

EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DE UN CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO USANDO EL MÉTODO DE PRIESTLEY-TAYLOR

Evaluation of the water requirements for a greenhouse tomato crop using the Priestley-Taylor method

Héctor Valdés-Gómez^{1*}, Samuel Ortega-Farías², Mauricio Argote²

ABSTRACT

The Priestley-Taylor (PT) model was evaluated for estimating the real evapotranspiration (ET_{real}) of a drip-irrigated greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) crop. The net radiation incorporated in the PT model was estimated using meteorological variables. For this experiment, an automatic weather station (AWS) was installed inside the greenhouse to measure solar radiation (R_{gi}), net radiation (R_n), air temperature (T_a) and relative humidity (HR). Another AWS was installed over a grass cover to measure atmospheric conditions outside the greenhouse. The experiment was carried out at the Panguilemo experimental station (35°23' S, 71°40' W, 110 m.a.s.l.) from August to December 2000. The PT model was evaluated using the ET_{real} obtained from the water balance (BH) method. In this case, values of ET_{real} by PT model were calculated using: a) R_{gi} and soil heat flux (G) = 0; b) R_{gi} and G ≠ 0; c) solar radiation measured outside the greenhouse (R_{ge}) and G = 0; and d) R_{ge} and G ≠ 0. For these cases, results indicated that PT model was able to compute ET_{real} with errors less than 5%. Also, R_n was calculated with a relative absolute error and a mean deviation lower than 6% and 0.07 mm d⁻¹, respectively, using R_{gi} or R_{ge}. Daily soil heat flux values equal to zero did not affect the calculation of ET_{real} values. Thus, the PT model evaluated in this study could be used for scheduling irrigation for a greenhouse tomato crop, using internal measurements of air temperature and relative humidity, and external measurements of solar radiation. In this case, PT model predicted the ET_{real} with an error of 6.1%.

Key words: irrigation, model, crop coefficients, net radiation, heat soil flux.

¹ Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería en Bioinformática, Casilla 747, Talca, Chile.
E-mail: hevaldes@utalca.cl. * Autor para correspondencia.

² Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA), Casilla 747, Talca, Chile.

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento del modelo de Priestley-Taylor (PT) para la estimación de la evapotranspiración real (ET_{real}) de un cultivo de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en condiciones de invernadero. La radiación neta incorporada en el modelo de PT fue calculada usando variables meteorológicas clásicas. Para este experimento, una estación meteorológica automática (SMA) fue instalada dentro del invernadero para medir radiación solar (R_{gi}), radiación neta (R_n), temperatura del aire (T_a) y humedad relativa (HR). Un segundo SMA fue establecido sobre una cubierta herbácea para medir las condiciones atmosféricas al exterior del invernadero. El experimento se condujo en la Estación Experimental Panguilemo (35°23' S, 71°40' O, 110 m.s.n.m.) durante los meses de agosto a diciembre del 2000. Las estimaciones de ET_{real} obtenidas por el modelo PT fueron comparadas con los valores calculados por el método del balance hídrico (BH). En nuestro estudio, los valores de ET_{real} obtenidos por PT fueron calculados usando: a) R_{gi} y flujo de calor del suelo (G) = 0; b) R_{gi} y G ≠ 0; c) radiación solar medida al exterior del invernadero (R_{ge}) y G = 0; y d) R_{ge} y G ≠ 0. Para estos casos los resultados indicaron que el modelo de PT fue capaz de estimar la ET_{real} del tomate con errores menores que un 5%. Asimismo, la R_n fue calculada con un error absoluto relativo y una desviación media de no más del 6% y 0,07 mm d⁻¹, respectivamente, ya sea utilizando R_{gi} o R_{ge}. La utilización de un valor igual a cero para valores diarios de flujo de calor del suelo no afectó el cálculo de los valores de ET_{real}. Así, el modelo de PT evaluado en esta investigación podría ser usada para programar el riego de un cultivo de tomates bajo invernadero usando mediciones internas de temperatura y humedad relativa, y mediciones externas de radiación solar. En este caso, el modelo de PT predijo la ET_{real} con un error de un 6,1%.

Palabras clave: riego, modelo, coeficientes de cultivo, radiación neta, calor del suelo.

INTRODUCCIÓN

Uno de los factores fundamentales para alcanzar altos rendimientos y evitar pérdidas de calidad en el tomate cultivado bajo invernadero, lo constituye una correcta determinación del tiempo y frecuencia de aplicación de agua (Yuan *et al.*, 2001). Para esto, es primordial conocer los requerimientos hídricos del cultivo o evapotranspiración real (ET_{real}), los cuales dependen de las interacciones específicas entre el suelo (textura y propiedades físico-hídricas), el cultivo de tomates (variedad, sistema radical, etc.) y las condiciones atmosféricas. En invernaderos, la ET_{real} ha sido estimada por medio de la evaporación directa de agua de un recipiente como el evaporímetro de Piche o la bandeja de evaporación modificada

(Kirda *et al.*, 1988; Yuan *et al.*, 2001). Otros métodos de estimación de la ET_{real} lo constituyen los modelos con un mayor fundamento biofísico, que requieren de información climática como variable de entrada. Tal es el caso del modelo de Penman-Monteith y el de Priestley-Taylor, los que cuentan con un sólido soporte físico (Zhang y Lemeur, 1992; Ortega-Farias *et al.*, 2004b). El problema del modelo de Penman-Monteith es que requiere información como la resistencia de la cubierta vegetal (r_{cv}) y la resistencia aerodinámica (r_a), que son difíciles de medir o de estimar en condiciones de invernadero. Por su parte, el modelo de Priestley-Taylor evita este problema al integrar r_a y r_{cv} en un factor constante (α) dentro de la fórmula. En este contexto, Vusovich (2001) indicó que el modelo de PT simuló le ET_{real} para un cultivo de tomates en invernadero con errores inferiores a 1 mm d⁻¹ y 18%, para la raíz del error cuadrático medio y la raíz cuadrada del error medio relativo, respectivamente.

MARCO TEÓRICO

Método de Priestley y Taylor (PT)

Priestley and Taylor (1972) propusieron que la evapotranspiración potencial (ET_p, mm d⁻¹) de diferentes tipos de vegetaciones, a una escala regional, puede ser estimada como:

$$ET_p = \alpha \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad [1]$$

donde α es un coeficiente empírico, Δ es la pendiente de saturación (kPa °C⁻¹), γ es la constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), R_n es la radiación neta (mm d⁻¹), G es el calor del suelo (mm d⁻¹). El valor del factor α depende del tipo de cubierta vegetal y se podría relacionar con el flujo de calor sensible de la cubierta (Pereira y Villa Nova, 1992), así como, con el déficit de presión de vapor (Vusovich, 2001). Considerando que la ecuación de PT predice la tasa de evapotranspiración potencial (ET_p), y por lo tanto no considera el estado de desarrollo del cultivo, la evapotranspiración real (ET_{real}) del tomate debe ser calculada según la Ecuación [1] multiplicada por un coeficiente de cultivo (K_c) (Allen *et al.*, 1998). El K_c es un coeficiente empírico que integra la relación no-lineal entre suelo, cultivo y condiciones climáticas.

Radiación neta y calor del suelo

La Ecuación [1] necesita contar como parámetros de entrada con valores de R_n y G , los cuales son caros de medir al interior de un invernadero. Para solucionar este problema los valores diarios de R_n podrían ser calculados mediante la siguiente expresión (Antonioletti *et al.*, 1999):

$$R_n = \left[(1 - \xi) R_{gi} + \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_{cv} \sigma T_{cv}^4 \right] \cdot FC^{-1} \quad [2]$$

donde R_n se expresa en (mm d^{-1}), R_{gi} es la radiación de onda corta incidente dentro del invernadero ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ξ es el albedo superficial, ε_a es la emisividad de la atmósfera, ε_{cv} es la emisividad del cultivo, T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{K}$), T_{cv} es la temperatura de la cubierta vegetal ($^{\circ}\text{K}$), σ es la constante de Stefan-Boltzman ($4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y FC es un factor de conversión ($2,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1} \text{ mm}^{-1}$). La emisividad atmosférica puede ser estimada con la fórmula siguiente (Idso, 1981):

$$\varepsilon_a = 0,179 \cdot (e_w)^{1/7} \exp(350 / T_a) \quad [3]$$

donde e_w es la presión de vapor (kPa).

En general, G se asume igual a cero en el cálculo diario de la evapotranspiración debido a que su valor es pequeño en una escala diaria (Allen *et al.*, 1998; Ortega-Farías *et al.* 2004b). Así, Stanghellini (1987), y Vuscovich (2001) sugirieron un valor de G igual a cero para estimar la ET_{real} de cultivos de tomate en invernadero usando los modelos de Penman-Monteith y PT, respectivamente.

En Chile no hay suficiente información acerca de la estimación de la consumo de agua del tomate en invernadero por lo cual el objetivo de la presente investigación fue evaluar el método Priestley-Taylor para la estimación de la evapotranspiración de un cultivo de tomates bajo invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló en un invernadero ubicado en la Estación Experimental Panguilemo de la Universidad de Talca ($35^{\circ}23' \text{ S}$, $71^{\circ}40' \text{ O}$, 110 m.s.n.m.) durante el período de agosto a diciembre del 2000. Una descripción detallada del tipo de estructura del invernadero, el suelo, los principales manejos realizados y el dispositivo experimental es presentado por Ortega-Farías *et al.* (2003). En el presente estudio se usaron las cuatro repeticiones ($7,2 \text{ m}^2$ cada una) correspondientes al tratamiento con 100% de la ET_{real} . Las condiciones climáticas al interior y al exterior del invernadero para el período de estudio se presentan en la **Figura 1**.

Las plantas de tomate (cv. Presto) distribuidas en hileras simples se condujeron verticalmente en un eje siguiendo un sistema en V, es decir, a lo largo de la hilera una planta se guió hacia la izquierda y la otra hacia la derecha, lo cual significó contar con dos hileras efectivas por mesa de cultivo. Los valores del índice de área foliar (IAF) se estimaron con el modelo STICS (Brisson *et al.*, 2003) el cual se calibró para el tomate en invernadero.

El riego se efectuó por medio de cintas (T-Tape, TSX 310), separadas a 30 cm sobre la mesa de cultivo, que descargaban un caudal de $5 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Las cintas de riego así dispuestas se encontraban a 15 cm de la hilera de tomate (a la derecha y a la izquierda de ella) permitiendo mojar uniformemente la mayor parte de la mesa de cultivo. Se realizaron mediciones del contenido volumétrico de humedad del suelo (θ) cada 3 a 5 días utilizando la técnica de reflectometría (TDR, Trase System, Soil Moisture Equipment Corp, Santa Barbara, California, USA) (**Figura 2a**). Estas mediciones se realizaron justo antes del riego, para verificar que el aporte de agua entregado en el riego o los riegos anteriores fue suficiente para mantener la humedad del suelo sobre el nivel crítico. Se instalaron cuatro pares de guías de acero inoxidable en el suelo (una en cada repetición) que se monitorearon desde el trasplante del tomate hasta cuando se realizó el 50% de la cosecha. Además se estableció un valor crítico de humedad volumétrica (Hcr) equivalente a 23%, el cual se calculó usando un criterio de riego del 50%.

Se instaló un sistema meteorológico automático (SMA) en la parte central del invernadero para medir la radiación neta (R_n), temperatura de suelo (T_s), temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR) y radiación solar (R_{gi}). El sensor de R_n (REBS-Q7, Campbell Sci., Logan, Utah, USA) se instaló a 0,5 m sobre el suelo a principios de temporada y se movió a 2 m del suelo cuando el cultivo alcanzó su altura máxima de 1,7 m. Así, el sensor se mantuvo a 0,3 m sobre el cultivo durante toda la temporada de estudio, lo cual aseguró que la mayor parte de la radiación neta proviniera de la cubierta del tomate (Domingo *et al.*, 2000). Para la medición del flujo de calor del suelo se utilizaron dos termocuplas (TCAV, Campbell Sci., Logan, Utah, USA) ubicadas a 0,02 y 0,06 m bajo el suelo, en conjunto con dos placas de calor de suelo (HFT3-L, Campbell Sci., Logan, Utah, USA) puestas a 0,08 m bajo la superficie del suelo. El sensor de temperatura y humedad relativa (HMP 35C, Campbell Sci., Logan, Utah, USA) se instaló a 1,2 m de altura, mientras que el sensor de radiación solar (Adcon Telemetry A730, Klosterneuburg, Austria) se ubicó a 2 m de altura. Un segundo SMA, similar al utilizado en el invernadero, se instaló sobre una cubierta vegetal de pasto para medir las condiciones climáticas al exterior del invernadero. Los sensores de temperatura y humedad relativa y de radiación solar se emplazaron a 2 y 2,3 m, respectivamente.

Debido al alto costo de los sensores para medir radiación solar, se planteó la posibilidad de estimar la radiación solar interior (R_{gi}) mediante la siguiente fórmula:

$$R_{gi} = \tau \cdot R_{ge} \quad [4]$$

donde τ es el coeficiente de transmisión de la radiación solar del plástico (sin dimensión), y R_{ge} es la radiación solar medida al exterior del invernadero ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

Para la estimación de la radiación neta se consideraron los siguientes supuestos: i) $T_a = T_{cv}$, pues T_{cv} es difícil de obtener de instrumental micrometeorológico simple y de bajo costo (Antonioletti *et al.*, 1999); ii) $\epsilon_{cv} = 0,92$. Este valor es el resultante de una ponderación de los tres componentes principales del sistema de cultivo que emiten radiación de onda larga en la superficie, es decir, el cultivo de tomate ($\epsilon = 0,95$, Pieters y Deltour, 1997), mulch plástico ($\epsilon = 0,53$, Zhu *et al.*, 1998) y el suelo desnudo de los pasillos ($\epsilon = 0,95$); iv) $\xi = 0,21$. Así, el modelo de R_n resulta:

$$R_n = \left(0,79 \cdot \tau \cdot R_{ge} + \sigma T^4 \cdot (\epsilon_a - 0,92) \right) \cdot FC^{-1} \quad [5]$$

Para corroborar que la utilización de un solo sensor de R_n ubicado sobre una repetición era suficiente para representar el flujo de R_n de las otras repeticiones, se realizaron mediciones al mediodía con porómetro (modelo AP4, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) en diferentes etapas fenológicas del cultivo (datos no mostrados). Estas mediciones indicaron que la temperatura foliar no fue muy diferente entre las distintas repeticiones (no más de 1 °C), lo cual indicaría que el estado hídrico, la emisión de calor sensible y el balance de energía era muy similares entre éstas.

Para el cálculo diario de la ET_{real} según la ecuación de PT se hicieron los siguientes supuestos: i) $G = 0$, ya que G es muy pequeño en una escala diaria, ii) $\alpha = 1,12$. Este valor se seleccionó en base a los trabajos de Pereira y Villa Nova (1992); iii) los valores de K_c fueron aquellos propuestos por Castilla y Fereres (1990) (**Cuadro 1**). Reemplazando la Ecuación [5] en [1] e incorporando todos los supuestos presentados, el modelo final de cálculo de la ET_{real} utilizado fue:

$$ET_{real} = 1,12 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left[\frac{0,79 \cdot \tau \cdot R_{ge} + \sigma T^4 \cdot (\epsilon_a - 0,92)}{2,45} \right] \cdot K_c \quad [6]$$

De forma paralela se calcularon los valores de ET_{real} según el método del balance hídrico (BH), el cual queda descrito mediante la siguiente expresión (Yuan *et al.*, 2001):

$$ET_{real} = R + \Delta\theta_s - E_s - P_p \quad [7]$$

donde ET_{real} es la evapotranspiración real del cultivo (mm d^{-1}); R es la cantidad de agua de riego aportada al sistema (mm d^{-1}); $\Delta\theta_s$ es la variación del contenido de agua del suelo (mm d^{-1}); E_s es el escurrimiento superficial (mm d^{-1}); P_p es el flujo de agua hacia horizontes más profundos (mm d^{-1}). En este balance no se consideró el escurrimiento superficial, puesto que se utilizó un sistema de riego por goteo y una cubierta plástica sobre el suelo que impedía el escurrimiento lateral del agua. La percolación profunda bajo la zona de raíces y el flujo de agua de la napa freática también se consideraron nulos, ya que bajo 40 cm existe un horizonte con una conductividad hidráulica muy baja que limitaba el flujo (tanto ascendente como descendente) normal de agua. La construcción de dos calicatas (rizotrones), en las cuales dos de sus paredes se cubrieron con una placa de vidrio y la parte superior se cubrió con el mulch, permitió visualizar el bulbo de mojado y observar también que no hubiera una napa colgante. Asimismo, estas calicatas mostraron que la mayor parte de las raíces se distribuyeron en los primeros 30 cm de suelo. Por otro lado, mediciones de humedad a 40 y 60 cm de profundidad usando el TDR mostraron que la humedad en la zona comprendida entre los 40 y 60 cm se mantuvo relativamente constante y cercana a la capacidad de campo, indicando que no habría habido consumo de agua por parte del cultivo bajo 40 cm (**Figura 2b**). Al respecto, los valores de humedad en este horizonte variaron entre 28 y 31%, que se encuentra en el rango de precisión del medidor de humedad. Además esta pequeña variación de humedad ratifica la hipótesis de una percolación profunda igual a 0. Así la Ecuación [7] quedó como sigue:

$$ET_{real} = R + \Delta\theta_s \quad [8]$$

Para evaluar el comportamiento del modelo de R_n , los flujos de R_n estimados (R_{ne}) se compararon con los flujos de R_n observada (R_{no}) mediante el radiómetro neto ubicado al interior del invernadero. Por su parte, la evapotranspiración del cultivo de tomates estimada por el modelo de PT se comparó con la ET_{real} obtenida del balance hídrico. La ET_{real} estimada por PT se realizó para los siguientes casos: (A) R_{gi} y $G \neq 0$; (B) R_{gi} y $G = 0$; (C) R_{ge} y $G \neq 0$; (D) R_{ge} ; y $G = 0$.

La comparación entre valores observados y estimados incluyó como parámetros estadísticos la desviación media (DM), la raíz del error cuadrático medio (RCME) y el error absoluto relativo (EAR). Además, se realizó un análisis de regresión entre los valores observados y estimados, donde se evaluó con el test Z si la pendiente de esta regresión fue igual a 1 y el intercepto igual a 0. Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto que tiene considerar $T_a = T_{cv}$ ($\Delta T = 0$) sobre la estimación de la radiación neta. Para este análisis, los datos de la temperatura del aire medida con el SMA se compararon con los datos de temperatura de la hoja medidos con el porómetro, determinando así el rango en el cual se haría variar ΔT .

RESULTADOS

Los registros climáticos al interior del invernadero muestran que las condiciones hasta inicio de la floración fueron poco favorables para el crecimiento rápido del cultivo e impidieron altas tasas transpiratorias (**Figura 1**). En este primer período más del 50% de los días se encontraron completa o parcialmente nublados y las temperaturas medias fluctuaron entre los 10 y 20 °C, la humedad relativa entre 70 y 90% y la radiación global no superó los 15 MJ m⁻² d⁻¹. Bajo estas condiciones climáticas el consumo de agua del tomate ($ET_{real} < 1,6$ mm d⁻¹) fue sólo la quinta parte del total utilizado entre trasplante y fin de la cosecha. La **Figura 1** muestra también que la temperatura fue más elevada al interior que al exterior del invernadero durante toda la temporada, este no fue el caso de la humedad relativa, la cual fue más baja al interior de la estructura hasta mediados de temporada (tercer racimo cuajado). A partir de este momento (día 308 del año) la ventilación del invernadero produjo un intercambio gaseoso mayor que equiparó las humedades relativas entre el interior y el exterior del invernadero.

En general, la humedad del suelo fluctuó entre la capacidad de campo y el valor crítico (**Figura 2a**) indicando que el riego fue adecuado. Sólo entre los días 325 y 332 del año los valores de θ se encontraron bajo el valor crítico ($\theta = 22,5\%$); sin embargo ello no afectó en forma significativa el crecimiento del cultivo. En esos días el contenido de humedad del suelo varió entre 20,9 y 22,1%. El alto rendimiento (152 t ha⁻¹) alcanzado en este estudio indica que el crecimiento del cultivo no fue disminuido por una restricción hídrica.

Radiación solar interior

Los valores diarios de radiación solar medida al interior del invernadero resultaron ser equivalentes en promedio a un 62% del valor observado al exterior del mismo (**Figura 3a**). En este estudio, la proporción entre R_{gi} y R_{ge} fue bastante estable durante toda la temporada (**Figura 3b**). El análisis estadístico

permitió establecer una regresión lineal que pasa por el origen debido a que su intercepto no es significativamente distinto de 0 (test Z con $p < 0,01$). Así se estableció que el parámetro τ presentado en la Ecuación [4] tiene un valor medio de 0,62 para la cubierta plástica utilizada en el experimento que es inferior al valor ($\tau = 0,68$) observado por Vuscovich (2001) para una cubierta de policarbonato.

Radiación neta y flujo de calor del suelo

El **Cuadro 2** muestra un buen comportamiento del modelo de R_n utilizando R_{gi} o R_{ge} . Para ambos casos el coeficiente R^2 de la regresión lineal fue igual o superior a 0,97 con un valor de EAR de 6%. Los valores para la DM y la RCME fueron inferiores a 0,08 y 0,28 mm d^{-1} , respectivamente. Estos resultados son similares a los reportados por Ortega-Farías *et al.* (2004a) para un cultivo de tomates al aire libre (RCME = 0,24 mm d^{-1} y EAR = 4,1%). La **Figura 4a** confirma el buen comportamiento del modelo ya que la mayoría de los puntos se distribuyeron en torno a la línea 1:1. El test estadístico indicó que la pendiente y el intercepto de la regresión lineal entre R_{ne} y R_{no} no fueron estadísticamente diferentes de 1 y 0, respectivamente, tanto para R_n estimada con R_{gi} como con R_{ge} (**Cuadro 2**). Estos resultados sugieren que es posible estimar R_n usando mediciones de R_{ge} .

El análisis de sensibilidad mostró que el modelo podría subestimar R_n en alrededor de un 26% cuando el gradiente de temperatura (ΔT) entre T_{cv} y T_a es de 3 °C (**Cuadro 2**). Además, la RCME fue de 0,65 mm d^{-1} y la DM de 0,61 mm d^{-1} . En este estudio la ETreal acumulada entre agosto y diciembre fue de 333,5 y 290,2 mm para un $\Delta T = 0$ y $\Delta T = 3$ °C, respectivamente. Al respecto, Ortega-Farías *et al.* (2004a) indicaron que si el tomate se mantiene bien regado, las diferencias entre T_a y T_{cv} no son importantes, y agregan que en más del 60% de los casos, de un experimento que condujeron en tomate industrial, ΔT fue inferior a 3 °C. Para el presente experimento, la comparación entre T_{cv} y T_a indicó que sobre el 98% de los datos la variación en ΔT fue menor que 3 °C.

La **Figura 3b** muestra que los valores diarios de G presentaron pequeñas variaciones en el período comprendido entre el trasplante ($IAF = 0,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) y el inicio de la cosecha ($IAF = 2,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). El valor máximo para G alcanzó 0,5 mm d^{-1} ($1,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) mientras que el valor mínimo fue -0,4 mm d^{-1} ($-0,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Este análisis corrobora el supuesto de usar $G = 0$ en el modelo de PT para estimar la ETreal de un cultivo de tomates en invernadero.

Evapotranspiración

La **Figura 4b** muestra la comparación entre la ETreal estimada por el método del balance hídrico y el método de PT. Para el modelo de PT, los valores de la ETreal fueron calculados usando (A) R_{gi} y $G \neq 0$, (B) R_{gi} y $G = 0$, (C) R_{ge} y $G \neq 0$ y D) R_{ge} y $G = 0$. Para todos los casos, los puntos se distribuyen en torno a la línea 1:1 indicando que la comparación entre la ETreal estimada por el método del BH y por el de PT es buena. Para los casos A, B, C y D el **Cuadro 3** muestra que el modelo de PT tiende a sobrestimar entre un 1,6 y un 6,2% la ETreal acumulada desde el trasplante (Día del año 220) hasta el momento en que se alcanzó un 50% de la cosecha (día del año 365). El método de PT sobrestima la ETreal en alrededor de 20 mm cuando se utiliza el supuesto de $G = 0$.

En general, el modelo de PT fue capaz de reproducir la evapotranspiración del tomate durante el período de estudio (135 días), con valores máximos de ETreal observados entre el día del año 320 al 355 (**Figura 5**). Estos valores medios máximos de ETreal bordearon los 5 mm d^{-1} , los cuales son inferiores a los 6 mm d^{-1} medidos por Vuscovich (2001) en la zona de Chillán. Esta diferencia, podría deberse, por una parte, al cultivar de tomate utilizado en el experimento de Vuscovich (2001), y por otra a la transmisividad más elevada del policarbonato comparado con el polietileno, dejando pasar más radiación hacia el interior del invernadero. Finalmente, también se observa que el método de PT sobrestima los valores de ETreal (**Figura 5**) obtenidos por BH después que se produce una labor de deshoje (día del año 332). Asimismo, se observó una pequeña subestimación de la ETreal en la primera etapa del cultivo (hasta el día del año 270).

DISCUSIÓN

Los supuestos propuestos para el cálculo de la R_n no produjeron grandes errores desde un punto de vista de la utilización de este modelo para programar el riego usando la ecuación de Priestley-Taylor: usando ΔT de hasta $3 \text{ }^\circ\text{C}$, el error en la radiación neta ($RCME < 0,7 \text{ mm d}^{-1}$) no fue muy importante. Concerniente a la emisividad del cultivo, un pequeño cálculo indica que un cambio de 0,01 en el valor de ésta es equivalente a ΔT de $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Así también, si se aumenta en 0,03 el valor de la emisividad usado en esta investigación (0,92), los errores no irían más allá de $0,7 \text{ mm d}^{-1}$ en el cálculo de la R_n . El buen comportamiento de las estimaciones de R_n utilizando radiación solar medida al exterior del invernadero, conforta la idea de utilizar un sensor de radiación solar ubicado en el exterior para caracterizar el flujo de radiación de onda corta interna. Para ello se debería considerar las propiedades de transmisión del material de recubrimiento.

Con respecto a la estimación de la ET_{real} con el método de PT calculado a partir del modelo de R_n y con valores de G medidos o iguales a 0, varios puntos resultan relevantes de discutir:

i) La utilización de un valor de α igual a 1,12, que es diferente al valor de 1,26 comúnmente descrito en la literatura, parece correcta en las condiciones de esta experimentación. McAneney e Itier (1996) señalan que bajo condiciones estables (con poco viento, como es el caso de un invernadero) el valor de α se torna confuso pudiendo ser distinto a 1,26. Al respecto, investigaciones como las de Vuscovich (2001) señalan que el valor α puede variar con los cambios en el déficit de presión de vapor, alcanzando valores incluso cercanos a 2 para períodos con alto déficit de humedad en el aire.

ii) La sobrestimación a principios de la cosecha del cultivo se originó probablemente por el deshoje realizado y por los pequeños problemas de riego que se produjeron en ese período. En el primer caso, la labor de deshoje removió una parte importante del follaje (ocho hojas inferiores) cambiando notoriamente el IAF del cultivo (disminuyó de 3,5 a casi 2) y por ende la superficie transpiratoria de la planta, situación que no es considerada por el modelo ni por los coeficientes de cultivo utilizados. En el segundo caso, la disminución del agua disponible en el suelo, justo en el momento de inicio de la cosecha, probablemente disminuyó la ET_{real} del tomate por algunos días, lo cual no es considerado por el modelo de PT. Este modelo no considera una regulación fisiológica de la planta en condiciones de restricción hídrica como en el caso del modelo de Penman-Monteith.

iii) La utilización de G medido o bien su omisión en el cálculo de la ET_{real} produce resultados similares (**Figura 4b, Cuadro 3**). Esto indicaría que la utilización de la ecuación de PT para fines de programación del riego, sin considerar G , no produce mayores errores en la estimación de los requerimientos hídricos del tomate.

iv) El uso de los coeficientes de cultivo propuestos por Castilla y Fereres (1990) permitió realizar una estimación aceptable de la ET_{real} . Sin embargo, es necesario notar que la pequeña subestimación observada a principios de temporada podría estar asociada al valor de K_c utilizado (0,4), el cual probablemente fue un poco bajo. Además, los problemas de sobrestimación observados después del deshoje indicarían que sería necesaria una corrección a los valores de K_c para capturar el efecto que puede tener un deshoje importante. Así, nuevas investigaciones deberían proponer valores de K_c específicos para la variedad y sobretodo para el tipo de manejo realizado en la zona de Talca.

CONCLUSIONES

Los resultados indicaron que la radiación neta pudo ser calculada con un error absoluto relativo y una desviación media de no más del 6% y $0,07 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente, ya sea utilizando la radiación solar medida al interior como al exterior del invernadero. Ello sugiere que bastaría un solo sensor de radiación ubicado en el exterior del invernadero junto a mediciones de temperatura y humedad relativa al interior para caracterizar la radiación neta del cultivo de tomates. En este contexto, el flujo de radiación de onda corta al interior del invernadero podría ser calculado conociendo la radiación solar exterior y las propiedades de transmisión del material de recubrimiento del mismo. También, el estudio indica que el modelo de Priestley-Taylor podría estimar la evapotranspiración del tomate asumiendo $G = 0$.

La metodología evaluada podría ser usada para programar el riego de tomates bajo invernadero usando mediciones internas de temperatura y de humedad relativa, y mediciones externas de radiación solar. En este caso, el modelo de PT predice la Etreal con un error de 6,1%.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por los proyectos FONDECYT N° 1970309 y CONICYT Bicentenario PSD-86/2006. Los autores agradecen a los ex-alumnos de la Universidad de Talca, colegas Ben-Hur Leyton, Gonzalo Enríquez y Jenny Pino por su participación en la recolección de datos. Asimismo se agradece al Dr. Hernán Paillán por facilitar la infraestructura e insumos utilizados en el experimento.

LITERATURA CITADA

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. 300 p. FAO, Rome, Italy.

Antonioletti, R., S. Ortega, and A. Olioso. 1999. Modélisation du rayonnement net pour des applications climatiques et agroclimatiques en milieu méditerranéen et tropical maritime. Publications de l'Association Internationale de Climatologie 12:335-341.

- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, *et al.* 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18:309-332.
- Castilla, N., and E. Fereres. 1990. The climate and water requirements of tomatoes in unheated plastic greenhouses. *Agricultura Mediterranea* 120:268-274.
- Domingo, F., L. Villagarcía, A.J. Brenner, and J. Puigdefabregas. 2000. Measuring and modelling the radiation balance of a heterogeneous shrubland. *Plant Cell Environ.* 23:27-38.
- Idso, S. 1981. A set de equations for full spectrum and 8 to 14 μm and 10.5 to 12.5 μm thermal radiation from cloudless skies. *Water Resour. Res.* 19:295-304.
- Kirda, C., B. Cevik, and K. Tulucu. 1988. A simple method to estimate the irrigation water requirement of greenhouse grown tomato. *Acta Hort. (ISHS)* 366:371-380.
- McAneney, K., and B. Itier. 1996. Operational limits to the Priestley-Taylor formula. *Irrig. Sci.* 17:37-43.
- Ortega-Farías, S., R. Calderón, N. Martelli, y R. Antonioletti. 2004a. Evaluación de un modelo para estimar la radiación neta sobre un cultivo de tomate industrial. *Agric. Téc. (Chile)* 64:41-49.
- Ortega-Farías, S., B. Leyton, H. Valdés, and H. Paillán. 2003. Efecto de cuatro láminas de agua sobre el rendimiento y calidad de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. Presto) de invernadero producido en primavera-verano. *Agric. Téc. (Chile)* 63:394-402.
- Ortega-Farias, S.O., V. Rojas, H. Valdés, and P. González. 2004b. Estimation of reference evapotranspiration in the Maule Region of Chile: A comparison between the FAO Penman-Monteith and Bowen Ratio methods. *Acta Hort. (ISHS)* 664:469-475.
- Pereira, A., and N. Villa Nova. 1992. Analysis of the Priestley-Taylor parameter. *Agric. For. Meteorol.* 61:1-9.
- Pieters, J., and J. Deltour. 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials. *J. Agric. Eng. Res.* 68:125-137.

- Priestley, C., and R. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81-92.
- Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops: and aid to climate management, Ph.D. Dissertation. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Vuscovich, M. 2001. Desarrollo de un modelo para determinar evapotranspiración en invernaderos. Tesis Magíster. 64 p. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile.
- Yuan, B., Y. Kang, and S. Nishiyama. 2001. Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouses. *Irrig. Sci.* 20(3):149-154.
- Zhang, L., and R. Lemeur. 1992. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. *Agric. For. Meteorol.* 58:209-228.
- Zhu, S., J. Deltour, and S. Wang. 1998. Modelling the thermal characteristics of greenhouse pond systems. *Aquacult. Eng.* 18:201-217.

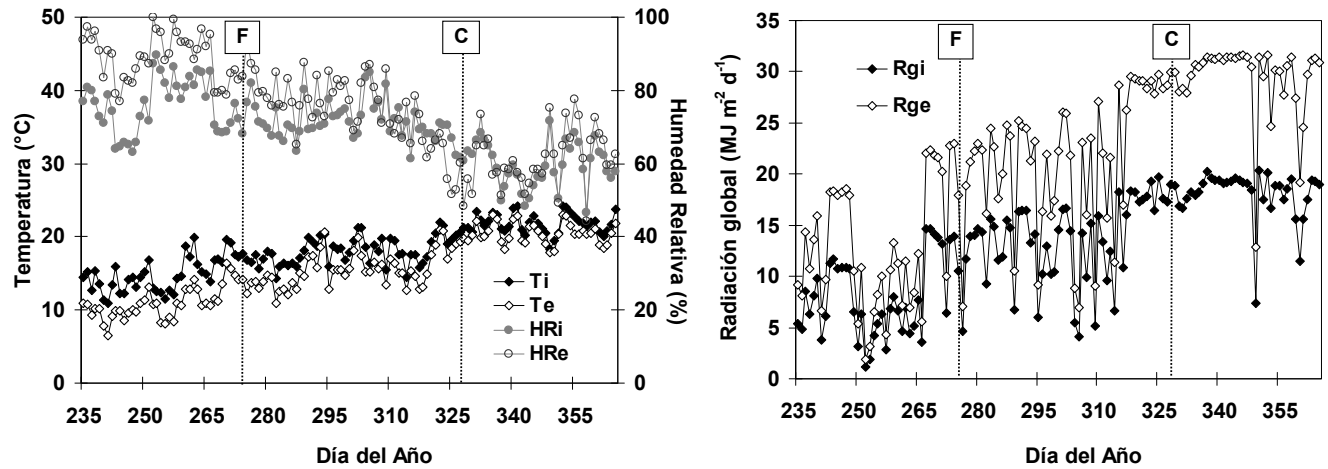


Figura 1. Temperatura media (T°), humedad relativa media (HR) y radiación solar (Rg) medida al interior (i) y al exterior (e) de un invernadero de tomates (temporada 2000-2001).

F: inicio de la floración; C: inicio de la cosecha.

Figure 1. Average temperature (T°), relative humidity (HR) and global radiation (Rg) measured inside (i) and outside (e) of a tomato greenhouse (2000-2001 season). F: start of flowering; C: start of harvest.

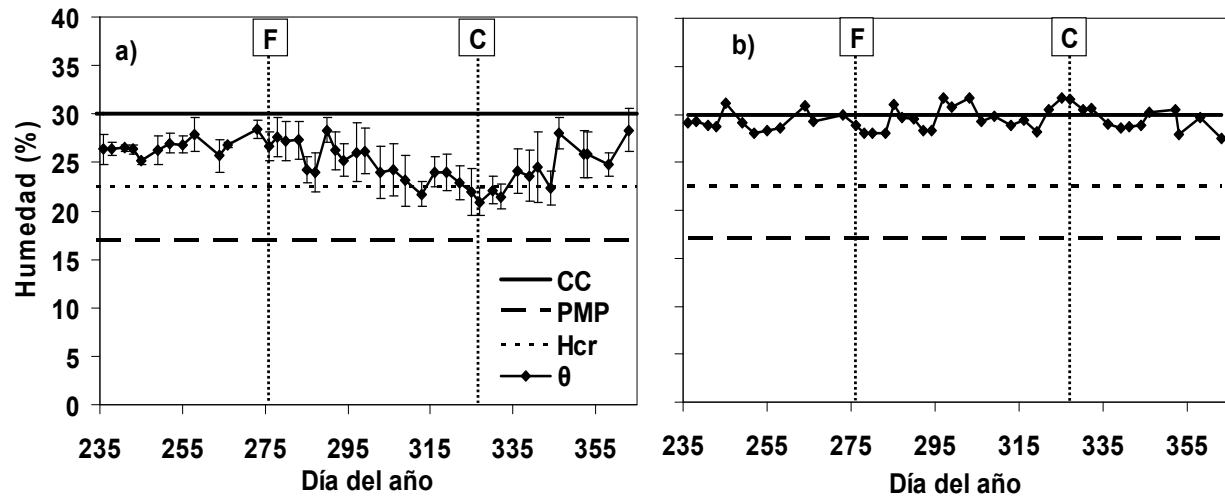


Figura 2. Evolución del contenido de humedad volumétrica del suelo (θ) en los horizontes 0-40 cm (a) y 40-60 cm (b). CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; Hcr: humedad crítica; F: inicio de la floración; C: inicio de la cosecha. Barras verticales corresponden a la desviación estándar.

Figure 2. Evolution of volumetric soil water content (θ) in 0-40 cm (a) and 40-60 cm profiles (b), CC field capacity; PMP: wilting point; Hcr: critical moisture; F: start of flowering; C: start of harvest. Vertical bars indicate standard deviation.

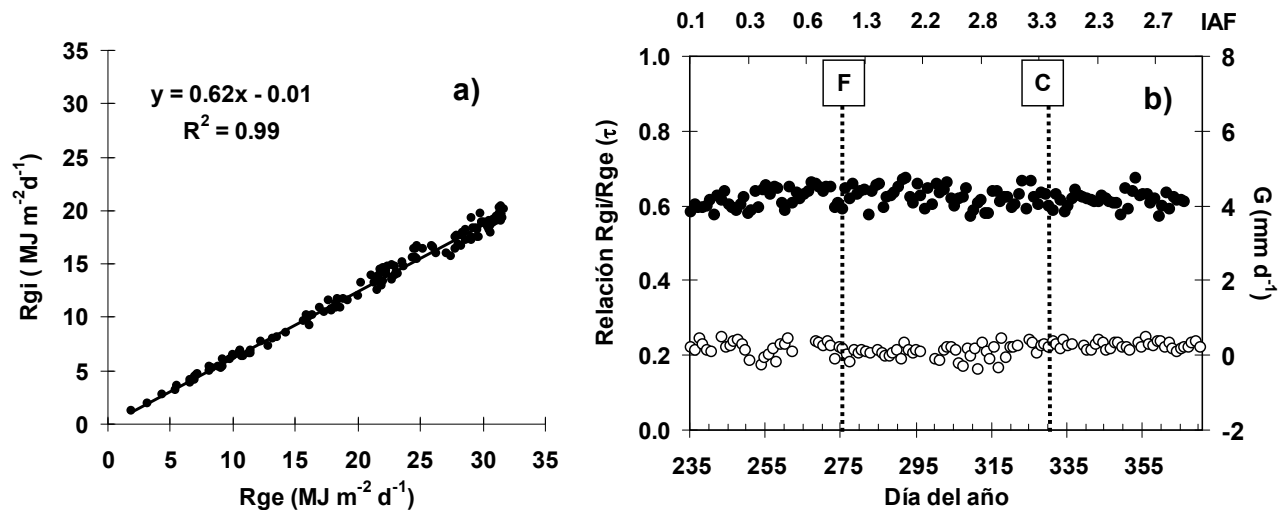


Figura 3. a) Relación entre la radiación solar medida al exterior (R_{ge}) e interior (R_{gi}) del invernadero de tomates; b) coeficiente de transmisión de la radiación solar del plástico, τ (sin dimensión, círculos negros) y evolución del calor del suelo (G, círculos vacíos) e índice de área foliar (IAF). F: inicio de la floración; C: inicio de la cosecha.

Figure 3. a) Relationships between solar radiation measured outside (R_{ge}) and inside (R_{gi}) the tomato greenhouse; b) solar radiation transmission coefficient of polyethylene, τ (dimensionless, solid circles), evolution of soil heat flux (G, open circles) and leaf area index (IAF).

F: start of flowering; C: start of harvest.

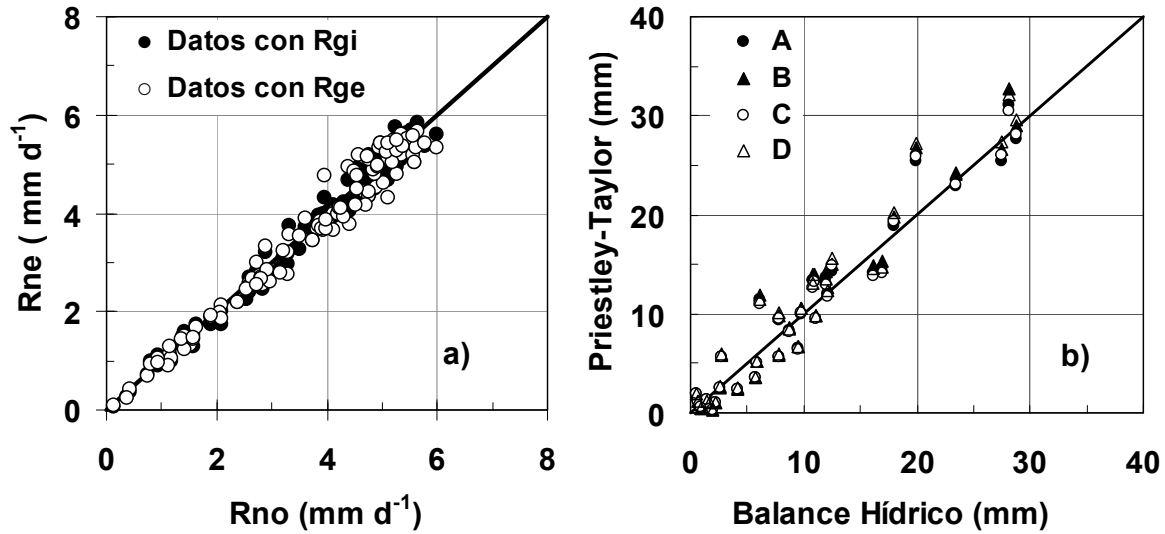


Figura 4. a) Comparación entre las estimaciones (Rne) y las observaciones (Rno) de radiación neta cuando se utiliza la radiación solar medida al interior (Rgi) o al exterior (Rge) del invernadero; b) comparación entre la evapotranspiración real estimada por los métodos del balance hídrico y Priestley-Taylor (PT). Valores de la ETreal con el modelo PT fueron calculados para los siguientes casos: (A) Rgi y $G \neq 0$; (B) Rgi y $G = 0$; (C) Rge y $G \neq 0$; (D) Rge y $G = 0$.

Figure 4. a) Comparison between estimated (Rne) and measured (Rno) values of net radiation when solar radiation was measured inside (Rgi) or outside (Rge) the greenhouse; b) comparison between real evapotranspiration estimated by the water balance and Priestley-Taylor (PT) methods. Values of ETreal by PT model were calculated according to the following cases: (A) Rgi and $G \neq 0$; (B) Rgi and $G = 0$; (C) Rge and $G \neq 0$; (D) Rge and $G = 0$.

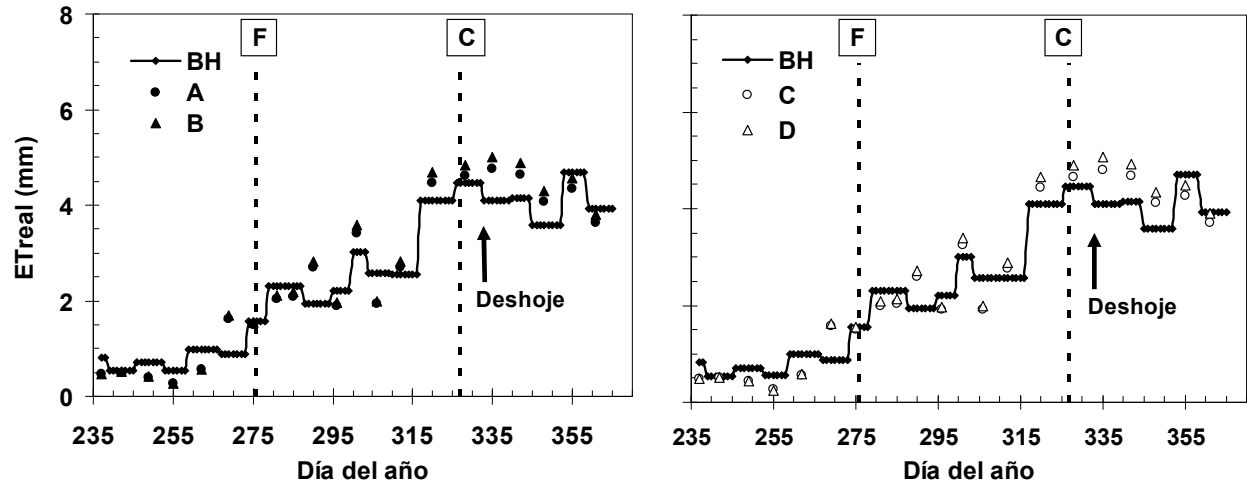


Figura 5. Evapotranspiración real media (ETreal) para un período de 5 a 8 días calculada por los métodos del balance hídrico (BH) y Priestley-Taylor (PT). Valores de la ETreal con el modelo PT fueron calculados para los siguientes casos: (A) R_{gi} y $G \neq 0$; (B) R_{gi} y $G = 0$; (C) R_{ge} y $G \neq 0$; (D) R_{ge} y $G = 0$. F: inicio de la floración; C: inicio de la cosecha.

Figure 5. Evolution of average real evapotranspiration (ETreal) for periods between 5 and 8 days obtained by the water balance (BH) and Priestley-Taylor (PT) methods. Values of ETreal by PT model were calculated according to the following cases: (A) R_{gi} and $G \neq 0$; (B) R_{gi} and $G = 0$; (C) R_{ge} and $G \neq 0$; (D) R_{ge} and $G = 0$. F: start of flowering; C: start of harvest.

Cuadro 1. Coeficientes de cultivo (Kc) para el cultivo de tomate bajo invernadero.

Table 1. Crop coefficients (Kc) of tomato crop cultivated under greenhouse.

Período fenológico	Fecha	Día del año	Kc¹
Trasplante-inicio floración	07 agosto-02 octubre	220-276	0,4-0,75
Inicio floración-inicio cuaja 3 ^{er} racimo	03 octubre-28 octubre	277-302	0,75-1,06
Inicio cuaja 3 ^{er} racimo-inicio cosecha	29 octubre-22 noviembre	303-327	1,06-1,25
Inicio cosecha-50% cosecha	23 noviembre-31 diciembre	328-366	1,25-1,0
50% cosecha-100% cosecha	01 enero-31 enero	1-31	1,0

¹ Valores propuestos por Castilla y Fereres (1990).

Cuadro 2. Comparación estadística entre los valores diarios observados y estimados de radiación neta (Rn) utilizando radiación solar medida al interior (Rgi) o al exterior (Rge) del invernadero. Un análisis de sensibilidad es incluido variando el gradiente de temperaturas entre el aire (T_a) y el cultivo (T_{cv}).

Table 2. Statistical comparison between observed and simulated daily values of net radiation (Rn) using solar radiation measured inside (Rgi) or outside (Rge) tomato greenhouse. A sensitivity analysis was included by varying the temperature gradient between the air (T_a) and canopy (T_{cv}) temperatures.

Rn estimada	DM (mm d ⁻¹)	RCME	EAR (%)	Regresión lineal			Test Z para	
				R ²	β (Rne/Rno)	a (intercepto)	β	a
Rgi	0,06	0,22	6	0,98	1,01	-0,08	V	V
Rge	0,07	0,27	6	0,97	0,99	-0,02	V	V
Rgi, T _{cv} - T _a = 1	0,24	0,32	11	0,98	1,00	-0,26	V	F
Rgi, T _{cv} - T _a = 2	0,43	0,48	18	0,98	1,00	-0,43	V	F
Rgi, T _{cv} - T _a = 3	0,61	0,65	26	0,98	1,00	-0,61	V	F

DM: desviación media; RCME: raíz del error cuadrático medio; EAR: error absoluto relativo; R², β y a son el coeficiente de determinación, la pendiente y el intercepto de la regresión lineal, respectivamente.

V: hipótesis verdadera (β = 1, a = 0); F: hipótesis falsa (β ≠ 1, a ≠ 0).

Cuadro 3. Evapotranspiración real acumulada (mm) para diferentes etapas fenológicas del cultivo de tomate, calculadas con los métodos del balance hídrico (BH) y de Priestley-Taylor (PT).

Table 3. Cumulative evapotranspiration (mm) for different phenological stages of a tomato crop calculated with water balance (BH) and estimated by Priestley-Taylor (PT) method.

Método	Estado fenológico				Total del período
	Trasplante a floración 1 ^{er} racimo	Floración 1 ^{er} racimo a inicio cuajado 3 ^{er} racimo	Inicio cuajado 3 ^{er} racimo a inicio cosecha	Inicio a 50% de cosecha	
BH	27,7	65,2	70,3	165,1	328,3
A ¹	26,8 (-3,3) ²	68,1 (4,3)	70,6 (0,4)	168,0 (1,7)	333,5 (1,6)
B	27,3 (-1,3)	71,0 (8,8)	73,8 (5,0)	176,6 (6,9)	348,7 (6,2)
C	26,6 (-3,7)	66,4 (1,7)	70,8 (0,8)	169,2 (2,5)	333,0 (1,4)
D	27,2 (-1,7)	69,2 (6,1)	74,1 (5,4)	177,9 (7,8)	348,4 (6,1)

¹ Valores de la ET_{real} calculados por PT para los siguientes casos (A) R_{gi} y G ≠ 0; (B) R_{gi} y G = 0; (C) R_{ge} y G ≠ 0; (D) R_{ge} y G = 0.

² Valores entre paréntesis corresponden al porcentaje de déficit (negativo) o exceso (positivo) de la ET_{real} en relación al (BH).