

Calibración y evaluación de modelos matemáticos para calcular evapotranspiración de referencia en invernaderos

Martin Azua-Barron¹

Ramón Arteaga-Ramirez^{2§}

Mario Alberto Vázquez-Peña²

Abel Quevedo-Nolasco³

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, México. CP. 56230. (potosino92@hotmail.com).

²Departamento de Irrigación y posgrado IAUIA-Universidad Autónoma Chapingo. (mavp52@hotmail.com; arteagarr@gmail.com). ³Campus Montecillo-Colegio de Posgraduados. Carretera Mex-Tex km 35.5. Montecillos, Texcoco, Estado de México. (anolasco@colpos.mx).

§Autor para correspondencia: arteagarr@gmail.com.

Resumen

Con la evapotranspiración de referencia (ET_o) y los K_c de un cultivo se estiman y planean los volúmenes de agua de riego y frecuencia de aplicación. En México la superficie de agricultura protegida se incrementa de 20 al 25% anualmente, 44% son invernaderos y predominan las unidades de producción menores a 0.5 ha, lo que sugiere que tienen tecnología limitada. Para los invernaderos no hay un método estándar para estimar la ET_o como el de Penman-Monteith para campo abierto. Con una estación automática Campbell instalada dentro de un invernadero en los terrenos de la Universidad Autónoma Chapingo, se midieron dos series de datos meteorológicos. Con la primera se modificaron los parámetros de varios modelos reportados en la literatura para calcular la ET_o, unos basados en temperatura (Baier-Robertson, Romanenko y Hargreaves) y otros en radiación (Abtew, Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Sthepen, Priestley-Taylor y Makkink) y con la segunda se evaluaron todos. La ET_o obtenida por cada uno de los métodos con sus parámetros modificados, se comparó con la ET_o calculada con el método de Penman-Monteith, determinándose que los modelos de radiación mostraron mejores ajustes que los de temperatura. En la evaluación los basados en temperatura mostraron ajustes no adecuados con R² menores a 0.461 y RSE mayores a 0.31 mm d⁻¹ y los de radiación tuvieron R² mayores a 0.909 y RSE menores a 0.21. El modelo modificado de Abtew fue el mejor para estimar la ET_o en invernadero con un R² de 0.947 y un RSE de 0.06 mm d⁻¹.

Palabras clave: manejo de riego en invernadero, Penman-Monteith, requerimiento de riego.

Recibido: diciembre de 2019

Aceptado: febrero de 2020

Introducción

Juárez *et al.* (2011) indican que la superficie de agricultura protegida en México tiene un crecimiento anual de 20 a 25 por ciento, el 44 por ciento son invernaderos. El promedio de superficie por unidad de producción en México es menor a 1 ha, pero las unidades de producción menores a 0.5 ha limitan el acceso a tecnología, capacitación y asistencia técnica, así como a mercados más exigentes (Cedillo y Calzada, 2012). Por lo que, para las estructuras que modifican las condiciones de microclima donde se producen cultivos, es necesario hacer estudios específicos para estimar las necesidades de agua de estos, mejorar el manejo de riego y la eficiencia del uso del agua (Moran *et al.*, 2014).

Conocer la ET_c es fundamental para ajustar los volúmenes y la frecuencia de riegos a las necesidades del cultivo. El manejo correcto del riego conduce a la obtención de altos rendimientos, calidad óptima y un uso racional de los recursos al minimizar el desperdicio de agua y energía (Puppo y García, 2010).

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la de referencia (ET_o) definida en el boletín 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006) para un cultivo se relacionan a través de un coeficiente denominado de cultivo (K_c) que depende de las características de este. La ET_o incorpora la mayoría de los efectos meteorológicos y es un indicador de la demanda atmosférica (Allen *et al.*, 2006). De la Casa y Ovando (2016) mencionan que en muchas estaciones meteorológicas no se dispone de mediciones completas de temperatura (T), humedad relativa (HR), radiación solar (R_s) y velocidad del viento, por lo que se han propuesto modelos con un número menor de variables.

El método de Penman-Monteith (P-M) es el método estándar para cultivos al aire libre, también ha dado buenos resultados para estimar la ET_o en el interior de los invernaderos en regiones con clima mediterráneo (Fernández *et al.*, 2010). Para invernaderos no existe un método similar, más aún cuando dichas estructuras tienen una gran variabilidad en su geometría (Gavilán *et al.*, 2014).

Si las condiciones en el exterior del invernadero condicionan el microclima en el interior, es posible ajustar los parámetros de los modelos que se generaron para estimar la evapotranspiración al aire libre, para predecir la ET_o en el interior del invernadero.

El objetivo de este trabajo fue calibrar y evaluar modelos matemáticos para calcular evapotranspiración de referencia en el interior de un invernadero los cuales fueron: Makkink (1957); Romanenko (1961); Turc (1961); Haise (1963); Baier-Robertson (1965); Stephen (1965); Priestley y Taylor (1972); Jensen y Caprio (1974); Hargreaves y Samani (1985); Abtew (1996); Irmak *et al.* (2003).

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en la estación meteorológica del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo en invernadero (Figura 1 y 2) con dimensiones 8 x 15 m, altura máxima de 6.5 m, altura de las paredes de 4.5 m, área útil para el cultivo de 105 m², volumen aproximado de aire 550 m³, ventilación lateral, cubierta de plástico y estructura de metal con orientación norte-sur. La localización geográfica es 19.483° latitud norte y 98.900° longitud oeste con altitud de 2 250 m.



Figura 1. Vista panorámica del invernadero.



Figura 2. Estación automática al interior del invernadero.

El clima de la localidad es de tipo Cb (Wo)(W)(i') g, templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con oscilación térmica que varía entre 5 a 7 °C. La temperatura media anual es de 17.2 °C, el mes más caliente es mayo con una temperatura media de 19.7 °C y con 14.1 °C enero es el más frío. La precipitación media anual es de 598 mm con vientos dominantes del Sur (Pulido y García, 2018).

La medición de los datos se realizó con una estación meteorológica automática Campbell CR10x ubicada en el interior del invernadero en suelo desnudo parcialmente cubierto con nopal verdura en bolsas de plástico (Figura 2), las variables registradas fueron: temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad (m s^{-1}) y dirección del viento (°) y radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$). La estación automática se ubicó en la parte central del invernadero.

La ecuación de Penman-Monteith (P-M)

El equipo CR10x de Campbell (1995) tiene programado el algoritmo para calcular la ETo con el modelo de Penman Monteith (PM) que presentan Allen *et al.* (2006). Para el cálculo manual de la ETo con el método de Penman-Monteith para condiciones similares a los invernaderos, en el boletín 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006) se recomienda utilizar 0.5 m s^{-1} como valor mínimo para la velocidad del viento, lo que mejora las estimaciones de la ETo.

Modelos seleccionados para calcular ETo

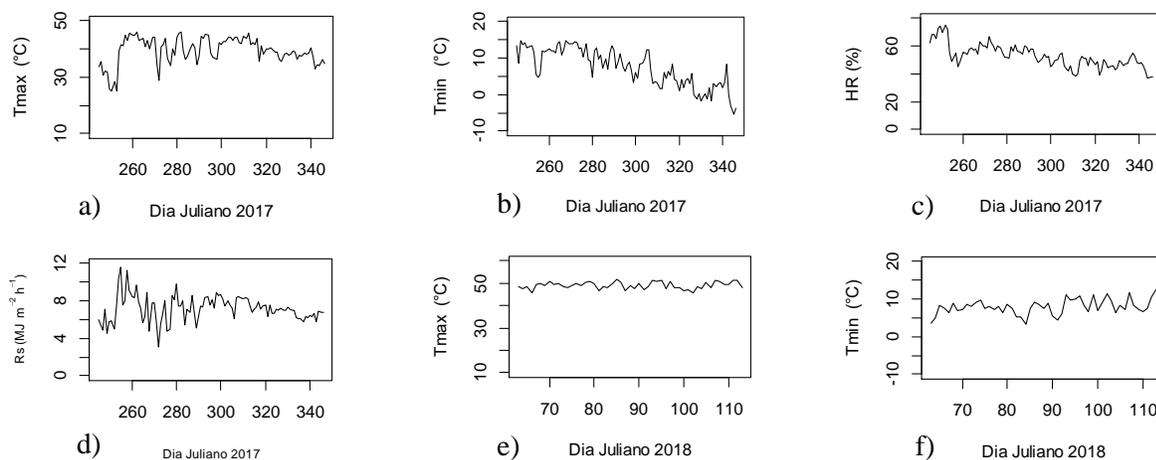
Se incluyen varios modelos basados en temperatura y radiación (Cuadro 1), que fueron propuestos para condiciones diferentes a las de un invernadero, pero que no incluyen velocidad del viento, para estimar ETo a nivel diario.

ETo es la evapotranspiración de referencia en (mm d^{-1}), Tmed la temperatura media (°C), Tmax la temperatura máxima (°C), Tmin la temperatura mínima (°C), TD la oscilación térmica diaria (°C), HR la humedad relativa (%), e_s la presión de vapor a saturación (kPa) e_a la presión de vapor real (kPa), Δ la pendiente de la curva de presión a saturación, γ la constante psicométrica, R_a la radiación solar extraterrestre en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, R_s la radiación solar en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, R_n la radiación neta en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, G es flujo de calor en el suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] y T1 es un coeficiente empírico.

Cuadro 1. Parámetros originales de los modelos empíricos y su referencia.

Modelo	Referencia	Fórmula	Variables
Basadas en temperatura			
Baier-Robertson	Baier and Robertson (1965)	$ET_o = 0.157 * T_{max} + 0.158(TD) + 0.109 * Ra - 5.39$	T_{max}, TD, Ra
Romanenko	Romanenko (1961)	$ET_o = 0.00006(T_{med} + 25)^2(100 - HR)$	T_{med}, HR
Hargreaves	Hargreaves y Samani (1985)	$ET_o = 0.0023 * Ra(T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}$	$Ra, T_{med}, T_{max}, T_{min}$
Basados en radiación			
Turc	Turc (1961)	$ET_o = (0.3107 R_s + 0.65) \left(\frac{T_1}{T_{med} * 15} \right)$	R_s, T_{med}, T_1
Abtew	Abtew (1996)	$ET_o = 0.408 - 0.01786 R_s T_{max}$	R_s, T_{max}
Jensen-Haise	Jensen-Haise (1963)	$ET_o = 0.408 * R_s (0.025 T_{med} + 0.08)$	R_s, T_{med}
Caprio	Caprio (1974)	$ET_o = (0.01092708 T_{med} + 0.0060706) R_s$	T_{med}, R_s
Irmak	Irmak <i>et al.</i> (2003)	$ET_o = 0.149 R_s + 0.079 * T_{med} - 0.611$	R_s, T_{med}
Stephen	Stephen (1965)	$ET_o = 0.408(0.0158 * T_{med} + 0.09) R_s$	R_s, T_{med}
Priestley-Taylor	Priestley-Taylor (1972)	$ET_o = 0.408 \left(1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G) \right)$	Δ, γ, R_n, G
Makkink	Makkink (1957)	$ET_o = 0.408 * 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s - 0.12$	Δ, γ, R_s

Se determinaron dos series de datos meteorológicos diarios de (T, HR, Rs) y calculados (ETo P-M): una del 2 de septiembre al 12 de diciembre de 2017 y otra del 4 de marzo al 23 de abril de 2018. Con los datos de la primera se modificaron los parámetros (Cuadro 1) de los modelos y con los de la segunda se evaluaron los modelos con los parámetros definidos en este trabajo. Los datos utilizados para la estimación de parámetros y la evaluación se presentan en la Figura 3.



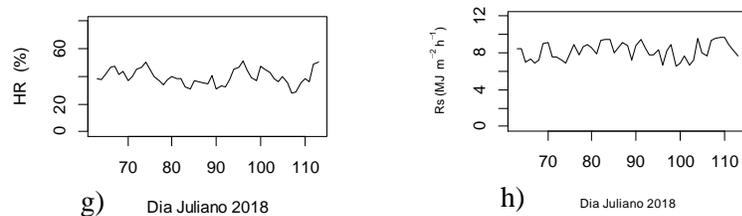


Figura 3. Datos usados para la estimación de parámetros de la (a) a la (d) con $n=102$ y los utilizados para la evaluación de la (e) a la (h) con $n=51$.

Con los valores obtenidos de ETo con los modelos del Cuadro 1 y calculados con la primera serie de datos y los de P-M que fueron calculados por la estación automática, se construyeron diagramas de dispersión entre los datos de ETo de los modelos y P-M, y se calcularon los estadísticos: raíz del cuadrado medio del error (RSE) y coeficiente de determinación R^2 .

Estimación de parámetros

Para la estimación de los parámetros de los modelos de ETo (Cuadro 1) se utilizaron los datos meteorológicos de la primera serie y los calculados por la estación Campbell CR10x destinados para esta tarea. Se realizó un programa en lenguaje R para este propósito, en el que se trabajó un modelo a la vez, con el siguiente procedimiento.

Se identificaron los parámetros de uno de los modelos propuestos (ETox) para su modificación. Para cada parámetro se definió un rango en el que el límite inferior fue el valor nominal del parámetro menos 10 y el límite superior el valor nominal más 10. Una vez definidos los rangos se dividieron en 80 000 partes con los que se construyó un vector, lo que definió propuestas del parámetro con incrementos de 0.00025.

Se programaron 20 000 ciclos para cada modelo, donde el programa asignó un valor a cada parámetro en forma aleatoria tomado del vector correspondiente. Se sustituyeron los valores de los parámetros seleccionados en el modelo y se evaluó con los datos meteorológicos de 2017 obteniéndose 102 datos de ETox. Con los datos de la ETox y los datos de ETo calculados con el método de Penman-Monteith (P-M) se determinó el coeficiente de correlación (R) entre estos.

El valor numérico de R se compara con el valor de R_0 (que al inicio del programa se le asignó el valor numérico de cero), si $R > R_0$, entonces $R_0 = R$ y los valores de los parámetros se almacenan en variables de programación definidas para tal fin, estos valores se actualizan solo si en el ciclo se obtiene un R mayor al almacenado en R_0 . El ciclo se repite 20 000 veces y al final de este proceso computacional se obtiene el valor del coeficiente de correlación y los valores de los parámetros propuestos aleatoriamente correspondientes.

En el modelo se sustituye los parámetros almacenados al final de los 20 000 ciclos, que corresponden a los que generaron el valor mayor de R y con los datos meteorológicos se generaron los ETox. Con los datos de ETo P-M (variable dependiente) y los calculados con el modelo y los parámetros almacenados (ETox variable independiente) se realizó una regresión lineal. Finalmente se obtuvieron los valores numéricos de los parámetros al ser afectados por el coeficiente de regresión y con la suma del término independiente.

Los modelos obtenidos para ser utilizados en la estimación de la ETo en invernadero se validaron con datos estimados con Penman-Monteith con la serie (segunda) del 2018 (51 datos) se determinaron el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del cuadrado medio del error (RSE) (Draper and Smith, 2014).

Resultados y discusión

Los modelos con base en temperatura de las Figura 4a a la 4c se aprecia que sobrestiman los valores de ETo calculados con P-M. Los basados en radiación de las Figuras 4e, 4f, 4g, 4h y 4j se determina que los datos calculados con los modelos de Abtew, Jensen y Haise (J y H), Caprio, Irmak y Priestley-Taylor (P y T) sobrestiman los valores de la ETo P-M, en la Figura 4d) el método de Turc tiene datos que sobrestiman y que subestiman, también se aprecia que los datos tienen una dispersión mayor a los otros métodos y en la Figuras 4i y 4k los datos de Makkink y Stephen subestiman los valores de ETo P-M.

Los coeficientes de determinación (R^2) y la raíz del cuadrado medio del error (RSE) de los diagramas de dispersión (Figura 4), indican que los datos calculados con los modelos de Abtew, Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Priestley-Taylor y Makkink son parecidos a los de P-M. Tienen coeficientes de determinación que van de 0.625 a 0.939 y los RSE son menores a 0.72 mm d^{-1} , el modelo mejor con sus parámetros originales es el de Makkink. El modelo de Turc tiene un valor de RSE de 0.34 y de R^2 de 0.198. Los datos de los modelos con base en temperatura obtuvieron valores menores de los coeficientes de determinación que los de radiación. Los RSE fueron más altos para los modelos con base en la temperatura, donde el modelo de Hargreaves obtuvo el valor de RSE más alto de 15.26 mm d^{-1} (Figura 4).

Los errores se calcularon de acuerdo a $e_i = ETo_{PM_i} - X_i$ donde X_i es el valor obtenido con el modelo con sus parámetros originales, ETo_{PM_i} es el valor de ETo calculado con el método de Penman-Monteith. Para el cálculo de RSE se consideró la media de los errores igual a cero, $n = 102$.

El coeficiente de determinación (R^2) no depende de las unidades de medición de las variables independiente y dependiente, por lo que aun cuando se tuvo un valor de RSE entre los datos de ETo PM y Abtew de 0.53, el de R^2 fue de 0.918 (Figura 4). Por lo anterior, el análisis del estadístico R^2 no debe usarse por sí solo para decidir si el modelo es correcto o no (Infante y Zarate, 2011).

Los modelos del Cuadro 1, no son de aplicación general por su dependencia meteorológica local, estudios en diferentes condiciones indican que se deben calibrar (Irmak *et al.*, 2003; Trajkovic, 2005; Xu and Singh, 2001). Se aprecia (Figura 4) que si se calculan los datos de ETo con los modelos con base en radiación y temperatura sin calibrar las constantes o parámetros de las fórmulas se obtienen errores en la estimación de la ETo lo cual concuerda con lo indicado por Xu and Singh (2001).

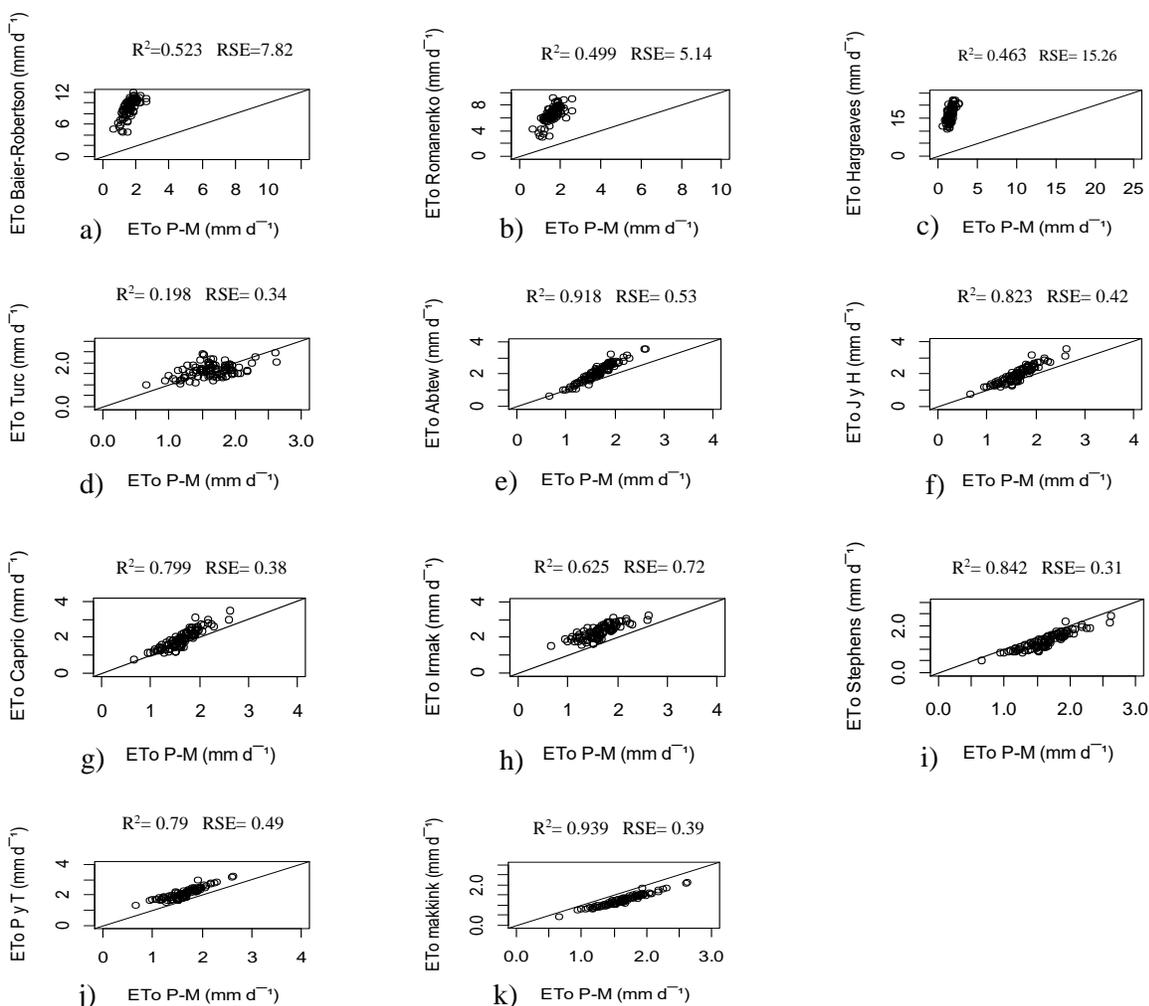


Figura 4. Diagramas de dispersión entre los valores de ETo calculados con los modelos del Cuadro 1 y los del método de P-M: (a), (b) y (c) con base en la temperatura y de la (d) a la (k) en radiación (n= 102).

Estimación d ETo con los modelos con sus parámetros modificados

Los valores de la raíz del cuadrado medio del error (RSE) de los modelos de ETo con sus parámetros modificados con base en temperatura de Baier-Robertson, Romanenko y Hargreaves fueron de: 0.21, 0.23, 0.2 mm d⁻¹ y los R² de 0.501, 0.599 y 0.626 respectivamente (Cuadro 2).

De los modelos para estimar ETo con base en la radiación los RSE fueron: de 0.19 y 0.09 mm d⁻¹ para el de Priestley-Taylor y Abtew respectivamente y de 0.08 mm d⁻¹ para los demás. El método de Irmak presentó el ajuste mayor a los valores de ETo calculados con Penman-Monteith. En general los métodos con base a la radiación fueron mejores que con respecto a la temperatura (Cuadro 2).

Con los valores calculados con los modelos modificados de Turc, Abtew, Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Stephens y Makkink y los estimados por el método de P-M se obtuvo un ajuste bueno, en todos los (R²) fueron mayores a 0.918. De acuerdo a los estadísticos del Cuadro 2, los datos de ETo

obtenidos con los modelos con base a la radiación tienen un mejor nivel de ajuste con los de ETo P-M que los basados en temperatura. Los coeficientes de determinación (R^2) al ser todos menores a la unidad indican que los datos presentan dispersión con respecto a la recta 1:1.

Cuadro 2. Los modelos con sus parámetros modificados para estimar de la ETo diaria (mm) dentro del invernadero n= 102.

Modelo	Formula modificada	R^2	RSE (mm d ⁻¹)
Con base en la temperatura			
Baier-Robertson	$ET_o = 0.0160 T_{max} + 0.0344(TD) + 0.0471 Ra - 1.559$	0.599	0.21
Romanenko	$ET_o = 0.0000202752(T_{med} + 11 + 18.68)^{1.909}(100 - HR_{11}) + 0.4345$	0.501	0.23
Hargreaves	$ET_o = 2.086 \cdot 10^{-5} Ra (T_{med} + 27.64) (T_{max} - T_{min})^{1.031} + 0.4694$	0.626	0.2
Con base en la radiación			
Turc	$ET_o = (0.257R_s - 2.0772) \left(\frac{303.2}{15T_{med}} \right) + 1.851$	0.934	0.08
Abtew	$ET_o = 0.408 \cdot 0.0099R_s T_{max} + 0.473$	0.918	0.09
Jensen-Haise	$ET_o = 0.4081 \cdot 0.0542 R_s (0.0784 T_{med} + 8.002) + 0.068$	0.945	0.08
Caprio	$ET_o = (0.0017 T_{med} + 0.178) R_s + 0.067$	0.945	0.08
Irmak	$ET_o = 0.2189 \cdot R_s + 0.0127 \cdot T_{med} - 0.233$	0.946	0.08
Stephen	$ET_o = 0.408 \cdot R_s (0.0041 \cdot T_{med} + 0.4389) + 0.065$	0.945	0.08
Priestley-Taylor	$ET_o = 0.408 \left(1.0269 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n) \right) - 0.023$	0.665	0.19
Makkink	$ET_o = 0.408 \cdot 0.6695 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s + 0.122$	0.939	0.08

De los estadísticos (Figura 4 y Cuadro 2) se observa el comportamiento de los modelos para predecir los valores de ETo P-M en el interior de un invernadero, con sus parámetros originales (Figura 4) y los modificados (Cuadro 2). Los modelos con base en temperatura pasaron de valores de R^2 entre 0.463 y 0.523 a valores entre 0.501 y 0.626 y sus RSE de 5.14 a 15.26 a valores entre 0.2 y 0.23. En todos estos modelos hubo una mejora del modelo con los parámetros modificados en la estimación de la ETo.

Los basados en radiación también mostraron una mejora para predecir los valores de ETo P-M, se pasó de RSE con valores entre 0.31 a 0.72 a valores entre 0.08 a 0.19 y los R^2 se mejoraron de valores entre 0.198 a 0.939 a valores de 0.665 a 0.946.

Evaluación del desempeño de los modelos con base en temperatura

En la marcha temporal de los valores de la ETo obtenidos con los modelos con base en temperatura y los obtenidos con la expresión de Penman-Monteith (P-M), se observa que los tres modelos sobrestimaron los valores de P-M durante los 51 días utilizados para evaluar los modelos (Figura 5). En el Cuadro 2 los que muestran mejor ajuste son las estimaciones hechas con los modelos de Baier-Robertson y Hargreaves, pero los datos de los dos modelos sobrestiman los valores de P-M (Figuras 6a y 6c). El Modelo de Romanenko en la mayoría de sus datos sobrestima a P-M y solo en cuatro datos subestima (Figura 6b).

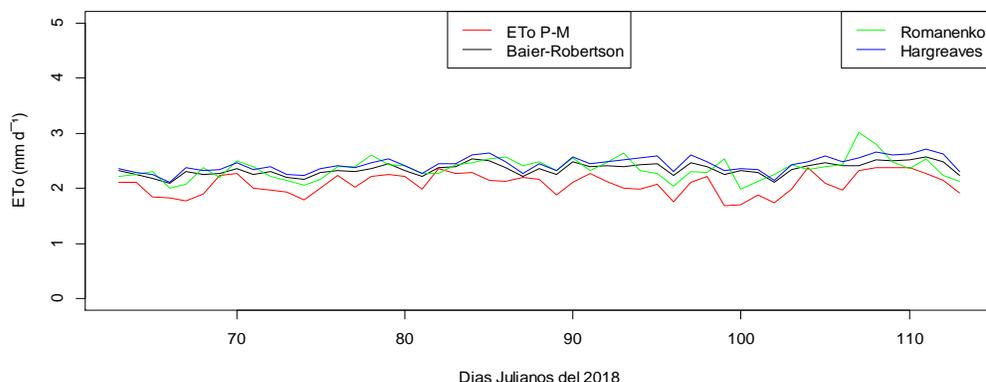


Figura 5. Ajuste temporal entre las mediciones de ETo de la estación automática (P-M) y los modelos modificados basados en temperatura para predecir la ETo diaria en el interior de un invernadero de: Baier-Robertson, Romanenko y Hargreaves, n= 51.

Los diagramas de dispersión entre las estimaciones de ETo de los modelos con base en temperatura y la estimación de ETo P-M se aprecian en la Figura 6a, 6b y 6c. El que presentó mejor tendencia fue el que corresponde a los datos entre el método de P-M y el de Baier-Robertson y el diagrama tiene los puntos más apegados a la línea 1:1.

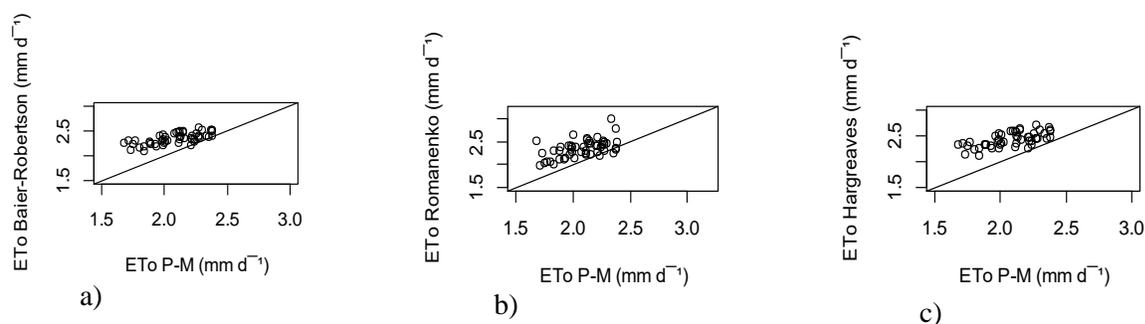


Figura 6. Diagramas de dispersión entre los valores predichos por los modelos modificados y las mediciones en el invernadero con la estación automática (P-M): a) entre el método de Baier-Robertson y P-M; b) entre Romanenko y P-M; y c) entre Hargreaves y P-M, n= 51.

Los estadísticos de la evaluación de los modelos con datos de 51 días, los modelos de Baier-Robertson y Hargreaves obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de 0.461 y 0.411 y sus RSE de 0.31 y 0.39 mm d^{-1} respectivamente. Los estadísticos del método de Romanenko son (R^2) de 0.3 y RSE de 0.34 mm d^{-1} fue el mejor método basado en temperatura.

Evaluación del desempeño de los modelos con base en radiación

La relación temporal entre ETo de los modelos con base en radiación y el método de Penman-Monteith (P-M), en el periodo de evaluación, el que mostró menor ajuste fue el de Turc (línea verde) ya que en todos sus datos subestimó el valor de ETo P-M (línea roja). Los datos del método de Abteu se apegaron a los de P-M y en términos generales el modelo tiene ajuste a los valores de P-M.

Los modelos de Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Stephens, Makkink, mostraron marchas temporales de sus datos que subestiman a los de P-M. El método de Priestley-Taylor mostró en su marcha temporal apego a los datos del modelo de P-M, en valores de ETo menores a 1.9 mm d^{-1} sobreestimó y a mayores de 2.1 mm d^{-1} subestimo (Figura 7).

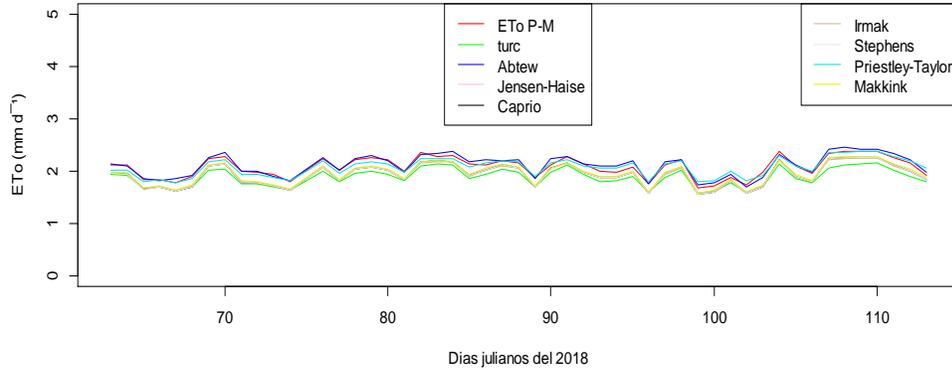


Figura 7. Ajuste temporal entre las mediciones de ETo de la estación automática (P-M) y los modelos modificados con base en radiación para predecir la ETo diaria en invernadero, n= 51.

En los diagramas de dispersión entre las estimaciones de los modelos modificados con base en radiación y Penman-Monteith, se aprecia que en general presentaron tendencia y seis de los ocho modelos subestimaron los valores de ETo de P-M (Figura 8). Los modelos que tuvieron comportamientos mejores en la etapa de evaluación fueron: Abteu, Priestley-Taylor y Makkink (Figuras 8b, 8g y 8h).

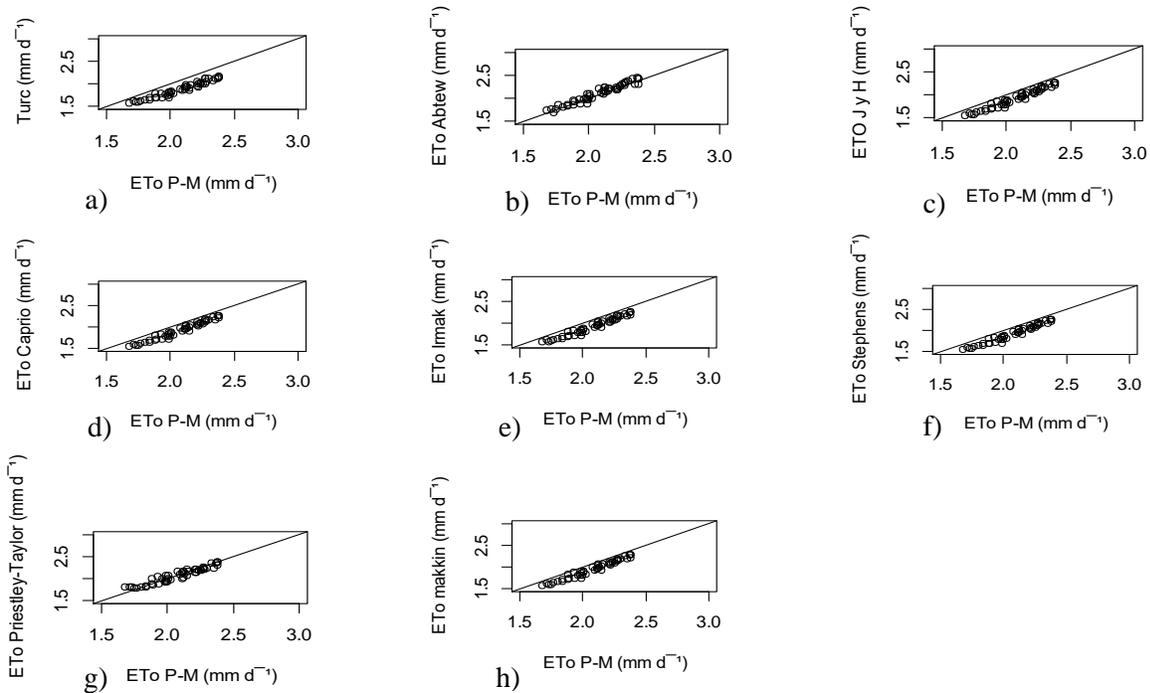


Figura 8. Diagramas de dispersión entre los valores predichos por los modelos modificados y las mediciones en el interior del invernadero con la estación automática (P-M): a) Turc y P-M; b) Abteu y P-M; c) Jensen-Haise y P-M; d) Caprio y P-M; e) Irmak y P-M; f) Stephens y P-M; g) Priestley-Taylor y P-M; y h) Makkink y P-M, n= 51.

El modelo de Turc con un R^2 de 0.943 y un RSE de 0.21 mm d⁻¹ fue el que se ajustó menos, el resto de los modelos obtuvieron R^2 mayores a 0.787 y RSE menores a 0.16 mm d⁻¹ (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estadísticos obtenidos entre los valores de los modelos modificados para estimar ETo en el interior del invernadero y las mediciones de ETo de la estación meteorológica automática (método de P-M).

Modelo modificado	R^2	RSE (mm d ⁻¹)
Turc	0.943	0.21
Abtew	0.947	0.06
Jensen-Haise	0.956	0.15
Caprio	0.956	0.16
Irmak	0.956	0.16
Stephen	0.956	0.16
Priestley-Taylor	0.909	0.06
Makkink	0.956	0.14

Al comparar los estadísticos de los modelos modificados, se aprecia que los modelos con base en la radiación se apegan más a los valores calculados con Penman-Monteith. Los modelos de Abtew y Priestley-Taylor con R^2 de 0.947 y 0.909 respectivamente y RSE de 0.06 para ambos fueron los que predijeron mejor los valores de ETo de P-M en invernadero.

Conclusiones

En las circunstancias en las que se realizó este trabajo sin las condiciones de referencia estándar para el cálculo de ETo y evaluación de las ecuaciones, los resultados obtenidos pueden ser una alternativa para estimar los requerimientos de agua de los cultivos.

Para utilizar modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en condiciones para las cuales no fueron desarrollados es necesario calibrarlos y evaluarlos.

En condiciones de invernadero y con parámetros originales los modelos de evapotranspiración con base en temperatura no dieron buenos resultados y de los basados en radiación el de Makkink fue el mejor. Los modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en invernadero con base en radiación y parámetros modificados fueron los mejores. En México la mayoría de los invernaderos son menores a 0.5 ha, por lo que es importante que este tipo de trabajos se sigan realizando ya que estos tienen diferentes tipos de estructuras y condiciones climáticas.

Literatura citada

- Abtew, W. 1996. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 32(3):465-473.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. 323 p.

- Baier, W. and Robertson, G. W. 1965. Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian J. Plant Sci.* 45(3):276-284.
- Campbell Sci Inc. 1995. On-line estimation of grass reference evapotranspiration with the Campbell scientific automated weather station. App. Note: 4-D. Whashington State University. 35 p.
- Caprio, J. M. 1974. The solar thermal unit concepring problems related to plant development and potential evapotranspiration *In: Lieth, H. (Ed.). Phenology and seasonality modeling. Ecological Studies.* New York. Springer Verlag. 353-364 pp.
- Cedillo, E. y Calzada, M. 2012. La horticultura protegida en México situación actual y perspectivas. Encuentros. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 1-10 pp. https://issuu.com/fesaragon/docs/horticultura_protegida.en.mexico.
- De la Casa, A. C. and Ovando, G. G. 2016. Variation of reference evapotranspiration in the central region of Argentina between 1941 and 2010. *J. Hydrology: Regional Studies.* 5(1):66-79.
- Draper, N. R. and Smith, H. 2014. Applied regression analysis, John Wiley and Sons. 326). 2nd (Ed.). Wisconsin, USA. 709 p.
- Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Orgaz, F.; Thompson, R.; López, J. C.; Granados, M. R. and Fereres, E. 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Sci.* 28(6):497-509.
- Gavilán, P.; Lozano, D. y Ruiz, N. 2014. Estimación de la evapotranspiración del cultivo de la fresa basada en pronósticos meteorológicos. Validación con datos experimentales. *In: V Jornadas de Agrometeorología.* Valencia, 13 y 14 de noviembre de 2014. 12 p.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1(2):96-99.
- Infante, S. G. y Zarate, de L. G. P. 2011. Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. (Ed.). Trillas. Mexico. 643 p.
- Irmak, S.; Irmak, A.; Allen, R. G. and 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.
- Jensen, M. E. and Haise. H. R. 1963. Estimating evapotrasnpiration from solar radiation. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE.* 89(1):25-38.
- Juárez, L. P.; Bugarin, M. R.; Castro, B. R.; Sánchez-Monteón, A. L.; Cruz-Crespo, E.; Juárez, R. C. R.; Alejo, S. G. y Balois, M. R. 2011. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente Año.* 3(8):21-27.
- Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Eng.* 11(1):277-288.
- Moran, P.; Dicken, U. and Tanny J. 2014. Penman-Monteith approaches for estimating crop evapotranspiration in screenhouses-a case study with table-grape. *Int. J. Bio.* 58(5):725-737.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review.* 100(2):81-92.
- Pulido, A. R. y García, P. Y. 2018. H Ayuntamiento de Texcoco. <https://es.wikipedia.org/wiki/Texcoco>.
- Puppo, L y García, P. M. 2010. Determinación del consumo de agua del durazno por lisimetria. *Rev. Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental.* 14 (1): 25-31.
- Romanenko, V. A. 1961. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. *Proc. of Ukrainian Hydrometeorological Research Institute.* 3(1):12-25.
- Stephens, J. C. 1965. Discussion of estimating evaporation from insolation. *J. Hydraul.* 504(91):171-182.

- Trajkovic, S. 2005. Temperature based approaches for estimation of reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drainage Eng.* 131(4):316-323.
- Turc, L. 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Ann. Agron.* 12(1):13-49.
- Xu, C. Y. and Singh, V. P. 2001. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes.* 15(2):305-319.