

MÉTODOS DE ESTIMACION DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UN CULTIVO DE LECHUGA EN CONDICIONES DE INVERNADERO, ZONA CENTRAL DE CHILE

Methods for estimating lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions, central zone of Chile

Manuel Casanova P.^{1*}, Ingmar Messing², Abraham Joel² y Alberto Cañete M.¹

ABSTRACT

This study evaluates five methods to estimate crop evapotranspiration in greenhouse conditions. It compares their performance in relation to the evapotranspiration directly determined from water balance measurements (ET_{lys}) in an irrigated lettuce (*Lactuca sativa* L.) crop during 9 weeks. Daily values of the reference evapotranspiration (ETo) from Class A pan (CAP), Piche atmometers (ATM), Andersson evaporimeters (ANE), FAO-Radiation (FRE) and FAO-Penman-Monteith (PME) equations were compared. The methods showed similar temporal variations but at different ranges as follows: $ANE < CAP < FRE < PME < ATM$. Furthermore, ETo had a clear correlation with solar radiation. Crop coefficients ($Kc = ET_{lys}/ETo$) varied somewhat amongst the methods, but trends were identified for two periods: in the first week, the overall mean Kc was $0.3 (\pm 0.1)$ and in weeks 2 to 9 on average $0.6 (\pm 0.3)$. The greenhouse values of Kc were lower than those generally adopted for lettuce in field conditions. In terms of irrigation design, crop evapotranspiration can be estimated by the methods in this study, on the condition that the appropriate crop coefficients are applied. The fact that ANE showed values closest to those of ET_{lys} , along with cost and management convenience, makes it an advantageous alternative as compared to the other methods.

Key words: evapotranspiration, greenhouse, lettuce, lysimeter, *Lactuca sativa*.

RESUMEN

Este estudio evalúa cinco métodos de estimación de la evapotranspiración de cultivos en condiciones de invernadero. Sus desempeños se evalúan en base a la evapotranspiración determinada directamente a partir de mediciones de balance hídrico (ET_{lys}), para un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo riego y un período de 9 semanas. Se compararon los valores diarios de evapotranspiración de referencia (ETo) provenientes de una bandeja clase A (CAP), atmómetros de Piche (ATM), evaporímetros Andersson (ANE), la ecuación FAO-Radiación (FRE) y la ecuación FAO-Penman-Monteith (PME). Los métodos

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Casilla 1004, Santiago, Chile. E-mail: mcasanov@uchile.cl *Autor para correspondencia

² Swedish University of Agricultural Sciences, Box 7014, SE-750 07 Uppsala, Sweden.

Recibido: 29 de noviembre de 2007

Aceptado: 29 de enero de 2008

muestran similares variaciones en el tiempo, pero en los diferentes rangos siguientes: ANE < CAP < FRE < PME < ATM. Además, ETo muestra una clara correlación con la radiación solar. Los coeficientes de cultivo ($K_c = ET_{lys}/ETo$) variaron entre métodos pero se identificaron tendencias para dos períodos: en la primera semana el K_c promedio fue de 0,3 ($\pm 0,1$) y dentro de las semanas 2 a 9 estos valores fueron del orden de 0,6 ($\pm 0,3$). Los valores de K_c encontrados en invernadero fueron inferiores a los adoptados para lechuga en condiciones de campo. En términos de diseño de riego, la evapotranspiración del cultivo puede ser estimada si se emplean los métodos de este estudio, con la salvedad que se apliquen los coeficientes de cultivo apropiados. El hecho que ANE muestre los valores más cercanos a los de ET_{lys} , combinado con su conveniencia en cuanto a costo y manejo, lo convierte en una alternativa ventajosa respecto a los otros métodos.

Palabras clave: evapotranspiración, invernadero, lechuga, lisímetro, *Lactuca sativa*.

INTRODUCCIÓN

La producción de cultivos bajo plástico constituye un sistema de producción importante en Chile. Cifras preliminares de INE (2007) señalan que se cultivaron en el país 1578 ha en invernadero. La necesidad de proporcionar a los mercados productos frescos de calidad durante períodos prolongados del año, conjuntamente con hacer un uso óptimo del agua en condiciones climáticas secas y calurosas, llevan a la adopción de esta tecnología. En estas condiciones, la cubierta plástica de los invernaderos cambia significativamente el balance de radiación interno con respecto a las condiciones ambientales externas, especialmente en lo que se refiere a la absorción y reflexión de la radiación solar incidente. Como consecuencia, se observan efectos importantes en la evapotranspiración (ET) de los cultivos. Incluso en los invernaderos de vidrio más modernos la entrada de luz se ve reducida al menos en un 30%, causando una disminución considerable de la ET (El Moujabber y Abi Zeid Daou, 1999; Radin *et al.*, 2004). La humedad relativa interna mayor a la del exterior tiene un impacto similar, pero es balanceado por las altas temperaturas que se registran normalmente al interior de un invernadero. Así también, la baja velocidad del viento tiende a reducir el intercambio de vapor de agua entre el dosel y la atmósfera. Las estrategias de control del clima de invernaderos y los modelos asociados a éstas, asumen que el crecimiento de las plantas en estas condiciones no se ve limitado por la disponibilidad de nutrientes y de agua (Kläring, 2001), por cuanto el riego y la fertilización deben ser manejados adecuadamente.

Los dispositivos más frecuentemente usados en Chile para la estimación de la demanda evaporativa en condiciones de campo son la bandeja clase A (CAP) y los atmómetros de Piche (ATM). Los

evaporímetros Andersson (ANE), en cambio, se han usado con éxito en estudios de variabilidad espacial de evaporación en zonas áridas de África (Messing *et al.*, 1998; Messing y Akrimi, 1998). Las lecturas que se registran en todos estos dispositivos son convertidas, con factores adecuados, a valores de evapotranspiración de referencia (ET_o). Paralelamente a estos dispositivos, se han desarrollado ecuaciones empíricas que emplean parámetros climáticos para estimar ET_o. La ecuación Penman-Monteith (PME) ha llegado a ser recomendada recientemente por Allen *et al.* (2006) y Lopez-Urrea *et al.* (2006), como el único método para determinar la ET_o, aunque la fórmula FAO-Radiación (FRE) ha sido una alternativa de amplia aceptación (Nandagiri y Kovoov, 2006).

A nivel de campo estos métodos otorgan estimaciones razonables de los requerimientos hídricos de los cultivos, aunque en circunstancias específicas poseen ventajas y desventajas (Kassam y Smith, 2001; Turco *et al.*, 2008). Es complejo utilizar PME en invernaderos, pues utiliza numerosas variables climáticas. La CAP es un medio simple para obtener ET_o; sin embargo, las limitaciones de espacio dificultan su uso en condiciones de invernadero. Tanto por su tamaño y costo, como por la simpleza de operación, los ANE y los ATM presentan indudablemente ventajas comparativas, respecto a la bandeja y ecuaciones.

Numerosos autores han comparado muchos de estos métodos. Araujo *et al.* (2005), considerando lisímetros y CAP, informan coeficientes de determinación (R^2) del orden de 0,77 y 0,65. Lopez-Urrea *et al.* (2006), confrontando PME y FRE con lisímetros, observan un R^2 de 0,92 y 0,82, respectivamente; en tanto que Vaughan *et al.* (2007) entre PME y lisímetros, muestran un R^2 alrededor de 0,74 (día) y 0,23 (noche). Papaioannou *et al.* (1996; 1998) comparan los ATM con PME y obtienen coeficientes de correlación (R) de 0,29 a 0,65 (período anual) y 0,49 y 0,91 (varios años). En el caso de los ANE, Johansson (1969) informa un valor R de 0,93 con CAP; en tanto que Messing (1998) los compara con ATM y CAP, obteniendo valores (R^2) de 0,78 y 0,85, respectivamente.

El Moujabber y Abi Zeid Daou (1999) argumentan que el diseño del riego basado en datos climáticos es una práctica muy común, pero que la mayor parte de los coeficientes usados para estimar la evapotranspiración de cultivos (ET_c), ya sea lisímetros, dispositivos o ecuaciones, son válidos principalmente para condiciones externas, distintas a las de invernaderos. Por otra parte, se hace necesario un mayor entendimiento de factores y procesos que se verifican al interior de los invernaderos, dentro de los cuales la ET_c estimada desde superficies vegetativas es uno de los principales términos a considerar en el cálculo de los balances hídricos. De esta manera, se contará con una medida adecuada y oportuna de la demanda de agua para el diseño de sistemas de riego, integrada al manejo (fertilización del cultivo, control

de plagas y enfermedades, etc.) de estos ambientes controlados. Sarraf (2004) señala que en ausencia de mediciones locales suficientes de los requerimientos hídricos de cultivos en invernaderos, en comparación a condiciones abiertas de campo, no están claros los requerimientos de agua por unidad de producto. En este ámbito se observa un número limitado de publicaciones nacionales que comparen valores de ETc para cultivos regados en invernadero, obtenidos por estos métodos, con estudios de balance hídrico empleando lisímetros. En la investigación internacional, si bien no se ha informado el uso de ANE en invernaderos, el resto de los métodos ha sido evaluado en estas condiciones para varios cultivos (Fernandes *et al.*, 2003; Blanco y Folegatti, 2003; 2004; Orgaz *et al.*, 2005), pero escasamente para lechuga (Galvani *et al.*, 1998).

La lechuga, un cultivo sensible a las variaciones meteorológicas y al exceso de lluvia (Radin *et al.*, 2004), constituye un caso interesante para analizar los efectos de las condiciones controladas de invernadero en la calidad del producto, especialmente el tamaño uniforme de planta a la cosecha, destacado por Navarette *et al.* (1993) como un parámetro fundamental de calidad, muy vinculado a variables ambientales y de manejo. Dada la ausencia de información nacional al respecto en esta especie, el objetivo de esta investigación fue comparar los valores de ETc estimados por diversos métodos (CAP, ATM, ANE, FRE, PME) con la evapotranspiración medida con lisímetros (ET_{lys}), para un cultivo de lechuga en invernadero de la zona central de Chile.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la Estación Experimental Antumapu (33°40' S; 70°38' O), en Santiago de Chile, durante el período primavera-verano del año 2002. El clima de la zona es templado mesotermal estenotérmico mediterráneo semiárido (Santibañez y Uribe, 1992). El régimen térmico se caracteriza por veranos calurosos y secos, e inviernos fríos; las temperaturas varían entre una máxima media en enero de 28,2 °C y una mínima media en julio de 4,4 °C; el período libre de heladas es de 231 días, con un promedio de 11 heladas al año. Anualmente se registran en promedio 1621 días grados y 1147 horas frío. La precipitación media anual es 419 mm, un déficit hídrico de 997 mm y un período seco de 8 meses.

Se utilizó un invernadero tipo capilla con estructura metálica, orientación norte-sur, cuyas dimensiones fueron 4,0 m de altura, 18,0 m de longitud y 11,5 m de ancho, cubierto con polietileno transparente de 0,15 mm y tratado contra radiación ultravioleta. Considerando la radiación solar (R_s) medida en la estación meteorológica del Centro Regional de Investigación La Platina (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA) para el mismo período, se obtuvo una transmisividad media de la cubierta de 85%.

Las paredes laterales poseían cortinas de polietileno de 0,20 mm, que se subían o bajaban acorde a las fluctuaciones climáticas.

Se sembró (20 de agosto 2002) un híbrido de lechuga de período corto, var. *capitata*, cv. XP 6256 (Seminis Sudamerica S.A., Santiago, Chile), fue trasplantado (30 de septiembre 2002) al estado de 3 hojas verdaderas. El cultivo se desarrolló durante 9 semanas en un sustrato artificial compuesto de un suelo Entic Haploxeroll franco arenoso (arena: 53,5%, limo: 32,4%, arcilla: 14,1%), residuos orgánicos y arena fina, en proporción volumétrica 2:1:1, respectivamente. La extracción de cinco muestras de este sustrato permitió caracterizar las propiedades físicas: densidad aparente con cilindro, densidad de partículas con picnómetro y retención de agua con equipos de presión (Dane y Topp, 2002).

El sustrato de 0,15 m de espesor se depositó en ocho mesas metálicas, de 16 x 0,80 m, con altura de 0,70 m sobre el piso. Las seis mesas centrales se cubrieron con polietileno (0,20 mm), antes de depositar el sustrato, disponiendo bajo ellas 10 cilindros de salida de agua conectados a recipientes a fin de cuantificar en probetas (precisión 1 mL) el volumen de percolación de agua (D). Las plantas transplantadas se dispusieron en dos hileras con un espaciamiento de 0,25 x 0,27 m. La fertilización, previa al trasplante, comprendió 80 kg N ha⁻¹ (urea), 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ (superfosfato triple) y 120 kg K₂O ha⁻¹ (salitre potásico). Se utilizó un sistema de dos cintas de riego por mesa sobre cada línea de planta, con salidas cada 0,20 m y un gasto de 2,20 L h⁻¹ m⁻¹. La frecuencia de riego fue diaria y el volumen de agua aplicado se determinó en un estanque externo de almacenamiento (graduado cada 1 cm), correspondiente a la evaporación en las 24 h del día precedente de una bandeja clase A dispuesta al interior del invernadero. Los contenidos de agua (W) del sustrato se registraron diariamente utilizando un sensor FDR (Frequency Domain Reflectometry, repetibilidad de ± 2% y rango de operación entre 0 y 100%) calibrado para el sustrato, con 15 mediciones por mesa antes del riego y a tres profundidades.

La ET_c se estimó diariamente ($\Delta t = 1$ día) por balance hídrico del sistema, empleando las mesas como lisímetros (ET_{lys}). La elevada porosidad del sustrato y el gradiente generado por un ligero declive del fondo de las mesas, descrito por Ben-Gal y Shani (2002), hicieron de las mesas lisímetros de drenaje libre. De esta forma, se determinó diariamente el agua suministrada por riego (I), el agua almacenada por el sustrato (ΔW) y aquella de drenaje (D). En el caso de la ET de referencia (ET_o), que normalmente se determina en condiciones estándar (Allen *et al.*, 2006), se estimó en base a la demanda atmosférica medida con los dispositivos y ecuaciones empíricas empleados. En total, se dispuso de dicha bandeja estándar clase A, 10 atmómetros de Piche y dos evaporímetros Andersson. El **Cuadro 1** incluye las fórmulas usadas en este estudio para definir ET_{lys} y ET_o con cada método.

La ubicación de la bandeja clase A (CAP) al interior del invernadero sin considerar las condiciones estándar de referencia, sólo constituye una vía de estimación aproximada de los requerimientos de agua, cuando no hay otros métodos disponibles o falta de datos climáticos (Baille, 1996). No obstante el uso de CAP en estas condiciones es objeto de controversia y las investigaciones acerca del K_p que debería ser utilizado no son concluyentes (Fernández *et al.*, 2003). En esta investigación se ubicó una CAP al centro del invernadero, sobre una estructura de madera y a la altura de las mesas, y se usó un coeficiente de bandeja (K_p) de 0,65 ó 0,75, dependiendo de la humedad relativa interior (40-70% ó > 70%, respectivamente); asumiendo el caso A, bandeja rodeada de cultivo verde bajo, distancia a barlovento igual a cero y velocidad del viento débil ($< 2 \text{ m s}^{-1}$), acorde a Doorenbos y Pruitt (1976).

Los atmómetros de Piche fueron semi-protegidos de la radiación solar; seis de ellos se colocaron a una altura fija de 1,50 m sobre el piso (ATM_p), los cuatro restantes se ajustaron semanalmente de acuerdo al crecimiento de la planta de lechuga y se mantuvieron a 0,15 m sobre las plantas (ATM_m). Para estos dispositivos, la ET_o (mm día^{-1}) se determinó utilizando las lecturas de evaporación registradas (E_p , mm día^{-1}), multiplicadas por dos coeficientes: α con un valor de 0,27 que contempla su semi-protección y $\rho(\sigma)$, un factor dependiente de la temperatura, ambos definidos por Bouchet (1963).

Los evaporímetros Andersson (ANE) (**Figura 1**), fabricados en acrílico transparente, consisten en un depósito cilíndrico cerrado pero ventilado, de 0,15 L de capacidad y una altura de agua en su interior entre 25 y 40 mm; el agua evaporada sale a través de orificios circulares situados en la parte superior del depósito. Su diseño se orientó a aumentar la resistencia de flujo para simular las condiciones aerodinámicas en la interfase hoja-aire (Andersson, 1969). Además, reaccionan rápidamente a cambios en la demanda evaporativa ambiental ya que operan con un volumen pequeño de agua. En el invernadero se ubicaron sobre pedestales de 1,5 m de altura y la ET_o (mm día^{-1}) se obtuvo del producto entre las lecturas (determinadas con un micrómetro y exactitud de 0,01 mm) de evaporación registradas (E_a) y un coeficiente E_a igual a 0,7 recomendado por Johansson (1969). La ET_o diaria (mm día^{-1}) de cada método correspondió a la diferencia de lecturas de evaporación, registradas a las 08:30 h, entre dos mediciones sucesivas.

En la ET_o (mm día^{-1}) estimada vía ecuaciones empíricas (**Cuadro 1**), se empleó aquella de Penman-Monteith (PME) (Allen *et al.*, 1998) derivada para 24 h. Ella predice la ET_o para una superficie hipotética de pasto como referencia, con 0,12 m de altura, una resistencia de 70 s m^{-1} y un albedo de 23%. Ha sido utilizada por Pollet y Bleyaert (2000) para lechuga en invernadero con subestimaciones del 6%. Su

estructura incluye la densidad de flujo del calor del suelo (G , $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) de valor cero a escala diaria; tanto la temperatura media del aire (T , $^{\circ}\text{C}$) como la velocidad del viento (u_2 , m s^{-1}) medidas a 2 m de altura, la presión de vapor a saturación y actual (respectivamente e_s y e_a , kPa), el déficit de presión de vapor a saturación ($e_s - e_a$), la pendiente de la curva de presión de vapor (Δ , $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) y la constante psicrométrica (γ , $0,063 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). La radiación neta en la superficie del cultivo (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) se calculó de la diferencia entre radiación neta de onda corta (R_{ns} , $[1-\text{albedo}]R_s$) y de onda larga (R_{nl}), acorde al procedimiento detallado en Doorenbos y Pruitt (1976).

También se utilizó la ecuación FAO-Radiación (FRE) (**Cuadro 1**), que vincula la ETo con la radiación solar en equivalente de evaporación (R_s , mm día^{-1}), considerando las correcciones de Frevert *et al.* (1983), que reemplazan los nomogramas originales (Nandagiri y Kovoov, 2006). Al respecto, Smith *et al.* (1998) informan que esta ecuación proporciona resultados adecuados de ETo en condiciones de alta humedad, donde el término aerodinámico es relativamente pequeño; en cambio, en condiciones secas resulta errática.

Para contar con todas las variables requeridas para los métodos indicados, se instaló al centro del invernadero tanto un anemómetro mecánico como una estación meteorológica con sensores de radiación solar (piranómetro) y de temperaturas, a 1,6 y 2,0 m de altura respectivamente. Así también, se usaron dos higrotermógrafos (calibrados con un psicrómetro de aspiración). La ubicación de los dispositivos e instrumentos indicados se observa en la **Figura 2** y mayores detalles de éstos se incluyen en el **Cuadro 2**.

Los efectos combinados de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se pueden integrar en un coeficiente del cultivo (K_c) único promedio del cultivo (Allen *et al.*, 1998), cuando se trata de la planificación normal del riego, del manejo y de estudios de balance hídrico. Por consiguiente, en este estudio, se estimó dicho coeficiente para lechuga en condiciones de invernadero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La densidad aparente y densidad de partículas del sustrato fueron $0,94$ y $2,89 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente, con porosidad total $67,5\%$. Durante el período de tiempo de 1 a 9 semanas postrasplante, los contenidos de agua (W) del sustrato a tres profundidades, se mantuvieron cercanos a una tensión de 33 kPa con valores en promedio de $19,2\%$ ($\pm 1,4$) las primeras tres semanas (**Figura 3**) y $21,3\%$ ($\pm 0,8$) en el período restante. Se observaron fluctuaciones importantes de las variables climáticas dentro del invernadero, con la excepción de la velocidad del viento (**Cuadro 3**).

Los valores de ETo (mm día^{-1}) determinados con los diferentes métodos empleados y los obtenidos con lisímetro (ET_{lys}) se observó alta variabilidad diaria para el período de evaluación. Este grado de oscilación obedece a las fluctuaciones naturales de las variables meteorológicas, con efectos directos sobre los dispositivos de medición (Blanco y Folegatti, 2003). Sin embargo, al analizar los promedios semanales, la tendencia es más obvia (**Cuadro 4**) y estrechamente correlacionada con las variaciones de la radiación solar, medida en equivalentes de evapotranspiración (**Figura 4**). Los valores de ET_{lys} y ETo estimados con los distintos métodos muestra el siguiente orden: $ANE < CAP \approx FRE \approx FPM < ATM_f \approx ATM_m$.

El coeficiente de bandeja (K_p), empleado por los autores del presente trabajo (Doorenbos y Pruitt, 1976), difiere del planteado por Galvani *et al.* (1998) que utilizan en condiciones de invernadero la fórmula empírica definida por Snyder (1992). No obstante, aplicando las variables medidas a dicha fórmula, los resultados obtenidos no difieren significativamente de los informados. Más aún, recientemente Gundekar *et al.* (2008) informaron que los K_p obtenidos por fórmulas empíricas, no son tan diferentes de los obtenidos por Doorenbos y Pruitt (1976), concluyendo que la fórmula de Snyder (1992) tiene la ventaja de simplificar el cálculo.

Un análisis de correlación simple de ETo diarios determinados entre los distintos dispositivos y ecuaciones, reveló coeficientes de correlación (R) altos (**Cuadro 5**). No obstante que el coeficiente de correlación (R) entre ET_{lys} y ETo, a partir de valores diarios no supera 0,35, este coeficiente aumentó a valores entre 0,72 y 0,86 al analizarlos a una escala semanal.

Los resultados de ET_{lys}/ETo , como una aproximación al coeficiente de cultivo (K_c) para lechuga, muestran los valores más bajos en la primera semana (postrasplante), con un promedio de 0,3 ($\pm 0,1$) para todos los métodos (**Cuadro 6**); luego, entre las semanas 2 a 9 muestran un promedio de 0,6 ($\pm 0,3$). En este contexto, Allen *et al.* (1998) recomiendan para lechuga en invernadero un valor único de K_c , mientras que Katerji y Rana (2006) informan que es posible encontrar diferencias de $\pm 40\%$ entre los K_c informados por Allen *et al.* (1998) y aquellos obtenidos experimentalmente, especialmente a mediados del ciclo de crecimiento. Estas diferencias se deben a la complejidad del coeficiente, al integrar varias funciones (Katerji *et al.*, 1991; Testi *et al.*, 2004) tales como: factores aerodinámicos vinculados a la altura del cultivo, factores biológicos relacionados al crecimiento y senescencia de hojas, factores físicos ligados a la evaporación desde el suelo, factores fisiológicos de respuesta estomática al déficit de presión de vapor del aire y factores agronómicos de manejo del cultivo como distancia entre hileras y sistema de riego. En

condiciones de invernadero, las diferencias en K_c se pueden atribuir además al tamaño del invernadero y al sustrato utilizado.

Al multiplicar los valores de E_{To} diarios informados en el **Cuadro 4** por los valores promedio de K_c , indicados para cada método en el **Cuadro 6**, es posible tener una estimación de la E_{Tc} para lechuga en invernadero. Así, un análisis de regresión lineal de los valores diarios pareados E_{Tc} - $E_{T_{lys}}$ muestra un grado de explicación (R^2) entre los métodos bastante adecuado, destacándose una estrecha relación 1:1 entre ellos. En la **Figura 5** se muestra gráficamente la E_{Tc} estimada para lechuga, comparada con la medida del lisímetro ($E_{T_{lys}}$), destacándose que este procedimiento no se ve influenciado por la variable radiación solar, con valores que siguen la tendencia tanto de las ecuaciones empíricas como de los evaporímetros al interior del invernadero. Por consiguiente, los valores de K_c estimados podrían resultar apropiados para determinar los requerimientos de agua del cultivo de lechuga en ambientes controlados, diseñar apropiadamente el riego y satisfacer la demanda hídrica de este cultivo. Los atmómetros móviles (ATM_m) se excluyen del análisis considerando su casi idéntico comportamiento con los atmómetros fijos (ATM_f).

En ambientes confinados como los invernaderos, son pocas las investigaciones (Fernandes *et al.*, 2003; Blanco y Folegatti, 2003; 2004; Orgaz *et al.*, 2005) y muy escasas para lechuga (Galvani *et al.*, 1998; Radin *et al.*, 2004). Algunas corroboran estos resultados, pero otras no los comparten. Arruda *et al.* (2006) sugieren por ejemplo estimar E_{To} dentro de invernaderos con métodos en el siguiente orden decreciente de importancia: a partir de la ecuación de Penman-Monteith (mediciones horarias o diarias) en el invernadero, de radiación solar medida al interior de éste, de radiación solar fuera de éste y de E_{To} fuera del invernadero.

CONCLUSIONES

Para las condiciones de este experimento en invernadero en la zona central de Chile, la determinación de evapotranspiración de referencia (E_{To}) con dispositivos y ecuaciones al interior de invernaderos, sin considerar las condiciones estándar de referencia, puede constituir una forma de estimación aproximada de los requerimientos de agua de cultivos.

Las variaciones de $E_{T_{lys}}$ y E_{To} observadas en el tiempo son grandes cuando se hace un análisis a escala diaria, pero en una escala semanal reveló una mayor tendencia y la variabilidad reducida. Es así que la correlaciones entre los valores obtenidos con dispositivos y ecuaciones fue elevada, con un coeficiente R

que fluctuó entre 0,83 y 0,99 a escala diaria, y desde 0,95 a 0,99 en una escala semanal. Por otra parte, entre ET_{lys} y ETo el R fluctuó entre 0,25 y 0,35 a escala diaria, alcanzando valores entre 0,72 y 0,86 para los promedios semanales.

La evolución de ET_{lys} y de la ETo en invernaderos muestra el siguiente orden: $ET_{lys} \approx ANE < CAP \approx FRE \approx FPM < ATM_f \approx ATM_m$, con una clara correlación con la radiación solar.

El uso del evaporímetro Andersson resulta recomendable en invernadero de acuerdo a estos resultados, con la adopción de un factor 0,7 generó una ETo casi igual a la evapotranspiración del cultivo medida vía lisímetros.

Para las condiciones de invernadero del presente ensayo el coeficiente del cultivo (Kc), basado en el cociente ET_{lys}/ETo , varió entre los métodos pero identifican valores promedio para dos estados de crecimiento del cultivo: en la primera semana postrasplante ($0,3 \pm 0,1$) y desde la semana 2 en adelante ($0,6 \pm 0,3$).

Los valores de evapotranspiración (ETc), obtenidos por dispositivos y ecuaciones ($ETo \cdot Kc$), fueron similares a los valores medidos directamente para lechuga vía balance hídrico en lisímetro (ET_{lys}), mostrando coeficientes de determinación (R^2) entre 0,72 y 0,80.

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 N° 56. 300 p. FAO, Rome, Italy.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Cuadernos de Riego y Drenaje N° 56. 322 p. FAO, Roma, Italia.

Andersson, S. 1969. A new evaporimeter. Grundförbättring (Journal of Agricultural Land Improvement) 22:59-66.

Araujo, G., F. Bussmeyer, and E. Sakai. 2005. Crop coefficient for irrigated beans derived using three reference evaporation methods. *Agric. For. Meteorol.* 135:135-143.

Arruda, F.B., R. Pires, E. Sakai, P. Furlani, A. Torre Neto, E. Silva, and R. Calheiros. 2006. Evapotranspiração de referência estimada em estufa com cobertura em polietileno em Campinas. *In* Proceeding VII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, V Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile. 10-12 de mayo (CD-Rom). Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola e Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.

Baille, A. 1996. Principle and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments. *Cahier Options Méditerranéennes* 31:177-187.

Ben-Gal, A., and U. Shani. 2002. A highly conductive drainage extension to control the lower boundary condition of lysimeters. *Plant Soil* 239:9-17.

Blanco, F., and M. Folegatti. 2003. Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 7:285-291.

Blanco, F., and M. Folegatti. 2004. Evaluation of evaporation-measuring equipment for estimating evapotranspiration within a greenhouse. *Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle, et production agricole. Ann. Agron.* 14:743-824.

Dane, J.H., and G.C. Topp (eds.) 2002. *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods (V1)*. 1.692 p. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

De Tourdonnet, S., J. Meynard, F. Lafolie, J. Roger-Estrade, J. Lagier, and M. Sebillotte. 2001. Non-uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increases the risk of N pollution and lower product quality. *Agronomie* 21:297-309.

Doorenbos, J., y W. Pruitt. 1976. *Las necesidades de agua de los cultivos*. 194 p. Estudio Riego y Drenaje N° 24. FAO, Roma, Italia.

El Moujabber, M., et R. Abi Zeid Daou. 1999. Gestion durable de l'eau pour les cultures protégées au Liban. *Cahiers Agricultures* 8:309-313.

Fernandes, C., J.E. Cora, and J.A.C. de Araujo. 2003. Reference evapotranspiration inside greenhouses. *Sci. Agríc. (Piracicaba, Braz.)* 60:591-594.

Frevert, D., R. Hill, and B. Braaten. 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *J. Irrig. Drain.* 109:265-270.

Galvani, E., R.T. Dantas, J.F. Escobedo, e E.S. Klosowski. 1998. Parâmetros meteorológicos em cultura de Alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em casas de vegetação com orientações leste-oeste, norte-sul e condições externas. *Rev. Brás. Agrometeorol.* 6:157-163.

Gundekar, H.G., U.M. Khodke, S. Sarkar, and R.K. Rai. 2008. Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. *Irrig. Sci.* 26:169-175.

INE. 2007. Resultados Preliminares de VII Censo Agropecuario y Forestal de Chile. Temporada 2006-2007. Cuadro 9. Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Santiago, Chile. Disponible en <http://www.censoagropecuario.cl/noticias/08/6/10062008.html> (Leído julio 2008).

Johansson, W. 1969. The influence of meteorological elements on the evaporation from the Andersson evaporimeter. *Grundförbättring (Journal of Agricultural Land Improvement)* 22:83-105.

Kassam, A., and M. Smith. 2001. FAO methodologies on crop water use and crop water productivity. Paper CWP-M07. 18 p. FAO, Rome, Italy.

Katerji, N., A. Hamdy, A. Raad, et M. Mastrorilli. 1991. Conséquence d'une contrainte hydrique appliquée à différents stades phénologiques sur le rendement des plantes de poivron. *Agronomie* 11:679-687.

Katerji, N., and G. Rana. 2006. Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions. *Agric. For. Meteorol.* 138:142-155.

Klärning, H.P. 2001. Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops. A review. *Agronomie* 21:311-321.

Lopez-Urrea, F., F. Martín de Santa, C. Fabeiro, and A. Moratalla. 2006. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agric. Water Manage.* 86:277-282.

Messing, I. 1998. A simple practical evaporimeter: comparison of Andersson evaporimeter with Class A pan, Piche atmometer, and Penman evaporation. *Arid Soil Res. Rehab.* 12:275-290.

Messing, I., M. Afors, K. Radkvist, and E. Lewan. 1998. Influence of shelterbelt type on potential evaporation in an arid environment. *Arid Soil Res. Rehab.* 12:123-138.

Messing, I., and K. Akrimi. 1998. Evaporative demand, water use, and crop yield at sheltered and unsheltered sites in an arid environment. *Arid Soil Res. Rehab.* 12:223-235.

Nandagiri, L., and G. Kovoov. 2006. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132:238-249.

Navarette, M., M. Sebillotte, B. Jeannequin, and J. Longuenesse. 1993. Inter-plant variability: a daily criterion for the grower, an open question for the modeler. *Acta Hort. (ISHS)* 328:211-218.

Orgaz, F., M.D. Fernández, S. Bonachela, M. Gallardo, and E. Federes. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agric. Water Manage.* 72:81-96.

Papaioannou, G., S. Kaloudis, and P. Kerkides. 1998. On the proper employment of Piche evaporimeters in estimating evapotranspiration. *Int. J. Climatol.* 18:1247-1260.

Papaioannou, G., K. Vouraki, and P. Kerkides. 1996. Piche evaporimeter data as a substitute for Penman equation's aerodynamic term. *Agric. For. Meteorol.* 82(1-4):83-92.

Pollet, S., and P. Bleyaert. 2000. Application of the Penman-Monteith model to calculate the evapotranspiration of head lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*) in glasshouse conditions. *Acta Hort. (ISHS)* 519:151-161.

Radin, B., C. Reisser Júnior, R. Matzenauer, e H. Bergamaschi. 2004. Crescimento de cultivares de alface conduzidas em estufa e a campo. *Hort. Bras.* 22(2):178-181.

Santibañez, F., y J.M. Uribe. 1992. Atlas agroclimático de Chile. 65 p. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.

Sarraf, S. 2004. Irrigation management and maintenance in greenhouse crops in Lebanon. p. 83-93. *In* Abdelhaq, H. (ed.) Integrated production and protection in greenhouse vegetable crops. Technical Booklet. FAO, Rome, Italy.

Smith, M., R. Allen, and L. Pereira. 1998. Revised FAO methodology for crop-water requirements. p. 51-58. *In* Proceedings of management of nutrients and water in rainfed arid and semi-arid areas, Vienna, Austria. 26-29 May 1997. A Consultants Meeting, FAO/IAEA (Food and Agriculture Organization of the United Nations/International Atomic Energy Agency), Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Vienna, Austria.

Snyder, R.L. 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 118:977-980.

Testi, L., F.J. Villalobos, and F. Orgaz. 2004. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agric. For. Meteorol.* 121:1-18.

Turco, J.E.P., D. Perecin, e D.L. Pinto Jr. 2008. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. *Irriga (Botucatu-Brasil)* 13(1):63-80.

Vaughan, P.J., T.J. Trout, and J.E. Ayars. 2007. A processing method for weighing lysimeter data and comparison to micrometeorological ETo predictions. *Agric. Water Manage.* 88:141-146.

Cuadro 1. Dispositivos y ecuaciones empleadas en la estimación de evapotranspiración.

Table 1. Devices and equations used in estimation of evapotranspiration.

Método	Fórmula/Ecuación	Referencia
Lisímetro	$ET_{lys} = \frac{I - (\Delta W + D)}{\Delta t}$	Ben-Gal y Shani (2002)
ATM	$ET_o = \alpha E_{pi} \rho(\sigma)$	Bouchet (1963)
CAP	$ET_o = E_{pan} K_p$	Doorenbos y Pruitt (1976)
ANE	$ET_o = E_a E_\alpha$	Johansson (1969)
PME	$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900u_2[e_s - e_a]}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$	Allen <i>et al.</i> (1994)
FRE	$ET_o = b_R \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right) - 0,3$	Doorenbos y Pruitt (1976) Frevert <i>et al.</i> (1983)

ET_{lys} : lisímetro; CAP: evaporímetro de bandeja clase A; ATM: atmómetro de Piche; ANE: evaporímetro Andersson; PME: ecuación Penman-Monteith; FRE: ecuación FAO-Radiación. Ver variables en texto.

Cuadro 2. Origen de los instrumentos y dispositivos empleados al interior del invernadero.**Table 2. Origin of instruments and devices used inside the greenhouse.**

Instrumento/dispositivo	Marca-Modelo	Localidad
FDR (Frequency domain reflectometry)	Aquaterr® (M-200).	Fremont, California, (EE.UU.)
Atmómetro de Piche	Casella (CEL)	Bedford, Inglaterra
Evaporímetro Andersson	Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Science, Hydrotechnics Division	Uppsala, Suecia
Estación meteorológica	LI-1200 (Li-Cor Inc.)	Lincoln, Nebraska, EE.UU.
Anemómetro mecánico	R-Fuess	Berlín-Steglitz, Alemania
Higrotermógrafo	Bendix Corporation, Friez Instruments Division (Modelo 594)	Baltimore, Maryland, EE.UU.
Psicrómetro de aspiración	Fisher® (Modelo Assmann)	Drebach, Alemania

Cuadro 3. Rango de variables climáticas en invernadero durante el período evaluado.**Table 3. Climatic variables range in the greenhouse during the whole measuring period.**

Variable	Valor		
	Mínimo	Máximo	Promedio ± DS
Temperatura, °C	4,0	36,8	20,0 ± 2,4
Radiación solar, MJ m ⁻² día ⁻¹	3,7	23,4	17,5 ± 5,5
Radiación neta, MJ m ⁻² día ⁻¹	4,1	15,1	11,3 ± 3,0
Humedad relativa, %	22,5	100,0	66,3 ± 8,6
Déficit de presión de vapor, kPa	0,2	2,4	1,3 ± 0,5
Velocidad del viento, m s ⁻¹	0,0	0,1	0,0 ± 0,0

DS: desviación estándar

Cuadro 4. Evapotranspiración diaria, promedios semanales, para los diferentes métodos.

Table 4. Daily evapotranspiration weekly averages, for the different methods.

Método	Evapotranspiración promedio									
	Tiempo postrasplante (semanas)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1-9
	mm día ⁻¹ ± SD									
ET _{lys}	0,6 ± 0,5	1,2 ± 0,7	1,0 ± 0,8	1,5 ± 0,6	1,5 ± 0,8	1,8 ± 0,7	1,7 ± 0,6	2,2 ± 1,1	2,1 ± 0,3	1,5 ± 0,9
ET _o										
CAP	1,6 ± 0,7	1,6 ± 0,7	1,9 ± 1,0	1,4 ± 0,8	2,4 ± 0,8	2,5 ± 0,7	2,9 ± 0,7	3,2 ± 0,6	2,8 ± 0,6	2,3 ± 1,0
ATM _f	3,0 ± 0,7	3,3 ± 1,5	3,5 ± 1,5	2,6 ± 1,2	4,1 ± 1,2	4,6 ± 1,5	5,1 ± 1,2	5,8 ± 1,5	4,3 ± 0,8	4,0 ± 1,6
ATM _m	3,2 ± 0,7	3,3 ± 1,5	3,5 ± 1,4	2,6 ± 1,2	4,0 ± 1,1	4,6 ± 1,5	5,1 ± 1,1	5,4 ± 1,4	4,1 ± 0,9	4,0 ± 1,5
ANE	1,0 ± 0,4	1,2 ± 0,5	1,3 ± 0,6	0,9 ± 0,6	1,6 ± 0,5	1,8 ± 0,5	2,0 ± 0,4	2,2 ± 0,4	1,8 ± 0,4	1,5 ± 0,7
PME	1,9 ± 0,6	2,2 ± 0,7	2,3 ± 0,5	2,0 ± 0,7	2,6 ± 0,6	2,8 ± 0,6	3,0 ± 0,4	3,2 ± 0,3	2,9 ± 0,4	2,5 ± 0,7
FRE	2,0 ± 1,0	2,3 ± 1,3	2,6 ± 1,1	1,8 ± 1,2	3,0 ± 1,1	3,1 ± 1,0	3,5 ± 0,7	3,9 ± 0,7	3,3 ± 0,7	2,8 ± 1,2

ET_{lys}: lisímetro; CAP: evaporímetro de bandeja clase A; ATM: atmómetro de Piche fijo (*f*) y móvil (*m*); ANE: evaporímetro Andersson; PME: ecuación Penman-Monteith; FRE: ecuación FAO-Radiación; SD: desviación estándar

Cuadro 5. Matriz de correlación para evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración por lisímetro (ET_{lys}) (mm día⁻¹), valores diarios y semanales (paréntesis).

Table 5. Correlation matrix for reference evapotranspiration (ET_o) and lysimeter evapotranspiration (ET_{lys}) (mm day⁻¹) daily and weekly (in brackets) values.

Método	ET _{lys}	CAP	ATM _f	ATM _m	ANE	PME	FRE
ET _{lys}	-						
CAP	0,34 (0,80)	-					
ATM _f	0,28 (0,78)	0,85 (0,97)	-				
ATM _m	0,25 (0,72)	0,83 (0,96)	0,99 (0,99)	-			
ET _o							
ANE	0,31 (0,80)	0,89 (0,99)	0,96 (0,99)	0,95 (0,98)	-		
PME	0,31 (0,79)	0,85 (0,99)	0,88 (0,98)	0,87 (0,97)	0,91 (0,99)	-	
FRE	0,35 (0,86)	0,84 (0,99)	0,89 (0,97)	0,87 (0,95)	0,90 (0,99)	0,97 (0,98)	-

ET_{lys}: lisímetro; CAP: evaporímetro de bandeja clase A; ATM: atmómetro de Piche fijo (*f*) y móvil (*m*); ANE: evaporímetro Andersson; PME: ecuación Penman-Monteith; FRE: ecuación FAO-Radiación.

Cuadro 6. Coeficientes del cultivo (Kc) de lechuga, promedios semanales, con distintos métodos en invernadero.

Table 6. Weekly average crop coefficients (Kc) for lettuce for the different methods on greenhouse.

Semana	Coeficiente del cultivo ^a						Promedio ± SD ^c
	CAP	ATM _f	ATM _m	ANE	PME	FRE	
1	0,4	0,2	0,2	0,6	0,3	0,3	0,3 ± 0,1
2	0,7	0,4	0,4	1,0	0,5	0,5	
3	0,5	0,3	0,3	0,8	0,5	0,4	
4	1,1	0,6	0,4	1,6	0,8	0,8	
5	0,6	0,4	0,3	0,9	0,6	0,5	0,6 ± 0,3
6	0,7	0,4	0,3	1,0	0,6	0,6	
7	0,6	0,3	0,2	0,9	0,6	0,5	
8	0,7	0,4	0,2	1,0	0,7	0,6	
9	0,7	0,5	0,3	1,2	0,7	0,6	
2 a 9, Promedio ± SD	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1	1,0 ± 0,2	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,1	

^aKc = ET_{lys}/ET_o; ET_{lys}: evapotranspiración por lisímetro; ET_o: evapotranspiración de referencia.

CAP: evaporímetro de bandeja clase A; ATM: atmómetro de Piche fijo (*f*) y móvil (*m*); ANE: evaporímetro Andersson; PME: ecuación Penman-Monteith; FRE: ecuación FAO-Radiación;

^c SD: desviación estándar.

Cuadro 7. Regresión lineal entre evapotranspiración diaria de lechuga con lisímetro (ET_{lys}) versus la estimada (ET_c) con cinco métodos (dispositivos y fórmulas) para el período estudiado.

Table 7. Linear regression of daily values of lysimeter evapotranspiration for lettuce (ET_{lys}) versus estimated values (ET_c) with five methods (devices and formulas) for the study period.

Método	Ecuación	Coefficiente de determinación (R^2)
CAP	$ET_{lys} = 0,98 \times ET_c$	0,76
ATM	$ET_{lys} = 0,97 \times ET_c$	0,72
ANE	$ET_{lys} = 1,00 \times ET_c$	0,72
FRE	$ET_{lys} = 0,92 \times ET_c$	0,73
PME	$ET_{lys} = 1,05 \times ET_c$	0,80

CAP: evaporímetro de bandeja clase A; ATM: atmómetro de Piche; ANE: evaporímetro Andersson; PME: ecuación Penman-Monteith; FRE: ecuación FAO-Radiación.



Figura 2. Distribución espacial de dispositivos e instrumentos al interior del invernadero. 1: Atmómetros; 2: Termohigrógrafo; 3: Bandeja clase A; 4: Evaporímetro Andersson; 5: Estación meteorológica; 6: Anemómetro.

Figure 2. Spatial distribution of devices and instruments inside the greenhouse. 1: Atmometer; 2: Thermohigrograph; 3: Class A pan; 4: Andersson evaporimeter; 5: Meteorological station; 6: Anemometer.

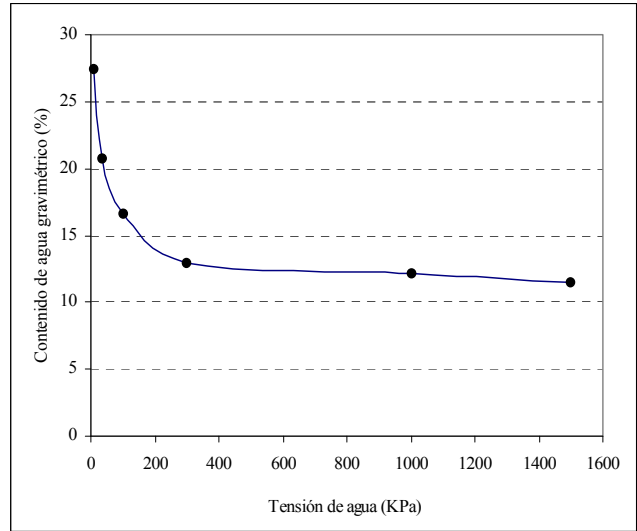
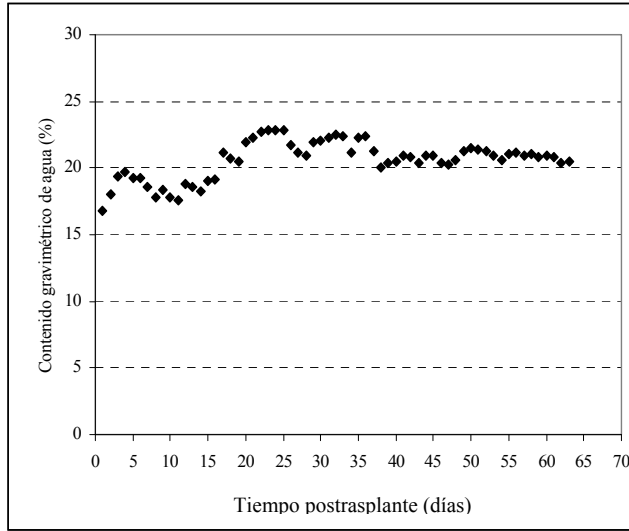
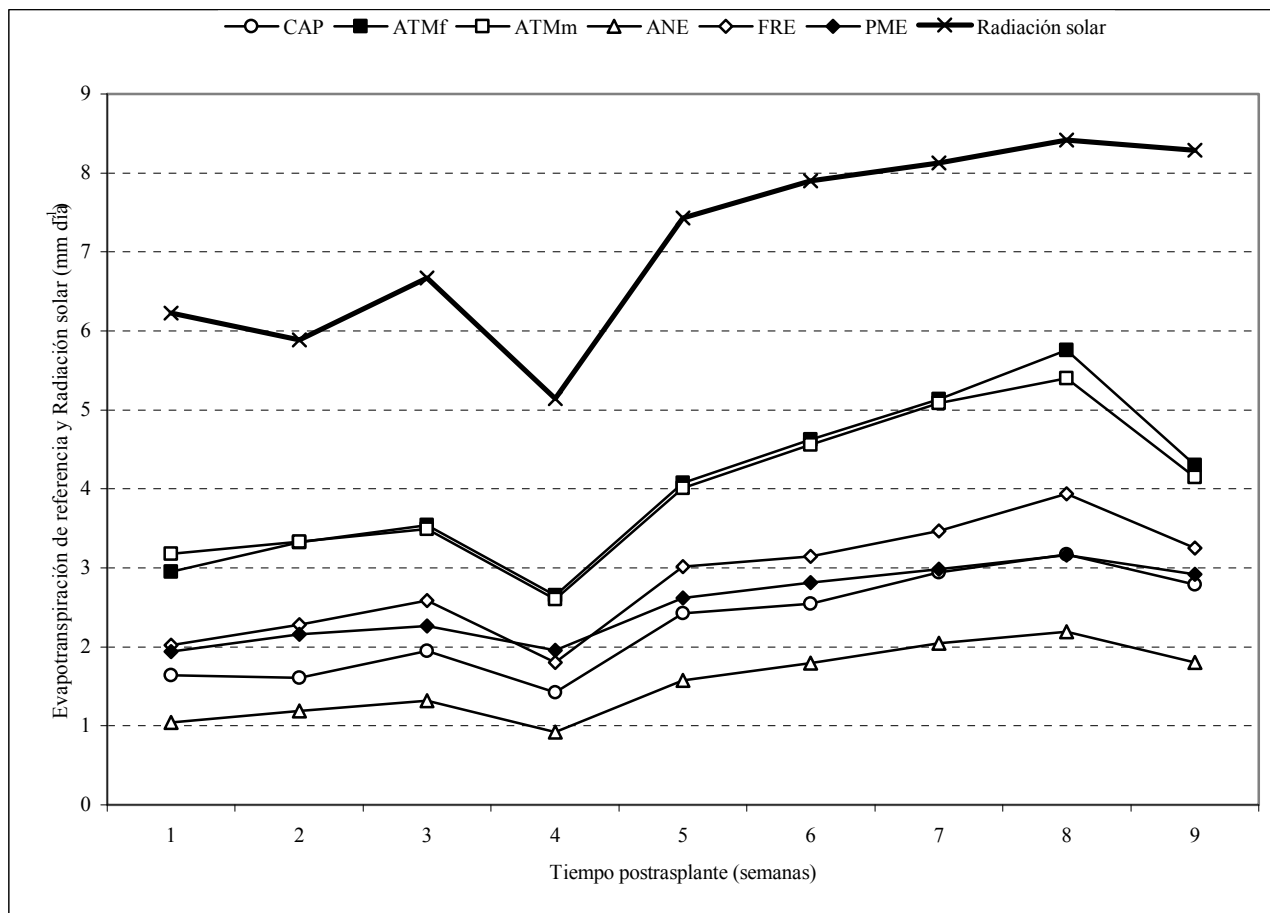


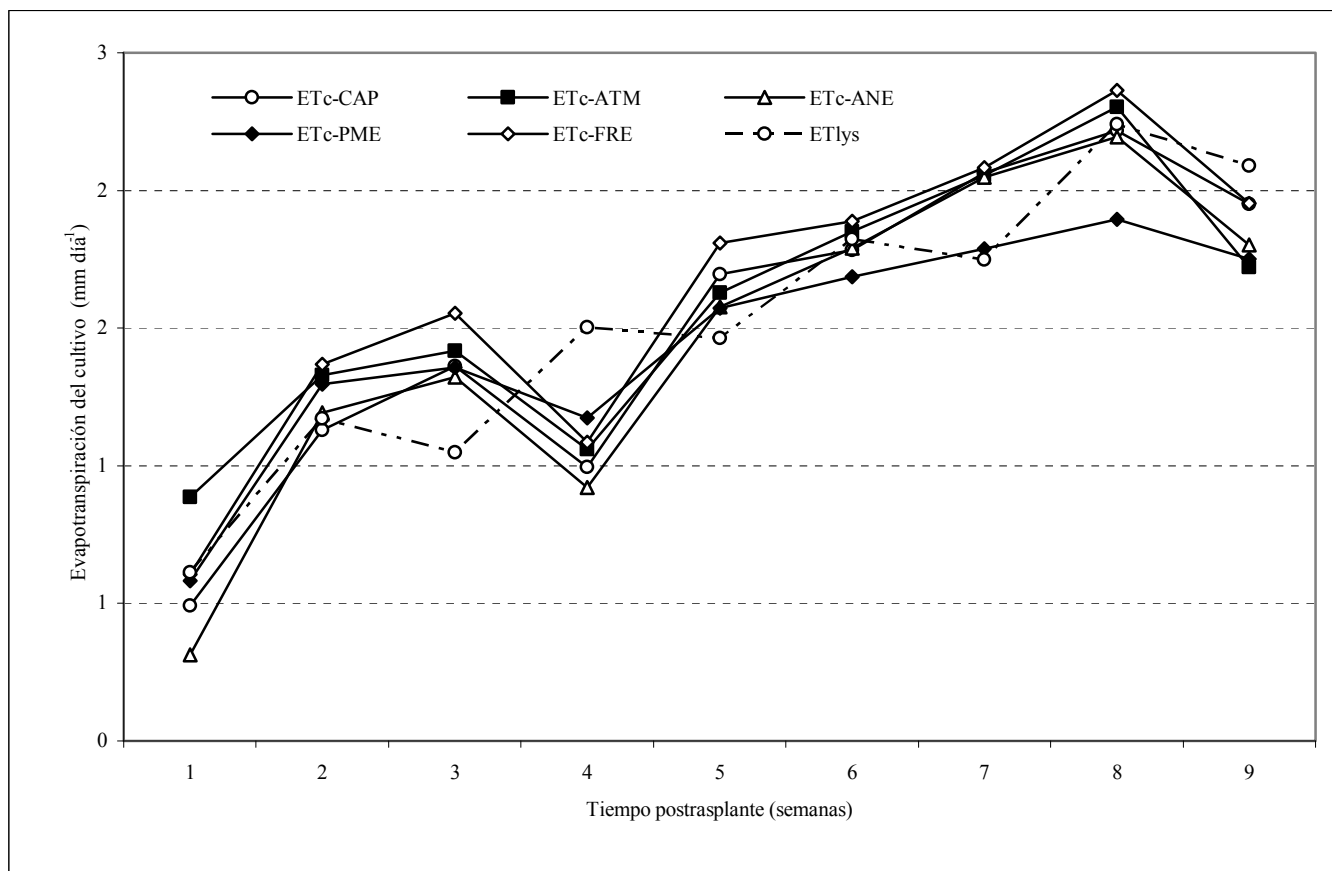
Figura 3. Contenido de agua del sustrato durante el ensayo y su curva de retención de agua.
Figure 3. Substrate water content and water retention curve during the essay.



CAP: evaporímetro de bandeja clase A; ATM: atmómetro de Piche fijo (*f*) y móvil (*m*); ANE: evaporímetro Andersson; PME: ecuación Penman-Monteith; FRE: ecuación FAO-Radiación.

Figura 4. Valores semanales promedios de evapotranspiración de referencia con los diferentes métodos y radiación solar dentro del invernadero.

Figure 4. Weekly average of reference evapotranspiration values for the different methods and solar radiation inside greenhouse.



ETc: evapotranspiración del cultivo estimada con evaporímetro de bandeja clase A (CAP); atmómetro de Piche (ATM); evaporímetro Andersson (ANE); ecuación Penman-Monteith (PME); ecuación FAO-Radiación (FRE); lisímetro (ET_{lys}).

Figura 5. Evapotranspiración de lechuga media mensual con los diferentes métodos y radiación solar dentro del invernadero.

Figure 5. Weekly mean lettuce evapotranspiration for the different methods and solar radiation inside greenhouse.