

EVAPOTRANSPIRACIÓN Y COEFICIENTES DE CULTIVO DE CHILE BELL EN EL VALLE DE CULIACÁN, MÉXICO

Evapotranspiration and Crop Coefficient of Bell Pepper in Culiacan Valley, Mexico

Jesús Enrique López Avendaño^{1‡}, Tomás Díaz Valdés¹, Christopher Watts Thorp²,
Julio César Rodríguez², Alejandro Emilio Castellanos Villegas²,
Leopoldo Partida Ruvalcaba³ y Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz¹

¹ Colegio de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-Eldorado km 17.5. 80000 Culiacán, Sinaloa, México.

[‡] Autor responsable (profe.jesus@uas.edu.mx)

² Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

³ Universidad Tecnológica de Culiacán. Carretera a Imala km 3.1. Culiacán, Sinaloa, México.

RESUMEN

La evapotranspiración es un elemento importante del ciclo hidrológico y balance de energía en la superficie terrestre, su conocimiento y estimación es determinante para la planeación de recursos hídricos y en lo particular, para el uso eficiente del agua de riego. Se propuso como objetivo, aplicar el método de covarianza de torbellinos para medir la evapotranspiración (ET_c) y determinar coeficientes de cultivo (K_c) del chile bell (*Capsicum annum*) para mejorar la precisión del método FAO-56 en la estimación de ET_c de este cultivo en el Valle de Culiacán. El estudio se realizó de febrero a abril de 2014, en una superficie de 90 ha regadas con un sistema por goteo localizadas en el Valle de Culiacán, México. Se calculó la evapotranspiración de referencia (E_{to}) utilizando la ecuación de Penman-Monteith y para ET_c ajustada se utilizó además el K_c ajustado mediante una regresión cuadrática realizada con los datos de K_c estimados (método CE) y los días transcurridos después del trasplante; para el análisis estadístico se utilizaron: RMSE, índice de concordancia de Willmott (d), índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (E) y R². Los resultados mostraron que la evapotranspiración medida fue de 267.6 mm y estimada de 363.6 mm con los métodos CE y FAO-56, respectivamente, lo que representa un error relativo de 35.9%, mientras que la E_{tc} ajustada fue de 261.5 mm. Los valores de K_c promedio para la etapa media fueron de 0.86, 1.16 y 0.86, y para la etapa final fueron 0.66, 0.87 y 0.64, para los métodos CE, FAO-56 y K_c ajustado, respectivamente. Los valores estadísticos entre ET_cFAO-56 y ETCCE fueron E = -13.2, d = 0.51,

R² = 0.56 y RMSE = 1.32 mm d⁻¹. El método FAO-56 sobrestimó la ET determinada con el método CE.

Palabras clave: *coeficiente dual; método FAO-56; riego por goteo; método de covarianza de torbellinos.*

SUMMARY

Evapotranspiration is an important component of earth's hydrological cycle and energy balance. Understanding and estimating it is crucial for planning the use of water resources, particularly, efficient use of irrigation water. Thus, the objectives of this study were to apply the method of Eddy Covariance for measuring evapotranspiration (ET_c) and determining crop coefficients (K_c) for bell pepper (*Capsicum annum* L.) and to improve the accuracy of the FAO-56 method of estimating ET_c for this crop. The study was carried out in the Valley of Culiacan, Mexico, from February to April 2014 on 90 ha irrigated with drip irrigation. E_{to} was calculated using the Penman-Monteith equation. Moreover, to estimate adjusted ET_c, adjusted K_c was also used. Adjusted K_c was obtained with quadratic regression carried out with estimated K_c data and the days after transplanting. Several parameters were used for statistical analysis: the Root Mean Square Error (RMSE), the Willmott concordance index (d), the Nash and Sutcliffe efficiency index (E) and the coefficient of determination (R²). The results showed that measured evapotranspiration was 267.6 mm, while it was 363.6 mm when estimated with CE and FAO-56 methods,

respectively. This represents a relative error of 35.9%, whereas the adjusted ETc was 261.5 mm. The Kc values for the crop mid-season stage were 0.86, 1.16 and 0.86, whereas for the crop end-stage, they were 0.66, 0.87 and 0.64 with the EC, FAO-56 and adjusted Kc methods, respectively. The statistical values between ETcFAO-56 and ETcCE were $E = -13.2$, $d = 0.51$, $R^2 = 0.56$ and $RMSE = 1.32$ mm d⁻¹. The FAO-56 method overestimated ET measured with the EC method.

Index words: dual coefficient; FAO-56 method; drip irrigation; eddy covariance system.

INTRODUCCIÓN

Sinaloa es el principal productor agrícola de México, con una superficie de riego de 855 mil hectáreas aproximadamente, lo que representa 29% de la superficie de riego total del país; el chile bell (*Capsicum annuum* L.) es un cultivo relevante en muchas partes del mundo, dado su importancia económica y social, por lo que se han desarrollado múltiples trabajos de investigación analizando la respuesta del cultivo a diferentes factores agronómicos y ambientales, como la evaluación de la producción y calidad de chile bell en función del régimen y tipo de riego, el uso de acolchados y malla sombra para evaluar el intercambio de CO₂, y la determinación de coeficientes de cultivo bajo diferentes tipos de riego (Smittle *et al.*, 1994; García *et al.*, 2000; Sezen *et al.*, 2007; Zermeño *et al.*, 2011; Díaz, 2013; Shukla *et al.*, 2014). En Sinaloa, la producción de chile bell se destina principalmente al mercado internacional (85%), mientras que el 15% restante se destina para consumo nacional (INIFAP, 2011). En el valle de Culiacán, chile bell ha sido una de las principales hortalizas cultivadas, durante los ciclos agrícolas 2008-2009, 2009-2010 y 2011-2012, la superficie promedio sembrada fue de 2694 hectáreas con un volumen promedio de agua utilizada de 35.561 millones de metros cúbicos, una producción promedio de 185 215 toneladas, con un valor de 929 millones de pesos aproximadamente (CONAGUA, 2010; 2011; 2013).

La evapotranspiración es de los principales componentes del ciclo hidrológico y balance de energía; constituye uno de los procesos críticos e indispensables en diversos campos como hidrología, ecología, agricultura y planeación de los recursos hídricos; en las últimas dos décadas se han desarrollado diversas técnicas para estimar la evapotranspiración, que incluyen el uso de

la Covarianza de Torbellinos, lisímetro, relación de Bowen, balance de agua en el suelo, Scintilometría y Percepción Remota (Zhang *et al.*, 2014). México es un país con baja disponibilidad de agua, por lo que resulta imprescindible no solo mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura, sino también promover su uso de manera sustentable (Salazar *et al.*, 2014) además, la limitación de los recursos hídricos se ha convertido en uno de los principales problemas de la agricultura, en la medida que los períodos de sequía son cada vez más recurrentes y prolongados, particularmente en el valle de Culiacán, México (Ravelo *et al.*, 2014), lo que conlleva a poner mayor énfasis a la estimación del consumo real de agua por las plantas en la agricultura.

En este sentido, ha resurgido con mayor fuerza la estimación precisa del uso del agua por los cultivos, particularmente en aquellas regiones donde la disponibilidad del recurso hídrico para la agricultura es cada día menor; las técnicas como la de covarianza de torbellinos, Scintilometría y Percepción remota, continuamente se evalúan y validan para calibrar otros métodos menos sofisticados pero más económicos (Balbontín *et al.*, 2011); y aunque el uso de la ecuación de la FAO Penman-Monteith y coeficientes de cultivo (Kc), continúan siendo de las metodologías más sencillas y económicas, presentan el inconveniente de que los valores de Kc deben obtenerse y validarse para condiciones locales (Shukla *et al.*, 2014).

La Organización para la Agricultura y Alimentación de las Naciones Unidas, propuso la metodología FAO-56 basada en la evapotranspiración de referencia que se calcula con la ecuación FAO Penman-Monteith y un coeficiente de cultivo (Kc); este método ha sido ampliamente utilizado debido a que ha arrojado resultados satisfactorios bajo diversas condiciones climáticas alrededor del mundo; el Kc representa las características específicas del cultivo, tales como altura, resistencia superficial, albedo, entre otras; el Kc varía poco con el clima sin embargo, es afectado por el manejo del cultivo y el riego, así como por condiciones ambientales tales como presencia de plagas y enfermedades, salinidad en el suelo, etc., lo que conduce a diferentes condiciones de estrés hídrico y conlleva a ajustar el valor de Kc a las condiciones actuales o reales mediante el uso de un coeficiente de estrés (Ks) (Zhang *et al.*, 2013). El método FAO-56 utiliza dos tipos de Kc, por un lado el Kc único, el cual integra el efecto combinado de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo; mientras que el Kc dual proporciona un cálculo separado

de estos dos fenómenos físicos, este se integra por un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e) (Allen *et al.*, 2005); el coeficiente dual del cultivo permite evaluar mejor el impacto del humedecimiento del suelo por la lluvia o riego, así como los impactos por mantener parte del suelo seco o utilizar acolchado plástico para evitar la evaporación directa del suelo (Rosa *et al.*, 2012). Los valores de K_c deben calibrarse para condiciones locales de clima y manejo del cultivo, sin embargo, existen pocos estudios de evapotranspiración del cultivo en Chile para determinar estos valores bajo condiciones reales de campo; algunos estudios realizados con diversos cultivos mostraron que los valores de K_c obtenidos experimentalmente no concuerdan con aquellos propuestos por FAO-56 en Allen *et al.* (1998) (Zhang *et al.*, 2013, Villagra *et al.*, 2014).

El método de Covarianza de Torbellinos se ha convertido en el método principal para monitorear flujos de energía, vapor de agua y carbono en el ecosistema, a diferentes escalas de tiempo; además, se ha incrementado el uso de los datos obtenidos con este método para la calibración y validación de otros métodos para estimar evapotranspiración (Reichstein *et al.*, 2005). El principio físico general de la medición de flujos de torbellinos consiste en comprobar la cantidad de una entidad (masa o energía) que se mueve en forma ascendente y descendente en la unidad de tiempo, así como la velocidad con lo que se mueve; matemáticamente este flujo vertical se representa como una covarianza entre las mediciones de la velocidad vertical de los movimientos del aire ascendente y descendente y la concentración de la entidad de interés (masa o energía); para poder realizar estas mediciones se requiere de equipo muy sofisticado como el anemómetro sónico, debido a que las fluctuaciones turbulentas ocurren de una manera muy rápida, mientras que los cambios de concentración, densidad o temperatura son muy pequeños, y ambas cosas deben medirse de manera apresurada y precisa (Zermeño *et al.*, 2011). El método de Covarianza de Torbellinos se ha utilizado en numerosas investigaciones para validar otros métodos, Liu *et al.* (2013) evaluaron los resultados obtenidos en la medición de la evapotranspiración en diferentes superficies, utilizando scintilómetro y sistema CE; Er-Raki *et al.* (2013) midieron la ET_c utilizando sensores remotos y validaron con un sistema CE; Balbontín *et al.* (2011) compararon los métodos de CE y relación de Bowen para medir ET_c . También se ha

utilizado para analizar la relación entre la producción de CO_2 y evapotranspiración (Pérez *et al.*, 2010; Zermeño *et al.*, 2011); así como para estimar la evapotranspiración de diversos cultivos y vegetación natural (Ezzahar *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2010; 2011; Zhang *et al.*, 2013).

El objetivo de este trabajo consistió en aplicar el método de Covarianza de Torbellinos para medir la evapotranspiración (ET_c) y determinar coeficientes de cultivo (K_c) del Chile Bell para mejorar la precisión del método FAO-56 en la estimación de ET_c de este cultivo en el valle de Culiacán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Delimitación de la Zona de Estudio

Para la presente investigación se utilizó el cultivo de Chile Bell sembrado en una superficie de 90 hectáreas localizadas en el valle de Culiacán, Sinaloa, México, con coordenadas geográficas centrales $24^{\circ} 36' N$ y $107^{\circ} 31' O$. La investigación se realizó durante el ciclo agrícola 2013-2014, utilizando un periodo de estudio de 83 días comprendido entre el 01 de febrero y 24 de abril de 2014, la fecha de trasplante del cultivo fue el 10 de septiembre de 2013. El clima de la región es semi-árido con una precipitación promedio anual de 690 mm. La temporada de lluvias es de julio a septiembre (con alrededor de 79% de la precipitación anual) y la temporada más seca es de febrero a mayo (con apenas 1.3% de la precipitación anual). La temperatura promedio mensual varía desde $19.2^{\circ} C$ en enero, hasta $30^{\circ} C$ en julio, llegando a presentar una máxima extrema promedio de $43^{\circ} C$ en el mismo mes de julio, y una mínima extrema promedio de $0.6^{\circ} C$ en el mes de febrero. El cultivo se plantó a doble hilera en surcos con una separación de 2 m, la separación de plantas fue de 30 cm y se colocaron estacones de 1.8 m de alto a 1.5 m de separación y a doble hilera, para el sostén de la planta. El suelo presentó una textura arcillosa (59.4% de arcilla, 19.2% de limo y 21.4% de arena). El contenido gravimétrico de humedad a capacidad de campo fue de 31.6% y punto de marchitamiento permanente 17.8% determinado con la olla y membrana de presión. Se utilizó un sistema de riego por goteo, con un intervalo de riego de 2 días y un tiempo de riego que varió desde 9.5 hasta 18 h; los emisores en la cinta de riego se encontraban a 30 cm de separación, el caudal de descarga promedio fue de $1 L h^{-1}$ y el porcentaje de área mojada fue del 25%. La fertilización se hizo a través del agua de riego

y la aplicación de pesticidas empleando maquinaria y avión. La cosecha se hizo en varias cortes, para lo cual se requirió de mano de obra y camiones para su recolección.

Medición de Variables Meteorológicas

La radiación solar neta se midió utilizando un radiómetro Net-Lite2 (Kipp y Zonen), colocado a 5 m sobre la superficie del suelo, para la temperatura del aire y la humedad relativa se utilizaron dos sondas Vaisala HMP45C con protector URS1 colocadas a 3 y 5 m sobre la superficie, (se utilizó el promedio), para la velocidad y dirección del viento se empleó una anemoveleta YOUNG modelo 05103 (Campbell Scientific) colocada a 6.2 m sobre la superficie del suelo, y la presión barométrica se midió utilizando un CS100 (Campbell Scientific) colocado a 2 m sobre la superficie del suelo. Se utilizaron dos platos de flujo de calor HFP01 (Hukseflux) para medir el flujo de calor en el suelo (G) de la ecuación de balance de energía, se colocaron bajo el cultivo, en la zona humedecida con el riego, se utilizaron dos dispositivos colocados a 5 y 10 cm de profundidad (se utilizó el promedio). Todos los sensores se encontraban conectados a un colector de datos CR1000 (datalogger, Campbell Scientific) donde se almacenaba la información meteorológica cada 10 min. Posteriormente se promedió la información meteorológica cada 30 min para calcular los flujos con el método de covarianza de torbellinos; así mismo, se obtuvieron los promedios diarios para estimar la ET_o (mm d^{-1}), de acuerdo con la ecuación propuesta por la FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

Evapotranspiración de Referencia (ET_o)

Para calcularla se utilizó la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

donde: ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}), R_n es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G es el flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T es la temperatura del aire promediada diariamente ($^{\circ}\text{C}$), Δ es la pendiente de la curva de presión a saturación ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ es la constante psicométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), e_s es la presión de

saturación del vapor (kPa), e_a es la presión de vapor promedio diaria (kPa), u_2 es la velocidad promedio del viento a 2 m de elevación (m s^{-1}).

Medición de Flujos de Calor Latente y Sensible

Para la medición de los flujos de calor, se instaló un método de covarianza de torbellinos IRGAE-150 con un anemómetro sónico CSAT3 (Campbell Scientific) sobre el cultivo de chille bell a una altura de 6.2 m, de tal forma que proporcionó información continua de los flujos verticales de calor. El resultado de las mediciones de flujo se evaluó con el cierre de la ecuación de balance de energía; la cual, sin considerar el término de almacenamiento de energía en la cubierta vegetal y la energía utilizada en la fotosíntesis, quedaría como:

$$R_n - G = LE + H \quad (2)$$

donde: R_n y G ya fueron definidos anteriormente, H y LE son el flujo de calor sensible y latente respectivamente, medido en el sistema CE.

Evapotranspiración del Cultivo ($ET_{c, \text{Eddy}}$) con el Método de Covarianza de Torbellinos (Método CE)

Para determinar la ET_c se utilizaron los valores de calor latente (LE) medidos con el sistema CE y convertidos a lámina de agua, para lo cual se consideró el aporte de energía necesario para vaporizar un 1 mm de agua de 2.45 MJ m^{-2} , el cálculo de la ET_c del chille bell en el período diario, se hizo sumando los valores de ET_c medidos cada media hora.

Evapotranspiración del Cultivo ($ET_{c, \text{FAO-56}}$) con el Método FAO-56

Para estimar la ET_c con la metodología FAO-56 se utilizó la ET_o y el coeficiente dual del cultivo, determinado, como se muestra en Allen *et al.* (1998), para lo que se utilizó la siguiente ecuación:

$$ET_c = ET_o (K_{cb} K_s + K_e) \quad (3)$$

donde: ET_c es la evapotranspiración del cultivo (mm d^{-1}), K_{cb} es el coeficiente basal del cultivo que comprende el concepto de transpiración del cultivo, K_s es el coeficiente de estrés hídrico igual a 1 en este caso, dado que

el cultivo se mantuvo en condiciones óptimas de humedad (capacidad de campo) durante todo su ciclo, monitoreada permanentemente con la ayuda de tensiómetros instalados en el campo (con riegos frecuentes cada 2 días), y K_e es el coeficiente de evaporación del suelo y el follaje, la cobertura vegetal en su máximo desarrollo era de 40%. Para determinar el valor de K_e , se utilizó una fracción expuesta a la evaporación (1-fc) de 0.6 y fracción cubierta (fc) de 0.4.

Coeficientes de Cultivo (Kc)

Para el método FAO-56 se utilizó el Kc dual (Allen *et al.*, 1998), mientras que para el método de Covarianza de Eddy se utilizaron los valores de ETc estimados y el valor de ETo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (4)$$

Análisis Estadístico (ETc_{FAO-56} - ETc_{Eddy}) y (ETc_{Eddy} - ETc_{ajustada})

Se utilizaron cuatro parámetros de eficiencia estadística: 1) El coeficiente de determinación (R^2), el cual se define como el cuadrado del coeficiente de correlación, indica la capacidad de un modelo para replicar sus resultados, 2) RMSE, la raíz de la media del error cuadrático, mide la variación de los valores calculados respecto a los observados; 3) el índice de concordancia (d), propuesto por Willmott, representa la relación del error cuadrado medio y el error potencial, el error potencial en el denominador representa el valor más grande que la diferencia al cuadrado puede alcanzar; 4) E, la Eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe caracteriza el comportamiento del modelo de simulación, el modelo perfecto debería tener una eficiencia cercana a 1 (Krause *et al.*, 2005).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

donde: O_i y P_i son los datos observados o medidos y los estimados o calculados, respectivamente, \bar{O} y \bar{P} representa los valores promedio de los datos observados y calculados, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (6)$$

n es el número de datos evaluados.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evapotranspiración de Referencia (ETo)

El valor de ETo se modificó de acuerdo con el comportamiento de la humedad relativa (HR), velocidad del viento (u_e) y temperatura del aire (T_a); la ETo es mayor durante los días más cálidos y la atmósfera más seca. Para el presente estudio, la ETo se incrementó desde 3 mm d⁻¹ (inicio de la evaluación) hasta llegar a 5.7 mm d⁻¹ para posteriormente descender de nuevo hasta 3.1 mm d⁻¹; se observa un segundo incremento de ETo hasta llegar a 5.8 mm d⁻¹ y descender nuevamente hasta 2.8 mm d⁻¹. En los días con mayor ETo ocurrieron, de manera simultánea, una disminución de la humedad relativa y un incremento de la velocidad del viento (Figura 1). La ETo total estimada fue de 328.7 mm. La respuesta de la evapotranspiración de referencia a los cambios de humedad relativa y temperatura del aire ha sido evaluada por Moratiel *et al.* (2010) y Bhartiya *et al.* (2014); estos autores obtuvieron modelos matemáticos que muestran que la ETo depende fuertemente de la humedad relativa, principalmente; con lo que se puede mostrar que cuando disminuye esta se incrementa la evapotranspiración de referencia; asimismo, otros autores concluyen que al coincidir una baja en la humedad relativa con un incremento en la velocidad del viento, favorece al incremento de ETo (Liu *et al.*, 2013).

Evapotranspiración del Cultivo con el Método de Covarianza de Torbellinos (ETc_{Eddy})

Con la Ecuación 2 se determinó el balance de energía y, en la Figura 2 se observa el comportamiento de

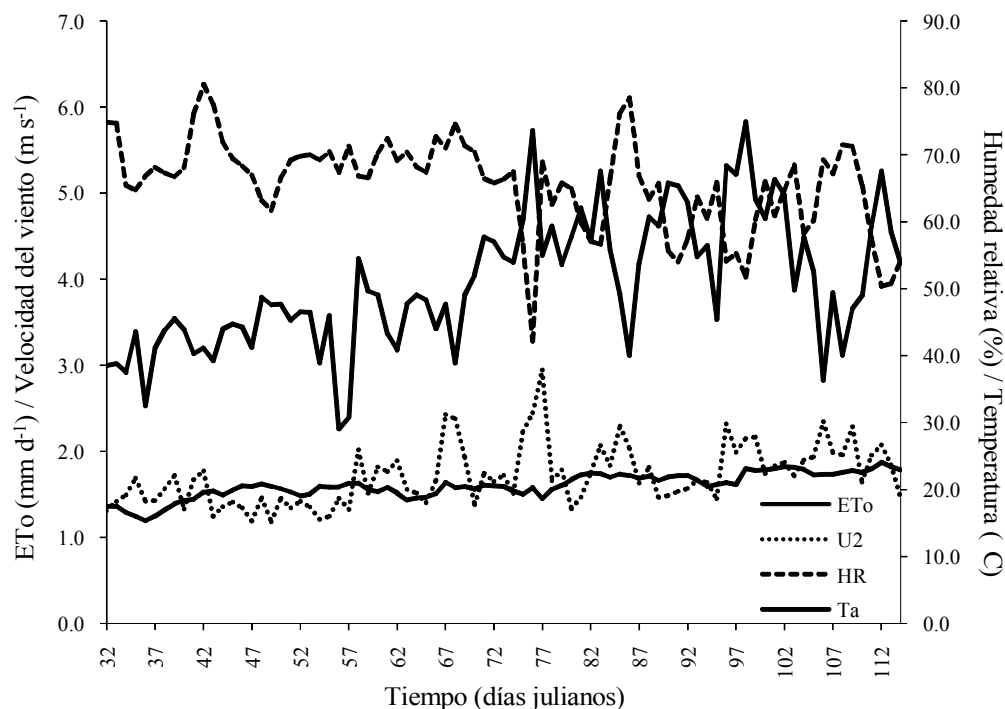


Figura 1. Comportamiento de evapotranspiración de referencia (E_{To}) en función de la velocidad del viento (U_2), humedad relativa (HR) y temperatura del aire (T_a).

los flujos de energía; la pendiente resultante de la regresión lineal forzada al pasar por el origen, fue de 0.84, lo que indica una subestimación de la suma de flujos turbulentos ($H+LE$) de 16%, aproximadamente, respecto a la disponibilidad de energía (R_n-G), lo cual es satisfactorio de acuerdo con Twine *et al.* (2000); en el valle del Yaqui, México se obtuvo una subestimación de flujos del 18% en Chile (Rodríguez *et al.*, 2011), mientras que en la costa de Hermosillo resultó una subestimación del 20% al medir los flujos de calor con el método de covarianza de torbellinos sobre el cultivo de vid (Er-Raki *et al.*, 2013), mientras que en la cuenca del río Hai situada al noreste de China se encontró una subestimación de los flujos de calor que varió de 9% hasta 24%, considerando un sistema de Covarianza de torbellinos sobre un área con cultivos heterogéneos basada en maíz, trigo, algodón y huertos de frutales (Liu *et al.*, 2013). En todos estos casos se obtuvo que la energía disponible (R_n-G) fue superior a los flujos de calor ($H+LE$), lo cual se debe a que en la ecuación de balance no se consideran otros términos de energía, tales como el calor almacenado y liberado de la planta, o la energía utilizada en actividades metabólicas como la fotosíntesis y la respiración, en consecuencia esto indica

que la medición de la energía disponible será superior a la energía utilizada para calentar la atmósfera y en la evapotranspiración (Allen *et al.*, 1998).

Para obtener el valor de la Evapotranspiración del cultivo ($E_{Tc_{Eddy}}$), con el método de covarianza de torbellinos, se utilizaron los flujos de calor sensible (H) y latente (LE) obtenidos con el sistema CE, el comportamiento de $E_{Tc_{Eddy}}$ se muestra en la Figura 3, donde se observa que ésta se incrementó a partir 1.8 mm d^{-1} (inicio de la medición) hasta llegar a un valor máximo de 5.4 mm d^{-1} y descendió nuevamente hasta un valor de 2.0 mm d^{-1} al final de la evaluación; la evapotranspiración del cultivo estimada con el sistema CE presentó un comportamiento típico observado en cultivos anuales y similar a los resultados mostrados por otros investigadores como lo demuestran Rodríguez *et al.* (2011), quienes obtuvieron un valor máximo de 5.5 mm d^{-1} en Chile banano (*Capsicum annuum*, L.) en el noroeste de México, mientras que Miranda *et al.* (2006) estimaron un valor máximo de 5.6 mm d^{-1} para el cultivo de Chile tabasco (*Capsicum frutescens* L.) en el noreste de Brasil. La evapotranspiración total estimada para el período de estudio con el método de covarianza de torbellinos fue de 267.6 mm .

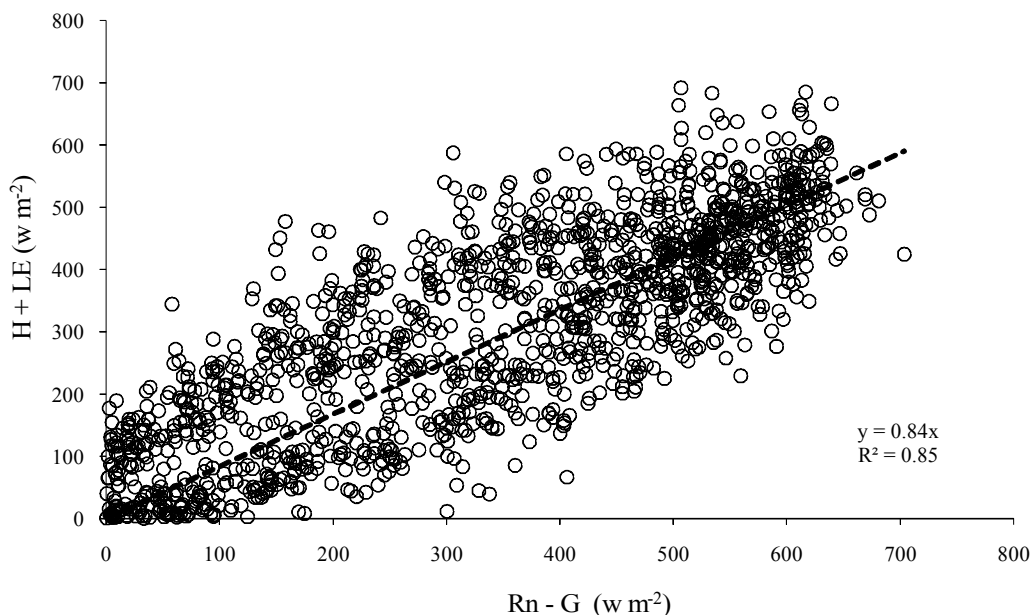


Figura 2. Evaluación del cierre de la ecuación de balance de energía.

Evapotranspiración del Cultivo (ETc_{FAO-56}) con el Método FAO-56

Con la Ecuación 3 se calculó el valor de la Evapotranspiración del cultivo con el método FAO-56 (ETc_{FAO-56}) propuesto por Allen *et al.* (1998) y en la Figura 3 se observa su comportamiento durante el período de estudio. Dado que el cálculo de ETc_{FAO-56} se hace en función de la ETo , su comportamiento es muy similar al mostrado por ésta en la gráfica se observa que la ETc se incrementó desde 3.5 mm d^{-1} (inicio de la evaluación) hasta un valor máximo de 6.9 mm d^{-1} (45 días después de iniciado el estudio), posteriormente descendió hasta 3.6 mm d^{-1} y se incrementó nuevamente hasta 7.1 mm d^{-1} (67 días después de iniciado el estudio) para finalmente descender hasta 2.4 mm d^{-1} en su valor mínimo. La existencia de un doble ciclo de desarrollo en el cultivo de chile se debe al manejo de la fertilización del cultivo y a las condiciones climáticas de la zona, lo cual fue concluido por Miranda *et al.* (2006) al estimar la ETc en Chile en la región noreste de Brasil. La Evapotranspiración total estimada con el método FAO-56 fue de 363.6 mm durante el período de estudio.

Riego Aplicado en el Período de Estudio

Salvo algunas excepciones, la lámina fue mayor que ETc_{Eddy} , por lo que existía humedad residual almacenada en el suelo. La lámina de riego máxima aplicada fue de

5.4 mm d^{-1} , que coincidió con la ETc_{Eddy} máxima diaria alcanzada. La lámina de riego total aplicada fue de 280.8 mm , superior en 3.8% a la lámina total estimada con el sistema CE (Figura 3).

Análisis de la Relación entre ETc_{Eddy} y ETc_{FAO-56}

Para analizar estadísticamente la relación entre los valores de ETc con los diferentes métodos, se utilizaron las ecuaciones 5, 6, 7 y 8. Los resultados de los diversos parámetros estadísticos considerados se muestran en la Figura 4. Krause *et al.* (2005) señalan que un valor negativo de E indica una baja eficiencia del modelo para representar los datos medidos; por lo que para este estudio, el valor negativo de E indica una baja eficiencia del método FAO-56 para representar los datos medidos con el método de Covarianza de torbellinos, a partir de los coeficientes de cultivo originalmente propuestos por la metodología; esto indica que se deberán ajustar dichos coeficientes para las condiciones locales de manejo de cultivo de Chile Bell en el valle de Culiacán.

Coefficiente de Cultivo (Kc)

Considerando lo anterior, y con el objeto de evitar el uso del Kc dual, se obtuvo un valor de Kc ajustado utilizando una función cuadrática que relaciona los datos de Kc estimados con ETc_{Eddy} y ETo y los días después del trasplante (DDT) (Figura 5).

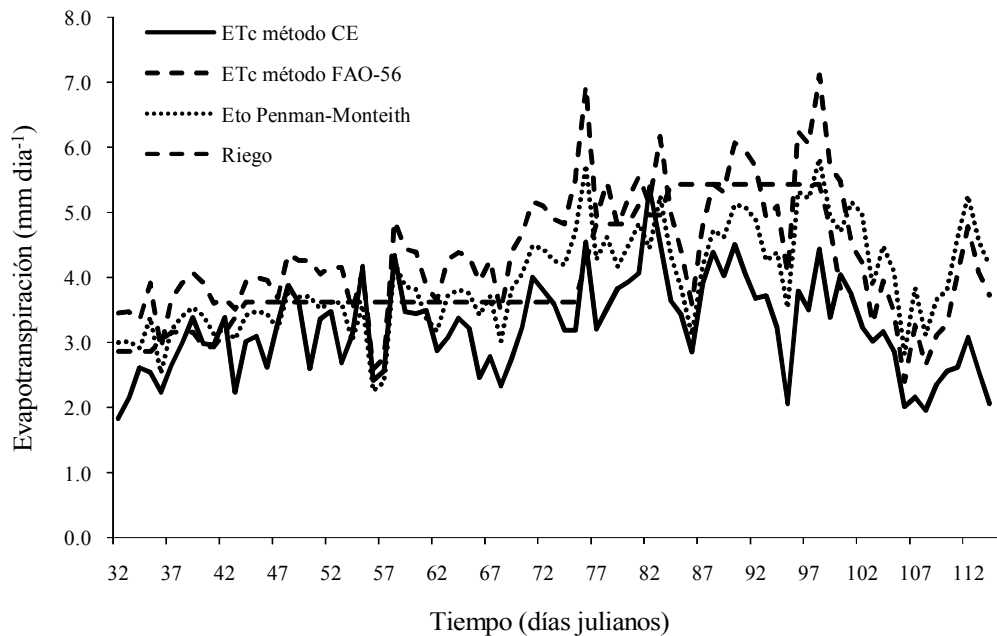


Figura 3. Evolución de la evapotranspiración de referencia (ETo), evapotranspiración estimada con las metodologías FAO-56 (ETc FAO-56) y covarianza de torbellinos (ETc Eddy) y el riego aplicado.

Del mismo modo, en esta Figura se observa el comportamiento de los valores de Kc calculados con ETc_{Eddy} y ETc_{FAO-56} . Al revisar el comportamiento de Kc estimado con ETc_{Eddy} , se encontró que la curva de Kc muestra dos ciclos de desarrollo, en el primero de ellos, el valor de Kc creció de 0.61 hasta un valor máximo de 1.17 y se redujo nuevamente hasta 0.68; mientras que en el segundo ciclo, comenzó con un valor de 0.68 hasta

llegar a un valor máximo de 1.21 y terminar con un valor de 0.49. Por otro lado, al calcular los valores promedio de Kc para la etapa de máximo desarrollo del cultivo y la etapa final del mismo, se obtuvieron valores de 0.86 y 0.66, respectivamente. Al revisar el Kc dual calculado con el método FAO-56, se observa que este se mantiene prácticamente constante durante la etapa de máximo desarrollo, mostrando también dos valores máximos,

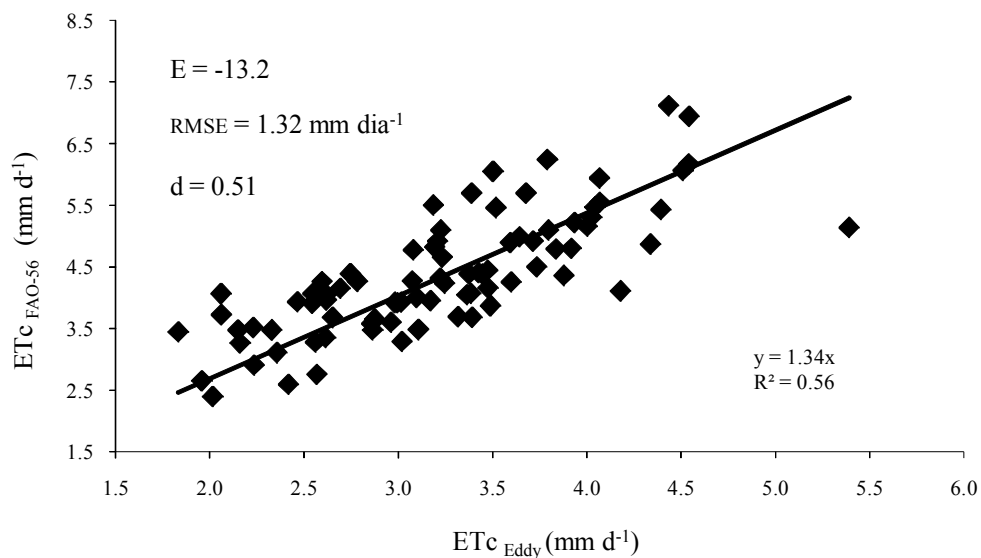


Figura 4. Relación estadística entre la evapotranspiración estimada con los método FAO-56 y Covarianza de torbellinos.

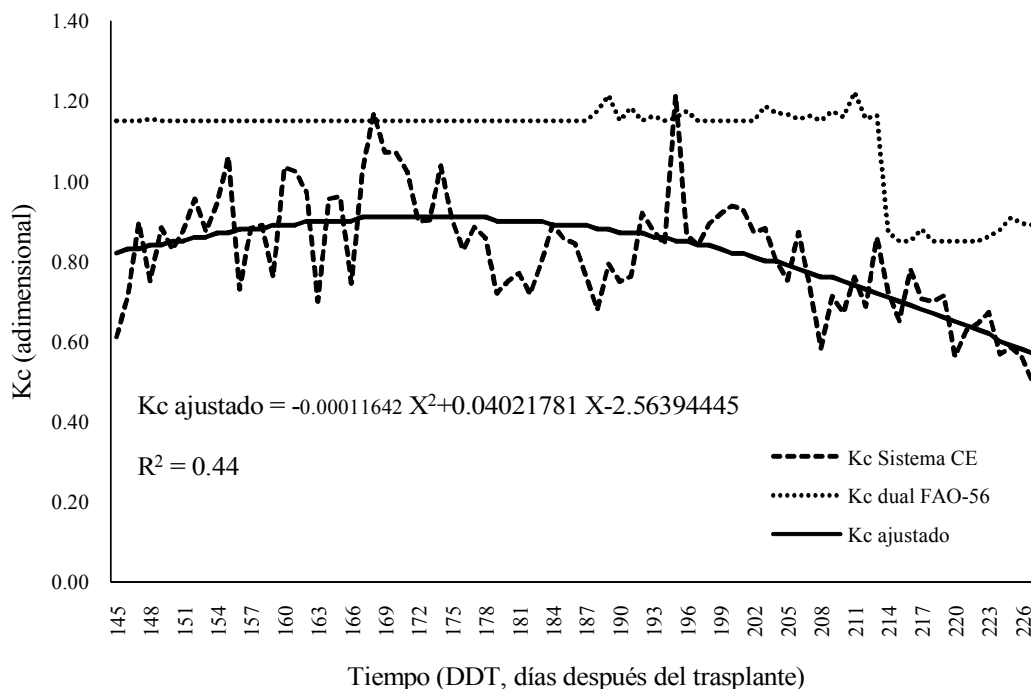


Figura 5. Comportamiento del coeficiente de cultivo (Kc) estimado con E_{To} y los valores de $ET_{c_{FAO-56}}$, $ET_{c_{Eddy}}$ y la ecuación de ajuste.

el primero de 1.21 y el segundo de 1.22, sin embargo, los valores de Kc promedio estimados con el procedimiento del coeficiente dual propuesto por Allen *et al.* (1998), fueron 1.16 para la etapa de máximo desarrollo (etapa media) y 0.87 para la etapa final del cultivo. Al comparar los resultados de Kc obtenidos en el presente trabajo con aquellos encontrados por Miranda *et al.* (2006) para chile tabasco es posible afirmar que existe similitud en el comportamiento de Kc, Miranda *et al.* (2006) reportaron dos ciclos de Kc con valores máximos de 1.22 y 1.08; mientras que para la etapa final del cultivo reportan valores de 0.65 y 0.60, que coinciden prácticamente con los valores estimados en esta investigación.

Por otro lado al determinar los valores promedio de Kc, los valores encontrados en esta investigación coinciden con los valores reportados por Rodríguez *et al.* (2011), quienes obtuvieron un valor de 0.85 en chile banana, regado mediante goteo, estos autores también señalan que durante algunos días de evaluación se presentaron valores superiores a 1, ocurriendo lo mismo en la presente investigación. Ahora bien, los valores de Kc promedio identificados en este trabajo para las etapas de máximo desarrollo (etapa media) y maduración (etapa final) del cultivo, no coincidieron con los valores reportados por Allen *et al.* (1998), quienes sugieren

valores de 1.15 para kc en la etapa media y 0.9 de kc en la etapa final del cultivo, valores superiores a los estimados en este trabajo.

Un aspecto importante del Kc calculado es que este incluye tanto la fracción relacionada con la transpiración (K_{cb}), como aquella relacionada con la evaporación (K_e). La estimación del coeficiente dual del cultivo, particularmente el K_{cb} , es importante porque permitiría estimar la ET_c para otros métodos de riego como el de gravedad con diferente régimen de riego y mayor impacto sobre el K_e y en consecuencia el Kc. Para dividir el valor de Kc estimado con ET_c medido con el método CE, es razonable asumir que existe una proporcionalidad entre K_{cb} y K_e de los métodos FAO-56 y Covarianza de torbellinos, de lo cual resultarían los valores del Cuadro 1.

Evapotranspiración del Cultivo Ajustada ($ET_{c_{ajust}}$)

Con los valores de Kc ajustado, calculados con la ecuación cuadrática de la Figura 5 y la E_{To} se evaluó la ET_c ajustada ($ET_{c_{ajust}}$). Al revisar y comparar el comportamiento de la $ET_{c_{ajust}}$, se observó que esta se mantuvo por debajo de la E_{To} , ajustándose de una manera aceptable a los valores de $ET_{c_{Eddy}}$. Los valores promedio para $ET_{c_{ajust}}$ fueron de 0.86 y 0.64 para

Cuadro 1. Separación de los coeficientes basal del cultivo (kcb) y coeficiente de evaporación del suelo (Ke) del Kc dual estimado.

	Kc dual	Kcb	Ke
FAO-56 (Etapa media)	1.16	1.1	0.06
FAO-56 (Etapa final)	0.87	0.8	0.07
CE (Etapa media)	0.86	0.82	0.04
CE (Etapa final)	0.66	0.61	0.05

las etapas fenológicas media y final del cultivo, respectivamente; lo cual concuerda con los valores de Kc promedio estimados con el método de Covarianza de torbellinos. La ETc_{ajust} total estimada en el período fue de 261.5 mm, lo que representa un error relativo de 2.3% con respecto a la ETc_{Eddy} . Al calcular los parámetros de eficiencia estadística se observó que estos mejoraron de manera significativa, obteniéndose una R^2 de 0.67, RMSE de 0.41 mm d⁻¹, E de 0.67 y d igual a 0.90.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que para el período de mediciones del presente estudio, el método FAO-56 sobrestimó en 36% la ETc acumulada medida con el método de Covarianza de Torbellinos (CE). Los coeficientes de cultivo estimados para las etapas intermedia y final fueron 0.86 y 0.66 con el método CE, menores que los valores de 1.16 y 0.87 estimados con el método FAO-56 utilizando el enfoque de coeficiente dual. Los valores de Kc son fuertemente influenciados por las condiciones de manejo de cultivo, y en este caso, la menor cobertura del terreno lograda con el marco de plantación aplicado en relación con otros estudios, pudiera explicar los menores valores de Kc derivados de las mediciones de ETc con el método CE. Al combinar los coeficientes Kc obtenidos con los propuestos por la FAO para la etapa inicial del cultivo, se tiene que para las condiciones de manejo de este estudio, se pueden aplicar los Kc de 0.6, 0.86 y 0.66 para estimar ETc en las etapas inicial, intermedia y final del cultivo de chile bell en el valle de Culiacán. Por otra parte, para poder utilizar el coeficiente dual y cuantificar de manera separada la evaporación directa y su impacto sobre ETc en otros sistemas de riego, los coeficientes Kcb serían: 0.15, 0.82 y 0.61. Se recomienda validar los coeficientes Kc en otros ciclos agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa agrícola TRICAR por las facilidades otorgadas para realizar el presente trabajo en el Campo “El Cafetal”, particularmente al ingeniero Francisco Javier Bejar Castañeda, administrador de la empresa y al ingeniero José Contreras García, responsable de campo de la empresa. Asimismo, a los Departamentos de Física y Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora por el apoyo brindado para uso de equipo propiedad de la Universidad.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, M. Smith, D. Raes, and J. L. Wright. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131: 2-13.
- Balbontín-Nesvara, C., A. Calera-Belmontes, J. González-Piqueras, I. Campos-Rodríguez, M. Ll. López-González y E. Torres-Prieto. 2011. Comparación de los sistemas de covarianza y relación de Bowen en la evapotranspiración de un viñedo bajo clima semi-árido. *Agrociencia* 45: 87-103.
- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biol.* 9: 479-492.
- Bhartiya, K. M. and A. D. Ghare. 2014. Relative humidity based model for estimation of reference evapotranspiration for western plateau and hills region in India. *Water Res. Manage.* 28: 3355-3364.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2010. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego, Año agrícola 2008-2009. México. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Estad%20C3%ADsticas%20agr%20C3%ADcolas%202020082009.pdf>. (Consulta: agosto 17, 2014).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2011. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego, Año agrícola 2009-2010. Comisión Nacional del Agua. México. http://www.cmic.org/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica/publicaciones_conagua/Pdf/publicaciones/2011%20PDF/SGIH-6-2011.pdf. (Consulta: agosto 17, 2014).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2013. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego, año agrícola 2011-2012. México. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGIH-4-13.pdf>. (Consulta: agosto 17, 2014).
- Díaz-Pérez, J. C. 2013. Bell pepper (*Capsicum annum* L.) crop as affected by shade level: Microenvironment, plant growth, leaf gas exchange, and leaf mineral nutrient concentration. *HortScience* 48: 175-182.
- Er-Raki, S., J. C. Rodríguez, J. Garatuzza-Payan, C. J. Watts, and A. Chehbouni. 2013. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico

- using multi-spectral vegetation index. *Agric. Water Manage.* 122: 12-19.
- Ezzahar, J., A. Chehbouni, J. C. B. Hoedjes, S. Er-Raki, Ah. Chehbouni, G. Boulet, J. M. Bonnefond, and H. A. R. De Bruin. 2007. The use of scintillation technique for monitoring water consumption of olive orchards in a semi-arid region. *Agric. Water Manage.* 89: 179-184.
- Ezzahar, J., A. Chehbouni, S. Er-Raki, S. Khabba, and L. Hanich. 2009. Estimating and monitoring seasonal water consumption of olive orchards in a semi-arid region (Morocco) using the Eddy covariance system. pp. 81-87. *In*: M. El Moujabber, L. Mandi, G. Trisorio-Liuzzi, I. Martín, A. Rabi, and R. Rodríguez (eds.). *Technological perspectives for rational use of water resources in the Mediterranean region*. Bari: CIHEAM. (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 88). <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=801182>. (Consulta: agosto 20, 2014).
- García-Estrada, R. S., C. Juárez-Reyes, J. A. Carrillo-Fasio, R. Allende-Molar, I. Márquez-Zequera y M. D. Muy-Rangel. 2000. Marchitez bacteriana en Chile bell causada por *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*. *Rev. Mex. Fitopatol.* 18: 120-124. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61218209> (Consulta: agosto 20, 2014).
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2011. Híbridos de Chile bell con calidad y rendimiento. Fundación Produce Sinaloa A.C. México. http://www.fps.org.mx/divulgacion/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=5:chile&Itemid=395. (Consulta: agosto 5, 2014).
- Krause, P., D. P. Boyle, and F. Bäse. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5: 89-97.
- Liu, S. M., Z. W. Xu, Z. L. Zho, Z. Z. Jia, and M. J. Zhu. 2013. Measurements of evapotranspiration from Eddy-covariance systems and large aperture scintillometer in the Hai River basin, China. *J. Hydrol.* 487: 24-38.
- Liu, X., X. J. Zhang, Q. Tang, and X. Z. Zhang. 2013. Effects of surface wind speed decline on modeled hydrological conditions in China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18: 2803-2813.
- Miranda, F. R., R. S. Gondim, and C. A. G. Costa. 2006. Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Agric. Water Manage.* 82: 237-246.
- Moratiel, R., J. M. Duran, and R. L. Snyder. 2010. Response of reference evapotranspiration to changes in atmospheric humidity and air temperature in Spain. *Climate Res.* 44: 27-40.
- Pérez-Ruiz, E. R., J. Garatuzo-Payán, C. J. Watts, J. C. Rodríguez, E. A. Yopez, and R. L. Scott. 2010. Carbon dioxide and water vapour Exchange in a tropical dry forest as influenced by North American Monsoon System (NAMS). *J. Arid Environ.* 74: 556-563.
- Ravelo, A. C., R. Sanz-Ramos y J. C. Douriet-Cárdenas. 2014. Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *Agriscientia* 31: 11-24.
- Reichstein, M., E. Falge, D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, T. Grünwald, K. Havránková, D. Janous, A. Knohl, T. Laurela, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J. Ourcival, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, and D. Yakir. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biol.* 11: 1424-1439.
- Rodríguez, J. C., J. Grajeda, C. J. Watts, J. Garatuzo-Payán, A. Castellanos-Villegas, J. Rodríguez-Casas, J. Saiz-Hernández, and V. Olavarrieta. 2010. Water use by perennial crops in the lower Sonora watershed. *J. Arid Environ.* 74: 603-610.
- Rodríguez, J. C., Ch. Watts, J. Garatuzo-Payán, M. A. Rivera, C. Lizárraga-Celaya, J. López-Elias, A. Ochoa-Meza, S. F. Moreno-Salazar y M. E. Rentería-Martínez. 2011. Evapotranspiración y coeficiente de cultivo en Chile banana (*Capsicum annuum* L.) en el Valle del Yaqui, México. *Rev. Cienc. Biol. Salud* 13: 28-35.
- Rosa, R. D., P. Paredes, G. C. Rodrigues, I. Alves, R. M. Fernando, L. S. Pereira, and R. G. Allen. 2012. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agric. Water Manage.* 103: 8-24.
- Salazar-Moreno, R., A. Rojano-Aguilar e I. L. López-Cruz. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tec. Cienc. Agua.* 5: 177-183.
- Sezen, S. M., A. Yazar, and S. Eker. 2007. Effect of drip irrigation regime on yield and quality of field grown bell pepper. *Agric. Water Manage.* 81: 115-131.
- Shukla, S., N. K. Shrestha, F. H. Jaber, S. Srivastava, T. A. Obreja, and B. J. Boman. 2014. Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in subtropical Florida. *Agric. Water Manage.* 132: 1-9.
- Smittle, D. A., W. L. Dickens, and J. R. Stansell. 1994. Irrigation regime affect yield and water use by bell pepper. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 119: 936-939.
- 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.
- Twine, T. E., W. P. Kustas, J. M. Norman, D. R. Cook, P. R. Houser, T. P. Meyers, J. H. Prueger, P. J. Starks, and M. L. Wesley. 2000. Correcting Eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. For. Meteorol.* 103: 279-300.
- Villagra, P., V. García-de Cortázar, R. Ferreyra, C. Aspillaga, C. Zúñiga, S. Ortega-Farías, and G. Sellés. 2014. Estimation of water requirements and Kc values of "Thompson Seedless" table grapes grown in the overhead trellis system, using the Eddy covariance method. *Chil. J. Agric. Res.* 74: 213-218.
- Zermeño-González, A., J. Munguía-López, J. A. Gil-Marín, L. Ibarra-Jiménez, R. Quezada-Martín, M. Cadena Zapata, M. A. García-Delgado y M. Cantú-Sifuentes. 2011. Intercambio de dióxido de carbono en Chile morrón cultivado en acolchado plástico. *Terra Latinoamericana* 29: 411-419.
- Zhang, B., Y. Liu, D. Xu, N. Zhao, B. Lei, D. R. Sosa, P. Paredes, T. A. Paco, and L. S. Pereira. 2013. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain. *Irrig. Sci.* 31: 1303-1316.
- Zhang, Z., F. Tian, H. Hu, and P. Yang. 2014. A comparison of methods for determining field evapotranspiration: Photosynthesis system, sap flow, and eddy covariance. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18: 1053-1072.