

ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN/TRANSPIRACIÓN EN UN CULTIVO DE TRIGO MEDIANTE RADIOMETRÍA TÉRMICA

Sánchez, J.M.⁽¹⁾, López-Urrea, R.⁽²⁾, Doña, C.⁽³⁾, Caselles, V.⁽⁴⁾, González-Piqueras, J.⁽⁵⁾

¹ Profesor, UCLM, Dpto. Física Aplicada, Plz. Manuel Meca s/n, 13400 Almadén, juanmanuel.sanchez@uclm.es

² Investigador, ITAP-FUNDESCAM, Polígono Campollano, Avda. 2ª-42 B, 02007 Albacete. rlu.itap@dipualba.es

³ Doctoranda, UV, Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica, C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, carolina.dona@uv.es

⁴ Catedrático, UV, Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica, C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Vicente.caselles@uv.es

⁵ Profesor, UCLM, Dpto. Física Aplicada, Av. España s/n, 02071 Albacete, jose.gonzalez@uclm.es

Resumen

En este trabajo se propone la aplicación de un modelo de balance de energía de dos fuentes que, junto con medidas de la temperatura de la superficie, proporcione valores horarios y diarios de los flujos energéticos en superficie, incluyendo la evapotranspiración real del cultivo de trigo (ET_c). Para mostrar la aplicación y utilidad del método se realizó un experimento en la primavera de 2014 sobre una plantación de trigo situada dentro de la finca experimental "Las Tiesas" en el término de Barrax, Albacete. Se midieron temperaturas del suelo y de la vegetación, además de variables meteorológicas y parámetros biofísicos, desde el momento de la siembra hasta la recolección. Los resultados se compararon con las medidas de un lisímetro de pesada instalado en la parcela, obteniendo unos errores de estimación de $\pm 0,10 \text{ mm h}^{-1}$ y $\pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$ a escalas horaria y diaria, respectivamente. Por su parte el valor de ET_c acumulado para toda la campaña fue solo el 4% mayor que el valor medido en el lisímetro. Además, el porcentaje entre la componente evaporativa (E) y transpirativa (T) fue de 30%-70% para el total de la campaña. El modelo también permite estimar los coeficientes de cultivo del trigo, y compararlos con los propuestos por FAO56.

Abstract

This work shows the application of a two-source energy balance model, together with surface temperature measurements, to derive hourly and daily values of land surface energy fluxes of wheat, crop evapotranspiration (ET_c) included. An experiment was carried out during the spring of 2014 in a wheat field located in the experimental farm of "Las Tiesas" in Barrax, Albacete. Soil and canopy radiometric temperatures were measured, as well as meteorological variables and biophysical parameters, from plantation to senescence. Results were compared to measurements in a weighing lysimeter installed within the wheat field. Estimation errors of $\pm 0.10 \text{ mm h}^{-1}$ and $\pm 0.9 \text{ mm d}^{-1}$ were obtained at hourly and daily scales, respectively. Cumulated value of ET_c for the whole campaign was only 4% over that registered in the lysimeter. Furthermore, a percentage 30% - 70% between evaporation (E) and transpiration (T) components was obtained for the full campaign. Modeled values of the wheat crop coefficients were also retrieved and compared to those proposed by FAO56.

1- Introducción

El trigo es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, cubriendo una extensión de 218 millones de hectáreas en 2013. Dentro del ámbito de la Unión Europea (UE) más de 25 millones de hectáreas se cultivaron de trigo en 2013, resultando en una producción de 143.3 millones de toneladas, lo que supone aproximadamente el 20% de la producción mundial. España es el quinto país productor dentro de la UE, con una extensión de 2,1 millones de hectáreas y una producción de 7,6 millones de toneladas (FAO 2014). Castilla y León es la región española con la mayor superficie cultivada de trigo (entorno a 780.000 ha), seguida por Castilla-La Mancha, con una extensión de más 320.000 ha (MAGRAMA 2014).

Conocer las necesidades hídricas del trigo, pasa por disponer de un buen conocimiento de la evapotranspiración. Lo más habitual y extendido para realizar un balance de agua entre el suelo y la planta, o estimar las necesidades hídricas del cultivo, es el uso del método conocido como FAO-56 (Allen et al. 1998). De acuerdo con la metodología de FAO-56, la evapotranspiración real del cultivo se estima combinando la evapotranspiración de referencia (ET_0) y los coeficientes de cultivo. Existen dos versiones del método FAO-56: la técnica del coeficiente de cultivo único, y la del coeficiente de cultivo dual. La primera se usa para expresar conjuntamente la transpiración de la planta y la evaporación del suelo a través de un coeficiente de cultivo (K_c). La técnica del coeficiente de cultivo dual consiste en utilizar dos coeficientes de cultivo distintos para representar la contribución de la planta (K_{cb}) y de la evaporación del suelo (K_e) (Allen et al. 1998). La técnica del coeficiente de cultivo dual puede mejorar la precisión en la estimación de ET_c cuando se dispone de una calibración previa adecuada de dichos coeficientes. Esta técnica se ha aplicado y explorado bajo una gran variedad de condiciones climáticas alrededor de todo el mundo (Hunsaker et al. 2005; Williams y Ayars 2005; López-Urrea et al. 2009, 2102, 2014; Campos et al. 2010; Howell et al. 2012; Zhang et al. 2013). Todos estos autores coinciden en que los valores de los mencionados coeficientes de cultivo pueden servir como punto de partida para la programación del riego, pero también destacan la necesidad de una corrección de estos coeficientes para ajustarlos a las condiciones locales para evitar los errores importantes que se pueden presentar debido a su naturaleza empírica.

Con este objetivo, en los últimos años se ha trabajado mucho en el marco de las posibilidades que ofrecen las medidas de Teledetección para estimar las necesidades hídricas de los cultivos, y de esta forma mejorar las programaciones de riego, y la productividad del agua. La combinación de un modelo de balance de energía de dos fuentes con medidas locales de temperatura radiométrica se ha mostrado como una técnica efectiva para estimar valores de evapotranspiración bajo una variedad de cultivos y condiciones ambientales (French et al. 2007; Sánchez et al. 2008, 2011, 2014; Colaizzi et al. 2012; Kustas et al. 2012). La técnica que se presenta en este trabajo se ha utilizado recientemente por Sánchez et al. (2014) para separar las componentes evaporativa y transpirativa, además de obtener coeficientes de cultivo dual para cultivos de girasol y colza. Todos los detalles sobre el modelo simplificado de balance de energía de dos fuentes (STSEB) empleado, así como del diseño experimental, pueden consultarse en Sánchez et al. (2014). En este trabajo nos centramos en los datos de una nueva campaña experimental que se llevó a cabo en la campaña de primavera de 2014 en un cultivo de trigo situado en una zona semiárida de la meseta sur de España.

2- Materiales y métodos

Este estudio se centra en un experimento llevado a cabo entre los meses de febrero y junio de 2014, en la finca experimental de “Las Tiasas” (2° 5'W, 39° 3'N, 695 m altitud)

situada en la provincia de Albacete. Se trata de una zona semiárida, caracterizada por un clima Mediterráneo templado. La zona concreta de estudio es una parcela de 100 x 100 m² que cuenta con un lisímetro de pesada (2,7 m largo, 2,3 m ancho y 1,7 m profundidad) instalado en el centro de la misma, con una resolución de 0,04 mm en equivalente de agua. Los lisímetros de pesada siguen siendo en la actualidad la técnica más precisa para la medida directa de la ET de los cultivos (Howell et al., 1995), si bien es cierto que su instalación y mantenimiento hace poco viable su uso extendido y operativo, quedando éste limitado a parcelas experimentales con fines de investigación.

El trigo (*Triticum aestivum* L. cv. 'Califa') se sembró el 4 de febrero con una separación entre filas de plantas de 15 cm y una población de semillas de 550 semillas por metro cuadrado (Fig. 1). Se realizó un esfuerzo para mantener el trigo dentro de los límites del lisímetro en el mismo estado de desarrollo y crecimiento que el cultivo en la parcela de protección. La parcela contaba con un sistema automatizado de riego por aspersión mediante cobertura total enterrada, con un marco de aspersores de 15 m x 12,5 m que permite suministrar una pluviometría de 8,6 mm h⁻¹. A lo largo de toda la duración del experimento el trigo se mantuvo bien regado, evitando condiciones de estrés hídrico en todo momento.



Figura 1. Montaje experimental sobre el lisímetro para los días julianos 55 y 129 (superior), y panorámica de la condiciones de la plantación del trigo para los días 153 y 174 (inferior).

Se realizaron medidas de proporción de vegetación (P_v) y altura de la planta, en tres zonas diferentes y de forma periódica. En cuanto a los radiómetros, se emplearon tres radiómetros de infrarrojo térmico (IRT) Apogees SI-121 (Apogee Instruments, Logan UT, USA). Se trata de instrumentos térmicos de banda ancha (8-14 μm) con una precisión de $\pm 0,2$ °C, un campo de visión de 18°, y un intervalo válido de temperaturas entre -30 y 65 °C. Uno de ellos se colocó a una altura de 2 m sobre el perímetro del lisímetro, apuntando a la superficie con una visión desde la vertical y midiendo de esta forma la temperatura efectiva el conjunto (T_R). Otro de los radiómetros se colocó a una altura de 20 cm directamente apuntando al suelo entre dos filas de plantas (Fig. 1) para registrar la temperatura del suelo (T_s). La temperatura de las plantas (T_c) se calculó a partir de T_R y T_s , empleando la información de P_v . Todas las temperaturas se sometieron al proceso de corrección atmosférica y de emisividad. Para la corrección atmosférica se empleó un tercer Apogee, colocado apuntando al cielo con un ángulo de 53° respecto a la vertical. Las medidas de temperatura comenzaron el día 42, una semana después de la siembra, y se extendieron hasta el final del desarrollo fenológico del trigo. Respecto a las variables meteorológicas, la

temperatura y humedad relativa del aire se midieron mediante un sensor HMP50 (Vaisala Inc., Helsinki, Finland). La velocidad del viento se midió a través de un anemómetro modelo A100R (VectorInstruments Ltd., UK). La radiación solar y la radiación incidente de onda larga se midieron respectivamente con sensores CM14 y CG2 (Kipp & Zonen Delft, Holland). Finalmente también se registraron medidas de radiación neta con un sensor NR- (Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands) instalado sobre el perímetro del lisímetro. Todos los datos se almacenaron cada 15 minutos, haciendo uso de un datalogger CR-1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, USA), y posteriormente se promediaron a escala horaria y diaria.

3- Resultados y discusión

Una vez registrados y procesados todos los datos necesarios para aplicar el modelo descrito en Sánchez et al. (2014), se procedió al cálculo de todos los términos de la ecuación de balance de energía, y a su promediado a escala horaria. Los valores estimados de ET_c , entre $-0,2$ y $1,2 \text{ mm h}^{-1}$, se compararon con los valores medidos en el lisímetro. En promedio se obtiene un error cuadrático medio (RMSE) de $\pm 0,10 \text{ mm h}^{-1}$, reforzado por una desviación sistemática (bias) prácticamente despreciable. Con el fin de observar la evolución de los valores diarios de ET_c , estimados y medidos, se ha elaborado la figura 2.

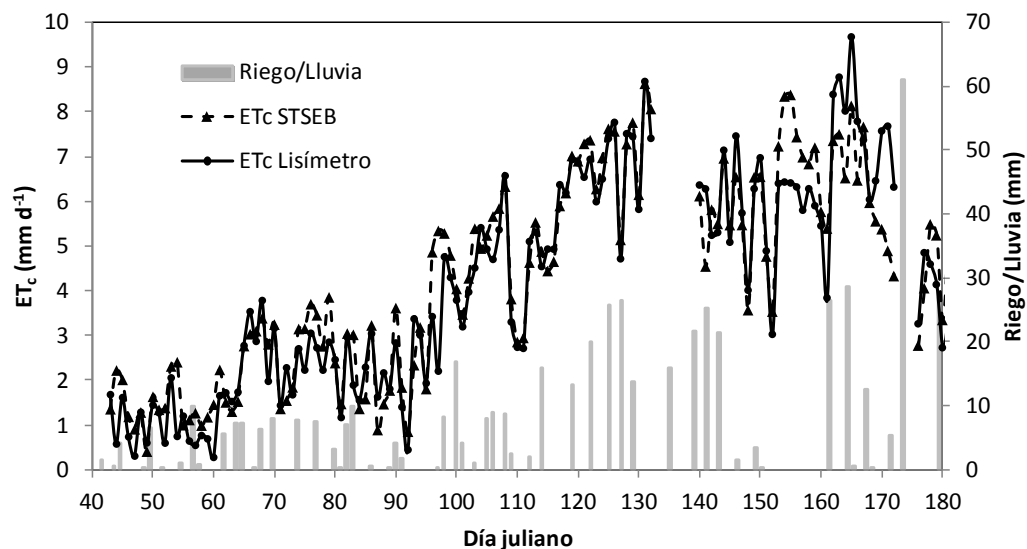


Figura 2. Evolución de los valores estimados y medidos de ET_c diaria para toda la campaña del trigo. También se incluye información de cantidades de lluvia y riego.

El promedio de ET_c diaria se sitúa por debajo de los 3 mm d^{-1} hasta finales de marzo, alcanzó su máximo a mediados de mayo con un pico entorno a los 9 mm d^{-1} , y fue descendiendo durante la fase de maduración hasta mediados de junio. En líneas generales, las estimaciones del modelo reproducen bastante bien los valores de ET_c medidos por el lisímetro a lo largo de toda la campaña, con la excepción de unos pocos días en los cuales se produjo algo de precipitación, y en las que hubo que recalcular las propias medidas del lisímetro. El análisis cuantitativo ofrece una ligera sobrestimación por parte del modelo de $0,08 \text{ mm d}^{-1}$ con un RMSE de $\pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$, y un coeficiente de determinación (r^2) de 0,863. Estos resultados están muy próximos a los obtenidos por ejemplo por otros autores. Si nos centramos en el cultivo del trigo, Zhang et al. (2013) obtuvieron unos valores de $RMSE = \pm 0,6 \text{ mm d}^{-1}$ y r^2 de 0,92. Un error muy similar de $RMSE = \pm 0,4 \text{ mm d}^{-1}$, se presenta en el trabajo de Gao et al. (2014). Por su parte, Zhang et al. (2015) obtuvieron una desviación media diaria de $\pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$.

Sumando los valores de ET_c diario, y calculando de esa forma el acumulado a lo largo del desarrollo del trigo, el valor total de evapotranspiración para toda la campaña predicho por el modelo es de 550 mm. Este valor resulta solo un 4% superior al medido directamente por el lisímetro, 530 mm (ver Figura 3). Es interesante destacar que el acuerdo entre los valores medidos y estimados es particularmente bueno para la primera fase de desarrollo del trigo ($DOY < 90$), ya que estas condiciones de suelo desnudo o baja proporción de vegetación tradicionalmente suponen un desafío para los modelos de balance de energía, o de balance de agua en suelo.

Uno de los puntos fuertes del modelo empleado es que permite la partición de la ET_c total en sus componentes evaporativa y transpirativa. Así pues, se ha llevado a cabo dicha separación para este estudio sobre el trigo. La figura 3 incluye la evolución por separado de E y T. La evaporación domina claramente para coberturas de vegetación por debajo de 0,2 ($DOY < 90$). El cociente T/E se va incrementando rápidamente, y la transpiración pasa a convertirse en la principal contribución a la ET_c . En términos cuantitativos, el total acumulado de E resultó ser de 166 mm, con aproximadamente dos terceras partes concentradas antes del DOY 90. Por su parte, el total acumulado de T fue de 381 mm. Esto supone que un 30% del total acumulado de evapotranspiración del trigo corresponde a evaporación del suelo. Estos resultados están de acuerdo con trabajos previos relativos al cultivo del trigo. López-Urrea et al. (2009) obtuvieron una componente evaporativa del 24% (135 mm) del total de ET_c . Zhang et al. (2013) observaron que la evaporación del suelo suponía el 28% del total de ET_c para toda la campaña de desarrollo de un trigo de invierno. Sun et al. (2006) mostraron un 30-35%, y Sadras and Rodriguez (2010) un 22-34% para un trigo de invierno en Australia. Shahrokhnia and Sepaskhah (2013) emplearon micro-lisímetros para medir la evaporación del suelo y encontraron un valor entorno al 30% del total de ET_c del trigo.

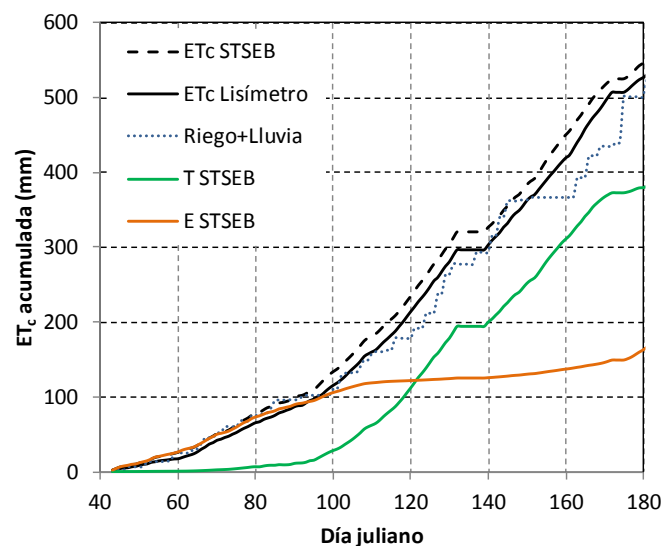
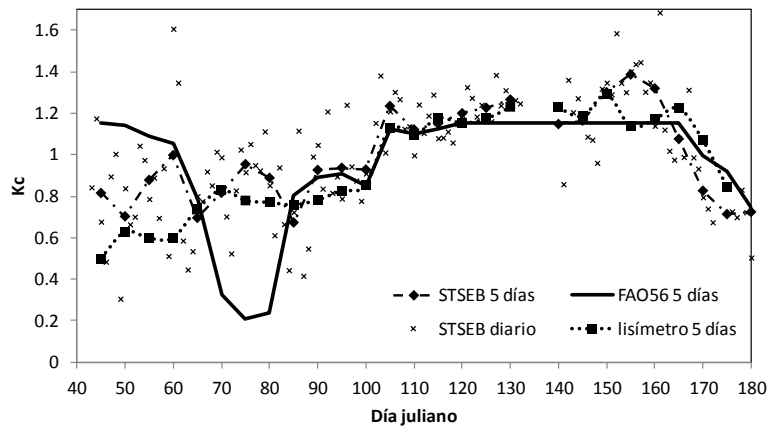


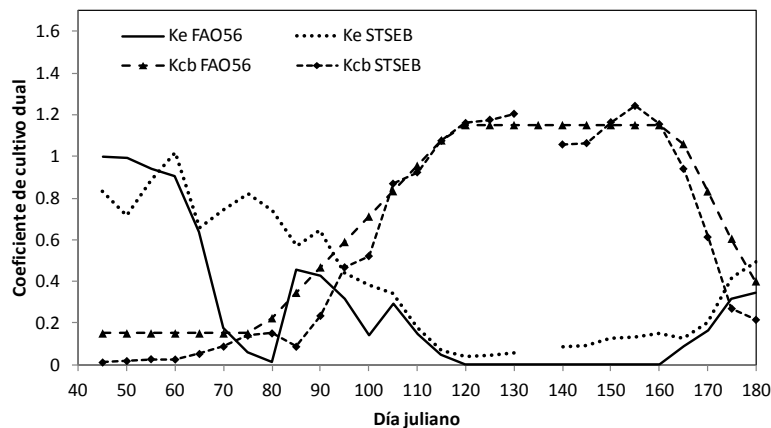
Figura 3. Valores acumulados de las estimaciones de ET_c , E, y T para toda la campaña del trigo, junto con los valores observados de ET_c , y la cantidad registrada de riego+lluvia.

Para estimar los coeficientes de cultivo K_c se ha calculado el cociente entre las medidas de lisímetro, y las predicciones del modelo, con los valores de evapotranspiración de referencia (ET_0) calculados previamente siguiendo la ecuación de FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al. 1998). Los resultados de K_c se muestran en la figura 4a. Los valores

representan promedios de 5 días para evitar la dispersión que introducen los eventos de riego. Los valores promedios obtenidos mediante el lisímetro son: K_{c-ini} : 0,67, K_{c-med} : 1,20 and K_{c-fin} : 0,41, mientras que los estimados a través de los cálculos del modelo son: K_{c-ini} : 0,84, K_{c-med} : 1,23 and K_{c-fin} : 0,50. Estos resultados están muy próximos a los obtenidos por López-Urrea et al. (2009) sobre un trigo en la misma zona, empleando medidas de lisímetro: K_{c-med} : 1,20 and K_{c-end} : 0,15. La diferencia en el valor de K_{c-fin} podría deberse a los valores más altos de ET_c al final de la fase de crecimiento en nuestras medidas, consecuencia del valor relativamente alto de $P_v=0,23$ todavía reinante en el DOY 180. Otros autores han obtenido valores de 0,30-0,45 para K_{c-ini} , de 1,10-1,20 para K_{c-med} , y K_{c-fin} en el intervalo 0,25-0,45 (Gontia and Tiwari 2010; Kjaersgaard et al. 2008; Howell et al. 2006; Allen et al. 1998). Los valores de K_{c-med} son similares a nuestros promedios y las ligeras variaciones se pueden deber a diferencias en factores como: la fecha de siembra, la duración de las fases de desarrollo, la variedad del trigo, prácticas culturales y condiciones climáticas. Las diferencia en K_{c-ini} y K_{c-fin} puede deberse a los valores más altos de evaporación durante estas dos fases en nuestro experimento.



(a)



(b)

Figura 4. Comparación entre los valores de coeficientes de cultivo estimados a través del modelo, los calculados a partir de medidas del lisímetro, y los propuestos por FAO56: (a) K_c , (b) K_e and K_{cb}

De una forma similar, procedimos al cálculo de los coeficientes de cultivo dual K_e y K_{cb} como los cocientes E/ET_0 y T/ET_0 , respectivamente. En la figura 4b se muestra la

comparación entre los resultados obtenidos y los valores propuestos por FAO-56. Todos ellos corresponden a valores promediados de 5 días. Durante las primeras fases de desarrollo del trigo se observan valores altos de K_e debido a los riegos frecuentes en esas fechas. Durante la fase de reproducción el K_{cb} aumentó rápidamente hasta alcanzar un pico de 1,20. Los valores promedio de K_{cb} obtenidos a través de los cálculos STSEB para cada fase resultaron: K_{cb_ini} : 0,06, K_{cb_med} : 1,13 y K_{cb_fin} : 0,22. Los valores modelados de K_{cb_ini} son más pequeños que los predichos por FAO-56, mientras que los estimados de K_{cb_med} están muy próximos. En términos de K_e , FAO-56 subestima los valores modelados, principalmente al inicio de la fase de crecimiento. Conviene recordar que la metodología de FAO aplica una serie de parámetros y medidas de campo para predecir la evaporación del suelo, y utiliza algunas suposiciones que pueden conducir a ciertos errores. Además, el coeficiente K_e se ve altamente afectado por la estrategia de riego, el tipo de suelo, la cobertura de vegetación, y las condiciones meteorológicas locales. Zhang et al. (2013) estimaron los valores inicial, a mitad de temporada, y final de K_{cb} de 0,25, 1,15 y 0,30, respectivamente. Valores muy similares fueron publicados por Shahrokhnia and Sepaskhah (2013), 0,18-0,27, 1,11-1,16, y 0,11-0,14 para las distintas etapas de crecimiento. Gao et al. (2014) también obtuvieron resultados de K_{cb} entre 0,22-0,27, 1,02-1,10, y 0,25-0,43, para la fase inicial, intermedia, y final, respectivamente, en un campo de trigo con riego por aspersión. Todos estos valores de K_{cb_med} y K_{cb_fin} están de acuerdo con nuestras estimaciones, mientras que los de K_{cb_ini} están claramente por encima de nuestro valor predicho promedio, seguramente debido a una mayor cobertura de vegetación durante la fase inicial de crecimiento en esos trabajos, como ya se mencionó anteriormente.

4- Conclusiones

En este trabajo se muestra el potencial de las técnicas basadas en la combinación del balance de energía en superficie junto con temperaturas radiométricas para el cálculo de la evapotranspiración de cultivo. Nos centramos en una plantación de trigo de primavera situado en una zona semiárida del centro de la Península Ibérica, pero la metodología sería perfectamente aplicable a cualquier otra variedad de trigo, y bajo cualquier otro tipo de condiciones ambientales y climáticas. La comparación entre los valores estimados y medidos mediante lisímetro de pesada muestran un RMSE de $\pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$, en sintonía con algunos otros resultados previos usando la misma técnica sobre otros cultivos como el sorgo, el girasol, o la colza. Además, este error se mantiene para más del 80% de los 130 días de duración de este estudio, con independencia de las condiciones de cobertura de vegetación. La precisión del modelo mejora cuando se trata de calcular los valores acumulados para toda la temporada del trigo, con una desviación de tan solo el 4% (20 mm) sobre el total de los 530 mm medidos en el lisímetro. La separación de ET_c en sus componentes E y T muestra que el 30% del total de ET_c corresponde a la evaporación de agua desde el suelo, con la mayor parte concentrada en la fase inicial cuando los valores de cobertura de vegetación son todavía inferiores al 20%.

Con la metodología presentada también es posible calcular coeficientes de cultivo, único y dual. Los resultados de K_c están de acuerdo con los obtenidos a través de medidas de lisímetro, y con los valores de K_{cb} y K_e publicados por otros autores sobre trigo. Por tanto, esta técnica se podría emplear en el ajuste local de los valores de K_c propuestos por FAO, como una alternativa en aquellas plantaciones en las que no se disponga de lisímetros de pesada.

5.- Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos CGL2013-46862-C2-1/2-P, y la Generalitat Valenciana con el



proyecto PROMETEUII/2014/086. Los autores quisieran agradecer al apoyo logístico en el mantenimiento de la instrumentación de Laura Martínez y Juan A. de la Vara.

6- Bibliografía

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, in: Proceedings of the FAO Irrigation and Drainage Paper No.56. Roma, Italy
- Campos I, Neale CMU, Calera A, Balbontín C, González-Piqueras, J. (2010) Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinífera* L.). *Agricultural Water Management* 98:45–54
- Colaizzi PD, Kustas WP, Anderson, MC, Agam N, Tolk JA, Evett SR, Howell TA, Gowda PH, O’Shaughnessy SA (2012) Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures. *Adv Water Res* 50:134-151
- FAO (2014) FAO Statistical Database (online). Consultation: January 20, 2014. <http://faostat3.fao.org/home/E>
- French AN, Hunsaker DJ, Clarke TR, Fitzgerald GJ, Luckett WE, Pinter PJ. Energy balance estimation of evapotranspiration for wheat grown under variable management practices in Central Arizona. *Trans. ASABE* 2007, 50(6):2059-71
- Gao Y, Yang L, Shen X, Li X, Sun J, Duan A, Wu L (2014) Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency. *Agr Water Manage* 146:1-10
- Howell TA, Schneider AD, Dusek DA, Marek TH, Steiner JL. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. *Trans. ASAE*, 1995, 38(4):1019-24
- Howell TA, Evett SR, Tolk JA, Copeland KS, Dusek DA, Colaizzi PD (2006) Crop coefficients developed at Bushland, Texas for corn, wheat, sorghum, soybean, cotton, and alfalfa. In: *Proceeding of the World Environmental and Water Resources Congress*, Omaha, NE, p. 9.
- Howell TA, Evett SR, Tolk JA, Copeland KS, Marek TH (2012) Evapotranspiration and crop coefficients for irrigated sunflower in the Southern High Plains. *ASABE Paper No. 12-1338306*. St. Joseph, Mich.: ASABE
- Hunsaker DJ, Pinter Jr PJ, Kimball BA (2005) Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index *Irri Sci* 24(1):1-14
- Kjaersgaard JH, Plauborg FL, Mollerup M, Petersen CT, S. Hansen (2008) Crop Coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. *Agric Water Manag* 95:918-924
- Kustas WP, Alfieri JG, Anderson MC, Colaizzi PD, Prueger JH, Evett SR, Neale CMU, French, AN, Hipps LE, Chávez JL, Copeland KS, Howell TA (2012) Evaluating the two-source energy balance model using local thermal and surface flux observations in a strongly advective irrigated agricultural area. *Adv Water Res* 50:120-133
- López-Urrea R, Martín de Santa Olalla F, Fabeiro C, Moratalla A (2006) Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agr Water Manage* 85:15–26
- López-Urrea, R, Montoro A, González-Piqueras J, López-Fuster P, and Fereres E (2009) Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agr Water Manage* 96:1305–1310
- López-Urrea R, Montoro A, Mañas F, López-Fuster P, Fereres E (2012) Evapotranspiration and Crop Coefficients from Lysimeter Measurements of mature ‘Tempranillo’ wine grapes. *Agric Water Manage* 112:13-20
- López-Urrea R, Montoro A, Trout TJ (2014) Consumptive Water Use and Crop Coefficients of Irrigated Sunflower. *Irrig Sci* 32(2): 99-109



- MAGRAMA (2014) Anuario de Estadística 2013. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. pp. 1095.
- Sadras VO, Rodriguez D (2010) Modelling the nitrogen-driven tradeoff between nitrogen utilisation efficiency and water use efficiency of wheat in eastern Australia. *Field Crops Res.* 118:297–305
- Sánchez JM, Kustas WP, Caselles V, Anderson M (2008) Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sens Environ* 112:1130-1143
- Sánchez JM, López-Urrea R, Rubio E, Caselles V (2011) Determining water use of sorghum from two-source energy balance and radiometric temperatures. *Hydrol Earth Syst Sc* 15:3061-3070
- Sánchez JM, López-Urrea R, Rubio E, González-Piqueras J, Caselles V (2014) Assessing crop coefficients of sunflower and canola using two-source energy balance and thermal radiometry. *Agr Water Manage* 137:23-29
- Shahrokhnia MH, Sepaskhah AR (2013) Single and dual crop coefficient and crop evapotranspiration for wheat and maize in a semi-arid region. *Theor Appl Climatol*, 114:495-510
- Sun HY, Liu CM, Zhang XY, Shen YJ, Zhang YQ (2006) Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agric Water Manag* 85:211–218
- Williams LE, Ayars JE (2005) Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132:201–211:
- Zhang B, Liu Y, Xu D, Zhao N, Lei B, Rosa RD, Paredes P, Paço TA, Pereira LS (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 S, Zhao H, Lei H, Shao H, Liu T (2015) Winter wheat productivity evaluated by the developed remote sensing evapotranspiration model in Hebei Plain, China. *The Scientific World Journal*, article ID 384086.