

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-02-04

Artículos

Modelo empírico de evapotranspiración dependiente de la temperatura y radiación solar en la República del Ecuador

Evapotranspiration empirical model dependent on temperature and solar radiation in the Republic of Ecuador

Javier Ezcequiel Colimba-Limaico¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9924-8628>

Lilian Marcela Chuquín-Farinango², ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6746-5599>

Ángel del Vigo³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8158-2222>

¹MJ Producción Agropecuaria Sostenible, Natabuela, República del Ecuador, mjpas241123@gmail.com

²MJ Producción Agropecuaria Sostenible, Natabuela, República del Ecuador, lilianachuquin@hotmail.com

³Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, a.delvigo@upm.es

Autor para correspondencia: Ángel del Vigo, a.delvigo@upm.es



Resumen

La evapotranspiración tiene una importancia sustancial en el proceso de filtración de agua en el suelo y su posterior absorción por parte de la raíz de la planta; consecuentemente, es un factor importante que determina la cantidad de agua disponible para los cultivos. En este artículo se analizan resultados de evapotranspiración recogidos en un invernadero en el sitio de Natabuela, provincia de Imbabura (República del Ecuador), a través de un tanque evaporímetro. Con estos datos experimentales se ha estudiado la validez de cinco modelos empíricos de referencia para el cálculo de la evapotranspiración que dependen, exclusivamente, de la temperatura y la radiación solar. Se concluye que existe una buena correlación (coeficiente de Pearson de alrededor del 80 %) entre los datos observados y la predicción teórica de estos cinco modelos, siendo el modelo de Irmak, Irmak, Allen y Jones (2003), el que mejor se ajusta a los datos observados en esta región de Sudamérica; sin embargo, se ha comprobado que todos estos modelos sobreestiman la evaporación observada. Además, según los datos recogidos, se ha concluido que los parámetros radiación solar y temperatura media diaria son los que más influyen sobre la evaporación observada en dicha región del Ecuador. En consecuencia, se ha inferido un nuevo modelo empírico para la evapotranspiración en esta región de Sudamérica, que depende linealmente de la temperatura media diaria y la radiación solar. Este modelo empírico será implementado próximamente en los modelos numéricos de simulación como el Del Vigo-García, Juana-Sirgado y Rodríguez-Sinobas (2022a), utilizado para el diseño y automatización de los sistemas de riego en la región.

Palabras clave: evapotranspiración, modelo matemático, riego, radiación solar, temperatura, Ecuador.

Abstract

Evapotranspiration is a phenomenon highly involved for water infiltration and redistribution among the soil. It is also an important factor that determines the amount of water available for crops. In this article, evaporation data collected by evaporimeter tank in a greenhouse at Imbabura province (north of Ecuador) are presented. Based on these experimental results, the validity of five evapotranspiration reference models that depends exclusively on temperature and solar radiation has been tested for this area. It was seen that, there is a good correlation (Pearson-coefficient around 80 %) between the observed data and the prediction of these five models, being the Irmak, Irmak, Allen and Jones model (2003) what suits better with the observed data for this region. However, all these models overestimate the observed evaporation. Furthermore, it was found that the evaporation observed in this area are highly affected by solar radiation and average daily temperature. Consequently, a new empirical model has been inferred for evapotranspiration in this region of South America that depends linearly on mean daily temperature and solar radiation. This equation will be next implemented in the numerical model, Del Vigo-García, Juana-Sirgado and Rodríguez-Sinobas (2022a), that is being used to develop automation and design of trickle irrigation system in this area.

Keywords: Evapotranspiration, mathematical models, irrigation, solar radiation, temperature, Ecuador.

Recibido: 17/10/2024

Aceptado: 14/06/2025

Publicado *ahead of print*: 27/06/2025

Versión final: 01/03/2026

Introducción

Aunque el cultivo en invernadero ha incrementado su importancia en las últimas décadas en la República del Ecuador, la escasez de agua para el regadío y su deficiente gestión por parte de los agricultores son factores limitantes de esta actividad. Por ello, es necesario utilizar los modelos existentes para optimizar la gestión de agua y el diseño de los riegos de esta zona. Como los agricultores aún no disponen de una metodología adecuada para el suministro del requerimiento hídrico a los cultivos es necesario aplicar los modelos empíricos y teóricos de base física que describen la filtración de agua en suelos, con el objeto de optimizar el suministro de agua y el diseño de los riegos en esta zona, a la vez que seguir avanzando en la mejora y fiabilidad de dichos modelos descriptivos.

En el norte de la República del Ecuador, y en particular en la provincia de Imbabura, desde hace algunos años está aumentando el cultivo bajo invernadero, sobre todo para la producción de rosas y planta del tomate. Sin embargo, uno de los principales problemas a los que se enfrentan los agricultores es la baja disponibilidad de agua para el riego (Colimba-Limaico, Zubelzu-Minguez, & Rodríguez-Sinobas, 2022a). En la República del Ecuador ya existe una importante falta de agua, y se ha estimado que para el 2035 este déficit llegará al 46.3 % de la demanda (Senagua, 2019). Por otro lado, no se está haciendo un uso optimizado

de este limitado recurso, pues los agricultores desconocen el requerimiento hídrico de los cultivos en función de los factores ambientales, lo que impide realizar una programación adecuada del riego. Autores como Zapatta y Gasselin (2005) han apuntado que en la República del Ecuador existe un problema de escasez de agua que se ve agravado por el bajo nivel de tecnificación en los cultivos. Una buena programación del riego en esta zona permitiría ahorrar agua, energía y recursos en mano de obra, aumentando el rendimiento y mejorando la calidad de las cosechas.

El estudio de variables relacionadas con el contenido de agua en el suelo es un trabajo que requiere mano de obra calificada, tiempo y material adecuado. Estos recursos no son disponibles en zonas agrícolas con limitaciones económicas, como puede ser la provincia de Imbabura. En tal contexto aflora el interés por los modelos matemáticos (empíricos, analíticos y numéricos) para el estudio y la predicción del contenido de humedad en el suelo de los cultivos y el diseño de los riegos. Aplicando los modelos empíricos y teóricos de base física que describen la filtración de agua en suelos, como los de Schwartzman y Zur (1986); Šimůnek, van Genuchten y Šejna (2006); Del Vigo, Zubelzu y Juana (2019), o Del Vigo (2023), se puede optimizar el suministro de agua y aumentar la eficacia en el diseño de los riegos utilizando pocos recursos. En este sentido, los modelos de simulación son primordiales a la hora de tomar decisiones en agricultura, ya que permiten cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos y el desarrollo de estos, sin alterar las condiciones del sistema.

La programación de riego determina la cantidad de agua que hay que aplicar a un cultivo y la frecuencia de aplicación de riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo, y así reducir o

evitar los efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo. Una buena programación de riego permite ahorrar agua, energía y recursos en mano de obra; también reduce el estrés hídrico, aumenta el rendimiento y mejora la calidad de las cosechas, lo que redundará en un incremento en la rentabilidad del productor (Catalán, Sánchez, Villa, Inzunza, & Mendoza, 2007). En trabajos anteriores se presentó un primer estudio basado en simulaciones de flujo de agua en el suelo a partir de un modelo numérico de base física (Del Vigo, Zubelzu, & Juana, 2020), con objeto de optimizar la programación de riego en plantaciones de tomate bajo invernadero en esta zona del Ecuador. El modelo tiene en cuenta la absorción del flujo de agua por parte de la raíz de la planta, aunque no considera la evapotranspiración. Se puede consultar un resumen de los resultados obtenidos en la bibliografía (Del Vigo, Colimba, Juana, & Rodríguez-Sinobas, 2022b).

La evapotranspiración es un parámetro que afecta de forma sustancial al flujo de agua en el suelo y a la cantidad de agua disponible para los cultivos, por lo que es de gran interés conocer este dato para realizar una correcta programación del riego. La evapotranspiración de referencia (*ET_o*) puede ser medida a partir de la evaporación de una superficie libre de agua (tanque evaporímetro), estando en relación con parámetros como la radiación solar (irradiancia), temperatura del aire, humedad y velocidad del viento, entre otros. Por otro lado, existen modelos empíricos de evapotranspiración que con base en estos datos climáticos (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006; Alexandris, Stricevic, & Petkovic, 2008; Azua-Barrón, Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña, & Quevedo-Nolasco, 2020) permiten estimar la *ET_o* en una zona determinada. Una adecuada medida de la *ET_o* en la región de Imbabura

puede mejorar la predicción de los modelos físicos de simulación utilizados para optimizar la programación del riego en esta zona del ecuador.

El empleo del tanque evaporímetro es una metodología ampliamente usada para estimar la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 2006). Para el estudio experimental que se presenta en este artículo se ha dispuesto de un tanque evaporímetro de elaboración artesanal, el cual fue calibrado y validado en estudios previos (Sivisaca, 2013). En este artículo se presentan datos de evaporación recogidos con este dispositivo en un invernadero durante el año 2021, en el sitio de Natabuela, provincia de Imbabura (República del Ecuador).

En trabajos anteriores (Del Vigo *et al.*, 2022b) se presentó un primer estudio, basado en simulaciones de flujo de agua en el suelo a partir de un modelo numérico de base física y de elaboración propia (Del Vigo, 2020), a fin de optimizar la programación de riego en plantaciones de tomate en invernadero en esta zona del ecuador. El modelo tiene en cuenta la absorción del flujo de agua por parte de la raíz de la planta (Del Vigo *et al.*, 2022a), aunque no considera la evapotranspiración. El objetivo general del trabajo que se presenta en este artículo es el estudio de la evapotranspiración en esta zona de la República del Ecuador que servirá para implementar esta característica del sistema al modelo numérico de simulación existente; ello permitirá optimizar la capacidad predictiva del modelo, que está siendo utilizado para mejorar la eficiencia del riego en dicha zona de Sudamérica.

Los dos objetivos específicos de este trabajo se enumeran a continuación. En primer lugar, se pretende analizar entre un grupo de modelos de evapotranspiración conocidos de la bibliografía cuál es el más adecuado para la predicción de dicho fenómeno en esta zona del ecuador. En este sentido, se han recogido datos de radiación solar, temperatura

media, temperatura máxima y temperatura mínima diaria. A partir de tales datos experimentales se ha estudiado la validez de cinco modelos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración (Jensen & Haise, 1963; Stephens, 1965; Hargreaves & Samani, 1985; Abtew, 1996; Irmak *et al.*, 2003) de la bibliografía. Se ha observado que estos cinco modelos tienen un alto grado de correlación con los datos de evapotranspiración obtenidos en la zona, aunque todos ellos tienden a sobrestimar la *ET_o* obtenida. Se ha comprobado también que entre los parámetros que se han medido, la radiación solar y temperatura media diaria son los dos factores que más influencia tienen sobre la evaporación observada. El segundo objetivo específico ha sido inferir a través de los datos experimentales obtenidos en este trabajo un nuevo modelo empírico para la evapotranspiración. El modelo que se ha inferido depende exclusivamente de la radiación solar y la temperatura media diaria, pues como ya se ha mencionado son los dos factores climáticos más influyentes en la evapotranspiración para esta zona de Sudamérica.

Materiales y métodos

Metodología experimental

Los experimentos se realizaron en un invernadero metálico con cubierta de plástico ubicado en el sitio de Natabuela, del cantón Antonio Ante, provincia de Imbabura (República del Ecuador). El invernadero tiene una cubierta curva de 24.5 m de largo, 14.5 m de ancho y una superficie total de 355 m². Su altura bajo canal es de 3.6 m y su zenit es de 4.9 m. El invernadero cuenta con dos cortinas laterales que sirven para su ventilación y control de la temperatura. El invernadero se encuentra

ubicado sobre las coordenadas 0° 20' 16.67" N, 78° 12' 0.65" O, a una altura de 2 445 metros sobre el nivel del mar (m.n.m.m.). La zona tiene una precipitación media anual de entre 630 y 1 000 mm/año. La temperatura promedio oscila entre 8 °C (mínima, en la temporada húmeda) y 36 °C (máxima en época estival). En general, el sitio de Natabuela tiene seis meses secos (GAD Natabuela, 2016), y una estacionalidad que comprende el verano desde mayo hasta septiembre y el invierno de octubre a abril.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se ha determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$ET_o = K_p \cdot E_v \quad (1)$$

Donde:

ET_o = unidades de mm/día

K_p = parámetro adimensional dependiente del tanque evaporímetro

E_v = evaporación medida a través del tanque (mm/día)

La medida de E_v se realizó con una cubeta de evaporación plástica de 20 l de capacidad, calibrada con un tanque de evaporación clase-A (Sivisaca, 2013). La cubeta cilíndrica, que se encuentra en la parte central del invernadero, tiene 0.31 m de diámetro y 0.31 m de profundidad. La medida de E_v se realizó diariamente a las 7:00 a.m. (hora local). El coeficiente del tanque evaporímetro se consideró igual a la unidad ($K_p = 1$), siguiendo el criterio de Blanco y Folegatti (2003), y Macías (2009). Por lo que la Ecuación (1) se puede simplificar del siguiente modo: $ET_o = E_v$.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es un parámetro relativo a un cultivo de referencia (pasto o alfalfa) bajo unas condiciones determinadas que se pueden consultar en la bibliografía (Allen *et al.*, 2006; Dingman, 2015). Para ajustar este parámetro a la evapotranspiración de cualquier otro cultivo (ET_c), es necesario introducir un parámetro adimensional conocido como coeficiente de cultivo (K_c) y que se estima experimentalmente en cada plantación. Este parámetro depende del tipo de cultivo, pero también de su etapa de crecimiento o desarrollo, y de las características del suelo. Para el caso particular de la planta del tomate, y dependiendo de su etapa de desarrollo, Allen *et al.* (2006) han propuesto un valor del coeficiente de cultivo en el intervalo $K_c = (0.6, 1.15)$. En particular, en la República del Ecuador se han desarrollado algunos estudios independientes para determinar el coeficiente K_c en cultivos de la planta del tomate, por ejemplo, Hidalgo (2019), donde se han encontrado valores para este coeficiente que varían dentro del intervalo $K_c = (0.5, 1.21)$. En este sentido, y por razones de simplificación, se propone utilizar para los cultivos de tomate en la República del Ecuador la aproximación $K_c \cong 1$, lo que implica finalmente asumir que $ET_o \cong ET_c$.

Las ecuaciones empíricas que se han analizado en este artículo describen la evapotranspiración de referencia (ET_o) en función de la temperatura media diaria (T_m), la temperatura máxima diaria (T_{max}), la temperatura mínima diaria (T_{min}) y la radiación solar (R_s). Para medir la temperatura dentro del invernadero se utilizó un higró-termómetro digital (Boeco, BOE 327, Alemania), y para medir la radiación solar se utilizó un medidor de irradiancia solar portátil (SM206-SOLAR, China). La temperatura y radiación solar se midieron cada hora, desde las 6:00 a.

m. hasta las 6:00 p. m. (hora local). La Figura 1 muestra los dispositivos utilizados y, en particular, la cubeta de evaporación.

(a)

(b)

(c)



Figura 1. Dispositivos experimentales utilizados en este trabajo: (a) estación meteorológica, (b) piranómetro y (c) cubeta de evaporación calibrada (Sivisaca, 2013).

En total se tomaron medidas de todos estos parámetros correspondientes a 268 días desde febrero hasta diciembre del año 2021. Los días en los que se obtuvieron los datos se repartieron de forma equitativa a lo largo de los 11 meses de observación. De este modo, se obtuvieron datos de forma balanceada con respecto a las dos estaciones propias de este lugar (verano e invierno).

Ecuaciones empíricas contrastadas

La irradiancia o radiación solar (R_s) se mide en W/m^2 . En el uso de ecuaciones empíricas que describen la evapotranspiración en función de la radiación solar es frecuente convertir esta magnitud en unidades de evapotranspiración equivalente (mm/día), a través de un factor de conversión que combina el calor latente de vaporización del agua a $20\text{ }^\circ\text{C}$ ($L_v = 2.45\text{ MJ/kg}$) y su densidad a esta misma temperatura ($\rho_{\text{agua}} = 998\text{ kg/m}^3$). En este contexto, la constante solar (irradiancia media anual sobre la esfera terrestre fuera de la atmósfera), que es igual a $I = 1\,361\text{ W/m}^2$, se transforma del siguiente modo:

$$\frac{I}{L_v \rho_v} = 5.55 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} = 47.95 \text{ mm/día} \quad (2)$$

Lo que supone una evaporación máxima en condiciones de irradiancia (I) para un trozo de terreno que estuviera sometido a estas condiciones de radiación durante 24 horas al día. En la práctica, la evaporación es muy inferior, pues la radiación solar está fuertemente atenuada por la atmósfera en función de las condiciones climatológicas y también por el ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre la superficie terrestre; esto último depende de la latitud y hora del día en función de la rotación terrestre; se debe tener en cuenta, además, que una gran parte de las horas del día no hay radiación, ya que es de noche.

Por lo tanto, se puede considerar el siguiente factor de conversión entre unidades de radiación solar y radiación equivalente a evapotranspiración: $1\text{ W/m}^2 \approx 0.0352\text{ mm/día}$. Se debe recalcar que esta

relación es de equivalencia y no de igualdad, pues se trata de dos magnitudes de distinta dimensión.

La Tabla 1 resume los modelos empíricos que se han comparado con los valores de evapotranspiración obtenidos experimentalmente. Los valores de temperatura media, mínima y máxima (T_m , $T_{\min}$, $T_{\max}$) están expresados en las siguientes ecuaciones en °C; mientras que la evapotranspiración, así como la radiación solar equivalente (ET_o , R_s), se han dado en mm/día para todos esos modelos.

Tabla 1. Modelos empíricos contrastados en este artículo. En la tercera columna se cita la referencia en la que se ha consultado el modelo.

Modelo	Ecuación	Referencia
Jensen y Haise (1963)	$ET_o = R_s(0.0252T_m + 0.078)$	Jensen y Haise (1963)
Stephens (1965)	$ET_o = R_s(0.0158T_m + 0.09)$	Azua-Barron <i>et al.</i> (2020)
Hargreaves y Samani (1985)	$ET_o = R_s \cdot 0.0023 \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} \cdot (T_m + 17.8)$	Alexandris <i>et al.</i> (2008)
Abtew (1996)	$ET_o = 0.01786 \cdot R_s \cdot T_{\max}$	Azua-Barron <i>et al.</i> (2020)
Irmak <i>et al.</i> (2003)	$ET_o = -0.611 + 0.149 \cdot (2.451) \cdot R_s + 0.079 \cdot \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$	Irmak <i>et al.</i> (2003)

Resultados

Evapotranspiración experimental frente a los modelos empíricos existentes

La Figura 2 representa el ajuste obtenido entre los datos experimentales ($n = 268$) y cada uno de los cinco modelos empíricos mencionados en el capítulo anterior siguiendo el esquema:

$$Y = mX \quad (3)$$

Tal que Y es el valor experimental obtenido en tanque evaporímetro para la ET_o (mm/día), y siendo X la predicción que arrojan cada uno de los cinco modelos para la ET_o (mm/día) en función de las variables (temperatura y radiación solar) medidas en cada caso. Un análisis preliminar de estos resultados basado en este procedimiento se puede encontrar en la bibliografía (Colimba-Limaico, Del Vigo, Chuquín-Farinango, & Rodríguez-Sinobas, 2022b).

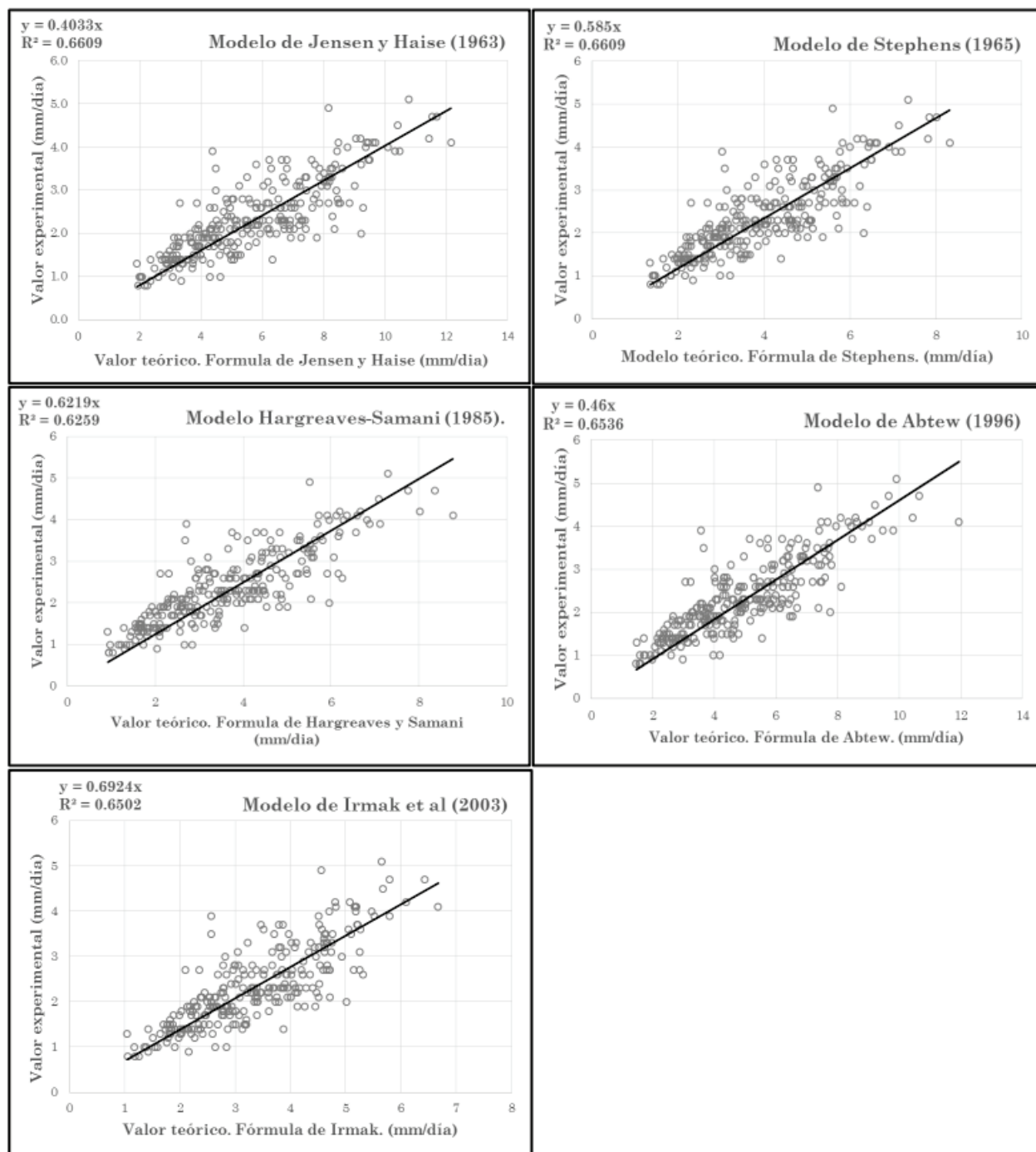


Figura 2. Contraste experimental de los cinco modelos empíricos. Se representa, en el eje-Y, el valor medido para la ETo (mm/día), y en el eje-X, la predicción para la ETo (mm/día) de cada uno de los cinco modelos empíricos contrastados.

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos y la bondad del ajuste en función del coeficiente de correlación de Pearson. Se observa un ajuste aceptable en cada uno de los cinco casos, con un coeficiente de correlación en torno a $r \cong 0.80$ para todos ellos.

Tabla 2. Resultados para un ajuste $Y = mX$. Coeficiente de correlación entre los modelos empíricos y los datos experimentales.

	Jensen y Haise (1963)	Stephens (1965)	Hargreaves y Samani (1985)	Abtew (1996)	Irmak et al. (2003)
Línea de tendencia	$y = 0.40x$	$y = 0.58x$	$y = 0.62x$	$y = 0.46x$	$y = 0.65x$
Coeficiente- r	0.8130	0.8130	0.7911	0.8084	0.8063

En la Tabla 3 se muestra el resultado de un ajuste para los cinco modelos sobre una línea de tendencia con ordenada en el origen ($Y = mX + b$). Obviamente, al introducir un segundo parámetro en la función de aproximación, el coeficiente de correlación aumenta. A pesar de ello, hay que tener en cuenta que en una comparación adecuada de los datos experimentales (variable- Y) con los modelos empíricos (variable- X), la ordenada en el origen debería ser nula ($b = 0$), ya que no debería existir un valor para la ET_o experimental cuando los modelos empíricos contrastados predicen un valor de evaporación nulo. Como además el incremento del coeficiente de correlación al introducir la ordenada en el origen es muy pequeño (entre 1 y 4 %), se concluye que la aproximación inferida inicialmente a través del esquema $Y = mX$ es adecuada.

Tabla 3. Resultados para un ajuste $Y = mX + b$ entre los datos observados (eje- Y) y los cinco modelos de referencia (eje- X). Se muestra el coeficiente de correlación en cada caso.

	Jensen y Haise (1963)	Stephens (1965)	Hargreaves y Samani (1985)	Abtew (1996)	Irmak et al. (2003)
Línea de tendencia	$y = 0.34x + 0.41$	$y = 0.50x + 0.38$	$y = 0.48x + 0.62$	$y = 0.37x + 0.51$	$y = 0.63x + 0.23$
Coeficiente- r	0.8292	0.8269	0.8389	0.8361	0.8109

Influencia de las variables de estudio sobre la evapotranspiración

La Figura 3 representa la evapotranspiración de referencia obtenida experimentalmente (Eje- Y) frente a cada una de las magnitudes que se midieron cada jornada: T_m (temperatura media), $T_{\max}$ (temperatura máxima), $T_{\min}$ (temperatura mínima) y R_s (radiación solar). Se presenta también un gráfico en el que se compara la evaporación experimental con el valor promedio entre la temperatura máxima y mínima diaria $(T_{\max} - T_{\min})/2$, que es una variable de la que dependen los modelos de Irmak *et al.* (2003), y Hargreaves y Samani (1985). Esta figura ilustra, por tanto, la dependencia de la ET_o experimental respecto a cada una de las magnitudes de manera independiente.

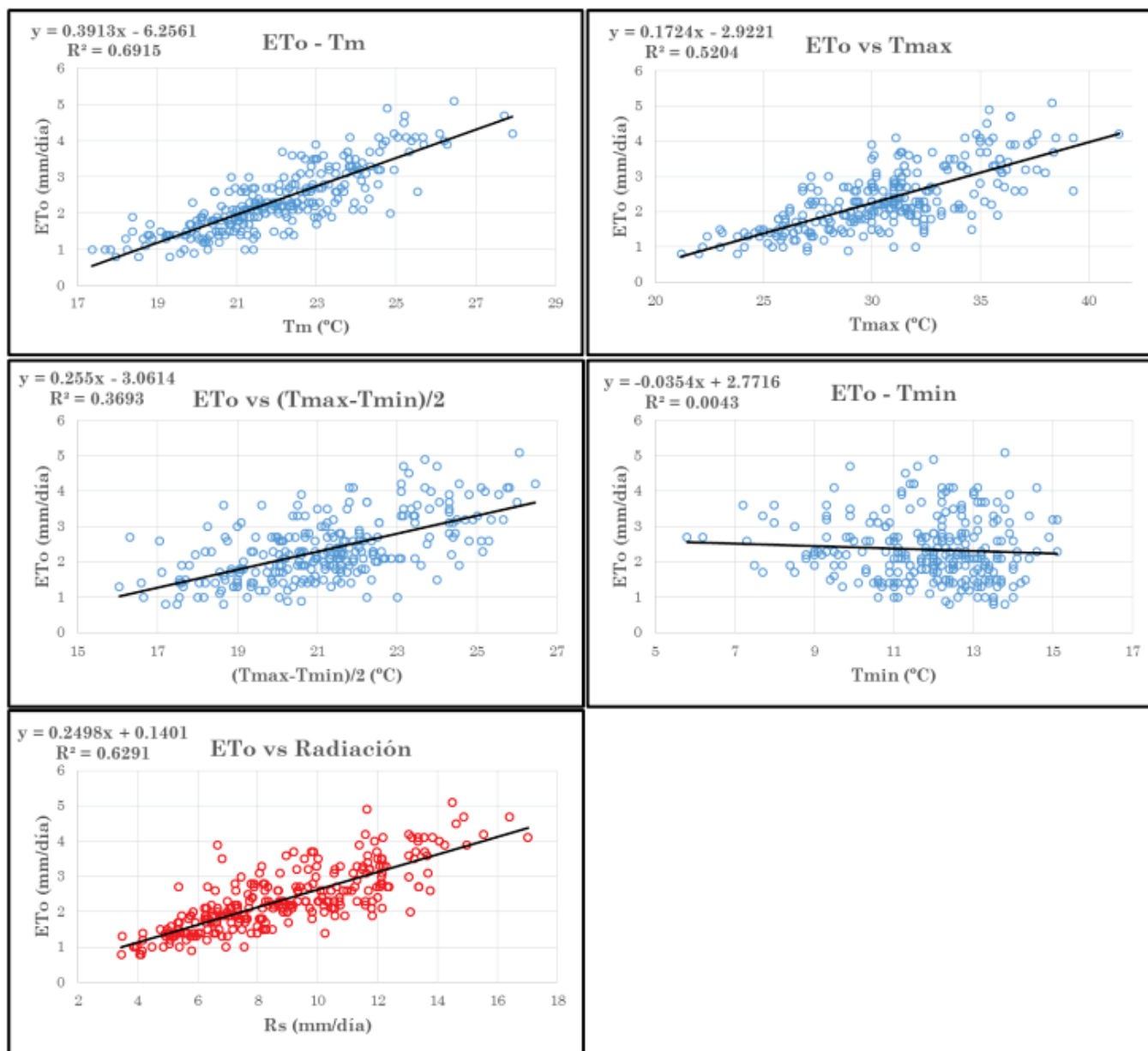


Figura 3. Datos experimentales. Evaporación (ETo , mm/día) frente a cada una de las variables que se han medido de forma independiente a diario: temperatura diaria media (T_m , °C), temperatura máxima (T_{max} , °C), temperatura mínima (T_{min} , °C), promedio entre las temperaturas máxima y mínima ($(T_{max}-T_{min})/2$, °C) y radiación solar (R_s , mm/día). Se observa que la correlación de la evapotranspiración es mayor frente a las variables temperatura media diaria (T_m) y radiación solar (R_s).

En la Tabla 4 se muestran los parámetros de los cinco ajustes. Se observa una correlación significativa entre los datos experimentales de la evaporación frente a la temperatura media diaria ($r = 0.8316$) y frente a la radiación solar ($r = 0.7932$). En tal sentido, un modelo empírico que represente una relación de proporción lineal entre la ET_o y estas dos magnitudes parece adecuado en esta zona. La correlación de la ET_o observada frente a la temperatura máxima también es alta ($r = 0.7214$), pero en un grado menor que respecto a las dos magnitudes mencionadas anteriormente. No parece tan adecuada, sin embargo, una proporción lineal entre la ET_o y el promedio $(T_{\max} - T_{\min})/2$, como propone el modelo de Irmak *et al.* (2003), pues en este caso el coeficiente de correlación es aproximadamente $r = 0.6$. Además, por inspección de la gráfica, tampoco se observa una tendencia de raíz cuadrada en este caso entre estas dos magnitudes, como propone en el modelo de Hargreaves y Samani. Por último, y como cabría esperar, la correlación entre la evaporación medida y las temperaturas mínimas registradas es inexistente ($r = 0.06$), ya que la temperatura mínima diaria no afecta prácticamente a este parámetro.

Por tanto, parece adecuado inferir para la ET_o en esta zona del ecuador un modelo lineal frente a las variables radiación solar y temperatura media diaria.

Tabla 4. Evapotranspiración de referencia (ET_o) obtenida experimentalmente frente a cada una de las magnitudes medidas cada día de forma independiente. Se muestra la línea de tendencia y el coeficiente de correlación en cada caso.

	ET_o T_m	ET_o T_{max}	$ET_o -$ $(T_{max} - T_{min})/2$	ET_o T_{min}	ET_o Radiación solar (R_s)
Línea de tendencia	$y = 0.39x - 6.26$	$y = 0.17x - 2.92$	$y = 0.25x + 3.06$	$y = -0.03x + 2.77$	$y = 0.25x + 0.14$
Coeficiente- r	0.8316	0.7214	0.6077	0.0655	0.7932

Modelo empírico propuesto

Siguiendo el razonamiento con el apartado anterior, se han elegido la temperatura media diaria (T_m) y la radiación solar (R_s) como variables independientes para la función evapotranspiración (ET_o), ya que son las dos magnitudes para las que se ha observado una mejor correlación lineal con la ET_o , según los datos que se han recogido. Se discriminan, por tanto, las variables temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}) y su promedio $(T_{max} - T_{min})/2$ que utilizan otros modelos empíricos, pues su correlación con la evapotranspiración de referencia es menor para los datos observados en esta zona. Con ello, se ha obtenido el siguiente modelo empírico por el método de la regresión lineal múltiple para la evapotranspiración en esta zona de estudio:

$$ET_o = 0.258 \cdot T_m + 0.111 \cdot R_s - 4.307 \quad (4)$$

La Tabla 5 muestra el error calculado para los coeficientes de esta ecuación en un intervalo de confianza del 95 %.

Tabla 5. Parámetros del modelo propuesto. El error está calculado para un 95 % de intervalo de confianza.

	a (mm/(día·°C))	b (adim)	c (mm/día)
Valor	0.258	0.111	-4.307
Error absoluto	0.025	0.017	0.442
Error relativo	9.7 %	15.3 %	10.2 %

La Figura 4 muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo empírico propuesto en la Ecuación (4), según el esquema $Y = mX$; se representa en el eje-Y los datos experimentales, y en el eje-X los resultados que arroja el nuevo modelo empírico para la evaporación en esta zona. Se comprueba la bondad del ajuste a través del valor de la pendiente $m = 1.0014 \cong 1$. Hay que observar también que el coeficiente de correlación ($r = 0.8573$) es claramente superior a los que se han obtenido para los otros modelos.

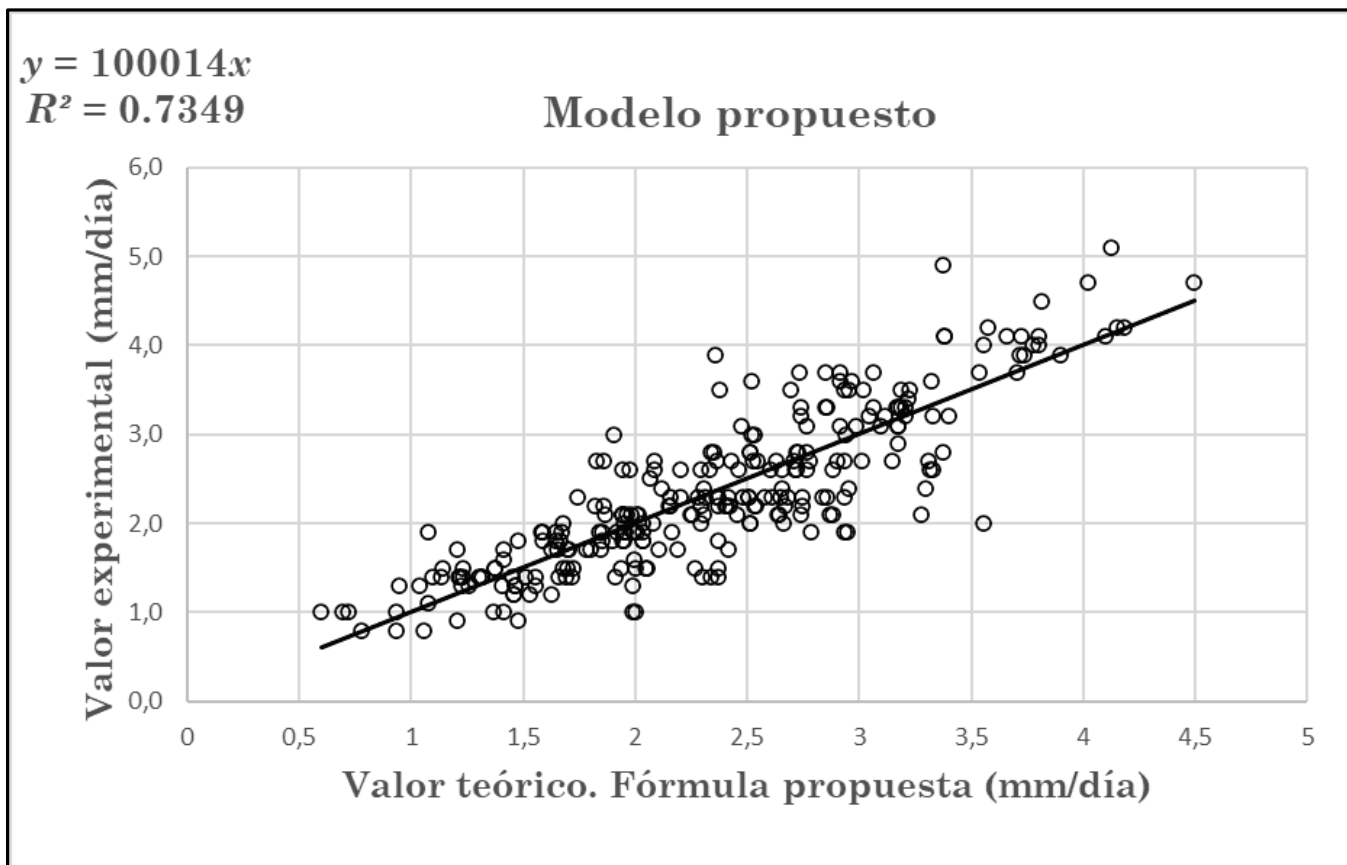


Figura 4. Ajuste del modelo propuesto a los datos experimentales obtenidos. Coeficiente de correlación $r = 0.8573$.

La Figura 5 muestra la gráfica en tres dimensiones del modelo propuesto para la ET_o como función de las dos magnitudes de las que depende: temperatura media (T_m) y radiación solar (R_s). La gráfica muestra el plano matemático que describe la Ecuación (4) de ajuste a los datos experimentalmente (cruces). La representación en el espacio euclídeo de estas tres magnitudes es la terna de coordenadas (T_m , R_s , ET_o). El vector normal al plano que define este modelo de aproximación es, por tanto $(-a, -b, 1) = (-0.258, -0.111, 1)$.

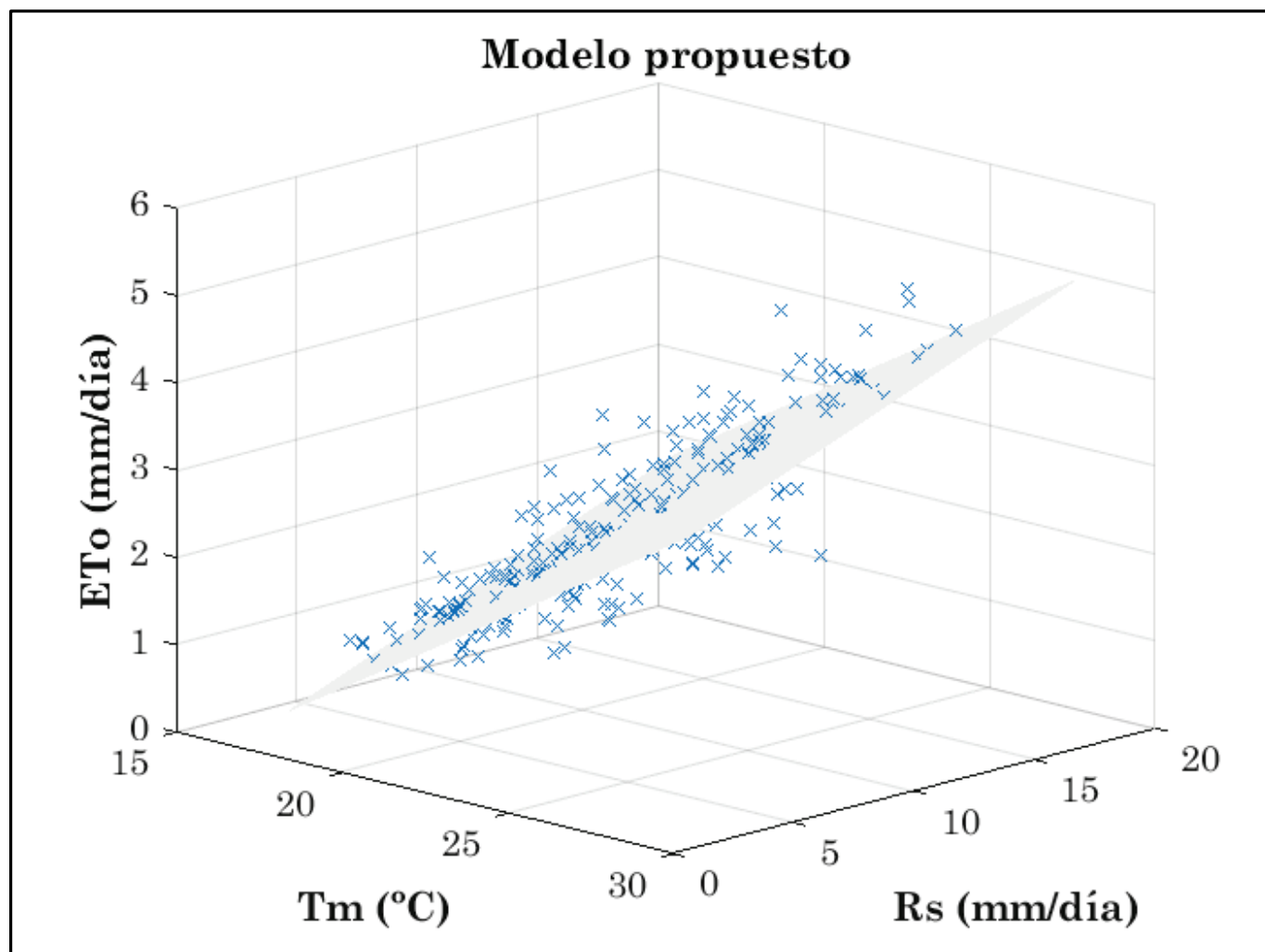


Figura 5. Regresión lineal múltiple. Modelo inferido experimentalmente para la *ETo* de esta zona frente a las magnitudes sobre las que se observa una mejor correlación: temperatura media (T_m) y radiación solar (R_s). Observar que el vector normal al plano que define su orientación es $(-0.258, -0.111, 1)$.

Discusión

Modelos empíricos contrastados

De los resultados obtenidos en este estudio se concluye que cualquiera de las cinco ecuaciones empíricas analizadas podría describir la evapotranspiración en esta zona de la República del Ecuador, atendiendo al alto nivel de correlación (aproximadamente un 80%) existente entre los datos experimentales y los cinco modelos analizados (Tabla 2). Los valores más altos del coeficiente de correlación se han obtenido para los dos modelos más antiguos, que son los de Jensen y Haise (1963), y Stephens (1965), para los que $r \cong 0.81$ en ambos casos. Sin embargo, las diferencias de este parámetro con respecto al calculado para los otros tres modelos es tan pequeña que no se puede concluir que las ecuaciones de Jensen y Haise, y Stephens puedan realizar predicciones significativamente mejores que las de cualquiera de los otros tres modelos empíricos.

La evaporación máxima diaria obtenida experimentalmente por cubeta de evaporación en estos ensayos ha sido de 5.1 mm/día. Se observa (Figura 2) que los modelos de Jensen y Haise (1963), y Abtew (1996) predicen valores para la evapotranspiración excesivos, que en algún caso superan los 10 mm/día, lo cual supone una tasa de evaporación del doble que la evaporación máxima obtenida en las observaciones realizadas. En esta línea, otros autores, como Aschale, Sciuto, Peres, Gullotta y Cancelliere (2022), también han reportado que el modelo de Jensen y Haise sobrestima la evapotranspiración en comparación con otros modelos empíricos y resultados experimentales. Hay que advertir además, que la pendiente obtenida para estos dos

modelos, según el ajuste de la Ecuación (3), es muy pequeña ($m \cong 0.4$), lo cual significa que los valores medidos experimentalmente para la *ETo* en esta región son muy inferiores a los que predicen los modelos de Abtew, y Jensen y Haise. Con base en este criterio, se debería discriminar el uso de estos dos modelos para la estimación de la *ETo* de referencia en la zona frente a los otros tres modelos que se han analizado en este artículo. Teniendo en cuenta además que la predicción para la evaporación máxima del modelo de Irmak *et al.* (2003) no alcanza los 7 mm/día, mientras que las de los modelos de Stephens (1965), y Hargreaves y Samani (1985) superan ampliamente los 8 mm/día, parece razonable proponer el uso de la ecuación de Irmak *et al.* (2003) para la predicción de la evapotranspiración en esta región del ecuador sobre cualquiera de los otros modelos analizados. Es necesario observar además que el valor de la pendiente en el ajuste sobre la Ecuación (3) para el modelo de Irmak *et al.* (2003) ($m = 0.65$) es el más alto de los cinco modelos estudiados; esto implica que la fórmula de Irmak *et al.* (2003) es la que menos sobrestima el valor de la *ETo* en esta región del ecuador, en virtud de los datos observados. No obstante, todos los modelos (incluido el de Irmak *et al.*, 2003) sobrestiman el valor de la *ETo* frente a los resultados experimentales, pues la pendiente en el ajuste de la Ecuación (3) es menor que la unidad en todos los casos. En concordancia con tal resultado, Zhang, Duan, Gao, Shen y Cai (2015) evaluaron la aplicabilidad de ocho modelos empíricos de evaporación para la región de Xinxiang (China), confirmando que el modelo Irmak *et al.* (2003) es también el más adecuado en su zona. No obstante, la capacidad predictiva de cada modelo depende mucho de las características climáticas de cada región, como ya se ha mencionado, lo que sugiere inferir un modelo empírico propio para cada zona.

Dependencia de la *ETo* respecto a las magnitudes analizadas

De los resultados que se muestran en la Figura 3, y que resume la Tabla 4, se deduce que los factores con una mayor correlación lineal respecto a la evaporación son la temperatura media diaria ($r = 0.83$) y la radiación solar ($r = 0.79$). En esta línea, otros autores, como Hargreaves y Samani (1982), Samani (2000), y Gao, Chen, Ren y Chen-Liao (2006), también han reportado que la temperatura media diaria y la radiación solar son los dos factores con mayor influencia sobre la *ETo* de referencia.

El siguiente factor a nivel de correlación con la *ETo* de referencia según este estudio sería la temperatura máxima registrada en cada jornada ($r = 0.72$). Desde un punto de vista físico, es lógico que la temperatura media diaria, y no la temperatura máxima registrada, sea un parámetro más influyente en la evaporación de agua en el suelo, pues un valor alto registrado para la temperatura máxima durante un momento del día no implica que la evaporación deba ser alta también a lo largo de toda la jornada; si las condiciones atmosféricas a lo largo del día cambian, puede disminuir la temperatura durante la mayor parte de horas del día, aumentando la humedad relativa del aire que está en contacto con el suelo y, por tanto, se reduce en gran medida la evaporación. De estos resultados también se deduce que la temperatura mínima diaria ($r = 0.065$) no afecta prácticamente a la *ETo*, pues normalmente estas temperaturas se alcanzan por la noche cuando la evaporación es mínima. En este sentido, se puede despreciar el efecto de la temperatura mínima diaria para la predicción de la evapotranspiración. Del mismo modo, se puede advertir que el promedio entre la temperatura máxima y mínima

diaria no alcanza un factor de correlación alto ($r = 0.61$), seguramente debido a que aquí también interviene un factor, como es la temperatura mínima, que no afecta en gran medida a la evaporación. Teniendo en cuenta dichos resultados, se ha propuesto un modelo empírico que tan solo depende (linealmente) de la temperatura media diaria y de la radiación solar, los dos factores más influyentes sobre la ET_o observada en este estudio.

Nuevo modelo empírico propuesto

El ajuste del modelo empírico inferido con los datos experimentales que se han medido para esta zona de la República del Ecuador es muy bueno. Como se muestra en la Figura 4, la pendiente de la recta de aproximación es prácticamente igual a la unidad; el coeficiente de correlación entre los dos ejes de este ajuste es alto ($r = 0.86$), y los errores que se han obtenido para los parámetros del modelo a través de la regresión lineal múltiple (Tabla 5) son aceptables para un intervalo de confianza estadístico del 95 %. El modelo empírico propuesto, considerando el error en los parámetros, vendría dado por la siguiente ecuación:

$$ET_o = (0.258 \pm 0.025) \cdot T_m + (0.111 \pm 0.017) \cdot R_s - (4.307 \pm 0.442) \quad (5)$$

Cuyas unidades son mm/día. Las unidades de los parámetros inferidos se pueden consultar en la Tabla 5.

Una estimación más precisa de la evapotranspiración en esta zona permite una mejor comprensión de los mecanismos que intervienen en el intercambio de agua entre la tierra y la atmósfera; la comprensión de

estos mecanismos es de gran importancia para la gestión agrícola y diseño de los riegos. Se concluye por tanto que con base en los datos de ajuste, el modelo propuesto en este artículo mejora la estimación de la evapotranspiración en esta zona del ecuador sobre los otros modelos ya publicados. El nuevo modelo propuesto de evaporación está siendo implementado en el modelo numérico de simulación de base física mencionado anteriormente (Del Vigo *et al.*, 2020; Del Vigo *et al.*, 2022b), con objeto de mejorar su capacidad predictiva en la dinámica del flujo y patrones de infiltración, y con ello optimizar la gestión del agua en los riegos de esta zona de Sudamérica.

Conclusiones

Como han apuntado algunos autores (Ahmadi & Fooladmand, 2008; Dimitrios, Samaras, & Konstantinos, 2014), la inferencia de modelos empíricos de evaporación a las condiciones climáticas locales reduce el error en la predicción de la *ET_o* de referencia; del mismo modo, en el caso de los modelos generales de evaporación, es necesario un ajuste (o calibración) a las condiciones locales para obtener una descripción adecuada de la evaporación en el sistema.

Del estudio desarrollado se concluye que los modelos empíricos contrastados se pueden utilizar para predecir la evapotranspiración de esta región de Sudamérica, a pesar de que todos ellos tienden a sobrestimar la *ET_o*. El hecho de que todos los modelos contrastados de la bibliografía sobrestimen el valor de la *ET_o* observada, también puede deberse a que la constante K_p utilizada en la Ecuación (1) en este estudio sea pequeña. En tal sentido, puede ser interesante explorar la posibilidad de estimar la *ET_o* en esta zona del ecuador utilizando un valor para la

constante del dispositivo sensiblemente superior a la que proponen Blanco y Folegatti (2003), y Macías (2009), es decir, $K_p > 1$, lo que representaría un efecto más acusado en la transpiración de la planta; ello puede ser compatible con las características climatológicas antes mencionadas de esta provincia del Ecuador.

Se ha observado también que las magnitudes de temperatura media diaria (T_m) y radiación solar (R_s) intervienen en mayor medida en la tasa de evapotranspiración diaria que otras magnitudes, como la temperatura máxima o mínima diaria ($T_{\max}$, $T_{\min}$). En consecuencia, se ha propuesto una fórmula empírica que ajusta de manera aceptable a los datos observados, y que tan solo depende linealmente de la temperatura media diaria y de la radiación solar. Se sugiere revisar los modelos empíricos de la bibliografía que dependen de la temperatura mínima diaria, pues como se ha visto en este estudio, es una variable poco influyente en la evaporación de agua en el suelo.

El modelo empírico propuesto está siendo implementado en el modelo numérico de base física que se ha desarrollado para el estudio de la filtración de agua en suelos (Del Vigo *et al.*, 2020) y que tiene capacidad para estudiar el flujo de agua absorbido a través de la raíz de la planta (Del Vigo *et al.*, 2022a). Este modelo ya se ha utilizado de forma exitosa para diseñar un calendario de riegos óptimo (Del Vigo *et al.*, 2022b) para el cultivo de tomate en invernadero en la provincia de Imbabura (República del Ecuador). La inclusión de dicha fórmula empírica para la ET_o en esta zona del Ecuador en el modelo de simulación permitirá mejorar las predicciones respecto a la filtración de agua en el suelo, patrones de infiltración y su posterior absorción por parte de la raíz de la planta, teniendo en cuenta la evapotranspiración que se produce en tal proceso. Con todo ello, se espera mejorar, finalmente, la gestión y el

diseño del riego por goteo en plantaciones de tomate en esta zona de Sudamérica, y por tanto, su producción agrícola, economizando el uso de agua.

Referencias

- Abtew, W. (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 32(3), 465-473. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb04044.x>
- Ahmadi, S. H., & Fooladmand, H. R. (2008). Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: A case study, South of Iran. *Irrigation Science*, 26, 303-312. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0094-8>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Alexandris, S., Stricevic, R., & Petkovic, S. (2008). Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, 21(22), 17-28.
- Aschale, T. M., Sciuto, G., Peres, D. J., Gullotta, A., & Cancelliere, A. (2022). Evaluation of reference evapotranspiration estimation methods for the assessment of hydrological impacts of photovoltaic power plants in Mediterranean climates. *Water*, 14(14), 2268. <https://doi.org/10.3390/w14142268>

- Azua-Barron, M., Arteaga-Ramirez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Quevedo-Nolasco, A. (2020). Calibration and evaluation of mathematical models to calculate reference evapotranspiration in greenhouses. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 125-137. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.1906>
- Blanco, F., & Folegatti, M. (2003). Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7, 285-291. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000200017>
- Catalán, V., Sánchez, C., Villa, C., Inzunza, I., & Mendoza, M. (2007). *Programa para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos (Folleto Técnico 7)*. Gómez Palacio, México: Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente-Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID-RASPA-INIFAP).
- Colimba-Limaico, J. E., Zubelzu-Minguez, S., & Rodríguez-Sinobas, L. (2022a). Optimal irrigation scheduling for greenhouse tomato crop (*Solanum lycopersicum* L.) in Ecuador. *Agronomy*, 12(5), 1020. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051020>

- Colimba-Limaico, J. E., Del Vigo, Á., Chuquín-Farinango, L. M., & Rodríguez-Sinobas, L. (octubre, 2022b). *Contraste experimental de modelos empíricos de evapotranspiración dependientes de la temperatura y radiación solar. Resultados preliminares*. VII Congreso Nacional de Riego Drenaje y Biosistemas, Teziutlán, Mexico. Recuperado de https://www.riego.mx/congresos/comeii2022/assets/docs/ProtPonencias/PDF_Extenso/22009_Javier_Colimba_Limaico_extenso.pdf
- Del Vigo, Á., Zubelzu, S., & Juana, L. (2019). *Soluciones analíticas aproximadas bajo hipótesis de Green-Ampt desde fuentes semiesférica y circular en superficie*. Jornadas Ingeniería del Agua (JIA). Toledo, España. Recuperado de https://oa.upm.es/65070/1/INVE_MEM_2019_324240.pdf
- Del Vigo, Á., Zubelzu, S., & Juana, L. (2020). Numerical routine for soil water dynamics from trickle irrigation. *Applied Mathematical Modelling*, 83, 371-385. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.01.058>
- Del Vigo, Á. (2020). *Simulación del flujo del agua en el suelo en riego por goteo superficial, soluciones analíticas aproximadas, caracterización del suelo y diseño de los riegos* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.63840>
- Del Vigo-García, Á., Juana-Sirgado, L., & Rodríguez-Sinobas, L. (2022a). Modelo numérico de simulación del flujo de agua en el suelo afectado por la absorción de la raíz. *Ingeniería del Agua*, 26(1), 37-46. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.16531>

- Del Vigo, Á., Colimba, J., Juana, L., & Rodríguez-Sinobas, L. (2022b). Numerical model for the simulation of soil water flow under root-absorption conditions. Application to tomato plant crop. *Irrigation Science*, 41(1), 141-154. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00806-x>
- Del Vigo, Á. (2023). Flujo de agua en el suelo bajo condiciones de simetría radial. Contraste entre modelos. *Ingeniería del Agua*, 27(3), 169–181. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.19290>
- Dimitrios, A., Samaras, A. R., & Konstantinos, T. (2014). Evaluation of radiation-based reference evapotranspiration models under different Mediterranean climates in central Greece. *Water Resources Management*, 28(1), 207-225. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0480-3>
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hidrology* (3rd ed.). Long Grove, USA: Waveland Press.
- Gao, G., Chen, G. Y., Ren, Y., & Chen-Liao, Y. M. (2006). Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China in 1956-2000. *Journal of Geographical Sciences*, 16(1), 3–12. <https://doi.org/10.1007/s11442-006-0101-7>
- GAD Natabuela, Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de San Francisco de Natabuela. (2016). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. Natabuela, Ecuador: Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de San Francisco de Natabuela.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390>

- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hidalgo, F. (2019). *Determinación de los requerimientos hídricos óptimos del tomate (Solanum lycopersum L.) mediante el cálculo de la evapotranspiración y Kc en la zona de Morache* (tesis de grado). Universidad Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., & Jones, J. W. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5), 336-347. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:5\(336\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:5(336))
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89(4), 15-41. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000287>
- Macías, R. (2009). *Estimación de la evapotranspiración del cultivo y requerimientos hídricos del tomate (Solanum lycopersicum Mill. Cv. El Cid) en invernadero* (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Jiquilpan, México.
- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265-267. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265))
- Schwartzman, M., & Zur, B. (1986). Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112, 42-253. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1986\)112:3\(242\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242))

- Senagua, Secretaría Nacional del Agua. (2019). *Plan Nacional de Riego y Drenaje 2019–2027*. Quito, Ecuador: Secretaría Nacional del Agua.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M., & Šejna, M. (2006). *The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual* (version 1.0). Praga, República Checa: PC Progress.
- Sivisaca, J. (2013). *Efecto de tres frecuencias de riego por goteo en la producción del cultivo de fréjol (Phaseolus vulgaris L.), según la evaporación del tanque evaporímetro Clase A* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- Stephens, J. C. (1965). Discussion of “Estimating evaporation from insolation”. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(5), 171-182. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001310>
- Zapatta, A., & Gasselin, P. (2005). *El riego en el Ecuador: problemática, debate y políticas*. Quito, Ecuador: Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas.
- Zhang, Q., Duan, A. W., Gao, Y., Shen, X. J., & Cai, H. J. (2015). Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation methods using temperature data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 46(2), 104-109.