



Ingeniería agrícola y biosistemas

ISSN: 2007-3925

ISSN: 2007-4026

Universidad Autónoma Chapingo

Villa-Camacho, Augusto Omar; Ontiveros-Capurata, Ronald Ernesto;
Ruíz-Álvarez, Osías; González-Sánchez, Alberto; Quevedo-
Tiznado, José Antonio; Ordoñez-Hernández, Laura Maleni
Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration from empirical methods in Chihuahua, Mexico
Ingeniería agrícola y biosistemas, vol. 13, no. 1, 2021, January-June, pp. 95-115
Universidad Autónoma Chapingo

DOI: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.02.035>

Available in: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688672120006>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's webpage in redalyc.org



Scientific Information System Redalyc

Network of Scientific Journals from Latin America and the Caribbean, Spain and
Portugal

Project academic non-profit, developed under the open access initiative

Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration from empirical methods in Chihuahua, Mexico

Variación espacio-temporal de la evapotranspiración de referencia a partir de métodos empíricos en Chihuahua, México

Augusto Omar Villa-Camacho¹; Ronald Ernesto Ontiveros-Capurata²; Osías Ruíz-Álvarez³; Alberto González-Sánchez^{2*}; José Antonio Quevedo-Tiznado²; Laura Maleni Ordoñez-Hernández¹

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Agrohidráulica. Av. Universidad s/n, Ciudad San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, C. P. 73965, MÉXICO.

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac, núm. 8532, Jiutepec, Morelos, C. P. 62550, MÉXICO.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro de Chiapas (CECECh). Carretera Ocozacoautla-Cintalapa km 3, Ocozacoautla, Chiapas, C. P. 29140, MÉXICO.

*Corresponding author: alberto_gonzalez@tlaloc.imta.mx, tel. 777 329 36 00 ext. 115

Abstract

Introduction: Evapotranspiration is key in the management of arid agricultural areas. In Chihuahua, the volume of irrigation water is based on reference evapotranspiration (ET_0) calculated with empirical methods and extrapolated to the cropped area, which is inaccurate. The alternative is to calculate ET_0 variation by spatial interpolation.

Objective: To analyze the spatio-temporal variation of ET_0 using empirical methods and spatial interpolation in Chihuahua, Mexico.

Methodology: Records from 33 meteorological stations from 1960-2013 and seven ET_0 estimation methods were used. The results were compared with the Penman-Monteith method, modified by FAO (PMMF), ANOVA analysis ($P \leq 0.05$), and homogeneous ET_0 surfaces built from the point values by spatial interpolation.

Results: The Hargreaves method ($R^2 = 0.91$, $RMSE = 1.16$ and $ME = -0.69 \text{ mm-day}^{-1}$) had a smaller bias with respect to PMMF. ET_0 values ranged from 2.5 to 7.1 mm-day^{-1} in a west-east direction, with maximum values at low elevations and minimum values at high elevations, which showed the influence of the Sierra Madre Occidental on ET_0 . This characteristic was most noticeable in the warm months (June to September).

Limitations of the study: The use of estimated data needs field validation.

Originality: The ET_0 estimation with seven empirical methods and one spatial interpolation method to extrapolate values to areas with scarce meteorological data.

Conclusions: The Hargreaves method allows estimating the spatio-temporal variation of ET_0 in large extensions and areas with limited meteorological information.

Resumen

Introducción: La evapotranspiración es clave en la gestión de zonas agrícolas áridas. En Chihuahua, el volumen de agua de riego se asigna a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0) calculada con métodos empíricos y extrapolada a la superficie agrícola, lo que es inexacto. La alternativa es calcular la variabilidad de la ET_0 mediante interpolación espacial.

Objetivo: Analizar la variabilidad espacio-temporal de ET_0 a partir de métodos empíricos e interpolación espacial en Chihuahua, México.

Metodología: Se utilizaron registros de 33 estaciones meteorológicas del periodo 1960-2013 y siete métodos de estimación de la ET_0 . Los resultados se compararon con el método Penman-Monteith, modificado por la FAO (PMMF), mediante un análisis ANOVA ($P \leq 0.05$), y se elaboraron superficies homogéneas de la ET_0 a partir de los valores puntuales mediante interpolación espacial.

Resultados: El método Hargreaves ($R^2 = 0.91$, $CME = 1.16$ y $EM = -0.69 \text{ mm-día}^{-1}$) presentó un menor sesgo respecto a PMMF. Los valores de ET_0 oscilaron de 2.5 a 7.1 mm-día^{-1} en dirección oeste-este, con valores máximos en zonas bajas y mínimos en altas, lo que mostró la influencia de la sierra madre occidental en la ET_0 . Dicha característica resaltó en los meses cálidos (junio a septiembre).

Limitaciones del estudio: El uso de datos estimados requiere validación en campo.

Originalidad: Estimación de la ET_0 con siete métodos empíricos y uno de interpolación espacial para extrapolar valores a zonas con datos escasos.

Conclusiones: El método Hargreaves permite estimar la variabilidad espacio-temporal de la ET_0 en grandes extensiones y zonas con información meteorológica limitada.

Keywords:

water requirements, Hargreaves, modified Penman-Monteith, semi-arid, spatial interpolation.

Palabras clave:

requerimientos hídricos, Hargreaves, Penman-Monteith modificado, semi-árido, interpolación espacial.

Please cite this article as follows (APA 6): Villa-Camacho, A. O., Ontiveros-Capurata, R. E., Ruíz-Álvarez, O., González-Sánchez, A., Quevedo-Tiznado, J. A., & Ordoñez-Hernández, L. M. (2021). Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration from empirical methods in Chihuahua, Mexico. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1), 95-115. <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.02.035>

Received: February 15, 2021 / Accepted: June 16, 2021.



Ingeniería Agrícola
y Biosistemas

<https://revistas.chapingo.mx/inagbi/>

Introduction

Evapotranspiration includes the loss of water from crops by transpiration and from the soil by evaporation, making it a key variable in the development of irrigation schedules and the optimization of water resources (Santiago-Rodríguez *et al.*, 2018). Evapotranspiration occurring on a vegetated surface is a function of the meteorological conditions of the area and the anatomical and physiological characteristics of vegetation (Allen *et al.*, 1994).

The evapotranspiration rate of a reference area that occurs without water restrictions is called reference evapotranspiration (ET_0). This area corresponds to a hypothetical grass or alfalfa crop (with specific characteristics). It is assumed that the only factors affecting it are meteorological parameters to be calculated from atmospheric weather measurements (Allen *et al.*, 1998). ET_0 can be measured with direct methods such as lysimeters, eddy-covariance towers, evapotranspirometers and evaporimeter tanks (Mauder *et al.*, 2018). Alternatively, estimated with indirect or empirical methods usually obey equations or models obtained by regression. In the first case, specialized equipment and qualified personnel are required for management, which is costly and makes implementation difficult in agricultural areas.

Among the empirical methods for estimating ET_0 , the FAO modified Penman-Monteith method (PMMF) stands out for its accuracy (Allen *et al.*, 1998). However, this method is limited to compact geographic areas. It requires a large amount of meteorological data (Toro-Trujillo *et al.*, 2015), such as relative humidity, wind speed and solar radiation, often unavailable at conventional stations in Mexico (Lavado *et al.*, 2015). An alternative is to use less sophisticated empirical methods with more affordable meteorological variables and extrapolate point values to large extensions using the spatial interpolation methods (Aragón-Hernández *et al.*, 2019; Greenough & Nelson, 2019). Indirect ET_0 estimates allow filling the missing information gap around this meteorological variable of great agriculture importance.

Chihuahua, located in the north of Mexico, is a state with an arid and semi-arid climate with an average precipitation of 252 to 482 mm·yr⁻¹ (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017), making water a scarce resource. Despite these conditions, about 597 000 ha are cultivated under irrigation and 443 000 ha under rainfed. The main irrigated crops are cotton (with 166 000 ha in the spring-summer cycle) and grain wheat (with 8 000 ha in the autumn-winter period) (Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018).

Introducción

La evapotranspiración comprende la pérdida de agua de los cultivos por transpiración y del suelo por evaporación, por lo que es una variable clave en la elaboración de calendarios de riego y la optimización de los recursos hídricos (Santiago-Rodríguez *et al.*, 2018). La evapotranspiración que ocurre en una superficie con vegetación está en función de las condiciones meteorológicas del área, así como de las características anatómicas y fisiológicas de la vegetación (Allen *et al.*, 1994).

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia que ocurre sin restricciones de agua se denomina evapotranspiración de referencia (ET_0). Dicha superficie corresponde a un cultivo hipotético de pasto o alfalfa (con características específicas) donde se asume que los únicos factores que lo afectan son los parámetros meteorológicos, por lo que se puede calcular a partir de observaciones del tiempo atmosférico (Allen *et al.*, 1998). La ET_0 se puede medir con métodos directos como lisímetros, torres de eddy-covariance, evapotranspirómetros y tanques evaporímetros (Mauder *et al.*, 2018); o estimar con métodos indirectos o empíricos que, por lo general, obedecen a ecuaciones o modelos obtenidos por regresión. En el primer caso se requiere equipo especializado y personal calificado para su manejo, lo que resulta costoso y dificulta su implementación en las zonas agrícolas.

Entre los métodos empíricos para estimar la ET_0 destaca, por su precisión, el de Penman-Monteith modificado por la FAO (PMMF) (Allen *et al.*, 1998); sin embargo, este método está limitado a áreas geográficas compactas y requiere gran cantidad de datos meteorológicos (Toro-Trujillo *et al.*, 2015), como humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, los cuales con frecuencia no están disponibles en las estaciones meteorológicas convencionales de México (Lavado *et al.*, 2015). Una alternativa es utilizar métodos empíricos menos sofisticados que se alimentan de variables meteorológicas más asequibles y extrapolan los resultados puntuales a extensiones más grandes con ayuda de métodos geoestadísticos de interpolación espacial (Aragón-Hernández *et al.*, 2019; Greenough & Nelson, 2019). Las estimaciones indirectas de ET_0 permiten llenar la brecha de información faltante en torno a esta variable meteorológica de gran importancia hidroagrícola.

Chihuahua, ubicado al norte de la República Mexicana, es un estado de clima árido y semi-árido con una precipitación promedio de 252 a 482 mm·año⁻¹ (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017), por lo que el agua es un recurso escaso. Pese

The extensive agricultural areas of Chihuahua are cultivated under irrigation in irrigation districts and units, where water volume designation is the responsibility of the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Each year, irrigation water demand is calculated from ET_0 estimates made with empirical methods; subsequently, these estimates are extrapolated to the rest of the agricultural area without considering spatial variation, which results in errors and overestimates. Some ET_0 estimates made with the PMMF method suggest that Chihuahua values range from 100 to 270 mm·month⁻¹ (Ruíz-Álvarez et al., 2014) or from 3.5 to 8.5 mm·day⁻¹ (Lozoya et al., 2014), with the highest values in June.

Campos-Aranda (2005) estimated that ET_0 values in Chihuahua range from 60 mm·months⁻¹ in January to 200 mm·months⁻¹ in June, with an R^2 of 0.96 when comparing Hargreaves-Samani with PMMF. These values indicate a strong demand for water resources in this region, aggravated in agricultural areas by high water consumption and low irrigation water application efficiency.

Despite the efforts described above to understand and meet the water needs of crops in the state of Chihuahua, the low availability of climatic information is a limitation for quantifying and analyzing the spatiotemporal variation of ET_0 . Accurate ET_0 estimates incorporating spatio-temporal variation contribute to improving water resource allocation, especially in agricultural areas where the resource is scarce. It is essential to achieve a more efficient use. In this sense, the objective of this study was to analyze the spatio-temporal variation of ET_0 estimated from empirical methods and spatial interpolation, using meteorological observations available for the state of Chihuahua.

Materials and methods

Study area

The state of Chihuahua is located in the north-central region of Mexico (31° 47' 04" and 25° 33' 32" north latitude, and 103° 18' 24" and 109° 04' 30" west longitude). Chihuahua represents 12.6 % of the national territory, is bordered to the northeast by the United States of America, to the east by Coahuila de Zaragoza and Durango, to the south by Durango and Sinaloa, and to the west by Sonora and Sinaloa (Figure 1). The territory has four types of climates: very dry (40 %), dry and semi-dry (33 %), temperate-sub-humid (24 %) and warm-sub-humid (3 %). The average annual temperature is 17 °C, and the average annual precipitation is 500 mm (INEGI, 2017).

a estas condiciones, en el estado se cultivan cerca de 597 000 ha bajo riego y 443 000 ha bajo temporal. Los principales cultivos con modalidad de riego son el algodón (con 166 mil ha en el ciclo primavera-verano) y el trigo de grano (con 8 mil ha en el periodo otoño-invierno) (Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018).

Las extensas superficies agrícolas de Chihuahua se cultivan bajo riego en distritos y unidades de riego, donde la designación del volumen de agua está a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Cada año, la demanda de agua de riego se calcula a partir de estimaciones de la ET_0 realizadas con métodos empíricos; posteriormente, dichas estimaciones se extrapolan al resto de la superficie agrícola sin considerar la variabilidad espacial, lo cual da lugar a errores y sobreestimaciones. Algunos cálculos de ET_0 realizados con el método de PMMF sugieren que en Chihuahua los valores oscilan de 100 a 270 mm·mes⁻¹ (Ruíz-Álvarez et al., 2014) o de 3.5 a 8.5 mm·día⁻¹ (Lozoya et al., 2014), con los valores más altos en junio.

De forma similar, Campos-Aranda (2005) estimó que los valores de la ET_0 en Chihuahua oscilan de 60 mm·mes⁻¹ en enero y de 200 mm·mes⁻¹ en junio, con un R^2 de 0.96 al comparar Hargreaves-Samani con PMMF. Estos valores indican una fuerte demanda de los recursos hídricos en dicha región, la cual se agrava en las zonas agrícolas por el gran consumo de agua y la baja eficiencia de aplicación del agua de riego.

A pesar de los esfuerzos descritos, en aras de conocer y satisfacer las necesidades de agua de los cultivos en el estado de Chihuahua, la baja disponibilidad de información climática es una limitante para cuantificar y analizar la variabilidad espacio temporal de la ET_0 . Las estimaciones precisas de la ET_0 que incorporen la variabilidad espacio-temporal contribuyen a mejorar la asignación de recursos hídricos, en especial en zonas agrícolas donde el recurso es escaso y es imprescindible lograr un uso más eficiente. En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue analizar la variabilidad espacio-temporal de la ET_0 estimada a partir de métodos empíricos e interpolación espacial, esto mediante observaciones meteorológicas disponibles para el estado de Chihuahua.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estado de Chihuahua se localiza en la región norte-centro de México (31° 47' 04" y 25° 33' 32" de latitud norte, y 103° 18' 24" y 109° 04' 30" de longitud oeste). Chihuahua representa el 12.6 % del territorio nacional y colinda al noreste con Estados Unidos de América,

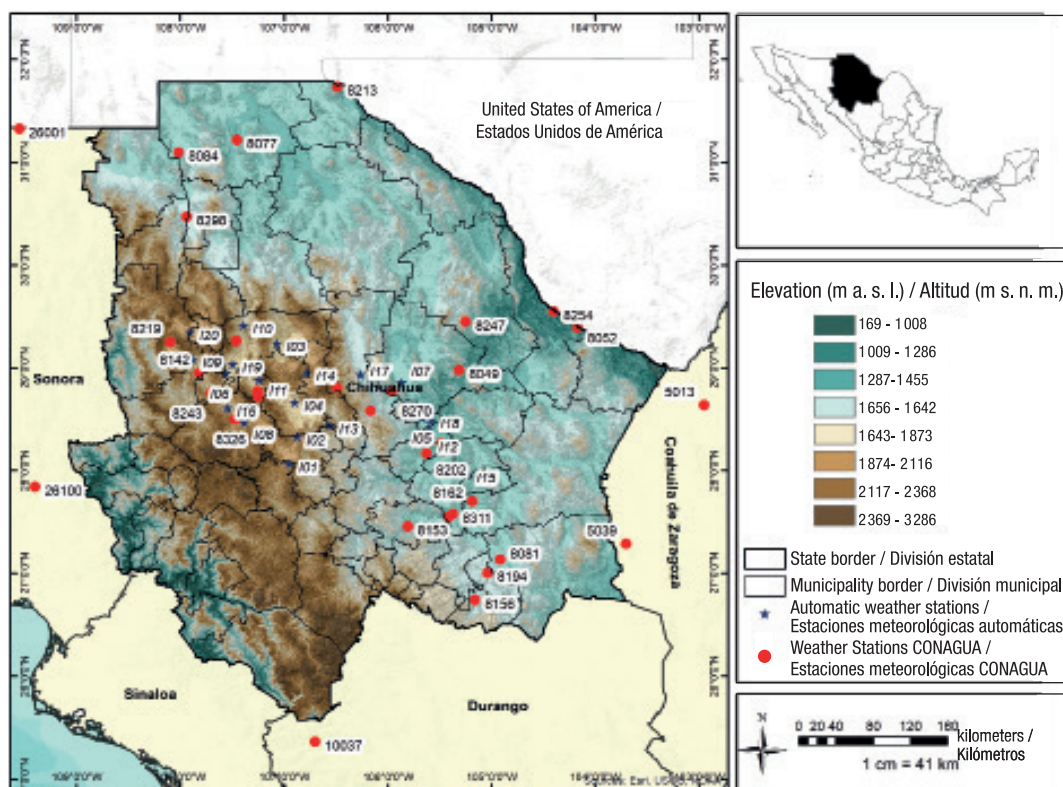


Figure 1. Study area and location of weather stations.

Figura 1. Área de estudio y ubicación de estaciones meteorológicas.

Meteorological data and processing

Daily temperature and precipitation records were obtained from 33 meteorological stations managed by the Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA-SMN, 2019) for the period 1960-2013 (Figure 1, Table 1). This data series includes outlier data cleaning, which is performed by SMN staff. Data were subjected to the double mass curve test, where each station was compared to surrounding stations for consistency, as recommended by Gao et al. (2017), Ruíz-Álvarez et al. (2020) and Searcy and Hardison (1960), and all measurements were consistent. A homogeneity test was also performed using the PROCLIMDB package developed for the R program (Štěpánek et al., 2009), which works similarly to CLIMATOL (Guijarro, 2016). This analysis showed that climatic information from all the stations used is homogeneous.

Relative humidity and wind speed records were collected from 20 automatic weather stations (EMAs), managed by the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), for the latest available period (1 to 3 years) (INIFAP, 2019). These records were used to validate the relative humidity values required to operate the PMMF method. Finally, solar radiation was calculated using the equation described by Allen et al. (1998).

al este con Coahuila de Zaragoza y Durango, al sur con Durango y Sinaloa, y al oeste con Sonora y Sinaloa (Figura 1). El territorio posee cuatro tipos de clima: muy seco (40 %), seco y semiseco (33 %), templado-subhúmedo (24 %) y cálido-subhúmedo (3 %). La temperatura media anual es de 17 °C y la precipitación promedio anual es de 500 mm (INEGI, 2017).

Información meteorológica y su procesamiento

Las observaciones diarias de temperatura y precipitación se obtuvieron de 33 estaciones meteorológicas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA-SMN, 2019) para el periodo 1960-2013 (Figura 1, Cuadro 1). Esta serie de datos incluye una depuración de datos atípicos, la cual es realizada por el personal del SMN. Además, los datos se sometieron a la prueba de curva de doble masa, donde cada estación se comparó con estaciones circundantes para verificar su consistencia, tal como lo recomiendan Gao et al. (2017), Ruíz-Álvarez et al. (2020) y Searcy y Hardison (1960), y se encontró que todas las observaciones fueron consistentes. También se realizó una prueba de homogeneidad mediante el paquete PROCLIMDB desarrollado para el programa R (Štěpánek et al., 2009), el cual funciona de manera similar a CLIMATOL (Guijarro, 2016). Este

Table 1. Weather stations used in the study.
Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

ID/ Clave	Name /Nombre	X	Y	Elevation (m a. s. l.)/ Altura (m s. n. m.)
8004	Bachiniva	279793	3184779	2 017
8044	Delicias (DGE)	454499	3118802	1 173
8049	Luis L. León	469634	3205655	1 080
8052	El Mulato	580642	3251948	774
8059	El Tintero	261240	3239694	2 450
8077	Guzmán	266606	3456205	1 200
8081	Jiménez (DGE)	508255	3001202	1 370
8084	Ascensión (DGE)	784950	3444124	1 323
8085	La Boquilla	459332	3046747	2 119
8099	Majalca	355108	3187042	1 155
8102	Meoqui (DGE)	452598	3126841	1 932
8142	Temosachi (OBS)	225463	3205714	1 290
8153	Valle de Zaragoza (DGE)	420266	3037025	1 350
8156	Villa Coronado	484089	2957493	1 516
8162	Camargo (DGE)	481928	3063984	1 250
8185	Presa Chihuahua (DGE)	385906	3162376	1 548
8194	Villa López	496418	2986779	1 424
8202	Presa Francisco I. Madero	438397	3115883	1 242
8213	Juárez (DGE)	359194	3512179	1 135
8215	Las Chepas	280632	3178510	2 076
8219	Peñitas	782536	3239399	2 135
8243	Tejolocachi (DGE)	236606	3184348	1 920
8247	Coyame (DGE)	475756	3257869	1 220
8254	Ojinaga (DGE)	558128	3269074	800
8270	La Mesa	405939	3183250	1 250
8298	Dublan	218328	3375014	1 440
8311	Colina	463341	3050423	1 214
8326	Presa Abraham González	258236	3155235	2 000
5039	Sierra Mojada	628631	3018733	1 256
10037	La Huerta, Topia	328890	2806268	670
26001	Agua Prieta	638065	3466622	1 210
26100	Tesopaco, Rosario	657804	3080602	421
5013	Ejido San Miguel	700550	3169454	1 060
I01	Buena Vista, Carichi*	308057	3105965	1 719
I02	Campo 26, Cuauhtémoc*	315657	3135074	1 749
I03	Campo 305, Namiquipa*	298403	3236198	1 947
I04	Campo 8, Cuauhtémoc*	314138	3172065	1 782
I05	El Paraíso, Aldama*	434628	3154251	1 443
I06	Faciatec, Namiquipa*	250714	3204783	1 849
I07	Inifap Aldama, Aldama*	415367	3192047	1 290
I08	La Junta, Guerrero*	266883	3151677	1 976
I09	La Tiznadita, Temósachi*	219898	3220682	1 602

Table 1. Weather stations used in the study. (cont.)

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. (cont.)

ID/ Clave	Name /Nombre	X	Y	Elevation (m a. s. l.)/ Altura (m s. n. m.)
I10	Las Cruces, Namiquipa*	268152	3256147	2 239
I11	Las Varas, Bachíniva*	281690	3196628	2 000
I12	Lázaro Cárdenas, Meoqui*	441162	3139876	1 534
I13	Loma Verde, Cuauhtémoc*	347006	3146728	1 546
I14	Maurilio Ortiz, Cuauhtémoc*	326212	3204248	610
I15	Puerto de Toro, Saucillo*	476856	3093180	1 401
I16	Rancho Colorado, Guerrero*	251374	3167218	1 956
I17	Sacramento, Casas Grandes*	376813	3201513	1 356
I18	Salón de Actos, Rosales*	442634	3151532	1 477
I19	Soto Mainez, Namiquipa*	257343	3214490	1 969
I20	Sta. Clara, Namiquipa*	218046	3250400	1 995

*Automated weather stations (AWS).

*Estaciones meteorológicas automatizadas (EMAs)

The missing values of databases were estimated with the interpolation method known as inverse distance weighted (IDW), according to Equation 1 (Shepard, 1968):

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (1)$$

where Z_p is the estimated value for the point, n is the number of points used in the interpolation, Z_i is the known meteorological record, d_i is the distance between stations (m), and p is the power depending on the degree of terrain undulation: 1 for flat and 2 for steep.

Empirical methods for calculating reference evapotranspiration

The empirical methods used to calculate ET_o were selected based on the availability of meteorological information in the study area. Table 2 shows the empirical methods used to calculate ET_o . The reference method was PMMF, while the methods compared or evaluated were Hargreaves (Hg), Turc (Tc), Blaney Criddle (BC), Thornthwaite (Th), Malmstrom (Mm), Makkink (Mk) and Hargreaves modified by Droogers (Dg).

Statistical analysis

Comparison of means of each empirical method regarding the reference method (PMMF) was performed with an analysis of variance ($P \leq 0.05$) and by the Tukey-Kramer least significant difference (LSD).

análisis mostró que la información climática de todas las estaciones utilizadas es homogénea.

Adicionalmente, se recopilaron registros de humedad relativa y velocidad del viento de 20 estaciones meteorológicas automáticas (EMAs), administradas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), para el último periodo disponible (1 a 3 años) (INIFAP, 2019). Estos registros se utilizaron para validar los valores de humedad relativa que se requieren para operar el método de PMMF. Finalmente, la radiación solar se calculó mediante la ecuación descrita por Allen *et al.* (1998).

Los valores faltantes de las bases de datos se estimaron con el método de interpolación conocido como inverso de la distancia ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), según la Ecuación 1 (Shepard, 1968):

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (1)$$

donde Z_p es el valor estimado para el punto, n es el número de puntos utilizados en la interpolación, Z_i es la observación meteorológica conocida, d_i es la distancia entre estaciones (m) y p es la potencia que está en función del grado de ondulación del terreno: 1 para plano y 2 para abrupto.

Métodos empíricos para calcular la evapotranspiración de referencia

Los métodos empíricos utilizados para calcular la ET_o se seleccionaron en función de la disponibilidad de

Table 2. Empirical methods for estimation of reference evapotranspiration (ET_o).**Cuadro 2. Métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o).**

Method / Método	Variables	Equation / Ecuación	Reference / Referencia
Hg	T_{mx}, T_{mn}, T_m, R_a	$ET_o = 0.023(T_m + 17.8)(T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \times R_a$	Hargreaves & Samani (1985)
Tc	T_m, R_G	$ET_o = a \times C(R_G + b) \left(\frac{T_m}{T_m + 15} \right)$	Turc (1961)
BC	T_m	$ET_o = a + b[p(0.46T_m + 8.13)]$	Doorenbos y Pruitt (1977)
Th	T_m	$ET_o = 16 d \left(\frac{10T_m}{I} \right)^a$	Thornthwaite (1948)
Mm	T_m	$ET_o = 4.09 \times 6.11 \exp \left(\frac{17.27T_m}{237.3 + T_m} \right)$	Malmström (1969)
Mk	T_{mx}, T_{mn}, R_s	$ET_o = 4.09 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{R_s}{2.45} - 0.12$	Makkink (1957)
Dg	T_{prom}, TD, P, R_a	$ET_o = 0.0013 \times 0.408 R_a (T_{prom} + 17)(TD - 0.0123P)^{0.76}$	Droogers & Allen (2002)
PMMF	T_m, Hr, V_v, R_n	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.334u_2)}$	Allen et al. (1998)

T_{mn} = minimum temperature (°C); T_{mx} = maximum temperature (°C); T_m = mean temperature (°C); T_{prom} = daily average temperature (°C); TD = daily temperature range (°C); P = precipitation (mm-month⁻¹); a and b = empirical constants; C = relative humidity dependent constant; R_G = global radiation (MJ·m⁻²·day⁻¹); R_s = solar radiation (MJ·m⁻²·day⁻¹); R_a = extraterrestrial radiation (MJ·m⁻²·day⁻¹); R_n = net radiation (MJ·m⁻²·day⁻¹); G = heat flux (MJ·m⁻²·day⁻¹); p = annual mean percentage of daylight hours; d = number of days per month; I = annual heat index; γ = psychrometric constant (kPa·°C⁻¹); Δ = slope of the saturated vapor stress curve (kPa·°C⁻¹); u_2 = wind speed at 2 m height (m·s⁻¹); $e_s - e_a$ = vapor stress deficit (kPa).

T_{mn} = temperatura mínima (°C); T_{mx} = temperatura máxima (°C); T_m = temperatura media (°C); T_{prom} = promedio diario de temperaturas (°C); TD = rango de temperaturas diarias (°C); P = precipitación (mm-mes⁻¹); a y b = constantes empíricas; C = constante dependiente de humedad relativa; R_G = radiación global (MJ·m⁻²·día⁻¹); R_s = radiación solar (MJ·m⁻²·día⁻¹); R_a = radiación extraterrestre (MJ·m⁻²·día⁻¹); R_n = radiación neta (MJ·m⁻²·día⁻¹); G = flujo calórico (MJ·m⁻²·día⁻¹); p = porcentaje medio anual de horas diurnas; d = número de días por mes; I = índice de calor anual; γ = constante psicrométrica (kPa·°C⁻¹); Δ = pendiente de la curva de tensión de vapor saturado (kPa·°C⁻¹); u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (m·s⁻¹); $e_s - e_a$ = déficit de tensión de vapor (kPa).

The hypotheses tested were: H₀) the mean values of each empirical method is equal to that of the reference method. H_A) at least one mean value of the empirical methods is different from that of the reference method. A linear regression analysis was performed between the values of each empirical method against those of the reference method. In this case, the hypotheses tested were H₀) the slope of the regression line is equal to 0 and H_A) the slope of the regression line is different from 0. The precision was evaluated with the coefficient of determination (R²), root mean square error (RMSE), mean error (ME) and the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) calculated according to Equations 2 to 5 (Alexandris et al., 2006; Cervantes-Osornio et al., 2012; Djaman et al., 2018; Nash & Sutcliffe, 1970; Tabari, 2010).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})(t_i - \bar{t})]^2}{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2][\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2]} \quad (2)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)^2}{N} \right)^{1/2} \quad (3)$$

información meteorológica en la zona de estudio. En el Cuadro 2 se presentan los métodos empíricos utilizados para el cálculo de la ET_o. El método de referencia fue el de PMMF, mientras que los métodos comparados o evaluados fueron: Hargreaves (Hg), Turc (Tc), Blaney Criddle (BC), Thornthwaite (Th), Malmstrom (Mm), Makkink (Mk) y Hargreaves modificado por Droogers (Dg).

Análisis estadístico

La comparación de medias de cada método empírico con respecto al método de referencia (PMMF) se realizó con un análisis de varianza ($P \leq 0.05$) y mediante la diferencia mínima significativa (LSD) de Tukey-Kramer. Las hipótesis contrastadas fueron: H₀) la media de las observaciones realizadas por cada método empírico es igual a la del método de referencia y H_A) al menos una media de los métodos empíricos es diferente a la del método de referencia. También se realizó un análisis de regresión lineal entre las observaciones de cada método empírico contra las del método de referencia.

$$ME = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)}{N} \right) \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \right] \quad (5)$$

where a_i is the value estimated by the empirical method, t_i is the value obtained with the reference method, \bar{a} is the average of the estimates with the empirical method, \bar{t} is the average of the reference method values, and N is the total number of measurements.

Spatial and temporal analysis

The geographic information was organized in a Geographic Information System (GIS) with QGIS software ver. 3.8 “Zanzibar”. The IDW method was used to obtain regular interpolated surfaces of monthly, seasonal, and average annual values of meteorological variables and ET_o with a 1 km x 1 km pixel size. A spatio-temporal analysis of ET_o values was performed with the maps obtained, including precipitation and temperature spatial and temporal distribution. Due to the volume of information generated in this study, only the annual and seasonal maps: spring (March-May), summer (June-August), autumn (September-November) and winter (December-February), are shown.

Results and discussion

This section includes a brief analysis of the spatial and temporal characteristics of temperature and precipitation in the state of Chihuahua to highlight the relationship between these variables and ET_o . ET_o values obtained, their statistical analysis, and spatiotemporal distribution are shown.

Temporal analysis of precipitation and temperature

Figure 2 shows the maximum and minimum average annual temperature and the annual cumulative precipitation for 1960-2013. The maximum temperature in this period ranged from 28.5 °C (2011) to 25 °C, while the minimum temperature was between 10.7 and 7.7 °C (1973). On the other hand, the average annual cumulative precipitation was 270 mm; the highest value was in 2004 (493 mm) and the lowest in 1960 (55 mm).

Chihuahua shows a monomodal cycle concerning temperature and precipitation (Figure 3). The average maximum temperature ranged from 18 °C in January to 34.4 °C in June, while the minimum temperature varied from 0.3 °C in January to 17 °C

En este caso, las hipótesis probadas fueron: H_0) la pendiente de la línea de regresión es igual a 0 y H_A) la pendiente de la línea de regresión es diferente de 0. Los estadísticos de prueba considerados fueron el coeficiente de determinación (R^2), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (CME), el error medio (EM) y la eficiencia Nash-Sutcliffe (ENS), los cuales se calcularon mediante las Ecuaciones 2 a 5, respectivamente (Alexandris *et al.*, 2006; Cervantes-Osornio *et al.*, 2012; Djaman *et al.*, 2018; Nash & Sutcliffe, 1970; Tabari, 2010):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})(t_i - \bar{t})]^2}{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2][\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2]} \quad (2)$$

$$CME = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)^2}{N} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$EM = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)}{N} \right) \quad (4)$$

$$ENS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \right] \quad (5)$$

donde a_i es el valor estimado por el método empírico, t_i es el valor obtenido con el método de referencia, \bar{a} es el promedio de las estimaciones con el método empírico, \bar{t} es el promedio de las observaciones del método de referencia y N es el número total de observaciones.

Análisis espacial y temporal

La información geográfica se organizó en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el programa QGIS ver. 3.8 “Zanzibar”. Se utilizó el método IDW para obtener superficies regulares interpoladas de valores promedio mensuales, estacionales y anuales de las variables meteorológicas y de la ET_o con tamaño de pixel de 1 km x 1 km. Con los mapas obtenidos, se realizó un análisis espacio-temporal de los valores de ET_o , incluyendo la distribución espacial y temporal de la precipitación y las temperaturas. Dado el volumen de información generada en este trabajo, únicamente se presentan los mapas anuales y estacionales: primavera (marzo-mayo), verano (junio-agosto), otoño (septiembre-noviembre) e invierno (diciembre-febrero).

Resultados y discusión

En esta sección se presenta un breve análisis del comportamiento espacial y temporal de la temperatura y la precipitación en el estado de Chihuahua, a fin de destacar la relación de estas variables con la ET_o . Posteriormente, se presentan los valores de la ET_o obtenidos, su análisis estadístico y su comportamiento espacio-temporal.

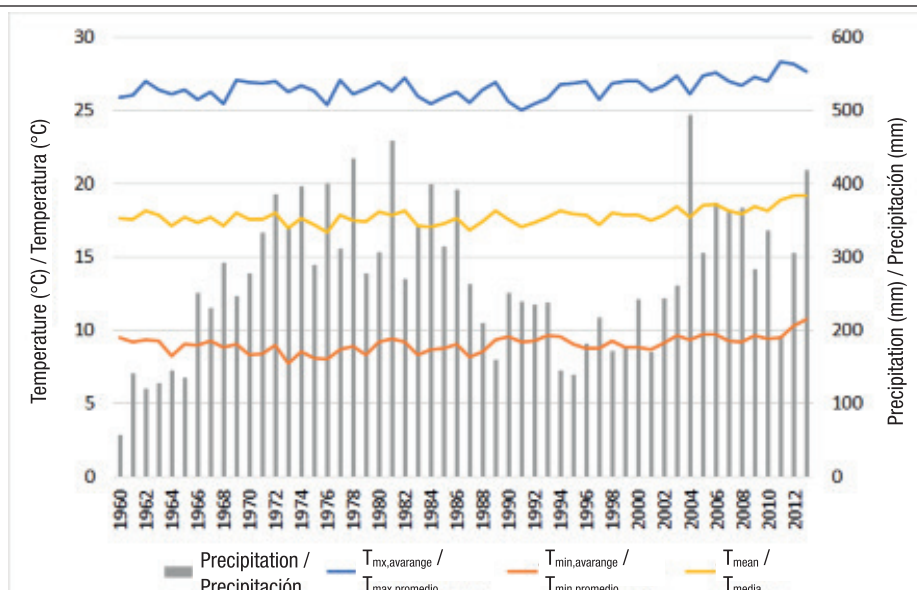


Figure 2. Mean annual temperature and annual cumulative precipitation in Chihuahua, México (1960-2013).

Figura 2. Temperatura promedio anual y precipitación anual acumulada en Chihuahua, México (periodo 1960-2013).

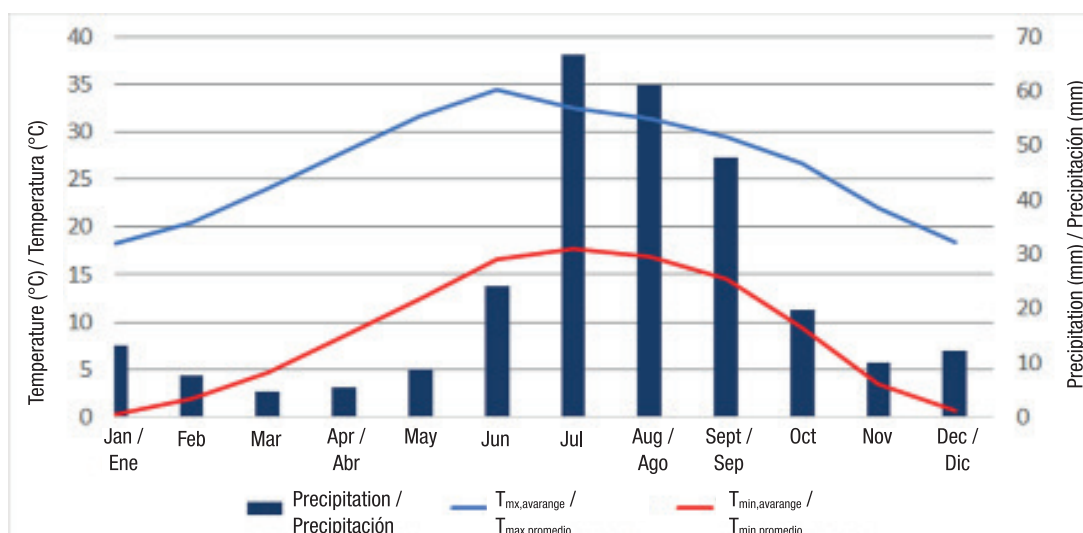


Figure 3. Mean monthly temperature (maximum and minimum) and mean monthly precipitation (1960-2013).

Figura 3. Temperatura (máxima y mínima) y precipitación promedio mensual (periodo 1960-2013).

in July. The highest monthly average precipitation was in July (66.6 mm), and the lowest value (4.8 mm) was recorded in March. The figure shows that the high-temperature season coincides with the rainy season (June-September). The dry season coincides with low temperatures (October-March); therefore, the planning of sowing and harvesting is necessary.

Spatial distribution of temperature and precipitation

Chihuahua is the largest state in Mexico, which generates significant differences in the distribution

Análisis temporal de precipitación y temperatura

En la Figura 2 se presenta la temperatura promedio anual máxima y mínima, así como la precipitación anual acumulada en el periodo 1960-2013. La temperatura máxima en este periodo osciló de 28.5 °C (2011) a 25 °C, mientras que la temperatura mínima estuvo entre 10.7 y 7.7 °C (1973). Por otra parte, la precipitación anual acumulada promedio fue de 270 mm; el valor más alto se presentó en 2004 (493 mm) y el más bajo en 1960 (55 mm).

Chihuahua presenta un comportamiento monomodal respecto a la temperatura y la precipitación (Figura 3).

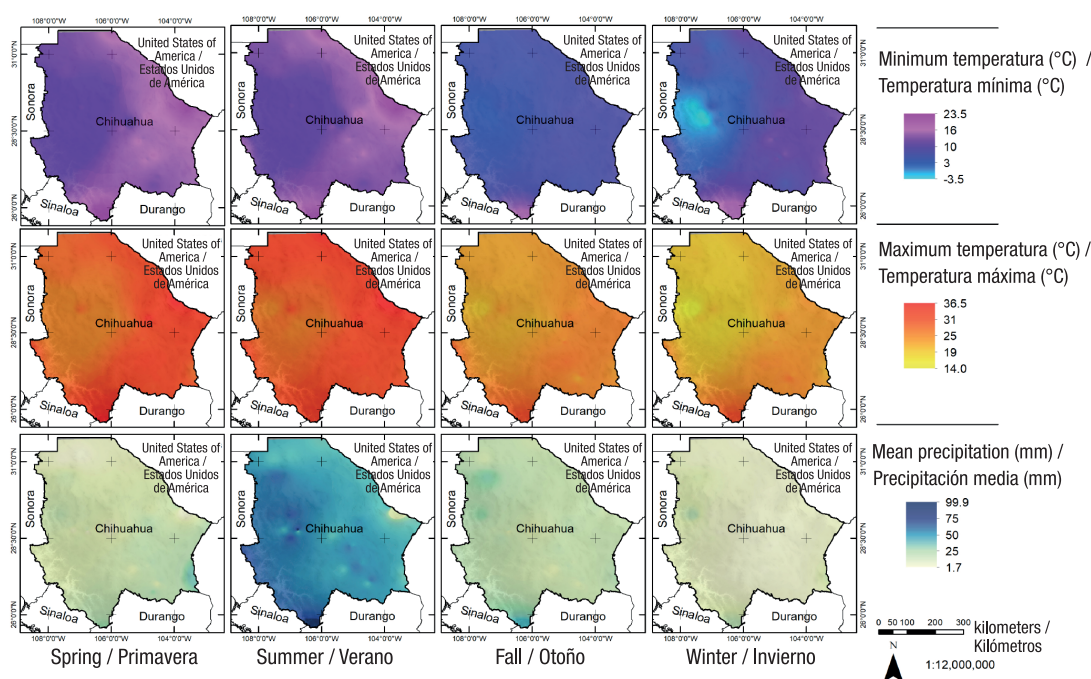


Figure 4. Spatial distribution of seasonal temperature (maximum and minimum) and precipitation in Chihuahua (1960-2013).

Figura 4. Distribución espacial de la temperatura (máxima y mínima) y la precipitación estacional en Chihuahua (promedio 1960-2013).

of temperature and precipitation. Figure 4 shows the spatial distribution of temperatures (maximum and minimum) and average seasonal rainfall in the state. The maximum temperature (36.5 °C) occurs in summer in Ojinaga (800 m a. s. l.), while the minimum (14.2 °C) happens in winter in Maderas (2 110 m a. s. l.). Therefore, agriculture is mainly carried out in the spring-summer cycle (May-October).

In Chihuahua, temperature decreases at a rate of 6 °C per 1000 m ascent, according to the linear regression model in Figure 5a ($R^2 = 0.74$). Temperature varies from 34 °C at 169 (m a. s. l.) to 15 °C at 3 286 (m a. s. l.).

Regarding precipitation, the maximum value was for the municipality of Bachiniva (99 mm, 2 017 MASL), while the minimum was in spring in Ojinaga (1.7 mm, 770 m a. s. l.). It is estimated that in 75 % of the state's surface, the annual cumulative precipitation is less than 300 mm, with a gradient that increases from east to west: from 73 mm in the region adjacent to the United States to a maximum of 552 mm in the Sierra Madre Occidental.

The precipitation-height relationship is complex. Figure 5b shows the model obtained by linear regression of this relationship. The R^2 value was 0.28 ($P \leq 0.05$), with a precipitation gradient increasing at a rate of 9.7 mm per 1000 m of ascent. This relationship, although low, indicates that precipitation could be

La temperatura promedio máxima osciló de 18 °C en enero a 34.4 °C en junio, mientras que la temperatura mínima varió de 0.3 °C en enero a 17 °C en julio. La precipitación promedio mensual más alta sucedió en julio (66.6 mm), y en marzo se registró el valor más bajo (4.8 mm). En la misma figura se observa que la época de temperaturas altas coincide con la época de lluvias (junio-septiembre), y la época seca coincide con temperaturas bajas (octubre-marzo), por lo que la planificación de la siembra y cosecha resulta necesaria.

Distribución espacial de temperatura y precipitación

Chihuahua es el estado más extenso de México, lo que genera diferencias significativas en la distribución de la temperatura y la precipitación. La Figura 4 muestra la distribución espacial de las temperaturas (máxima y mínima) y precipitación estacional promedio en dicho estado. La temperatura máxima (36.5 °C) ocurre en verano en el municipio de Ojinaga (800 m s. n. m.), mientras que la mínima (14.2 °C) ocurre en invierno en el municipio de Maderas (2110 m s. n. m.). Por lo anterior, la agricultura se realiza principalmente en el ciclo primavera-verano (mayo-octubre).

En Chihuahua la temperatura disminuye a razón de 6 °C por cada 1000 m de ascenso, esto de acuerdo con

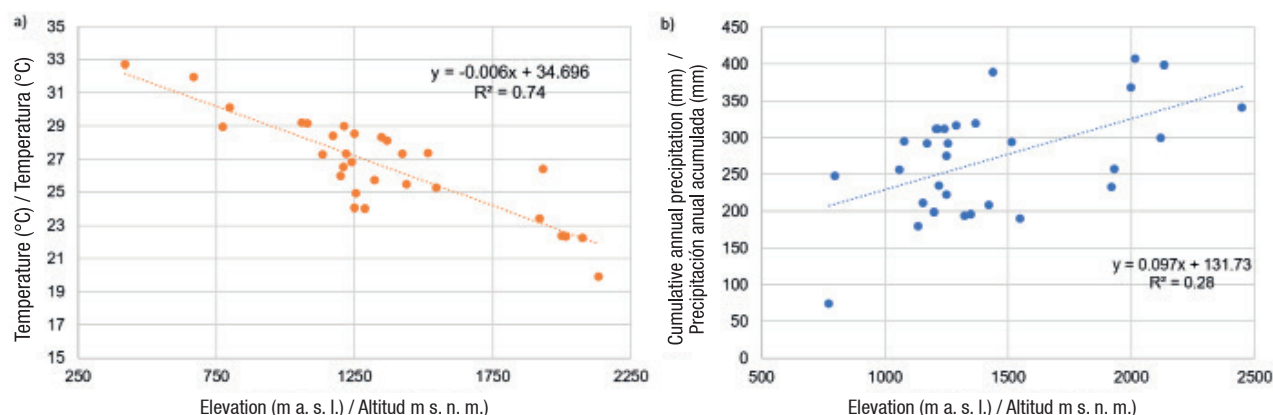


Figure 5. Linear regression between elevation (m a. s. l.) versus a) mean annual temperature (°C) and b) cumulative annual precipitation (mm) in weather stations of the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) in Chihuahua, Mexico.

Figura 5. Regresión lineal: a) temperatura promedio anual (°C) vs altura (m s. n. m.) y b) precipitación anual acumulada (mm) vs altura (m s. n. m.), en estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de Chihuahua, México.

influenced by other variables, such as terrain relief and slope, especially in mountainous regions (Geng et al., 2017).

Reference evapotranspiration values

The statistical parameters (mean, standard deviation, quartiles) and outliers of ET_0 allows comparing the methods used and studying their frequency distribution. The diagrams in Figure 6 show the variation of the average daily ET_0 calculated with the eight empirical methods, which indicate a mean ranging from 2.5 to 5.3 mm·day⁻¹ and a standard deviation between 1 and 2.2 mm·day⁻¹. The PMMF method reached an average value of 5.3 mm·day⁻¹, with a standard deviation of 2.2 mm·day⁻¹. The Dg and Hg methods are the closest to PMMF, with a mean of 5.2 and 4.5 mm·day⁻¹, respectively; this represents underestimating ET_0 values of 2 and 15 % concerning PMMF. This coincides with that reported by Allen et al. (1998). They indicate that the methods that come closest to PMMF consider temperature and radiation as the primary sources of energy that promote evapotranspiration, like Hg and Dg.

The methods with the lowest dispersion were Mm (1.5 to 4.5 mm·day⁻¹) and BC (2.2 to 5.3 mm·day⁻¹), which coincides with that reported by Le et al. (2012), who indicate that in regions with high variation of climate, height and land use conditions, empirical methods do not always provide satisfactory results. PMMF and Dg methods had the highest values of standard deviation (S) (2.2 and 1.9 mm·day⁻¹, respectively), while Mm and BC had the lowest values of S (1.0 mm·day⁻¹, in both cases).

el modelo de regresión lineal de la Figura 5a ($R^2 = 0.74$). La temperatura varía de los 34 °C a 169 m s. n. m., hasta los 15 °C a 3286 m s. n. m.

Respecto a la precipitación, el valor máximo se presentó en el municipio de Bachiniva (99 mm, 2017 m s. n. m.), mientras que el mínimo fue en primavera en el municipio de Ojinaga (1.7 mm, 770 m s. n. m.). Se estima que en el 75 % de la superficie del estado, la precipitación acumulada anual es menor a 300 mm, con un gradiente que incrementa de este a oeste: desde 73 mm en la región colindante con Estados Unidos, hasta un máximo de 552 mm en la sierra madre occidental.

La relación precipitación-altura es más compleja. La Figura 5b muestra el modelo obtenido por regresión lineal de dicha relación. El valor de R^2 fue de 0.28 ($P \leq 0.05$), con un gradiente de precipitación que aumenta a razón de 9.7 mm por cada 1 000 m de ascenso. Esta relación, aunque baja, indica que la precipitación podría ser influenciada por otras variables, tales como el relieve y la pendiente del terreno, en especial en regiones montañosas (Geng et al., 2017).

Valores de la evapotranspiración de referencia

El análisis de los parámetros estadísticos (media, desviación estándar, cuartiles) y los valores atípicos de la ET_0 permiten comparar los métodos utilizados y estudiar su distribución de frecuencias. Los diagramas de la Figura 6 muestran la variabilidad de la ET_0 promedio diaria calculada con los ocho métodos empíricos, los cuales presentan una media que oscila de 2.5 a 5.3 mm·día⁻¹, y una desviación estándar entre

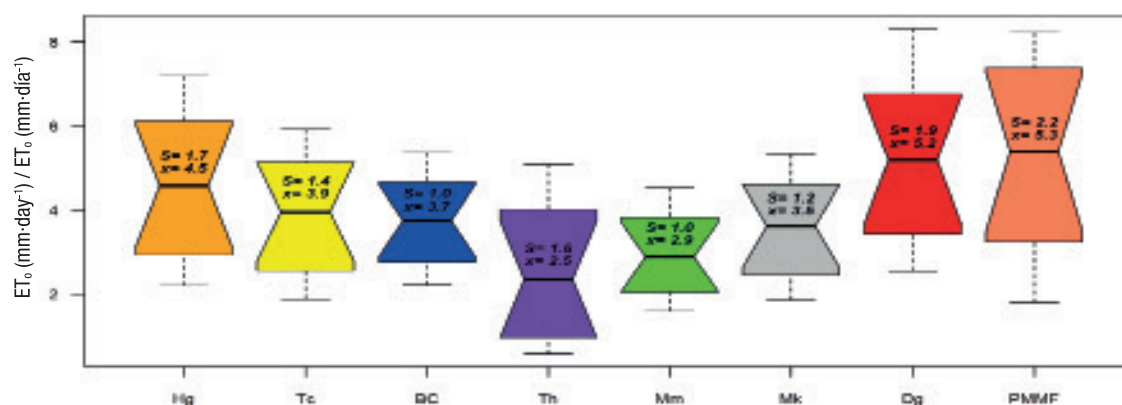


Figure 6. Box plot for reference evapotranspiration (ET_0) values estimated from eight empirical methods.

Figura 6. Diagrama de cajas para valores de evapotranspiración de referencia (ET_0) estimados a partir de ocho métodos empíricos.

Statistical analysis

The comparative statistical analysis between the empirical methods identified the closest methods to the reference method (PMMF). Table 3 and Figure 7 show the analysis of variance for the comparison of means and linear regression between ET_0 values estimated by empirical methods and the PMMF reference method. The comparison of means shows that, except for the Dg method, the empirical methods show statistically significant differences ($P > 0.05$) concerning PMMF. In the case of linear regression, all methods showed a statistically significant linear relationship with the PMMF method.

All methods had R^2 values above the minimum value (0.70) reported by Moriasi et al. (2007), indicating a good fit concerning the reference method. RMSE values ranged from 1.2 to 2.9 mm·day⁻¹, while ME ranged from -0.7 to -2.7 mm·day⁻¹ and NSE went from -0.55 to 0.71; this suggests that all methods underestimated ET_0 calculated with PMMF. The results obtained agree with those reported by Lozoya et al. (2014). The method closest to PMMF was Hg with $R^2 = 0.83$, RMSE = 1.1632 mm·day⁻¹, ME = -0.695 mm·day⁻¹, NSE = 0.71. It can be an alternative to calculate ET_0 in regions where only temperature records are available, as in Chihuahua, since the value of extraterrestrial radiation can be obtained from tables or with the equation recommended by Allen et al. (1998). However, if solar radiation measurements, wind speed, temperature and humidity are available, it would be feasible to use PMMF (Lozoya et al., 2014).

The comparative analysis shows that the methods that consider temperature and radiation (Hg, Tc, BC, Th

1 and 2.2 mm·day⁻¹. The method PMMF reached a value of 5.3 mm·day⁻¹, with a standard deviation of 2.2 mm·day⁻¹. The methods Dg and Hg are the ones that most approximate to PMMF, with a mean of 5.2 and 4.5 mm·day⁻¹, respectively; this represents a subestimation of the values of the ET_0 of 2 and 15 % respect to PMMF. The anterior coincides with what reported by Allen et al. (1998), who indicate that the methods that most approximate to PMMF are those that consider temperature and radiation as the main sources of energy that promote evapotranspiration, among which are Hg and Dg.

The methods that presented lower dispersion were Mm (1.5 to 4.5 mm·day⁻¹) and BC (2.2 to 5.3 mm·day⁻¹), which coincides with what reported by Le et al. (2012), who indicate that in regions with high variability of climate conditions, altitude and land use, the empirical methods do not always provide satisfactory results. The methods PMMF and Dg obtained the highest values of standard deviation (S) (2.2 and 1.9 mm·day⁻¹, respectively), while Mm and BC present the minimum values of S (1.0 mm·day⁻¹, in both cases).

Análisis estadístico

The comparative statistical analysis between the empirical methods allowed identifying the methods that most approximate to the reference method (PMMF). In Table 3 and Figure 7 the results of the analysis of variance for the comparison of means and linear regression between ET_0 values estimated by empirical methods and the PMMF reference method are shown. The comparison of means shows that, except for the Dg method, the empirical methods show statistically significant differences ($P > 0.05$) concerning PMMF. In the case of linear regression, all methods showed a statistically significant linear relationship with the PMMF method.

Table 3. Results of comparison of means and linear regression of reference evapotranspiration (ET₀) values between empirical methods (Hg, Tc, BC, Th, Mm, Mk and Dg) and the reference method (Penman-Monteith modified by FAO [PMMF]).
Cuadro 3. Resultados de la comparación de medias y la regresión lineal de los valores de evapotranspiración de referencia (ET₀) entre métodos empíricos (Hg, Tc, BC, Th, Mm, Mk y Dg) y el método de referencia (Penman-Monteith, modificado por la FAO [PMMF]).

Method/ Método	Comparison of means / Comparación de medias						Linear regression / Regresión Lineal							
	Mean (μ) / Media (μ)	S	C. I. for the mean/ I.C. para la media		Difference of means / Diferencia de medias	C.I. for the difference of means/ I.C. para la diferencia de medias		Slope / Pend.	C.I. for the slope / I.C. para la pendiente		R ²	RMSE / CME	ME / EM	NSE/ ENS
			Lower/ Inferior	Upper/ Superior		Lower/ Inferior	Upper/ Superior		Lower/ Inferior	Upper/ Superior				
Dg	5.24 a	1.96	5.09	5.39	0.04	-0.22	0.31	0.93*	0.89	0.97	0.70	1.23	-0.97	0.68
Hg	4.59 b*	1.71	4.46	4.72	0.70	0.43	0.96	0.64*	0.62	0.67	0.83	1.16	-0.69	0.71
Tc	3.91 c*	1.40	3.80	4.01	1.38	1.11	1.64	0.67*	0.65	0.70	0.83	1.73	-1.38	0.37
BC	3.73 cd*	1.05	3.65	3.81	1.56	1.29	1.82	1.30*	1.28	1.32	0.78	2.02	-1.55	0.14
Mk	3.58 d*	1.19	3.49	3.67	1.70	1.44	1.96	0.85*	0.83	0.87	0.81	2.11	-1.74	0.06
Mm	2.94 e*	1.01	2.86	3.02	2.34	2.08	2.61	0.61*	0.59	0.63	0.68	2.72	-2.34	-0.55
Th	2.54 f*	1.62	2.42	2.67	2.74	2.48	3.00	-1.18*	-1.21	-1.15	0.76	2.94	-2.74	-0.81

Dg = Hargreaves modified by Droogers; Hg = Hargreaves; Tc = Turc; BC = Blaney Criddle; Mk = Makkink; Mm = Malmstrom; Th = Thornthwaite; S = standard deviation; R² = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; ME = mean error; NSE = Nash-Sutcliffe efficiency; C.I. = confidence interval. Letter indicates statistical difference group; * indicates statistically significant differences (LSD, P < 0.05) in the comparison of means and that the linear regression is statistically significant.

Dg = Hargreaves modificado por Droogers; Hg = Hargreaves; Tc = Turc; BC = Blaney Criddle; Mk = Makkink; Mm = Malmstrom; Th = Thornthwaite; S = desviación estándar; R² = coeficiente de determinación; CME = raíz cuadrada del error cuadrático medio; EM = error medio; ENS = eficiencia Nash-Sutcliffe; I.C. = intervalo de confianza. La letra indica el grupo de diferencia estadística; * indica diferencias estadísticamente significativas (LSD, P < 0.05) en la comparación de medias y que la regresión lineal es estadísticamente significativa.

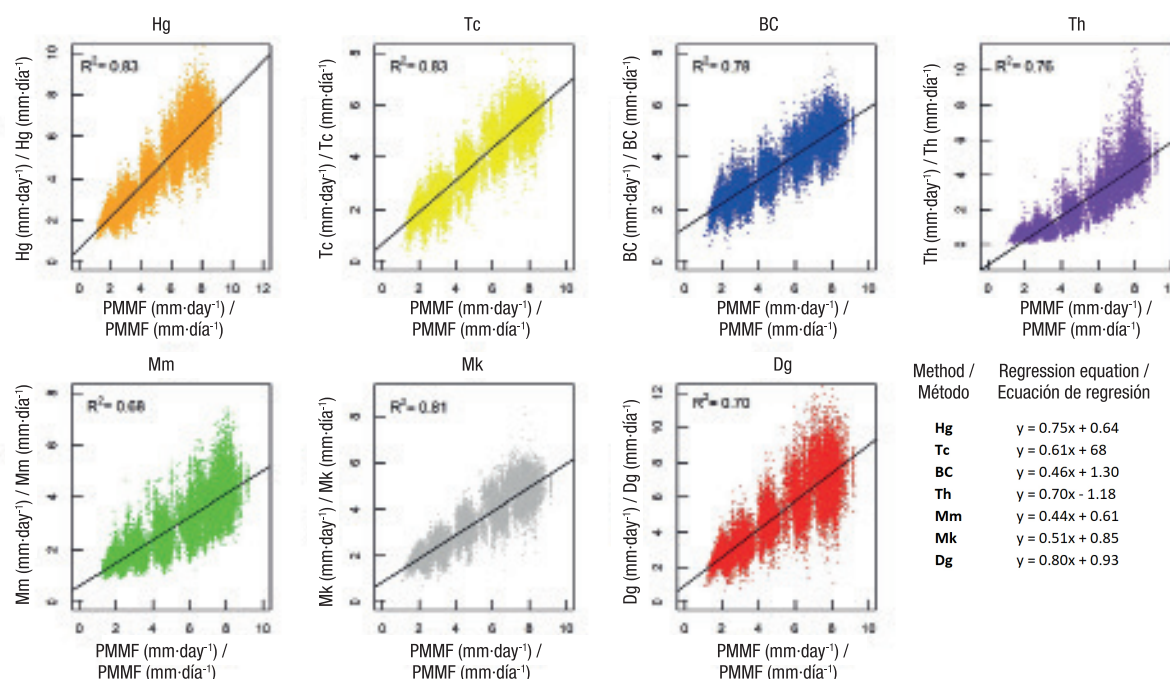


Figure 7. Linear regression between the seven empirical methods and Penman-Monteith method modified by the FAO (PMMF). Hg = Hargreaves; Tc = Turc; BC = Blaney Criddle; Th = Thornthwaite; Mm = Malmstrom; Mk = Makkink; Dg = Hargreaves modified by Droogers.

Figura 7. Regresión lineal de siete métodos empíricos con respecto al método Penman-Monteith, modificado por la FAO (PMMF). Hg = Hargreaves; Tc = Turc; BC = Blaney Criddle; Th = Thornthwaite; Mm = Malmstrom; Mk = Makkink; Dg = Hargreaves modificado por Droogers.

and Mk) performed better regarding PMMF than those using temperature and other variables such as relative humidity and precipitation (Mn and Dg).

Analysis of monthly reference evapotranspiration

A comparative analysis of the average daily values of ET_0 on a monthly scale, estimated with the different empirical methods, shows that all the methods studied have similar results throughout the year, although with significant differences depending on the season (Figure 8). According to the results, the maximum ET_0 values occur between June and July (4.5 to 8.3 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$), and the minimum between January and December (0.5 to 2.5 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$). Six methods underestimate PMMF most of the year with values ranging from 0.1 to 4.1 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ (Hg, Tc, BC, Th, Mm and Mk). The months with the most considerable differences concerning PMMF (between 2 and 4 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) are in the rainy spring and summer seasons (February and October), while the minor differences (< 2 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) correspond to late autumn and early winter (November, December and January) (Figure 8), which is in agreement with that reported by Ayyoub et al. (2017). The Dg method is the only one that overestimates PMMF almost throughout the year, except in July, August, and September.

($P > 0.05$) con respecto a PMMF. Para el caso de la regresión lineal, todos los métodos mostraron una relación lineal estadísticamente significativa con el método PMMF.

Todos los métodos tuvieron valores de R^2 por encima del valor mínimo (0.70) reportado por Moriasi et al. (2007), lo que indica un buen ajuste con respecto al método de referencia. Los valores de CME oscilaron entre 1.2 y 2.9 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$, mientras que el EM varió de -0.7 a -2.7 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y el ENS osciló de -0.55 a 0.71 ; esto sugiere que todos los métodos subestimaron a la ET_0 calculada con PMMF. Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por Lozoya et al. (2014). El método más cercano a PMMF fue Hg con $R^2 = 0.83$, $\text{CME} = 1.1632$ $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$, $\text{EM} = -0.695$ $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y $\text{ENS} = 0.71$, por lo que puede ser una alternativa para calcular la ET_0 en regiones donde se disponga únicamente de registros de temperatura como en Chihuahua, ya que el valor de la radiación extraterrestre se puede obtener de tablas o con la ecuación recomendada por Allen et al. (1998). No obstante, si existen mediciones de radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad, sería factible utilizar PMMF (Lozoya et al., 2014).

En el análisis comparativo se observa que los métodos

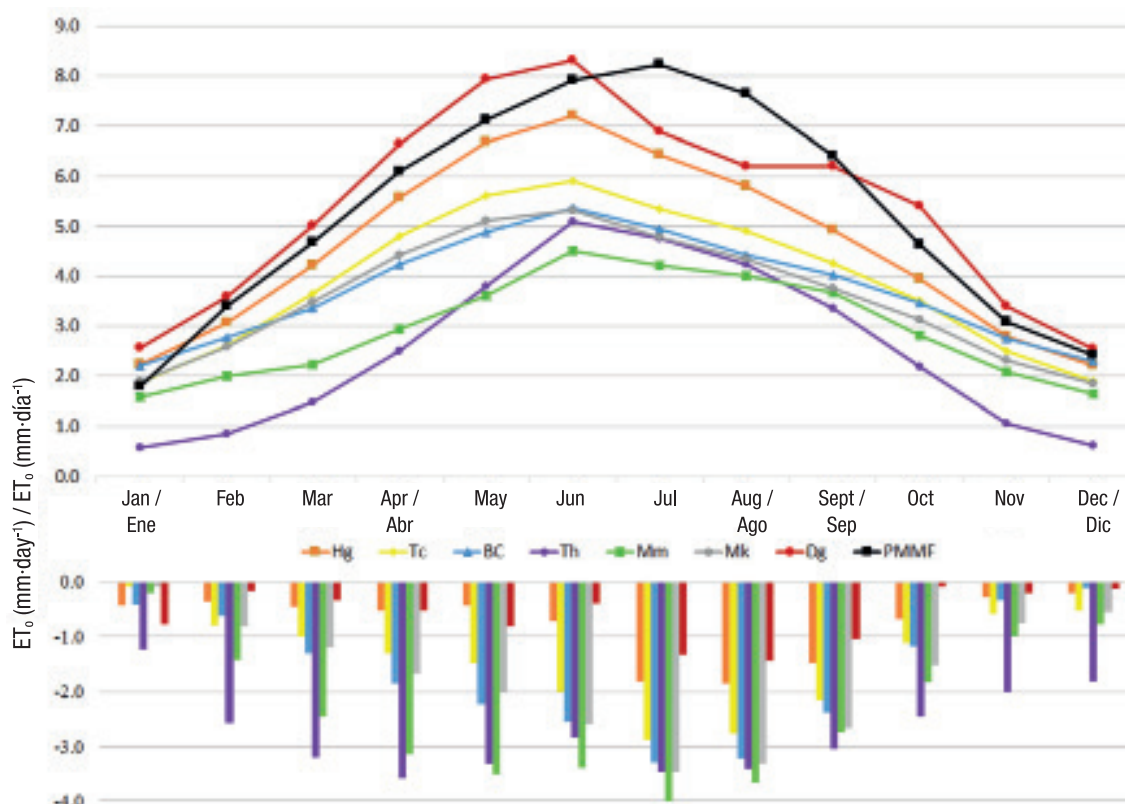


Figure 8. Temporal monthly distribution of reference evapotranspiration (ET_0) estimated with empirical methods and differences concerning the reference method (Penman-Monteith, modified by the FAO (PMMF)).

Figura 8. Comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia (ET_0) estimada con métodos empíricos y diferencias con respecto al método de referencia (Penman-Monteith, modificado por la FAO (PMMF)).

The most significant differences concerning PMMF occur in June with values ranging from 1.3 to 4.1 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$, while the minor differences (0.2 to 1.8 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) occur in December and January. The closest to PMMF is Hg and Dg, with differences ranging from 0.1 to 1.8 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$. These extremes occur in December and August, respectively, indicating that the most significant differences are concentrated in the months when the temperature begins to decrease, coinciding with the rainy seasons, similar to that obtained by Lozoya et al. (2014). These results indicate that estimating ET_0 closest to the reference method (PMMF) on a monthly scale is Hg. It was used throughout the state to obtain homogeneous surfaces of monthly, seasonal and annual values.

Spatial distribution of seasonal reference evapotranspiration

The spatial interpolation of point values of ET_0 in areas where there is no climate information allows the elaboration of maps to analyze spatial variation. Figure 9 shows seasonal average maps generated from the spatial interpolation of daily ET_0 calculated with the Hg method. The highest ET_0 values were reported

que consideran la temperatura y la radiación (Hg, Tc, BC, Th y Mk) tuvieron mejor desempeño con respecto a PMMF, en comparación con aquellos que consideran la temperatura y otras variables como la humedad relativa y la precipitación (Mn y Dg).

Análisis de la evapotranspiración de referencia mensual

Un análisis comparativo de los valores promedio diarios de la ET_0 a escala mensual, estimado con los diferentes métodos empíricos, muestra que todos los métodos estudiados presentan resultados similares a lo largo del año, aunque con diferencias importantes según la época (Figura 8). De acuerdo con los resultados, los valores máximos de la ET_0 se presentan entre junio y julio (4.5 a 8.3 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$), y los mínimos, entre enero y diciembre (0.5 a 2.5 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$). Seis métodos subestiman a PMMF la mayor parte del año con valores que varían de 0.1 a 4.1 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ (Hg, Tc, BC, Th, Mn y Mk). Los meses con mayores diferencias respecto a PMMF (entre 2 y 4 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) se concentran en la época de lluvias y las estaciones primavera y verano (febrero y octubre), mientras que las menores diferencias (< 2 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) corresponden a fines de otoño e

in the spring (5.6 to 7.1 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) and summer (4.9 to 6.5 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$), increasing from higher to lower elevations in a west-east direction. The highest ET_0 value (7 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) occurred in the spring at the Colina station (key 8 311, at $1\,214$ m a. s. l.). The lowest ET_0 values occurred in the fall (2.5 to 3.6 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) and winter (2.6 to 3.9 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$), with a predominant increase from high to low elevations from north to south. The lowest ET_0 value (3.5 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) occurred in the fall at the station La Huerta, Topia (key 10037, at 670 m a. s. l.).

The behavior mentioned above indicates a strong correlation between ET_0 , time of the year and elevation, especially during spring-summer and in the direction of the Sierra Madre Occidental. It coincides with that reported by Sun et al. (2020). They indicate that ET_0 gradually increases with increasing elevation up to a threshold altitude (approximately 1900 m a. s. l. in the study region) and then decreases. It may be because,

inicios de invierno (noviembre, diciembre y enero) (Figura 8), lo cual coincide con lo reportado por Ayyoub et al. (2017). El método Dg es el único que sobreestima a PMMF casi durante todo el año, excepto en los meses de julio, agosto y septiembre.

Las mayores diferencias con respecto a PMMF se dan en junio con valores que oscilan entre 1.3 y 4.1 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$, mientras que en diciembre y enero se presentan las diferencias menores (0.2 a 1.8 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$). Los métodos que más se aproximan a PMMF son Hg y Dg, con diferencias que oscilan entre 0.1 y 1.8 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$. Estos extremos ocurren en diciembre y agosto, respectivamente, lo que indica que las mayores diferencias se concentran en los meses en que la temperatura comienza a disminuir, coincidiendo con las épocas de lluvias, similar a lo obtenido por Lozoya et al. (2014). Estos resultados indican que el método para estimar la ET_0 que más se aproxima al método de referencia (PMMF) a escala mensual es Hg, por lo que se utilizó en todo el

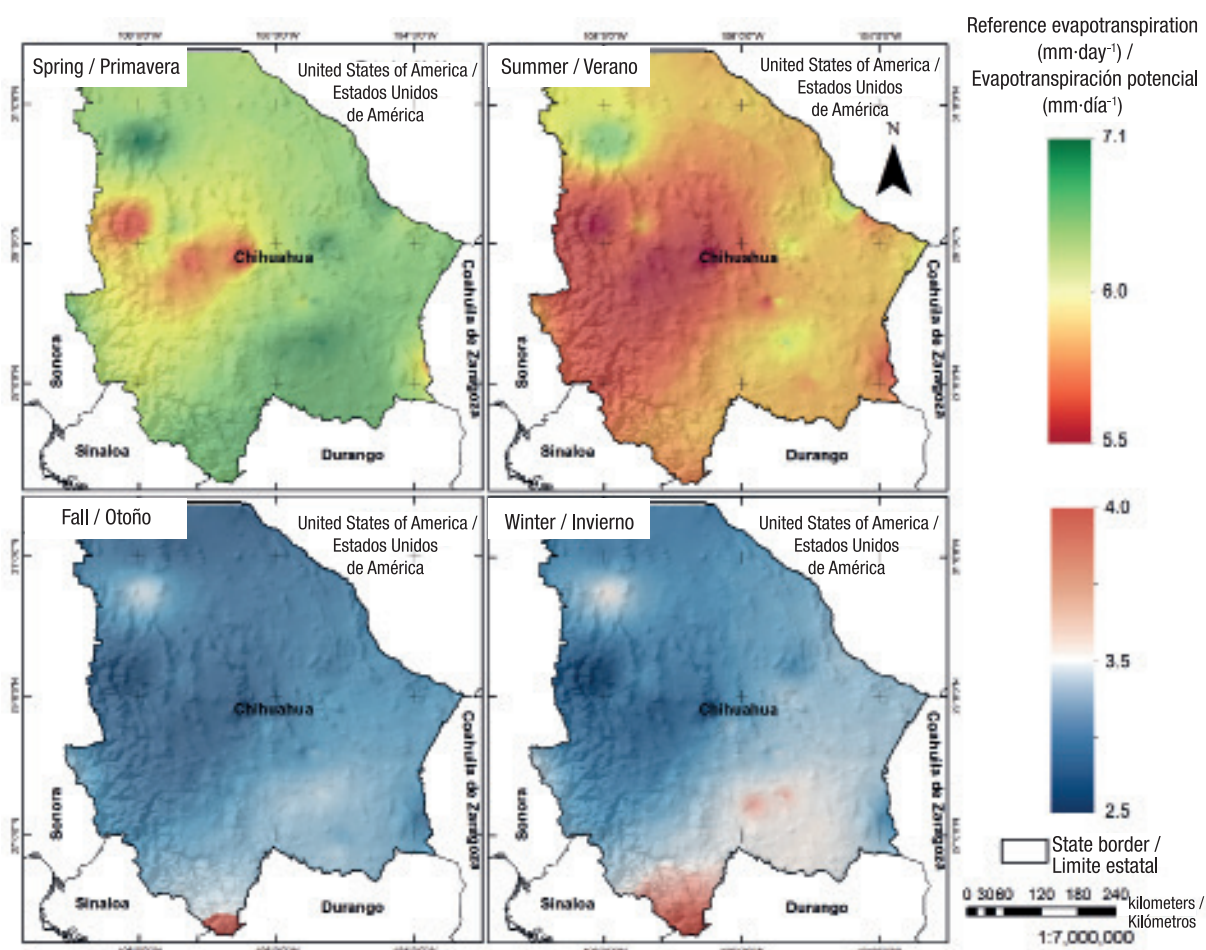


Figure 9. Spatial distribution of reference evapotranspiration (ET_0) estimated by the Hargreaves method (1960-2013).
Figura 9. Distribución espacial de evapotranspiración de referencia (ET_0) por el método Hargreaves (periodo 1960-2013).

during the warmer months, solar radiation is the primary source of energy for evapotranspiration, a dependence that intensifies with increasing altitude (Allen et al., 1998). In contrast, lower radiation availability in fall-winter generates lower ET_0 values, causing the spatial gradient to have a predominant relationship with latitude rather than elevation, consistent with that reported by Tang et al. (2019). Similar results to those of the PMMF model were obtained by Monterroso-Rivas et al. (2016), Ruíz-Álvarez et al. (2014) and Sheffield et al. (2010).

The seasonal analysis shows significant differences in the spatial distribution of ET_0 in Chihuahua, about the time of the year and altitude. On the other hand, for agricultural purposes, it is essential to represent the spatial distribution of the daily averages and annual cumulative values obtained with the Hg method. A standard deviation map of the annual ET_0 is also added to identify the areas with significant variability (Figure 10), which is helpful for water resource planning and management.

Monthly or annual cumulative ET_0 values are crucial for irrigated agriculture when a water balance is required to know the soil moisture content and determine periods of deficit or excess. Annual values ranged

estado para obtener superficies homogéneas de valores mensuales, estacionales y anuales.

Distribución espacial de evapotranspiración de referencia estacional

La interpolación espacial de valores puntuales de la ET_0 en zonas donde no se cuenta con información climática permite la elaboración de mapas para analizar la variabilidad espacial. En la Figura 9 se presentan mapas promedio estacionales generados a partir de la interpolación espacial de la ET_0 diaria calculada con el método Hg. Los valores más altos de la ET_0 se presentaron en primavera (5.6 a 7.1 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) y verano (4.9 a 6.5 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$), con un incremento que va desde las partes más altas a las bajas en dirección oeste-este. El valor más alto de la ET_0 (7 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) se dio en primavera en la estación Colina (clave 8 311, a 1 214 m s. n. m.). Los valores más bajos de la ET_0 se presentaron en otoño (2.5 a 3.6 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) e invierno (2.6 a 3.9 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$), con un incremento predominante de las partes altas a las bajas de norte a sur. El valor más bajo de la ET_0 (3.5 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) se presentó en otoño en la estación La Huerta, Topia (clave 10037, a 670 m s. n. m.).

El comportamiento mencionado indica una fuerte correlación entre la ET_0 , la época del año y la elevación,

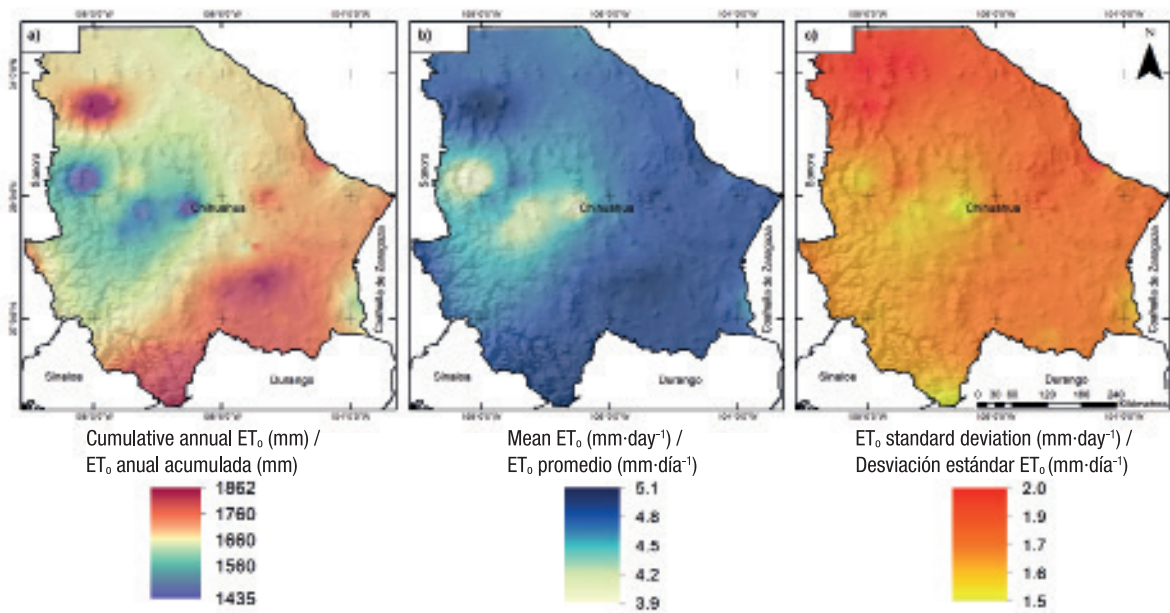


Figure 10. Spatial distribution of reference evapotranspiration (ET_0) (a) annual cumulative (b) daily average, (c) standard deviation estimated with the Hargreaves method (period 1960-2013).

Figura 10. Distribución espacial de la evapotranspiración de referencia (ET_0) anual acumulada (a), ET_0 promedio anual (b) y desviación estándar de la ET_0 diaria (c) estimada con el método Hargreaves (periodo 1960-2013).

from 1435 to 1862 mm, while daily values ranged from 3.9 to 5.1 mm·day⁻¹. These values are similar to those obtained by Orozco-Corral (2010) and Segura-Castruita and Ortiz-Solorio (2017).

Figures 10a and 10b show that the annual cumulative and daily average ET_o values have similar spatial behavior. It can be observed that the minimum values are concentrated in the western and central regions (near the Peñitas and Majalca stations). A radial increase occurs towards the southern area (near the La Huerta station) and north (near the Dublan station) in the direction of the Sierra Madre Occidental. This behavior indicates that elevation plays an essential role in the distribution of ET_o. An increase in height leads to a rise in ET_o, especially in the warm seasons (spring-summer). It is because radiation is the primary energy source for ET_o, as reported by Sun et al. (2020) and Tang et al. (2019).

The standard deviation is a measure of the dispersion of the data concerning the mean. In this sense, Figure 10c shows that the spatial variation of the daily mean values of ET_o ranges between 1.5 and 2.0 mm·day⁻¹ in the direction of the Sierra Madre Occidental. It confirms the effect of altitude on ET_o estimation since it is observed that the higher elevations have lower variation compared with the great plains of the state had more significant variation during the period analyzed.

Conclusions

The empirical methods used underestimate ET_o with significant differences concerning the reference method (PMMF). Besides, the methods that consider temperature as an input variable (Hg and Dg) are closer to PMMF, indicating that radiation is the primary energy source for the evapotranspiration process in arid and semi-arid areas.

On a monthly scale, the most significant differences between the methods compared occur in the warm months that coincide with the rainy season (June to September), and the methods closest to PMMF are Dg and Hg. The latter has the advantage of requiring only temperature measurements available at most meteorological stations in Chihuahua.

The spatial variation of ET_o at the daily and monthly scales in Chihuahua directly relates to altitude, with maximums at low elevations and minimums at high peaks and is more evident in the warm months.

The IDW spatial interpolation method helps estimate the spatio-temporal variation of ET_o over large extensions. However, in areas such as Chihuahua, where meteorological variables such as temperature and

en especial durante primavera-verano y en dirección de la sierra madre occidental. Esto coincide con lo reportado por Sun et al. (2020), quienes indican que la ET_o aumenta gradualmente con el incremento de la elevación hasta una altura umbral (aproximadamente a los 1900 m s. n. m. en la región de estudio) y luego decrece. Lo anterior se puede deber a que, durante los meses más cálidos, la radiación solar es la fuente principal de energía para la evapotranspiración, dependencia que se intensifica con el incremento de la altura (Allen et al., 1998). Por el contrario, en otoño-invierno, la menor disponibilidad de radiación genera valores de ET_o más bajos, lo cual provoca que el gradiente espacial tenga una relación predominante con la latitud, más que con la elevación, lo que coincide con lo reportado por Tang et al. (2019). Resultados similares a los del modelo PMMF fueron obtenidos por Monterroso-Rivas et al. (2016), Ruíz-Álvarez et al. (2014) y Sheffield et al. (2010).

El análisis estacional reflejó diferencias importantes en la distribución espacial de la ET_o en Chihuahua, esto en relación con la época del año y la altura. Por otro lado, para fines agrícolas, resulta importante representar la distribución espacial de los valores anuales acumulados y los promedios diarios anuales de los valores obtenidos con el método Hg. También se adiciona un mapa de desviación estándar de la ET_o anual que permite identificar las zonas con mayor variabilidad (Figura 10), lo cual resulta útil para la planificación y gestión de recursos hídricos.

Los valores acumulados mensuales o anuales de la ET_o son cruciales para la agricultura de riego cuando se requiere hacer un balance hídrico para conocer el contenido de humedad del suelo y determinar los periodos de déficit o exceso. Los valores anuales oscilaron de 1435 a 1862 mm, mientras los valores diarios oscilaron de 3.9 a 5.1 mm·día⁻¹. Estos valores son similares a los obtenidos por Orozco-Corral (2010) y Segura-Castruita y Ortiz-Solorio (2017).

Las Figuras 10a y 10b muestran que los valores anuales acumulados y promedio diarios de la ET_o presentan un comportamiento espacial similar. Se puede observar que los valores mínimos se concentran en la región oeste y centro (cerca de las estaciones Peñitas y Majalca), de ahí ocurre un incremento radial hacia la región sur (cerca de la estación La Huerta) y norte (cerca de la estación Dublan) en dirección de la sierra madre occidental. Este comportamiento indica que la elevación juega un papel importante en la distribución de la ET_o, ya que un incremento en la elevación da lugar a un aumento de la ET_o, sobre todo en las estaciones cálidas (primavera-verano). Lo anterior debido a que la radiación es la principal fuente de energía para la ET_o, tal como lo reportan Sun et al. (2020) y Tang et al. (2019).

precipitation strongly influence ET_o , it is recommended to try other spatial interpolation methods such as kriging or co-kriging, which have shown promising results with these variables.

End of English version

References / Referencias

- Alexandris, S., Kerkides, P., & Liakatas, A. (2006). Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach. *Agricultural Water Management*, 82(3), 371-386. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.08.001>
- Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S., & Perrier, A. (1994). An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43(2), 35-92. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10025613989/en/>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>
- Aragón-Hernández, J. L., Aguilar-Martínez, G. A., Velázquez-Ríos, U., Jiménez-Magaña, M. R., & Maya-Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 20(2), 1-15. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Ayyoub, A., Er-Raki, S., Khabba, S., Merlin, O., Ezzahar, J., Rodriguez, J. C., Bahlaoui, A., & Chehbouni, A. (2017). A simple and alternative approach based on reference evapotranspiration and leaf area index for estimating tree transpiration in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 188, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.005>
- Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación empírica de la ETP en la República Mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*, 20(3), 99-110. http://revistatyc.org.mx/index.php/tyca/article/download/1031/pdf_1
- Cervantes-Osornio, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Ojeda-Bustamante, W. (2012). Radiación global diaria estimada con métodos convencionales y redes neuronales artificiales en el distrito de riego 075. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 4(2), 55-60. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2012.09.008>
- Comisión Nacional del Agua – Sistema Meteorológico Nacional (CONAGUA-SMN). (2019, September). *Información estadística climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Djaman, K., Irmak, S., Sall, M., Sow, A., & Kabenge, I. (2018). Comparison of sum-of-hourly and daily time step standardized ASCE Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Theoretical and Applied Climatology*,

La desviación estándar es una medida de dispersión de los datos respecto de la media. En ese sentido, la Figura 10c muestra que la variabilidad espacial de los valores promedio diarios de la ET_o oscila entre 1.5 y 2.0 mm-día⁻¹ en dirección de la sierra madre occidental. Esto confirma el efecto de la altura en la estimación de la ET_o , pues se observa que las partes altas presentan menor variabilidad, mientras que las grandes planicies del estado tuvieron mayor variabilidad durante el periodo analizado.

Conclusiones

Los métodos empíricos utilizados subestiman la ET_o con diferencias significativas respecto al método de referencia (PMMF); además, los métodos que consideran a la temperatura como variable de entrada (Hg y Dg) se aproximan más a PMMF, lo que indica que en zonas áridas y semi-áridas la radiación es la principal fuente de energía del proceso de evapotranspiración.

A escala mensual, las mayores diferencias entre los métodos comparados suceden en los meses cálidos que coinciden con la época de lluvias (junio a septiembre), y los métodos que más se aproximan a PMMF son Dg y Hg. Este el último tiene la ventaja de que requiere únicamente observaciones de temperatura disponibles en la mayoría de las estaciones meteorológicas de Chihuahua.

La variabilidad espacial de la ET_o a escala diaria y mensual en Chihuahua tiene una relación directa con la altitud, con máximos en las partes bajas y mínimos en las altas, además de ser más evidente en los meses cálidos.

El método de interpolación espacial IDW es útil para estimar la variabilidad espacio-temporal de la ET_o en grandes extensiones; sin embargo, en zonas como Chihuahua donde las variables meteorológicas como la temperatura y la precipitación influyen fuertemente en la ET_o , se recomienda probar otros métodos de interpolación espacial como kriging o co-kriging, que han demostrado buenos resultados con estas variables.

Fin de la versión en español

- 134(1-2), 533-543. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2291-6>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16, 33-45. <https://doi.org/10.1023/A:1015508322413>
- Gao, P., Li, P., Zhao, B., Xu, R., Zhao, G., Sun, W., & Mu, X. (2017) Use of double mass curves in hydrologic benefit evaluations. *Hydrological Processes*, 31(26), 1-8. <https://doi.org/10.1002/hyp.11377>
- Geng, Y. J., Chen, L., Yang, C., Jiao, D. Y., Zhang, Y. H., & Cai, Z. Q. (2017). Dry-season deficit irrigation increases agricultural water use efficiency at the expense of yield and agronomic nutrient use efficiency of Sacha Inchi plants in a tropical humid monsoon area. *Industrial Crops and Products*, 109, 570-578. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.022>
- Greenough, P. G., & Nelson, E. L. (2019). Beyond mapping: a case for geospatial analytics in humanitarian health. *Conflict and Health*, 13(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s13031-019-0234-9>
- Guijarro, J. A. (2016). *Automatización de la homogeneización de series climáticas: nuevas funciones del paquete Climatol 3.0*. Universidad de Alicante. Instituto Interuniversitario de Geografía, Asociación Española de Climatología. <http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-14>
- 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>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Aguascalientes*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/CHIH_ANUARIO_PDF.pdf
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2019, September). *Red nacional de estaciones agrometeorológicas automáticas*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones/MapaEstaciones>
- Lavado, W., Lhomme, J., Labat, D., Loup Guyot, J., & Boulet, G. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO Penman - Monteith) con limitados datos climáticos en la Cuenca Andina Amazónica Peruana. *Revista Peruana Geo - Atmosférica*, 4, 34-36. https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper3.pdf
- Le, T. P., Seidler, C., Kändler, M., & Tran, T. B. (2012). Proposed methods for potential evapotranspiration calculation of the Red River basin (North Vietnam). *Hydrological Processes*, 26(18), 2782-2790. <https://doi.org/10.1002/hyp.8315>
- Lozoya, C., Mendoza, C., Mejía, L., Quintana, J., Mendoza, G., Bustillos, M., Arras, O., & Solís, L. (2014). Model predictive control for closed-loop irrigation. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 4429-4434. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02067>
- Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11(3), 277-288.
- Malmström, V. H. (1969). A new approach to the classification of climate. *Journal of Geography*, 68(6), 351-357. <https://doi.org/10.1080/00221346908981131>
- Mauder, M., Genzel, S., Fu, J., Kiese, R., Soltani, M., Steinbrecher, R., Zeeman, M., Banerjee, T., de Roo, F., & Kunstmann, H. (2018). Evaluation of energy balance closure adjustment methods by independent evapotranspiration estimates from lysimeters and hydrological simulations. *Hydrological Processes*, 32(1), 39-50. <https://doi.org/10.1002/hyp.11397>
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., Arce-Romero, A. R., Palacios-Mendoza, M. A., & Lechuga-Gayosso, L. M. (2016). *Evapotranspiración de referencia (ET₀) y cambio climático en México como herramienta de planeación de la adaptación*. Universidad de Alicante. Instituto Interuniversitario de Geografía, Asociación Española de Climatología. <https://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-52>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van-Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Orozco-Corral, A. L. (2010). Uso eficiente del agua de riego mediante sondas de capacitancia. *Aqua-LAC*, 2(1), 56-67. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2010-v2-1-06>
- Ruiz-Álvarez, O., Corrales-Suastegui, A., González-Jasso, L. A., Díaz-García, L. A., Narváez-Mendoza, M. P., Ontiveros-Capurata, R. E., & Ruiz-Corral, J. A. (2014). Comportamiento espacio temporal de la evapotranspiración de referencia en la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10, 1963-1976. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i10.1037>
- Ruiz-Álvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E., & dos Santos, C. A. C. (2020). Observed trends in daily temperature extreme indices in Aguascalientes, Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3-4), 1425-1445. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03391-1>
- Santiago-Rodríguez, S., Arteaga-Ramírez, R., Sangerman-Jarquín, D. M., Cervantes-Osornio, R., & Navarro-Bravo, A. (2018). Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves y RNA. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8), 1535-1549. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i8.1319>
- Searcy, J. K., & Hardison, C. H. (1960). *Double-mass curves, manual of hydrology: Part 1. General surface-water*

- techniques. United States Government Printing Office
- Segura-Castruita, M. A., & Ortiz-Solorio, C. A. (2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 93-110. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-06>
- Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018, December). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Štěpánek, P., Zahradníček, P., & Skalák, P. (2009). Data quality control and homogenization of air temperature and precipitation series in the area of the Czech Republic in the period 1961-2007. *Advances in Science and Research*, 3(1), 23-26. <https://doi.org/10.5194/asr-3-23-2009>
- Sheffield, J., Wood, E. F., & Munoz-Arriola, F. (2010). Long-term regional estimates of evapotranspiration for Mexico based on downscaled ISCCP data. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 253-275. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1176.1>
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference* (pp. 517-524). <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- Sun, J., Wang, G., Sun, X., Lin, S., Hu, Z., & Huang, K. (2020). Elevation-dependent changes in reference evapotranspiration due to climate change. *Hydrological Processes*, 34(26), 5580-5594. <https://doi.org/10.1002/hyp.13978>
- Tabari, H. (2010). Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*, 24(10), 2311-2337. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9553-8>
- Tang, P., Xu, B., Gao, Z., Li, H., Gao, X., & Wang, C. (2019). Estimating reference crop evapotranspiration with elevation based on an improved HS model. *Hydrology Research*, 50(1), 187-199. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.022>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2015). Modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona norte bananera del Urabá Antioqueño (Colombia). *Agrociencia*, 49(8), 821-836. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1183/1183>
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12, 13-49.