



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

MÁSTER EN HORTICULTURA MEDITERRÁNEA BAJO
INVERNADERO

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN
DE REFERENCIA EN INVERNADEROS
MEDITERRÁNEOS

ALUMNO: de SOUZA IBARRA, STEFANI ROMINA

DIRECTOR: GALLARDO PINO, MARIA LUISA
CODIRECTOR: GRANADOS GARCÍA, MARIA ROSA

Normas: ISHS <http://www.ishs.org/authors>

CURSO 2015/2016, CONVOCATORIA: JUNIO 2016

Estimación de la evapotranspiración de referencia en invernaderos mediterráneos

S. R. de Souza*, M. L. Gallardo y M. R. Granados

Universidad de Almería, Departamento de Agronomía, Almería, España.

*Contacto: rominadesouzai@gmail.com

ABSTRACT

The FAO 56 Penman-Monteith methodology (P-M) is commonly used to calculate reference evapotranspiration (ET_0) which is multiplied by a crop coefficient (kc) value to estimate crop water requirements. In previous work by Fernandez et al., (2010, 2011) this methodology was adapted to Mediterranean greenhouses, using a fixed aerodynamic resistance of 295 m s^{-1} . Other authors have found limitations in the use of the P-M equation adapted to greenhouses. This study was conducted to assess whether there were discrepancies between measured ET_0 and ET_0 values calculated by the P-M equation adapted to greenhouses, and to determine if the discrepancies were due to problems in the estimation of net radiation (RN) by the P-M equation. Climatic parameters and measured values of RN and ET_0 from several years measured in a greenhouse with a grass crop with and without whitening of the roof were used. The P-M equation adapted to greenhouses overestimated ET_0 in winter and in periods with whitening on the roof ("cool periods") and underestimated ET_0 in summer ("warm periods"). The calculation of solar radiation (R_s) on completely sunny days (R_{So}) was corrected by considering the transmissivity of the plastic; R_{So} is involved in the calculation of RN in the P-M equation. This correction did not improve the accuracy of ET_0 estimation. ET_0 calculated with the P-M equation using measured values of RN improved slightly the accuracy of the ET_0 estimations but presented the same limitations as the adapted equation by Fernandez et al., (2010, 2011). Finally it was found that the accuracy of the ET_0 estimations was higher when RN was estimated from R_s values inside the greenhouse, with different empirical correction coefficients for cool and warm periods. Even though the use of empirical coefficients improved the estimation, these should be evaluated in other conditions.

RESUMEN

La metodología FAO 56 Penman-Monteith (P-M) es la más utilizada para determinar la evapotranspiración de referencia (ET_0) la cual es necesaria junto con el coeficiente de cultivo (kc) para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos. En trabajos previos de Fernández et al., (2010, 2011) esta metodología se adaptó a invernaderos mediterráneos estableciendo un valor de resistencia aerodinámica constante de 295 s m^{-1} . Otros autores han encontrado limitaciones en el uso de la ecuación P-M adaptada a invernadero. Este estudio se realizó con el objetivo de evaluar si existían desajustes entre valores medidos y calculados de ET_0 mediante la ecuación de P-M adaptada a invernadero y determinar si esos desajustes se debían a problemas en la estimación de la radiación neta. Se utilizaron datos de una serie de años con invernadero encalado y sin encalar de clima, radiación neta (RN) y evapotranspiración de referencia (ET_0) del estudio de Fernández et al. (2010). Se observó que la ecuación P-M adaptada a invernadero sobreestima la ET_0 en invierno y en períodos con encalado (período frío) y subestima la ET_0 en verano (período cálido). Se corrigió el cálculo de la radiación solar en días soleados (R_{so}) por la transmisividad del plástico; este parámetro interviene en el cálculo de la RN de la ecuación de P-M. Esta corrección no

mejoró la precisión de la estimación de la ET_0 . La ecuación P-M calculada a partir de valores medidos de RN aunque mejoró ligeramente la precisión de las estimaciones de ET_0 presentó las mismas limitaciones que la ecuación de Fernandez et al., (2010, 2011). La precisión de la estimación de la ET_0 fue mayor cuando la RN se estimó a partir de valores medidos de Rs dentro del invernadero, con una corrección con coeficientes empíricos diferenciales para los períodos frío y cálido. Si bien la utilización de coeficientes empíricos mejora la estimación, estos deben ser evaluados en otras condiciones.

Palabras claves: Penman-Monteith, radiación neta, lisímetro

INTRODUCCIÓN

En las zonas áridas y semiáridas los recursos hídricos constituyen uno de los principales limitantes para la producción agrícola, es por esto que las necesidades de agua para el cultivo deben estimarse de la manera más precisa con el fin de realizar una buena planificación y gestión de los mismos (Berengena and Gavilán 2005, Gavilán et al., 2007). Además de la escasez de agua, en zonas con alta concentración de cultivos intensivos en invernaderos como Almería, en el sureste de España, otra problemática de importancia asociada, es la contaminación de los recursos hídricos subterráneos, principalmente con nitratos (Pulido-Bosch et al., 2000, Thompson et al., 2007). Por ello, en esta zona es necesario contar con herramientas que permitan un manejo óptimo de los recursos hídricos (Gallardo et al., 2011).

La programación del riego mediante la estimación de las necesidades hídricas del cultivo se considera un método establecido para optimizar el uso del agua (Allen et al., 2006). Para ello la metodología de la FAO (Allen et al., 1998) determina la evapotranspiración del cultivo (ET_c) como el producto de la evapotranspiración de referencia (ET_0) que representa el efecto del clima y el coeficiente de cultivo (K_c) que representa el efecto del cultivo sobre las necesidades hídricas (Allen et al., 1998). El cálculo de las necesidades hídricas utilizando la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo es muy utilizado en cultivos al aire libre y de invernadero (Fernández et al., 2010; Gallardo et al., 2016).

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), es equivalente a la evapotranspiración de un cultivo hipotético de 0,12 m de altura, con una resistencia superficial constante de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23 (Allen et al., 2006). La manera más precisa de medir la ET_0 es mediante el uso lisímetros de pesada o métodos micro meteorológicos, pero estos procedimientos no son prácticos, ya que consumen tiempo y son caros (Gavilán et al., 2006, Villarreal-Guerrero et al., 2012).

Existe un gran número de ecuaciones para la estimación de la ET_0 (Berengena and Gavilán, 2005), de éstas, la ecuación de Penman-Monteith es reconocida como la más precisa cuando se compara con otras ecuaciones en varias regiones de todo el mundo para cultivos al aire libre (Allen et al., 1989; Jensen et al., 1990; Smith 1991, citado por López-Urrea et al., 2006, Berengena and Gavilán 2005).

Para estimar la ET_0 dentro de invernadero se han ajustado diversos métodos (Fernández et al., 2010; 2011). En Almería, dentro de invernadero el método que mejor estima la evapotranspiración es el método local de radiación (Fernández et al., 2010, Gallardo et al., 2016), pero no se conoce su precisión en otras latitudes. Ésta metodología requiere datos de radiación solar exterior y transmisividad del plástico (τ , en %) (Bonachela et al., 2006), por lo que es un método sencillo.

Fernández et al., (2010; 2011) evaluaron el comportamiento de la ecuación Penman-Monteith de FAO-56 (P-M), encontrando que subestima la ET_0 principalmente en condiciones de invernaderos sin blanqueo. En la ecuación de P-M interviene la resistencia aerodinámica (R_a), parámetro que depende de la velocidad del viento (Allen, et al., 2006, Fernández et al., 2010). Considerando que la velocidad del viento dentro del invernadero es muy baja, y oscila entre $0,01$ y $0,2 \text{ m s}^{-1}$, se obtienen unos valores muy elevados de R_a para un invernadero con pradera, que oscilan entre 2.080 y 20.800 s m^{-1} , y son considerablemente más altos que los

medidos por Bailey et al., (1993) y Baille et al., (1994) para varios cultivos de invernadero, que oscilan entre 100 y 500 s m^{-1} (Fernández et al., 2010, 2011). Fernández et al., (2010, 2011) presentaron una adaptación de la ecuación de P-M a condiciones de invernadero mediterráneo y proponen utilizar la ecuación de P-M asumiendo un valor de R_a constante de 295 s m^{-1} ; la validación de esta ecuación adaptada con datos de ET_o medidos fue precisa. Sin embargo, el usar este valor de R_a significa que la velocidad del viento dentro del invernadero es constante y es de 0,71 m s^{-1} , la cual es bastante superior a los valores de velocidad de viento promedio registrados dentro del invernadero (Fernández et al., 2010).

En un trabajo posterior, Gallardo et al., (2016), encontraron un desajuste en la estimación de la ET_o entre el método de P-M adaptado a invernadero y el método local de radiación. En este estudio se puso de manifiesto que la ecuación de P-M adaptada a invernadero sobre-estima la ET_o en períodos de baja radiación ya sea en invierno o cuando la cubierta del invernadero se encuentra blanqueada y lo contrario sucede en verano cuando la radiación es máxima. Se ha propuesto (M.D. Fernández, comun. Personal) que posiblemente esta divergencia pueda ser debida a errores en el cálculo de la radiación neta (RN) en la ecuación P-M.

El objetivo de este trabajo fue evaluar si existían desajustes entre valores medidos y calculados de ET_o mediante la ecuación de P-M adaptada a invernadero por Fernández et al., (2010;2011) y determinar si esos desajuste se debían a problemas en el cálculo de la radiación neta. Así mismo se evaluó el comportamiento de la ecuación de P-M cuando se usan en su cálculo valores medidos de RN y se propusieron modificaciones que pudiesen mejorar su comportamiento para determinar la ET_o en invernadero.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este trabajo se han utilizado datos de clima y evapotranspiración de referencia (ET_o) procedentes de estudios previos y descritos en detalle por Fernández et al. (2010). Los datos que se han utilizado en este trabajo corresponden a los años completos 1994, 1995, 2000 y 2001 siendo los años 1994 y 1995 sin enclavado del invernadero y los años 2000 y 2001 con el invernadero enclavado. Así mismo se han utilizado períodos de los años entre 1996 al 2001 sin enclavado. A excepción de los años 1994 y 1995 que solo se disponía de datos de ET_o medida, los demás años contaban con mediciones simultáneas de RN y ET_o . A continuación se explican las instalaciones y los métodos utilizados en las determinaciones.

Localización e invernadero

Las medidas de evapotranspiración de referencia (ET_o) se llevaron a cabo durante los años 1994 a 2001 en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar" (N 36° 48'; W 2° 3' y 155 m snm) en la costa de Almería, sureste de España. El clima es Mediterráneo con invierno templado (temperatura media en invierno de 12,9°C) y precipitación media anual de 220 mm (Fernández et al., 2010, 2011).

Las medidas de ET_o se realizaron en un invernadero Mediterráneo típico de 24 m de largo por 20,5 m de ancho orientado E-W. La estructura era de alambre con cubierta simétrica a dos aguas con una pendiente del 12,5%; como material de cerramiento se utilizó plástico térmico de 0,2 mm de espesor y la ventilación era pasiva, con ventanas laterales y cenitales. El suelo era estratificado con una capa de 30 cm de suelo arcilloso importada, colocada encima del suelo natural el cual era de textura franco arenoso. En la capa de suelo arcilloso la capacidad de campo fue de 0,31 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, y el punto de marchitez permanente fue de 0,11 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Bonachela et al., 2006).

El invernadero contaba con dos lisímetros de drenaje (4 m longitud, 2 m de ancho y 0,7 m de profundidad), ubicados al sur del invernadero, recubiertos con una lámina de caucho butilo. El perfil del suelo dentro del lisímetro tenía las mismas características del suelo del exterior. La profundidad del suelo dentro del lisímetro era adecuada para el normal crecimiento de las raíces de los cultivos. El invernadero se sembró uniformemente con un cultivo perenne (*Cynodon dactylon* L.), el cual se mantuvo mediante cortes a 0,10-0,15 m de

altura. El riego se aplicó semanalmente y la conductividad eléctrica del agua era de 0,4 dS m⁻¹. La cubierta externa de plástico se blanqueó con carbonato de calcio a una concentración de 40 g m⁻² en los años 2000 y 2001 durante los meses de marzo a setiembre con el fin de lograr una transmisividad entre 40% y 50%, para reducir los valores de radiación solar incidente.

Determinaciones

Medida de clima dentro de invernadero.

En la parte sur del invernadero se encontraba una estación agrometeorológica automática (AWOS 7770, Thies Clima, Göttingen, Alemania), ubicada a 1,5 m altura. La temperatura del aire y la humedad relativa se midieron con un aspirópsicrómetro ventilado (mod. 1.1130, Thies Clima, Göttingen, Alemania), y la radiación solar se midió con un piranómetro (mod. CM21, Kipp & Zonen, Delft, Países Bajos). La radiación neta se midió con un radiómetro neto (mod. 7.1415.20, Thies Clima, Göttingen, Alemania), ubicado a 0,5 m de altura en la parte sur del invernadero. En el exterior del invernadero había otra estación agrometeorológica automática con características similares. Los datos climáticos se midieron cada 10 s y estos valores se promediaron cada cinco 5 min y se almacenaron en un registrador de datos (mod. DL- 15, Thies Clima, Göttingen, Alemania). A partir de estos datos se calcularon promedios diarios para determinar la ET_o.

Medida de Evapotranspiración de referencia (ET_o).

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se determinó semanalmente con los lisímetros de drenaje mediante balance de agua del suelo, utilizando la siguiente ecuación:

$$ET_0 = (SWC_{t_0} - SWC_{t_1}) + I - D \quad (1)$$

donde (SWC_{t₀} - SWC_{t₁}) es el cambio del contenido volumétrico del agua de suelo entre dos fechas de medida; I y D son, respectivamente, el volumen total del agua de riego aplicada y el del drenaje recogido en el período considerado. El contenido volumétrico de agua en los lisímetros se midió semanalmente con TDR (TRASE 6995X1, Soil Moisture Corp., Santa Bárbara, CA, USA). Las medidas de humedad de suelo con TDR se tomaron en cuatro sitios diferentes en el interior de cada lisímetro, a una profundidad de 0-45 cm. El drenaje procedente de los lisímetros se recogió diariamente y el agua aplicada al suelo se midió con un contador. A partir de medidas semanales, se calcularon valores promedios diarios de ET_o.

Métodos de estimación de la ET_o.

En este trabajo los valores de ET_o en invernadero se determinaron mediante (a) el método P-M adaptado a invernadero (Fernández et al., 2010; 2011); (b) con el mismo método pero corrigiendo el término de radiación neta de onda larga por la transmisividad del plástico; (c) con el mismo método sustituyendo la radiación neta (RN) calculada por P-M por la RN medida, y (d) estimando la radiación neta a partir de una relación empírica de la radiación solar dentro de invernadero sin y con correcciones para periodos cálidos y fríos.

Con todos estos métodos se determinaron valores diarios de ET_o usando hojas de cálculo en Excel 2013, utilizando datos climáticos medidos diariamente dentro del invernadero. Los valores diarios de ET_o calculados fueron promediados semanalmente a fin de obtener promedios diarios de ET_o que se pudiesen comparar con los valores medidos de ET_o. Para comparar la bondad de las estimaciones de ET_o se realizaron comparaciones entre los valores estimados y medidos de ET_o en el invernadero a través de una regresión lineal simple.

Método de P-M adaptado a invernadero.

La ecuación FAO 56 Penman-Monteith (Allen et al., 2006) es:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34U_2)} \quad (2)$$

donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n es la radiación neta en la superficie del césped ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G es el flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), U_2 velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}), T es la temperatura media diaria del aire ($^\circ\text{C}$), e_s es la presión del vapor de saturación (kPa), e_a es la presión real de vapor (kPa).

En la ecuación de P-M adaptada a invernaderos el valor de R_a se consideró constante a 295 s m^{-1} (Fernández et al., 2010; 2011); en la ecuación original este valor depende de la velocidad del viento.

$$R_a = 208/u_2 \text{ s m}^{-1} \quad (3)$$

Velocidad del viento (u_2) a 2 m de altura

Modificación de la radiación neta considerando la transmisividad del plástico.

En la ecuación original de P-M (Allen et al., 1989), la radiación neta de onda larga (R_{nl}) se calcula mediante la ecuación 4 en función de la temperatura, presión de vapor, radiación solar incidente (R_s) y de la radiación solar que habría en un día despejado (R_{so}), éste término es función de la latitud y época del año. En esta ecuación la R_s utilizada puede ser calculada en base a algoritmos, medida dentro del invernadero o medida en el exterior corregida por la transmisividad del plástico (R_s en el interior/ R_s en el exterior). Se observó que en el trabajo de Fernández et al., (2010) se utilizaron valores medidos de R_s dentro del invernadero pero el término R_{so} utilizado era el calculado para el exterior. En este trabajo se corrigió la R_{so} por la transmisividad del plástico, ya que la R_{so} en invernadero nunca va a ser igual a la del exterior debido a la presencia del plástico.

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K^4} + T_{min,K^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) (1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35) \quad (4)$$

Donde: R_{nl} Radiación neta de onda larga ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), σ constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), T_{max} , K temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas ($K = ^\circ\text{C} + 273,16$) T_{min} , K temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas ($K = ^\circ\text{C} + 273,16$), e_a presión de vapor real (kPa), R_s radiación solar medida o calculada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), R_{so} radiación en un día despejado ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

La corrección realizada consistió en ajustar R_{so} por la transmisividad, tomando como valor promedio 0,65.

Estimación de la ET_0 a partir de valores de RN medida.

La RN estimada por la ecuación P-M adaptado a invernadero fue sustituida por datos de RN medida dentro del invernadero. Se utilizaron datos de RN de los años 2000 y 2001 con el invernadero encalado y de 15 periodos de datos entre los años 1996 a 2000 sin encalado.

Estimación de la RN a partir de R_s .

Se establecieron tres metodologías de estimación de RN a partir de R_s dentro de invernadero buscando subsanar el desajuste entre la ET_0 estimada y la medida. Los datos utilizados para establecer los diferentes ajustes correspondieron a las determinaciones de RN

y Rs dentro de invernadero realizadas durante los años 1996 a 2001, incluyendo las condiciones de invernadero encalado y sin encalado.

Estimación de la RN a partir de Rs

Con los datos de RN y Rs medida en invernadero se estableció una ecuación de regresión para estimar la RN a partir de la Rs. La ecuación determinada para estimar RN a partir de Rs es:

$$RN = 0,7415Rs - 1,1043 \quad (5)$$

Estimación de la RN a partir de Rs según período “cálido” y “frío”

En base a la relación RN/Rs la cual varía según la época del año (frío o cálido) (M.D. Fernández, comun. personal) se estableció una ecuación para estimar la RN a partir de la Rs para cada uno de estos periodos, correspondiendo el período “cálido” a los días 60 a 273 y el período “frío” al resto del año.

Las ecuaciones determinadas fueron:

$$\text{Cálido: } RN = 0,6842Rs - 0,2615 \quad (6)$$

$$\text{Frío: } RN = 0,6644Rs - 0,8603 \quad (7)$$

Estimación de la RN a partir de Rs según período “cálido” y “frío” corregidos por coeficientes empíricos

La RN estimada a partir de la Rs (ecuación 5), posteriormente se ajustó con coeficientes determinados empíricamente para subsanar el problema de sobrestimación y subestimación de la ET_0 en los diferentes períodos del año. Para realizar la separación de los mismos se utilizó la herramienta filtro de Excel 2013. Cuando se empleó un ajuste para mejorar el rendimiento del método, se utilizaron series de datos diferentes para la validación del modelo. De esta manera la RN se estimó con la ecuación 5 y se corrigió por los coeficientes 1,03 y 0,4 para los períodos cálido y frío respectivamente.

La RN estimada por cualquiera de las tres modificaciones se incluyó en la ecuación P-M adaptada a invernaderos, sustituyendo a la RN calculada por el método correspondiente.

La precisión de las estimaciones de ET_0 se evaluó mediante ajuste de regresión lineal.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la figura 1 se presenta la estimación de la ET_0 con la metodología P-M adaptada a invernadero de Fernández et al., (2010, 2011) y la ET_0 medida con lisímetros para los años 1994 a 2001; se presentan de forma conjunta los datos de ET_0 correspondientes al invernadero con y sin blanqueo, debido a que ambos presentaron las mismas tendencias. La ET_0 estimada no se ajustó adecuadamente a la ET_0 medida (pendiente 0,81 con un R^2 de 0,79), lo cual confirma las observaciones de Gallardo et al., (2016) que indicaron que la ecuación de P-M adaptada por Fernández et al., (2010, 2011) sobreestima la ET_0 en los períodos fríos y subestima la ET_0 en los períodos de mayor demanda.

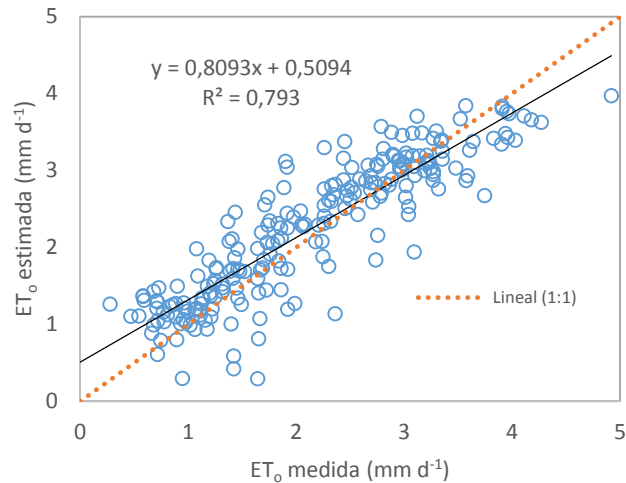
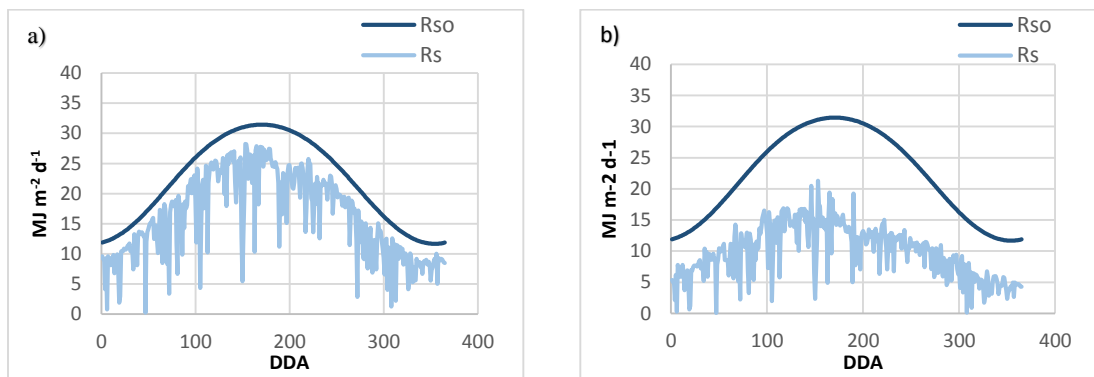


Figura 1. ET_0 medida versus ET_0 estimada con P-M adaptada a invernadero con y sin encalado, años 1994 a 2001.

Ha sido indicado que esta divergencia pueda ser debida a errores en el cálculo de la radiación neta (RN) en la ecuación P-M en condiciones de invernadero (M.D. Fernández, comun. personal). Éste método determina la RN en base a valores de RS medida dentro del invernadero y de la radiación solar en días despejados (R_{so}) calculada a partir de la radiación solar extrarrestre (R_a) (ecuación 4, Allen et al., 2006). Así como la RS se modifica por la transmisividad del plástico, el término R_{so} también debería estar modificado por la misma, ya que la máxima cantidad de radiación que puede alcanzar la superficie dentro del invernadero está determinada a su vez por la transmisividad del plástico. En la Figura 2 se evaluó para el año 1994 (sin encalado) el comportamiento de la RS medida y la R_{so} calculada con la ecuación 4 de P-M FAO-56 descrita en Allen et al., (2006) tanto en el exterior (Figura 2a) como en el interior del invernadero (Figura 2b). En la Figura 2c se presentan los mismos parámetros para el interior del invernadero, con la R_{so} corregida por la transmisividad del plástico que fue en promedio de 0,65.



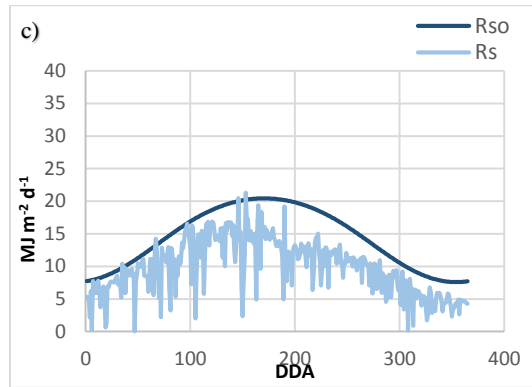


Figura 2. Radiación solar y radiación en un día despejado (R_{so}) para el año 1994 en: a) Exterior, b) Invernadero, c) Invernadero con R_{so} corregida por la transmisividad.

Se puede observar que la R_{so} calculada a partir de la radiación extraterrestre en la ecuación P-M de FAO 56 no se ajusta bien con valores medidos de R_s en el interior del invernadero, y que al corregir este término por la transmisividad del plástico, la curva coincide perfectamente con los valores de R_s medidos, lo cual ocurre también en el exterior (Figura 2). Esto significa que hay días donde la radiación incidente es prácticamente igual a la que llegaría en un día totalmente despejado, y que cuando hay nubosidad las curvas se separan; el cociente entre radiación solar y radiación en un día despejado se denomina radiación relativa de onda corta (Allen et al., 2006), este cociente debe ser menor o igual a 1, (siendo 1 cuando no hay nubosidad).

Una vez demostrado que es necesario corregir la R_{so} de la ecuación PM por la transmisividad del plástico, se estimó la ET_o con el método de P-M adaptado a invernadero con el término R_{so} corregido y se comparó con la ET_o medida. Los resultados se muestran en la Figura 3.

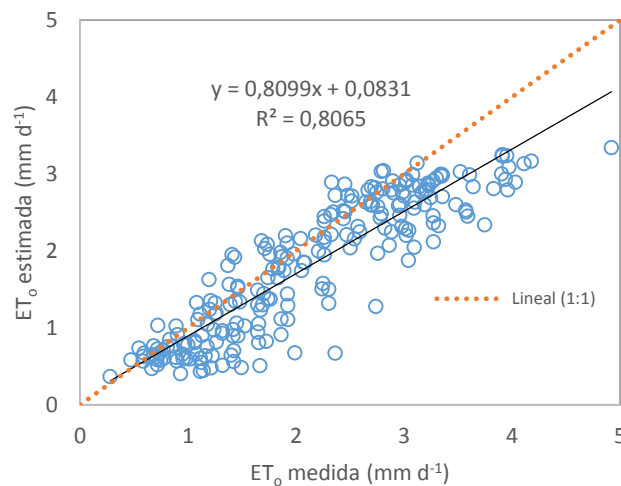


Figura 3. ET_o estimada con la ecuación P-M adaptada a invernadero con R_{so} corregido y ET_o medida (años 1994 a 2001).

Como se observa en la figura 3, la ET_o estimada a partir de la corrección con la transmisividad del plástico no mejoró la estimación de la ET_o (pendiente 0,81 con un R^2 de 0,81), la cual sigue teniendo los problemas observados en la estimación sin dicha corrección.

Debido a que la modificación no surgió efecto, se compararon los valores de RN estimada por el método P-M adaptado a invernadero con la corrección de R_{so} por la transmisividad con valores de RN medidos para el mismo período con radiómetros netos

instalados dentro del invernadero. Para esto se utilizaron datos de los años 1996 a 2001 (Figura 4).

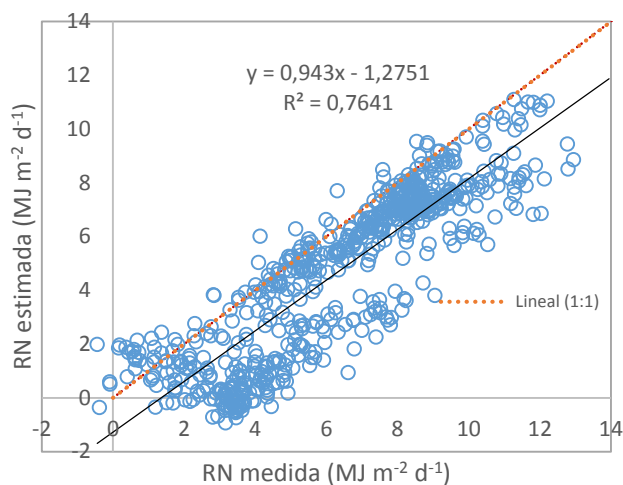


Figura 4. RN estimada con P-M con la corrección de R_{so} por la transmisividad frente a RN medida (con y sin encalado años 1996 a 2001).

La RN estimada por P-M corregida por la transmisividad subestimó la RN medida (Fig. 4). La pendiente de la curva fue 0,94 y el término independiente -1,23 con un R^2 de 0,76, lo que demuestra que la ecuación P-M adaptada a invernadero subestima en aproximadamente 25% la RN.

Debido a que la ET_o estimada con el término radiativo corregido por la transmisividad del plástico no se ajustó a la ET_o medida y que la RN estimada de esta manera tampoco se ajustó a la RN medida con radiómetro dentro del invernadero, en la ecuación P-M adaptada a invernadero se sustituyó la RN calculada por la RN medida. En la figura 5 se muestra la ET_o calculada usando valores de RN medida en comparación con la ET_o medida.

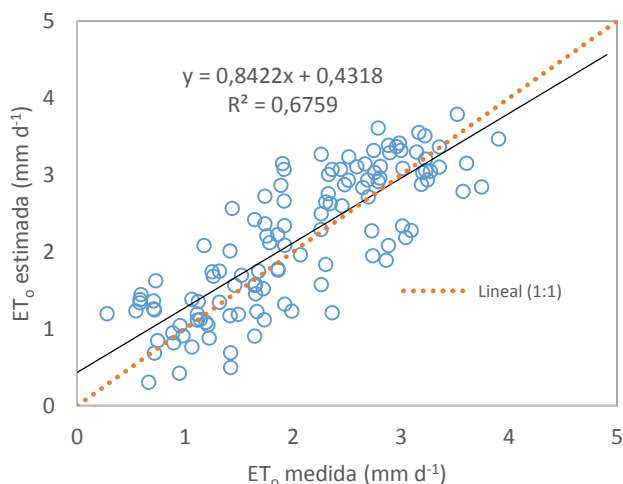


Figura 5. ET_o estimada con P-M adaptada a invernadero sustituyendo la RN calculada por la RN medida y su comparación con la ET_o medida con lisímetro, años 1996 a 2001.

Al incorporar la RN medida en la ecuación P-M, la ET_o calculada tampoco se ajustó a la medida (Fig.5), siendo el ajuste muy similar a las otras condiciones estudiadas, aunque la pendiente mejoró ligeramente (pendiente 0,84 con un R^2 de 0,67); lo mismo fue demostrado

en condiciones al aire libre, donde la RN medida no mejora las estimaciones de ET_o (Gavilán et al., 2007) llegando a subestimar en mayor magnitud con alta demanda evaporativa (Berengena and Gavilán, 2005). Al comparar los valores de ET_o medida menores a 2 mm d^{-1} frente a los estimados por la ecuación P-M con RN, P-M sobreestima la ET_o aproximadamente en un 14%, y por encima de $3,5 \text{ P-M}$ subestima en un 13%. El hecho de que al usar valores medidos de RN en el cálculo de ET_o con PM mejore muy poco la precisión de esta ecuación supone que además de problemas asociados al cálculo de la RN pueden estar afectando otros componentes como por el ejemplo el albedo o el cálculo de las resistencias que intervienen en la ecuación.

Con el fin de subsanar este problema se estableció una relación entre la RN y la R_s ambas medidas dentro de invernadero con la cual se estimó la RN; la RN calculada a partir de la R_s fue incluida en la ecuación P-M adaptada a invernadero. Sin embargo y como era previsible el desajuste entre la ET_o estimada y medida siguió estando presente (Fig. 6a) lo cual es lógico ya que al calcular la ET_o con datos medidos de RN hubo un desajuste entre valores estimados de ET_o y valores medidos.

M.D. Fernández (comun. personal) estableció una variación en la relación RN/ R_s dependiendo de la época del año (período frío y cálido), por lo que se evaluó el comportamiento diferencial de la RN en éstos dos periodos. En base a esto se estimó la RN a partir de la R_s medida dentro de invernadero, para dichos periodos. La ET_o estimada de esta manera si bien presenta una leve mejora con respecto a no diferenciar por periodos (pendiente 0,79 y 0,81 respectivamente) continúa presentando un desajuste (Fig. 6b), siendo el ajuste peor que al incorporar la RN medida en la ecuación (pendiente 0,84 con un R^2 de 0,67).

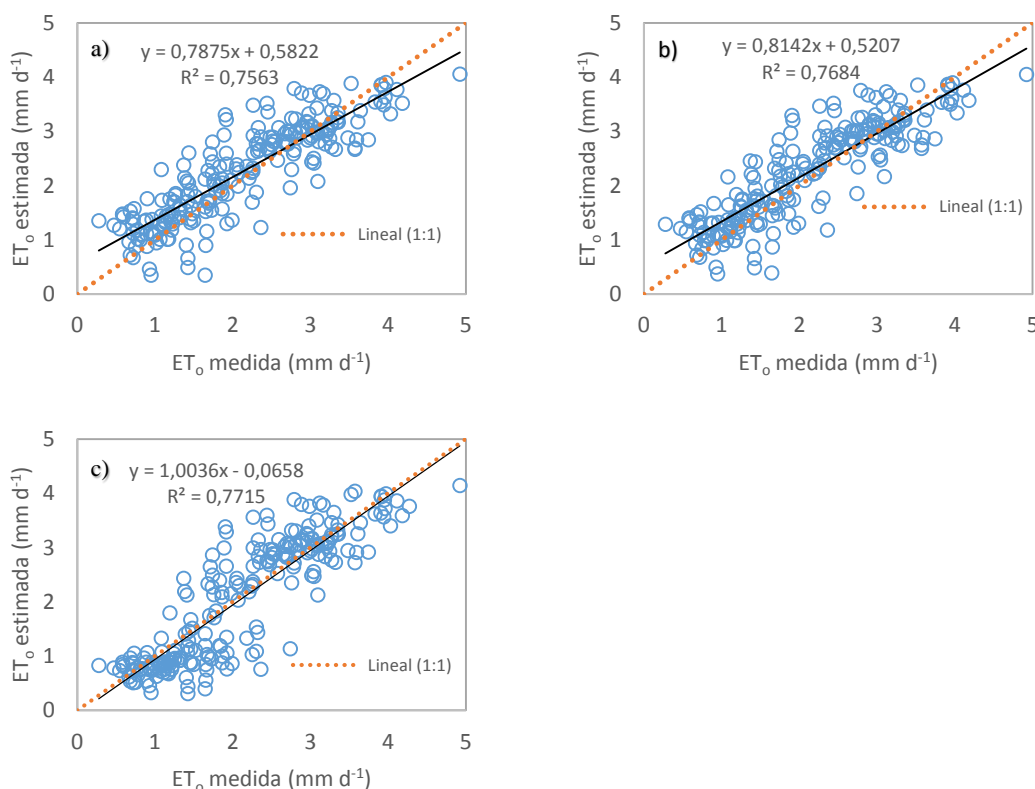


Figura 6. ET_o estimada con el método P-M adaptado a invernadero sustituyendo el cálculo original de RN por: **a)** RN calculada a partir de la R_s **b)** RN calculada a partir de la R_s separando por período cálido y frío y **c)** RN a partir de la R_s modificada por coeficientes empíricos; estos valores de ET_o se compararon con datos de ET_o medidos con lisímetros para los años 1994 a 2001.

Teniendo en cuenta la relación diferencial entre la RN y la Rs medida en los diferentes períodos, se establecieron coeficientes empíricos de ajuste para cada uno de ellos. Estos coeficientes ajustan la RN estimada en base a la Rs medida dentro de invernadero. Los coeficientes empíricos para cada época se establecieron considerando la época “cálida” entre los días del año 60 a 273 y la época “fría” durante el resto del año, los coeficientes determinados fueron: 1,03 y 0,4 cálido y frío respectivamente. En la Figura 6c se muestra el ajuste entre la ET_0 estimada con la corrección y la ET_0 medida. De esta manera se observa una mejora en la precisión de la ET_0 calculada con P-M (pendiente 1,01 con un R^2 de 0,77).

CONCLUSIONES

La estimación de la ET_0 por el método P-M adaptado a invernadero presenta limitaciones, ya que no se ajusta bien a la ET_0 medida. Se comprobó si el cálculo de la radiación neta que realiza la ecuación P-M es la razón de este desajuste en condiciones de invernadero. Sin embargo el hecho de que al usar valores medidos de RN en el cálculo de ET_0 con P-M mejore muy poco la precisión de esta ecuación supone que además de problemas asociados al cálculo de la RN pueden estar afectando otros componentes como por el ejemplo el albedo o el cálculo de las resistencias que intervienen en la ecuación.

La utilización de coeficientes empíricos que modifican el término radiativo mejoró la estimación, pero estos deben ser evaluados en otras condiciones.

La resistencia aerodinámica utilizada en la ecuación P-M adaptada a invernadero se corresponde con una velocidad de viento de $0,71 \text{ m s}^{-1}$, la cual es considerablemente más alta a los valores medidos de entre $0,01$ y $0,2 \text{ m s}^{-1}$ (Fernández et al. 2010; 2011). Por tanto hay que continuar profundizando en el estudio del efecto de la resistencia aerodinámica y balance de radiación sobre el cálculo de ET_0 con la ecuación de P-M para condiciones de invernadero.

BIBLIOGRAFÍA

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Estudio FAO Riego y Drenaje. doi:M-56

Bailey BJ, Montero JI, Biel C, Wilkinson DJ, Antón A, Jolliet O., 1993. Transpiration of Ficus benjamina: comparison of measurements with predictions of the Penman-Monteith model and a simplified version. *Agric For Meteorol* 65:229–243

Baille M, Baille A, Delmon D., 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agric For Meteorol* 71:83–97

Berengena, J., Gavilán, P., 2005. Reference Evapotranspiration Estimation in a Highly Advective Semiarid Environment. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131, 147–163. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(147)

Bonachela, S., González, A., Fernández, D., 2006. Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data 53–62. doi:10.1007/s00271-006-0034-z

Fernández, M.D., Bonachela, S., Gázquez, J.C., Thompson, R., Granados, M.R., López, J.C., 2010. Evaluación de la ecuación fao penman- monteith para la estimación de la evapotranspiración de referencia en invernadero en clima mediterráneo. XXVIII Congr. Nac. Riegos 33–34.

Fernández, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, J.C., Granados, M.R., Gallardo, M., Fereres, E., 2011. Erratum to: Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrig. Sci.* 29, 91–92.

doi:10.1007/s00271-010-0210-z

Fernández, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, J.C., Granados, M.R., Gallardo, M., Fereres, E., 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrig. Sci.* 28, 497–509. doi:10.1007/s00271-010-0210-z

Gallardo, M., Fernández, M.D., Giménez, C., Padilla, F.M., Thompson, R.B., 2016. Revised VegSyst model to calculate dry matter production, critical N uptake and ET_c of several vegetable species grown in Mediterranean greenhouses. *AGSY* 146, 30–43. doi:10.1016/j.agry.2016.03.014

Gallardo, M., Giménez, C., Martínez-Gaitán, C., Stockle, C. O., Thompson, R. B., & Granados, M. R. (2011). Evaluation of the VegSyst model with muskmelon to simulate crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 101(1), 107–117. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.09.008>

Gavilán, P., Berengena, J., Allen, R.G., 2007. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: Impact on Penman-Monteith reference ET estimates in semiarid regions. *Agric. Water Manag.* 89, 275–286. doi:10.1016/j.agwat.2007.01.014

Gavilán, P., Lorite, I.J., Tornero, S., Berengena, J., 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agric. Water Manag.* 81, 257–281. doi:10.1016/j.agwat.2005.05.001

López-Urrea, R., Olalla, F.M. de S., Fabeiro, C., Moratalla, A., 2006. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agric. Water Manag.* 86, 277–282. doi:10.1016/j.agwat.2006.05.017

Thompson, R.B., Martínez-Gaitán, C., Gallardo, M., Giménez, C., and Fernández, M.D., 2007. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. *Agric. Water Manag.* 89, 261–274.

Villarreal-Guerrero, F., Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G.A., Linker, R., Arbel, A., 2012. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 134, 210–221. doi:10.1016/j.scienta.2011.10.016