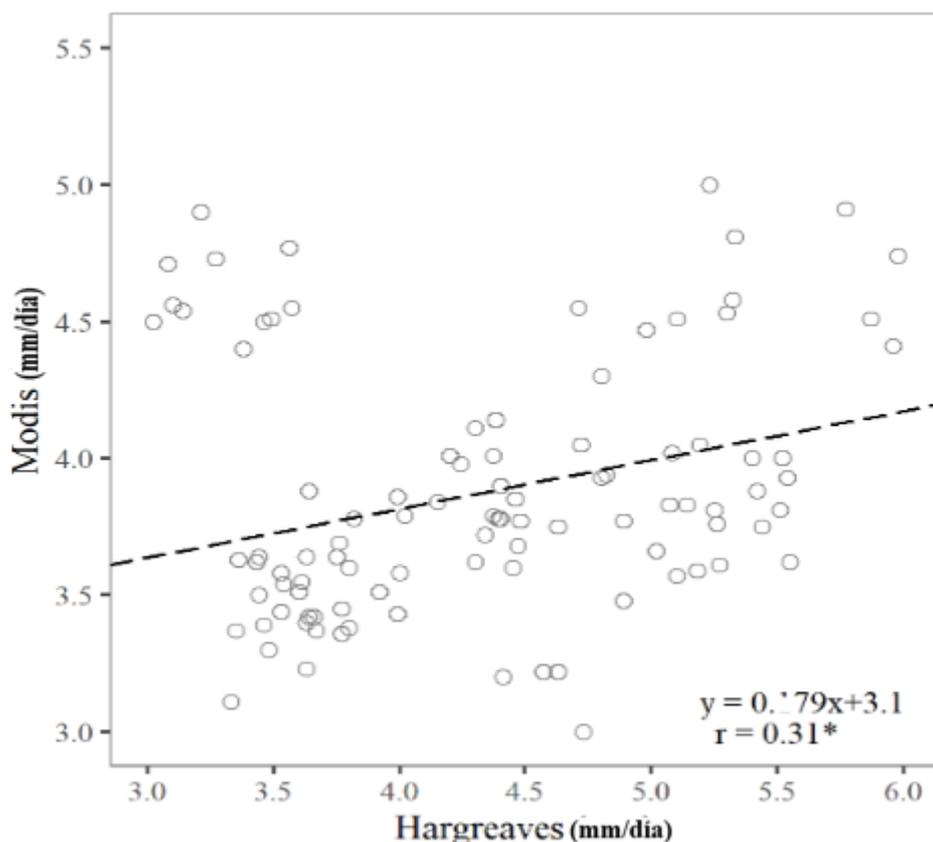


**Figura 16.** ETo de una estación meteorológica en la provincia de Zamora Chinchipe de la serie temporal de 1990-2013.

### 4.3. Evaluación estadística de MODIS

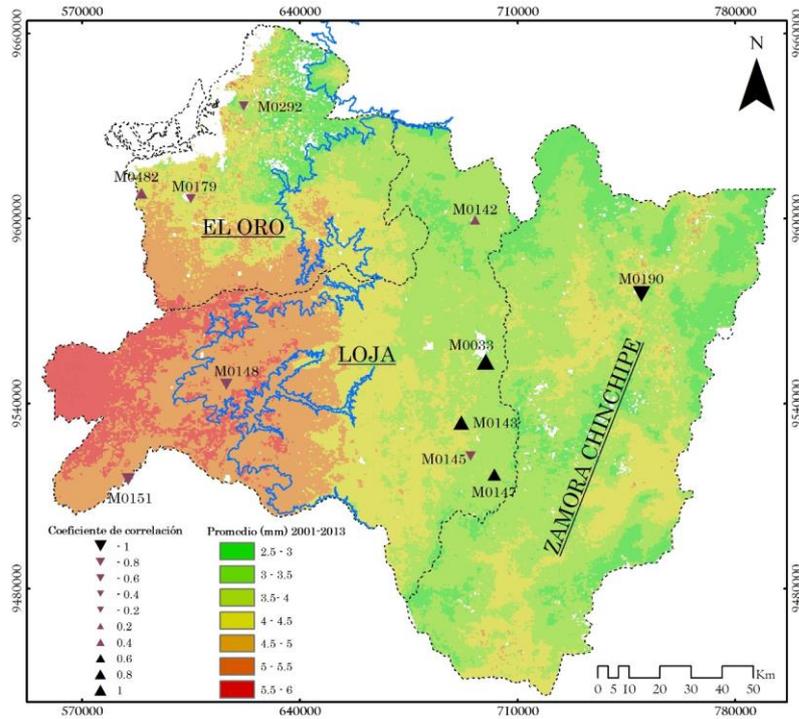
En la **figura 10** de forma general se muestra el gráfico de dispersión de 11 de 15 estaciones; se excluyó la estación M0149, M0180, M0146, M0144, por carecer de datos entre los años 2001 al 2013 y si se las llegase a proyectar puede significar algún error. Donde se observa la correlación existente entre la ETo de la ecuación de Hargreaves y MODIS, se presenta un coeficiente de correlación de Pearson positivo débil con un valor de 0.31, el p-valor del análisis de varianza es de 0.001; en consecuencia, hay una relación significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%. Además, que el coeficiente de determinación o bondad de ajuste solo explica el 10 de la variabilidad entre HG y MODIS, dando a entender una relación débil entre las variables. El valor de RMSE indica que la desviación estándar de la ETo es de 1.01 mm/día, también se obtiene un Bias o sesgo subestimado de -11.52.

Un estudio similar se realizó en el estado de Quintana Roo de la península de Yucatán, México en el año 2019. Donde determinaron valores obtenidos de ETo usando el modelo FAO Penman-Monteith (presentan robustez en los datos de las estaciones meteorológicas que permiten realizar este modelo) y la ETo de productos satelitales de MODIS. Al realizar este comparativo determinaron que existe una sobreestimación por parte del producto satelital en todos los puntos donde se ubican las estaciones meteorológicas. En términos generales, los valores de ETo se reducen un 1.1% al comparar los resultados de la evapotranspiración de referencia contra las estimaciones provenientes del producto satelital MOD16A3 y usando la forma tradicional de calcular la evapotranspiración (Orozco et al., 2019).



**Figura 17.** Diagrama de dispersión entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, para la serie temporal 2001 a 2013.

En la **figura 11** de correlación entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, para la serie temporal 2001 a 2013, se observan espacios vacíos donde el sensor de Modis16a2 no logro captar la imagen que se encuentra en una resolución de 500m<sup>2</sup> por pixel, esto se puede deber a que son zonas residenciales de los cantones y no registran evapotranspiración o a una alta nubosidad que impidió al sensor tomar la captura. También se puede observar una clasificación calorimétrica sobre la zona sur que indica la ETo, donde los promedios mínimos de 2.5 a 3 mm se los identifica con tonos verdes a verdes claros y los promedios máximos de 5.5 a 6 mm se los identifica con tonos rojizos a anaranjados. Se puede observar una línea divisora de color azul la cual corresponde a la zona andina del Ecuador y está por arriba de los 1000 msnm. La correlación positiva y significativa de las estaciones se las represento con triángulos de color negro, los triángulos de color morado muestran la correlación no significativa y los triángulos invertidos de color negro y morado representan la correlación negativa.



**Figura 18.** Correlación entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, para la serie temporal 2001 a 2013. Los triángulos color negro representan la correlación positiva significativa, los triángulos color morado muestran la correlación no significativa y los triángulos invertidos color negro y morado representan la correlación negativa. La región andina sobre los 1000 m.s.n.m. está delimitada por la línea de color azul

En la **tabla 3** se detallan los estadísticos de las estaciones meteorológicas estudiadas, en la cual se las caracterizo por código (COD), en la ubicación de cada una se la preciso por medio de la provincia (PROV), altura (ALT), el coeficiente de correlación ( $r$ ), el nivel de significancia ( $p$ -valor), sesgo o bias (BIAS), y el error cuadrático medio (RMSE) correspondientemente.

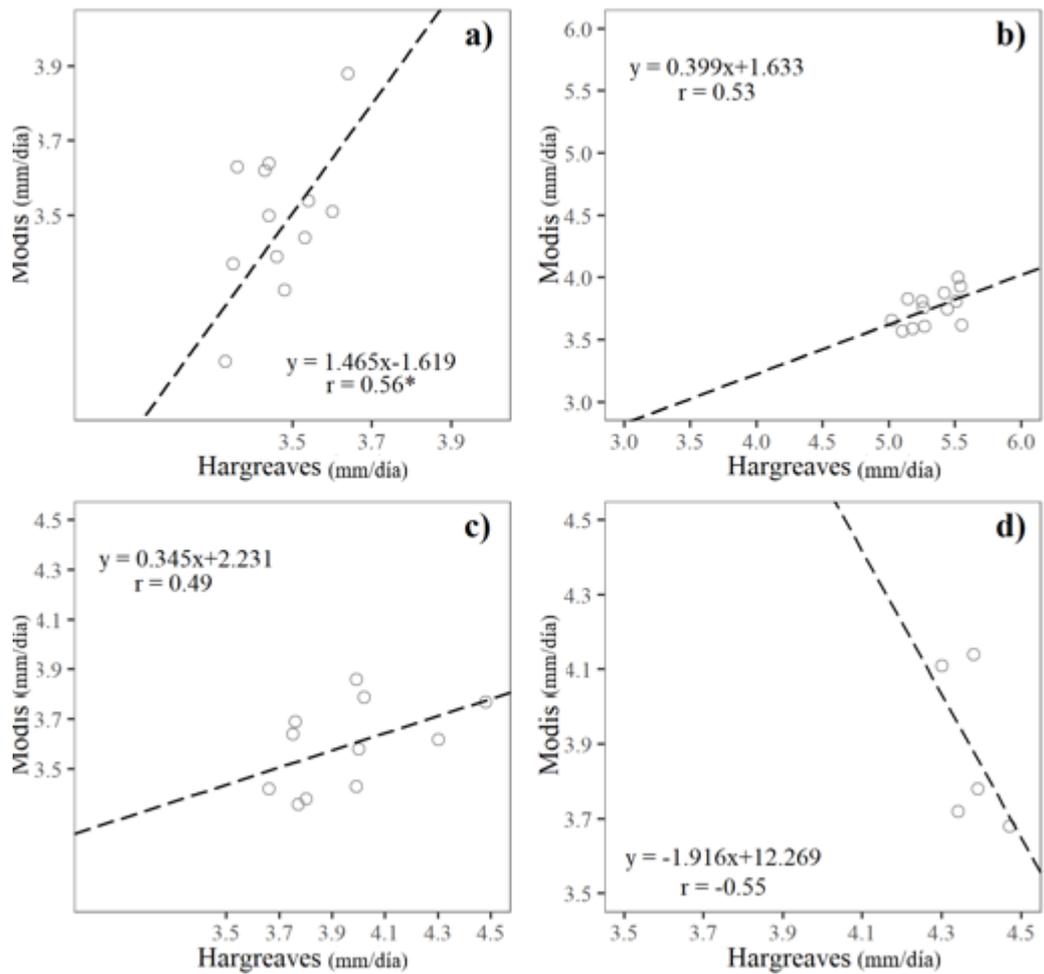
**Tabla 3.** Estadísticos de las estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador

CÓD	PROV	ALT	$r$	$p$ -valor	Bias	RMSE
M0033	Loja	2160	0.564	0.045	-0.33	0.204
M0143	Loja	1453	0.530	0.062	-29.45	1.575
M0147	Loja	1835	0.491	0.125	-9.15	0.421
M0148	Loja	1984	-0.014	0.965	40.64	1.352
M0151	Loja	2023	-0.319	0.486	-26.04	1.640
M0179	Loja	2042	0.071	0.929	-22.17	1.168

M0190	Zamora	830	-0.549	0.337	-11.20	0.543
M0292	El Oro	5	0.070	0.839	-23.05	1.084
M0142	Loja	2525	0.356	0.312	-4.66	0.224
M0482	El Oro	60	0.391	0.235	-13.66	0.806
M0145	Loja	1560	0.180	0.596	-14.67	0.744

En la **figura 12** se observan las correlaciones de 4 estaciones meteorológicas. La a) es la estación M0033 que presenta un coeficiente de correlación de Pearson positivo y significativa con un valor de 0.56, el p-valor del análisis de varianza es de 0.045; en consecuencia, hay una relación significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%. El valor de RMSE indica que la desviación estándar de la ETo es de 0.204 mm/día, también se obtiene un Bias o sesgo subestimado de -0.33. La b) es la estación M0143 presenta un coeficiente de correlación de Pearson positivo y significativa con un valor de 0.53, el p-valor del análisis de varianza es de 0.062; en consecuencia, hay una relación significativa entre las variables si se toma en cuenta un nivel de significancia del 90%. El valor de RMSE indica que la desviación estándar de la ETo es de 1.575 mm/día, también se obtiene un Bias o sesgo subestimado de -29.45.

La c) es la estación M0147 presenta un coeficiente de correlación de Pearson positivo y moderado con un valor de 0.491, el p-valor del análisis de varianza es de 0.125; en consecuencia, no hay relación significativa entre las variables. El valor de RMSE indica que la desviación estándar de la ETo es de 0.421 mm/día, también se obtiene un Bias o sesgo subestimado de -9.15. La d) es la estación M0190 presenta un coeficiente de correlación de Pearson negativo y significativo con un valor de -0.549, el p-valor del análisis de varianza es de 0.337; en consecuencia, no hay relación significativa entre las variables. El valor de RMSE indica que la desviación estándar de la ETo es de 0.421 mm/día, también se obtiene un Bias o sesgo subestimado de -9.15



**Figura 19.** Diagramas de dispersión entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, en a) 2001 al 2013 (M0033); b) 2001 al 2013 (M0143); c) 2001 al 2013 (M0147); d) 2001 al 2013 (M0190). Donde el \* indica la correlación significativa al 5%.

## 5. CONCLUSIONES

- Se extrajo y digitalizo los datos de 15 estaciones meteorológicas desde los anuarios de la página oficial del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) del Ecuador, de la zona sur del país que esta comprendido por las provincias del El Oro, Loja y Zamora Chinchipe. Donde se evaluó la calidad de los datos realizando la estadística descriptiva mediante el uso de gráficos de caja y sesgo, y la elaboración de mapas que permitan un mejor entendimiento del comportamiento de los datos por estación a escala mensual, en la serie temporal de 1990 a 2013. Que permitió caracterizar las variables que se usaron en el presente estudio.
- Una vez caracterizado y filtrado los datos de las 15 estaciones meteorológicas se utilizó la ecuación de Hargreaves (HG) para obtener valores de ETo de referencia, se utilizó este método porque solo requiere datos de temperatura (máxima-mínima-promedio) y radiación solar incidente, y las estaciones estudiadas carecen de diverso tipo de datos, siendo la temperatura el valor que se encontró en cada una de ellas. Además, el método es relativamente sencillo y con suficiente bibliografía que la respalda. Encontrando registros de mayor evapotranspiración en las zonas fronterizas de la provincia de EL Oro y la provincia de Loja.
- Se extrajo los valores de ETo de las imágenes satelitales de MODIS16a2 de forma anual en un periodo de 2001 a 2013 mediante el uso del paquete estadístico de Rstudio. Para poder evaluar la correlación y eficiencia entre la ETo calculada por la ecuación de Hargreaves y la ETo de productos MODIS16a2 a escala mensual, se utilizaron 11 de las 15 estaciones por el hecho de carecer de datos entre los años de 2001 2013. Al realizar la comparativa se pudo observar de forma general que existe una subestimación por parte de la ETo calculada con la ecuación de Hargreaves en los puntos donde se ubican las estaciones meteorológicas. Sin embargo, están dentro de rangos aceptables y puede servir como punto de partida para un estudio agrícola, forestal, etc.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda un mayor control y seguimiento en la toma de datos de las estaciones meteorológicas, ya que la ausencia de datos es la mayor limitante para la estimación de evapotranspiración mediante los diversos métodos alternativos (Blanney-Cridde, Thornthwaite, Penman-Monteith, Hargreaves, entre otros).
- Se recomienda que para mejorar las estimaciones de ETo se debe calibrar la ecuación de Hargreaves con los coeficientes propios para el lugar de estudio por medio de datos de un lisímetro, tanque evaporímetro u otras técnicas instrumentales.
- Se recomienda utilizar con mayor frecuencia las observaciones de evapotranspiración de las imágenes satelitales MODIS16a2, con imágenes en optimas condiciones que se encuentre libre la atmosfera de nubosidad, también permite la medición por encima de la cobertura vegetal y de diferentes espacios o superficies, permitiendo seguir el fenómeno durante todo el periodo de estudio, y de esta forma realizar un mejor análisis en la toma de decisiones a la hora de optimizar el recurso hídrico. Siendo el punto de partida para el balance hídrico y con ello la planificación de riego, entre otras actividades.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: United Nations FAO, Irrigation and Drainage Paper 56. In *FAO*.
- Allen, R., Trezza, R., & Tasumi, M. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1–16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Baille, A. (1999). *Principles and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments*. 187, 127–132.
- Brendel, A. S., Ferrelli, F., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. (2019). Assessment of the effectiveness of supervised and unsupervised methods: maximizing land-cover classification accuracy with spectral indices data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.014503>
- Castillo, J. (1997). *Descentralización del Estado y Desarrollo Fronterizo*.
- Chen, F., & Li, X. (2016). Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China. *Remote Sensing*, 8(6), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs8060472>
- Chuvieco, E. (1990). *TELEDETECCION, S.I.G. Y CAMBIO GLOBAL*.
- CVC, Pesca, S. D. A. A. Y., & CIAT. (2018). *Plan Integral De Cambio Climatico Para El Valle Del Cauca PICC*.
- Di Stefano, C., & Ferro, V. (1997). Estimation of Evapotranspiration by Hargreaves Formula and Remotely Sensed Data in Semi-arid Mediterranean Areas. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68(3), 189–199. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0166>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1976). Las necesidades de agua de los cultivos. *FAO*, Paper 24.
- Espinoza, R. (2018). *Universidad Nacional Agraria La Molina Escuela de Post Grado*.
- Fernández, S., Sánchez, J., Córdoba, A., & Largo, A. (2002). *Estadística descriptiva* (Esic Editorial (ed.)).
- Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M. F., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P. A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D. D.,

- Perret, J., Lagouarde, J., Waliser, D., Purdy, A. J., French, A., Schimel, D., ... Wood, E. F. (2017). *Water Resources Research*. 2618–2626. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>. Received
- Galvez, H., & Regalado, J. (2007). Características de las precipitaciones. la temperatura del aire y vientos en la costa ecuatoriana. *Acta Oceanográfica Del Pacífico*, 14(1), 1–6. <http://hdl.handle.net/1834/2364>
- Gao, Y., Long, D., & Li, Z. L. (2008). Estimation of daily actual evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in North China. *International Journal of Remote Sensing*, 29(11), 3295–3315. <https://doi.org/10.1080/01431160701469073>
- García, C., & Briones, G. (1997). Sistemas De Riego Por Aspersión Y Goteo. In *Editorial Trillas* (Primera ed, p. 264).
- Gavilán, P., Lorite, I. J., Tornero, S., & Berengena, J. (2006). Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. In *Agricultural Water Management*.
- George, H., & Zohrab, S. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Gontia, N., & Tiwari, K. (2010). Estimation of Crop Coefficient and Evapotranspiration of Wheat (*Triticum aestivum*) in an Irrigation Command Using Remote Sensing and GIS Prediction of Stream Inflow in a Forest Reservoir View project Estimation of Crop Coefficient and Evapotranspiration o. *Water Resour Manage*, 24, 1399–1414. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9505-3>
- González, A., & Hernández, B. A. (2000). *ESTIMACION DE LAS NECESIDADES HIDRICAS DEL TOMATE Estimation of Water Requirements of Tomato*.
- Gonzalez, S., & Ortiz, F. (2017). UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS SIG PARA EL ANÁLISIS ESPACIAL DE DATOS DE EXPLORACIÓN GEOLÓGICA EN EL PROYECTO MINERO SAN JOSE - B2GOLD CORP. In *Вестник Росздравнадзора* (Vol. 4).
- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53))
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., & Iguchi, T. (2014). The global precipitation measurement

- mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- Huaman, H. A. (2015). Estimación Espacial De La Evapotranspiración Real Usando Imágenes De Satélite Mediante El Algoritmo Sebal Caso: Irrigación Majes I - Arequipa. In *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3319>
- Inzunza, J. (2000). *Climatología y las estaciones*.
- Jensen, D., Hargreaves, G., Fellow, Temesgen, B., & Allen, R. G. (1997). Computation of ETo under Nonideal Conditions Advanced METRIC processing View project Regional water balance View project. *Article in Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1997\)123:5\(394\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:5(394))
- Jumah, A. (1995). *Lake Evaporation: A Model Study*. <https://digitalcommons.usu.edu/etd/4404>
- Karamirad, M., Omid, M., Alimardani, R., Mousazadeh, H., & Heidari, S. N. (2013). ANN based simulation and experimental verification of analytical four- and five-parameters models of PV modules. In *Simulation Modelling Practice and Theory*.
- Koen, H. (2020). *MODISTools: Interfaz con los servicios web “Subconjuntos de productos terrestres de MODIS.”*
- Lavado, W., Lhomme, J. P., Labat, D., Guyot, J. L., & Boulet, G. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO-56 Penman-Monteith) con limitados datos climáticos en la cuenca andina amazónica Peruana. *Revista Peruana Geoatmosférica*, 43(4), 31–43. [www.senamhi.gob.pe/5Crpga](http://www.senamhi.gob.pe/5Crpga)
- Manandhar, R., Odehi, I., & Ancevt, T. (2009). Improving the accuracy of land use and land cover classification of landsat data using post-classification enhancement. *Remote Sensing*, 1(3), 330–344. <https://doi.org/10.3390/rs1030330>
- Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C. M., & Basualdo, A. (2017). Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledeteccion*, 2017(48), 29–41. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.6743>
- Mather, P. M. (1990). Computers in geography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 14(1), 139–141. <https://doi.org/10.1177/030913339001400114>
- Melesse, A., Weng, Q., Thenkabail, P., & Senay, G. (2007). *Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modelling*.
- MODIS. (2021). *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*.

- Montoya, J. A. (1982). *Sensores remotos. Primera parte: principios generales percepción remota desde la atmósfera terrestre.*
- NASA. (2000). *Landsat 7 Gain Setting Strategy.*
- Oñate, F., Cajas, G., & Oñate, A. (2020). Evapotranspiración y cambio climático: un caso de estudio en el sur del Ecuador. *Evapotranspiration and Climate Change: A Case Study in Southern Ecuador*, 86–90.
- Orozco, I., Alvarado, M., López, J., & Ramírez, A. (2019). Evaluación del efecto de distintas aproximaciones de la radiación en la estimación de la evapotranspiración usando el modelo FAO Penman-Monteith. *Acta Universitaria*, 29, 1–15. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2481>
- Pielke, R. A. (1984). *Mesoscale Meteorological Modeling. Academic Press.*
- Popova, Z., & Pereira, M. (2006). Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. In *Irrigation and Drainage.*
- PREDESUR. (1998). *Plan de Desarrollo Regional del Sur. 1998-2003.*
- Quispe, J. (2015). *ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIANTE MÉTODOS DE PERCEPCIÓN REMOTA Y EMPIRICOS, EN LAS CUENCAS DE LA REGION TACNA.*
- Rendón, E., Macías, M., Villasís, Á., Keever, M., Miranda, G., & Novales, M. (2016). Estadística descriptiva. In *Rev Alerg Mex* (Vol. 63, Issue 4). <http://www.revistaalergia.mx>
- Roman, A., & Vargas, N. (2015). *Análisis de Imágenes Hiperespectrales. January.*
- Running, S., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2019). *User 's Guide NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm ( For Collection 6 ).* 1–38. <https://www.ntsug.umt.edu/project/modis/mod17.php>
- Salvador, M., & Gargallo, P. (2013). Análisis exploratoria de datos. *Análisis Exploratoria de Datos.* <https://doi.org/10.2307/j.ctvc5pc9g>
- Samani, Z. (2000). *Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data (Hargreaves-Samani equation).*
- Schubert, S., Rood, R., & Pfaendtner, J. (1993). Un conjunto de datos asimilado para las ciencias de la tierra aplicaciones. In *Boletín de la Sociedad Estadounidense de Meteorología* (pp. 2331–2342).
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Tuck, S. L., Phillips, H. R. P., Hintzen, R. E., Scharlemann, J. P. W., Purvis, A., &

- Hudson, L. N. (2014). MODISTools – downloading and processing MODIS remotely sensed data in R. *Ecology and Evolution*, 4(24), 4658–4668. <https://doi.org/10.1002/ece3.1273>
- Urdiales, D., & Célleri, R. (2018). Pronóstico de la ocurrencia de precipitación diaria en un gradiente altitudinal en el Sur del Ecuador mediante un generador climático. *Enfoque UTE*, 9(3), 29–41. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n3.209>
- Villegas, H. (2008). *Introducción a la Percepción Remota y sus Aplicaciones Geológicas*.
- Viteri, F., & Guerrero, A. (2013). *DEFINICIÓN DEL AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO EN BASE A LAS VARIABLES TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO, DE TRES REGIONES NATURALES DEL ECUADOR: COSTA, SIERRA Y ORIENTE*.
- Wang, K., & Dickinson, R. E. (2012). A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50(2). <https://doi.org/10.1029/2011RG000373>
- Wayne, D., & Vilamizar, J. (1988). *Estadística con aplicaciones a las ciencias sociales y a la educación*. (p. 504).
- Yang, Y., Long, D., Guan, H., Liang, W., Simmons, C., & Batelaan, O. (2015). Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE-12 campaign: Revisit of model physics. *Journal of the American Water Resources Association*, 5(3), 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>

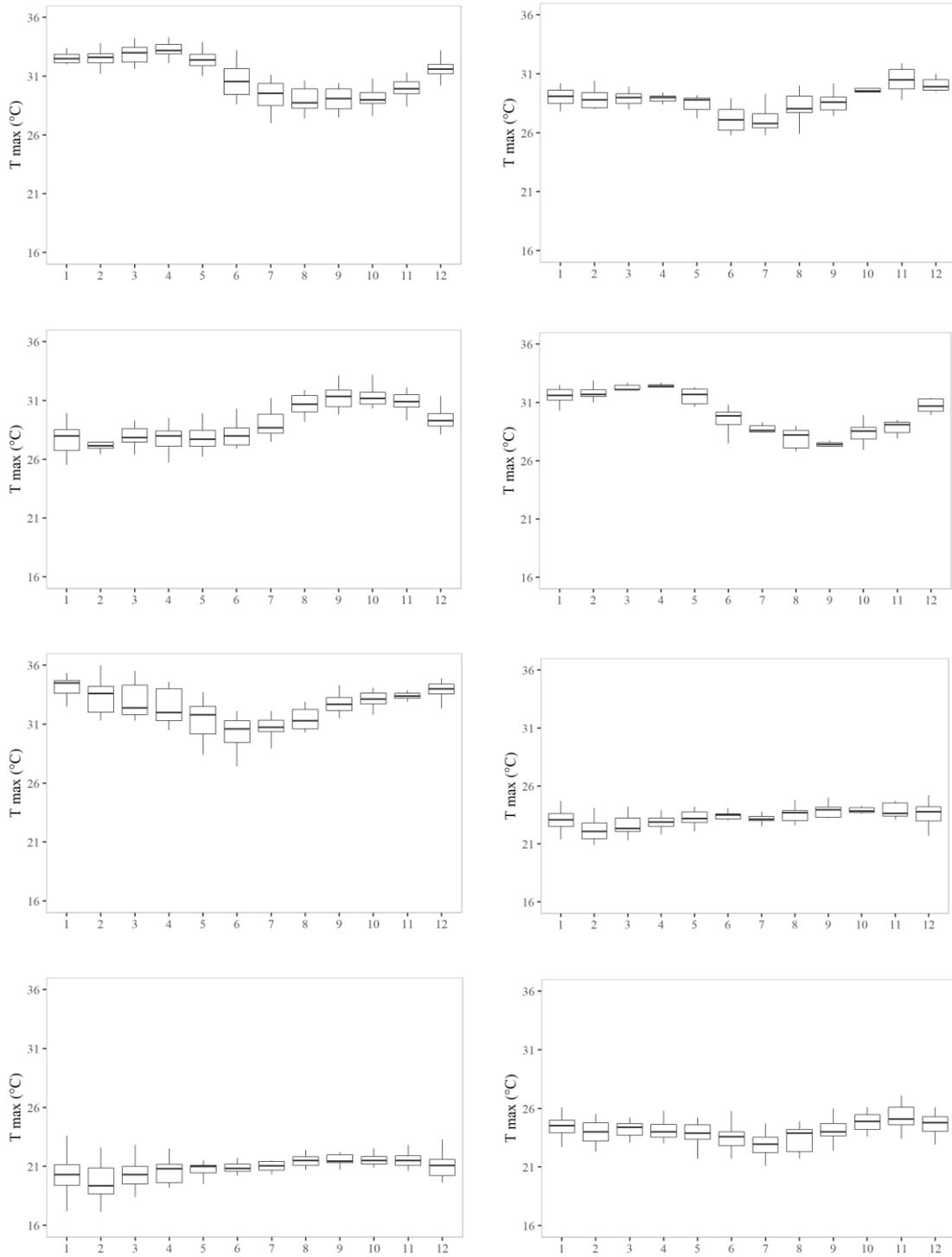
## 8. ANEXOS

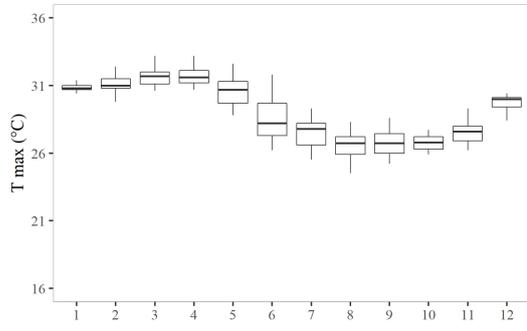
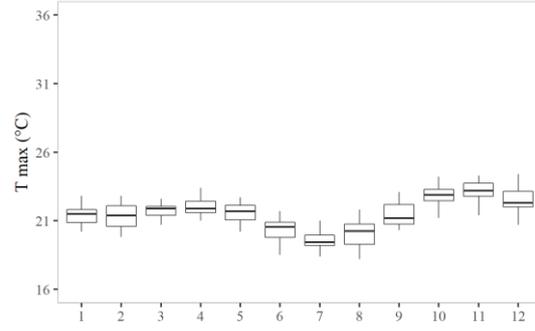
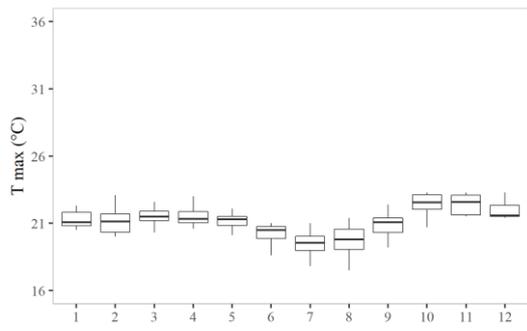
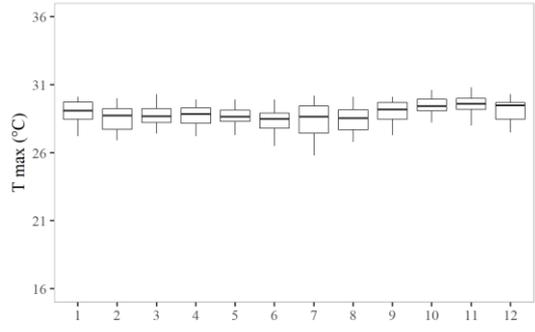
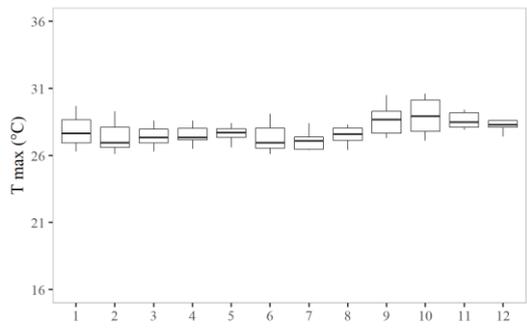
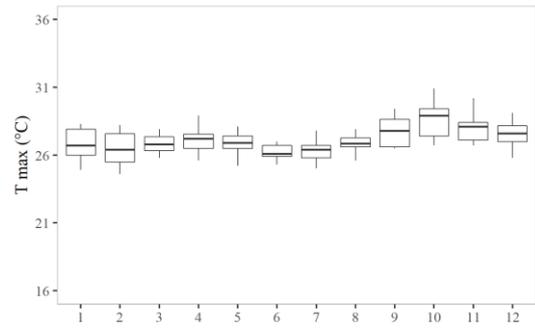
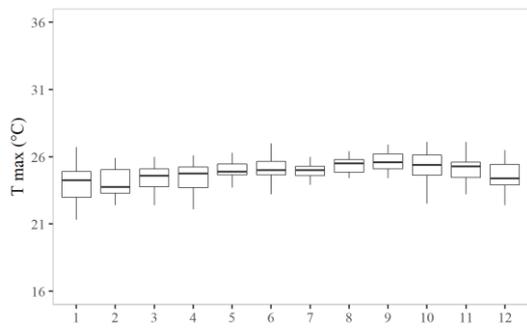
**Anexo 1.** Tabla de Hargreaves para calculo ra

LAT	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	15	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8
2	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
4	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
6	15.8	16	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14	15	15.7	15.8	15.7
8	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	145.8	16	16
10	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
12	16.6	16.3	15.4	14	12.5	11.6	12	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
14	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
16	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
18	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
20	17.3	16.5	15	13	11	10	10.4	12	13.9	15.8	17	17.4
22	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10	11.6	13.7	15.7	17	17.5
24	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
26	17.6	16.4	14.4	12	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
28	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13	15.4	17.2	17.9
30	17.8	16.4	14	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
32	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
34	17.8	16.1	13.5	10.5	8	6.8	7.2	9.2	12	14.9	17.1	18.2
36	17.9	16	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.8	11.7	14.6	17	18.2
38	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17	18.3
40	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11	14.2	16.9	18.3
42	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14	16.8	18.3
44	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
46	17.7	15.4	11.5	7.9	5.2	4	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
48	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4	6	9.3	13.2	16.6	18.2
50	17.5	14.7	10.9	7	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2

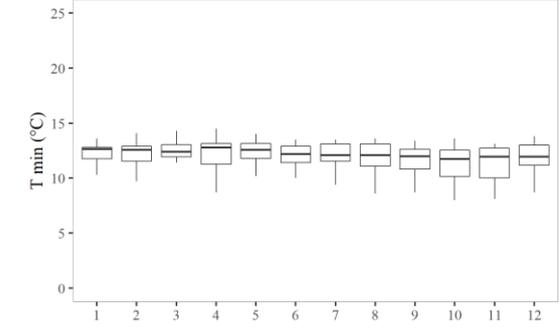
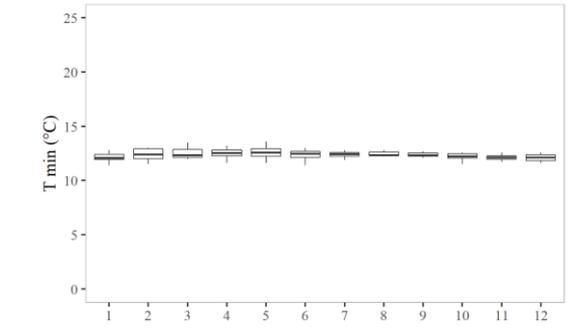
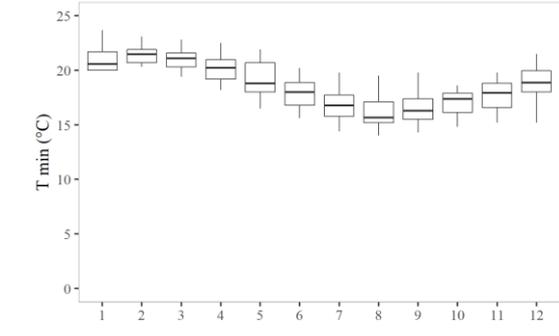
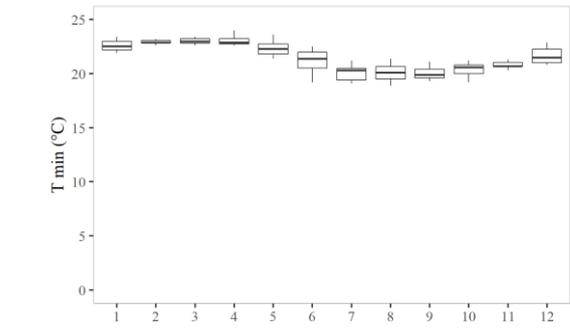
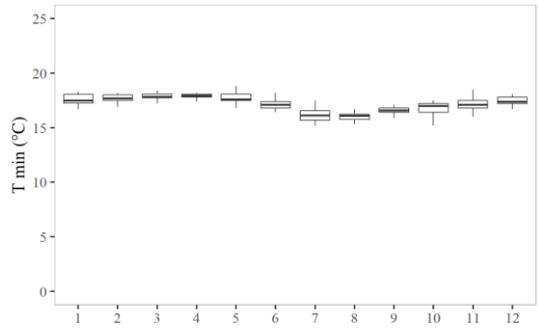
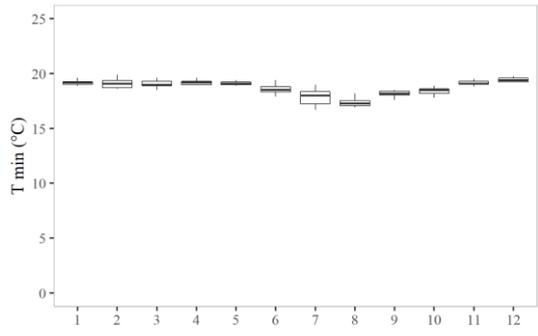
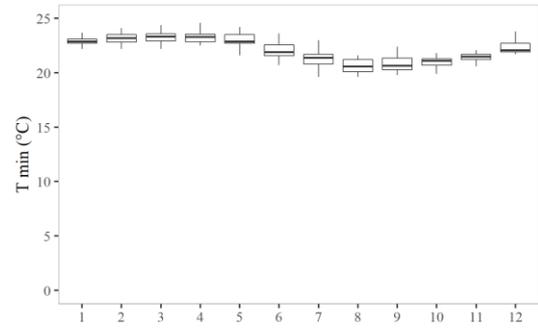
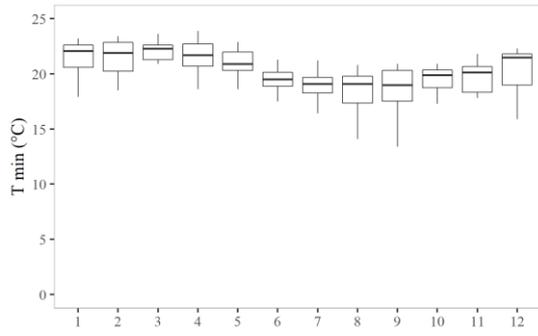
## Anexo 2. Figuras de caja y sesgo de temperatura máxima, mínima y promedio

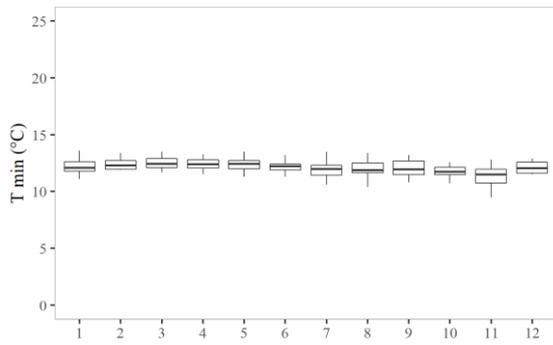
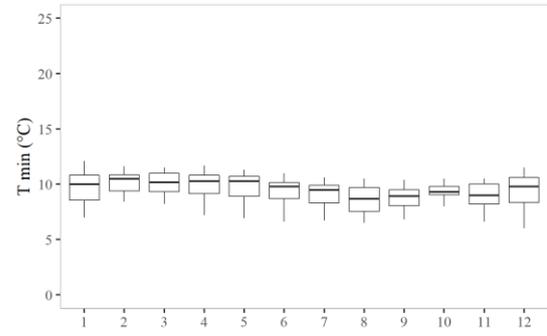
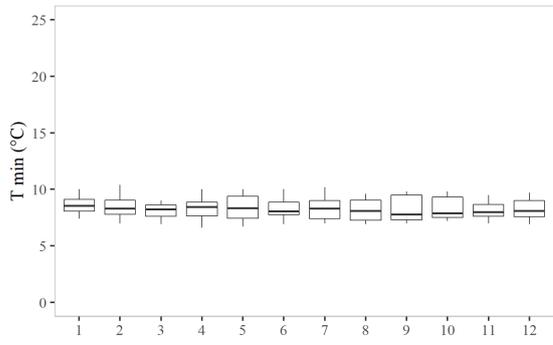
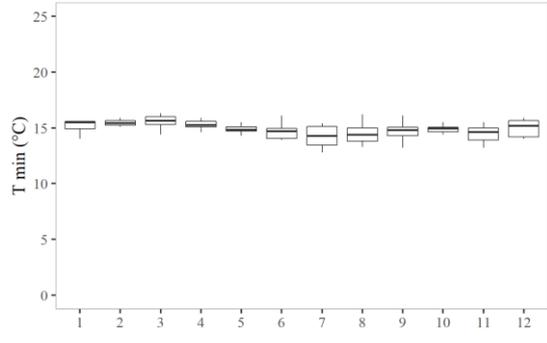
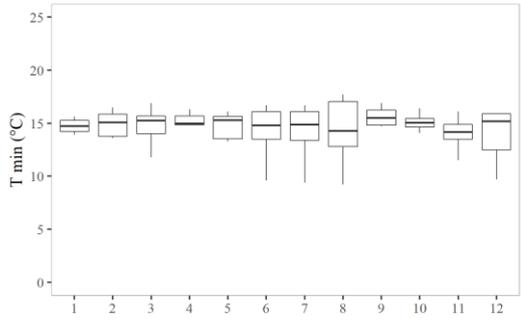
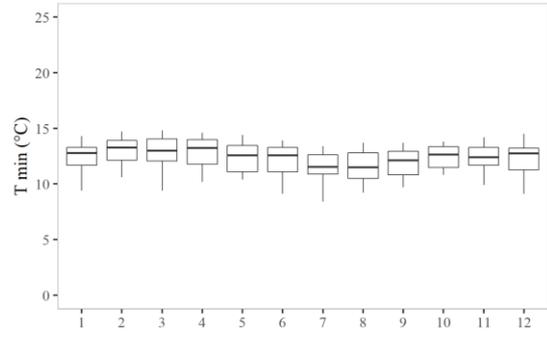
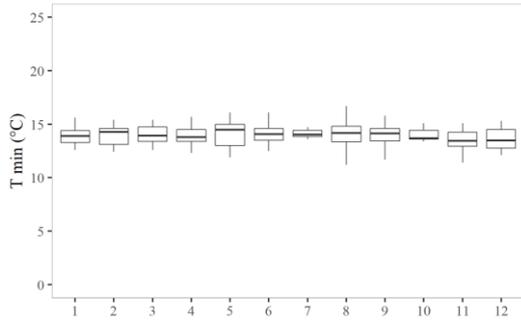
### Máxima



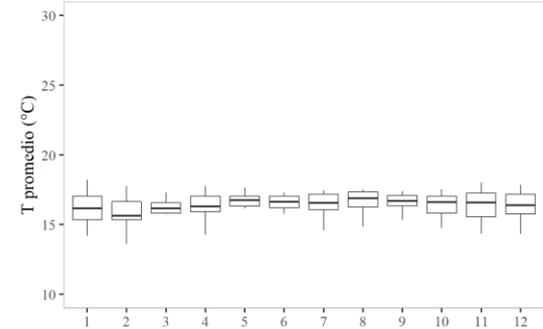
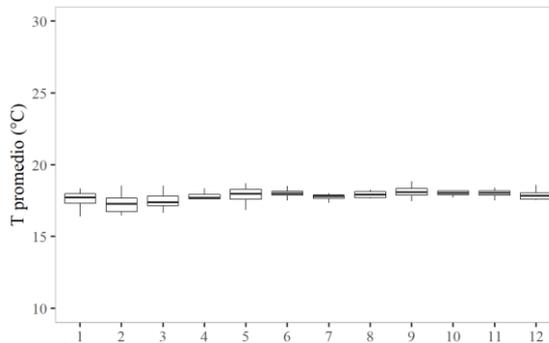
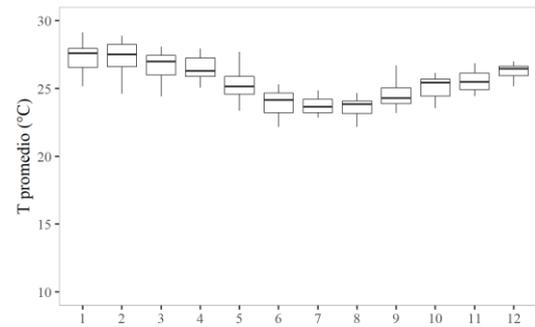
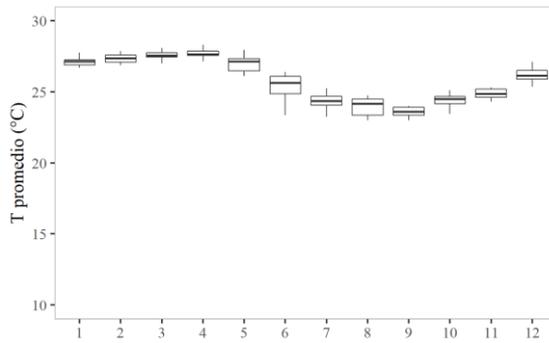
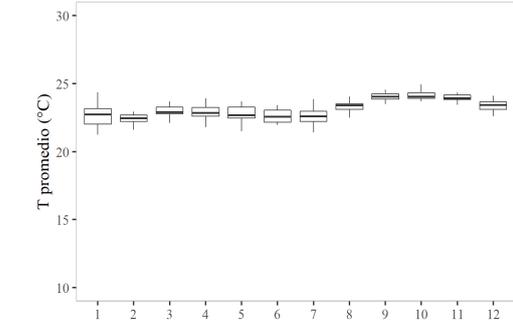
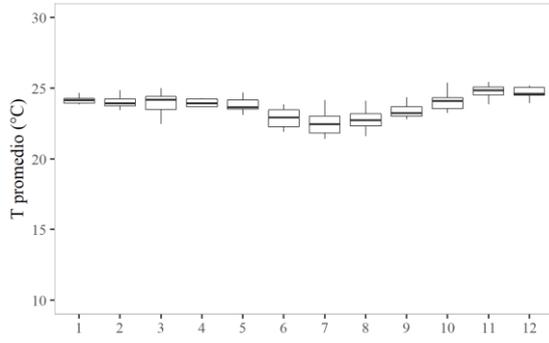
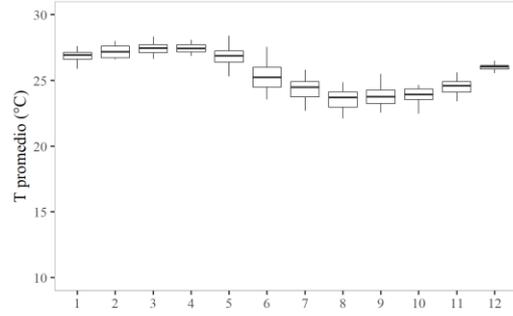
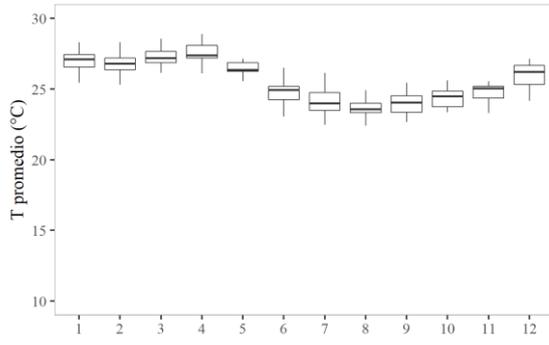


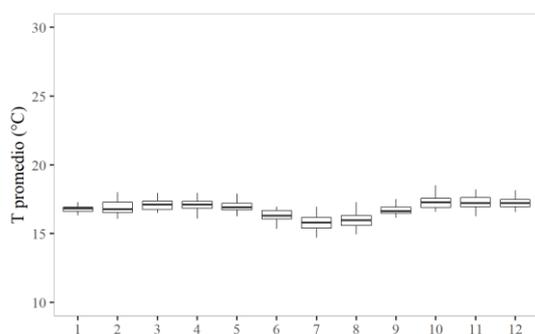
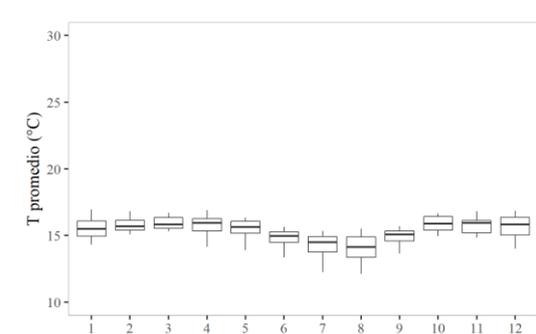
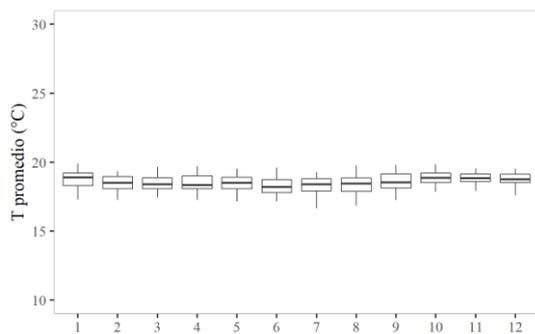
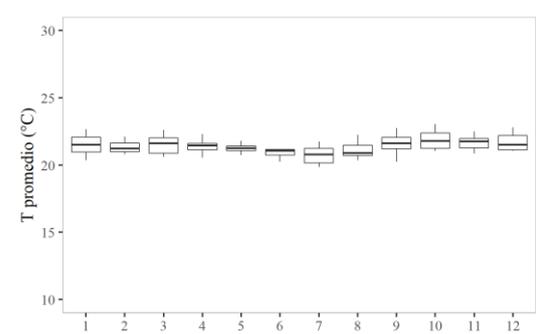
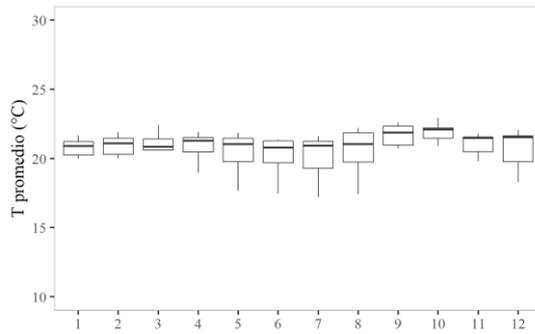
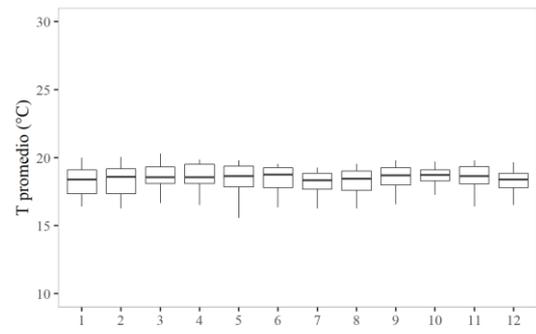
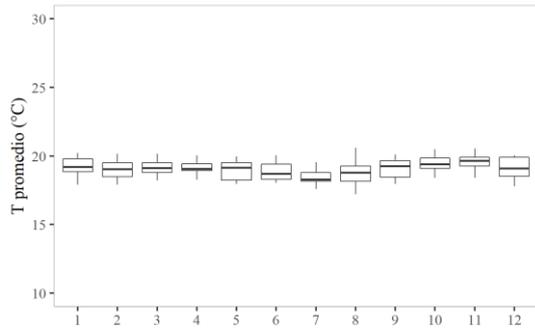
# Mínima





# Promedio





**Anexo 3.** Diagramas de dispersión entre la ETo calculada por Hargreaves y la ETo de productos MOD16a2 a escala mensual, para la serie temporal 2001 a 2013 del resto de estaciones meteorológicas de la zona sur del Ecuador.

