

Seguimiento de los flujos de calor sensible y calor latente en vid mediante la aplicación del balance de energía METRIC

González-Piqueras, J.*¹, Villodre, J.¹, Campos, I.², Calera, A.¹, Balbontín, C.³

¹Grupo de Teledetección y SIG, Universidad de Castilla-La Mancha, 02071 Campus de Albacete, Albacete, España.

²Robert B. Daugherty Water for Food Institute, University of Nebraska. Nebraska Innovation Campus. 2021 Transformation Dr. Ste 3220. Lincoln, NE 68583. USA.

³Instituto de Investigaciones Agropecuarias. INIA Intihuasi. Colina San Joaquín s/n, La Serena, Coquimbo, Chile.

Resumen: En este trabajo se presenta el seguimiento de los flujos de energía en un cultivo de vid bajo riego, obtenidos a partir del modelo de balance de energía METRIC (Allen *et al.*, 2007b). Este modelo resulta operativo al utilizar un método de calibración interna definido a partir de la selección de píxeles con valores extremos dentro de la escena. De esta manera se obtuvieron mapas de radiación neta (Rn), flujo de calor en suelo (G), calor sensible (H), calor latente (LE), evapotranspiración (ET) y coeficiente de cultivo (Kc). Estos valores fueron validados con registros obtenidos en el sitio, utilizando una torre de flujos turbulentos (covarianza de torbellinos). El RMSE fue 43 W m⁻², 33 W m⁻², 55 W m⁻² y 40 W m⁻² en Rn, G, H y LE, los cuales en términos relativos representan un 8%, 29 %, 21% y 20% respectivamente. A escala diaria el RMSE para la ET fue de 0,58 mm día⁻¹, con un valor de Kc máximo y estable de 0,42±0,08. Estos resultados permiten considerar que el método es adecuado y operativo para el seguimiento de la evapotranspiración y cálculo de las necesidades hídricas del viñedo evaluado.

Palabras clave: Evapotranspiración, coeficiente de cultivo, calor latente, vid, balance de energía.

Monitoring the latent and sensible heat fluxes in vineyard by applying the energy balance model METRIC

Abstract: The monitoring of the energy fluxes over vineyard applying the one source energy balance model METRIC (Allen *et al.*, 2007b) are shown in this work. This model is considered operative because it uses an internalized calibration method derived from the selection of two extreme pixels in the scene, from the minimum ET values such as the bare soil to a maximum that corresponds to full cover active vegetation. The model provides the maps of net radiation (Rn), soil heat flux (G), sensible heat (H), latent heat (LE), evapotranspiration (ET) and crop coefficient (Kc). The flux values have been validated with a flux tower installed in the plot, providing a RMSE for instantaneous fluxes of 43 W m⁻², 33 W m⁻², 55 W m⁻² and 40 W m⁻² on Rn, G, H and LE. In relative terms are 8%, 29%, 21% and 20% respectively. The RMSE at daily scale for the ET is 0.58 mm day⁻¹, with a value in the crop coefficient for the mid stage of 0.42±0.08. These results allow considering the model adequate for crop monitoring and irrigation purposes in vineyard. The values obtained have been compared to other studies over vineyard and with alternative energy balance models showing similar results.

Key words: Evapotranspiration, crop coefficient, latent heat, vineyard, energy balance.

* Autor para la correspondencia: jose.gonzalez@uclm.es

1. Introducción

La evapotranspiración (ET) es un componente clave en la gestión de los recursos hídricos, siendo además un parámetro básico de entrada en los modelos de balance hidrológico. La teledetección aporta la capacidad de extender la determinación de la evapotranspiración sobre grandes áreas del territorio. Gracias a los avances en los últimos años en la variedad y calidad en los datos remotos (considerando no sólo los datos de satélite sino también los suministrados por distintas plataformas como UAV's o ultraligeros), la teledetección se está utilizando cada vez con mayor frecuencia como una herramienta en la gestión de grandes áreas, así como en la implementación de agricultura de precisión. De este modo, el seguimiento de los flujos de energía, en particular el calor latente (LE), permite diagnosticar situaciones de estrés en cultivos y además planificar sus necesidades hídricas.

Actualmente existen dos líneas principales para la determinación de la evapotranspiración desde datos remotos, por un lado los modelos de balance de agua en suelo asistido por satélite (Padilla *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2012) y por otro los modelos de balance de energía (Norman *et al.*, 1995; Bastiaanssen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2007b; Sánchez *et al.*, 2008a; Sánchez *et al.*, 2008b; González-Dugo *et al.*, 2009; Sanchez *et al.*, 2011). En los primeros, los datos de teledetección se utilizan para caracterizar la cubierta vegetal a través de la determinación de parámetros biofísicos, principalmente los coeficientes de cultivo (K_c) y la fracción de cobertura vegetal (Gonzalez-Dugo y Mateos, 2008; Padilla *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2012). Estos modelos utilizan además datos meteorológicos para determinar la evapotranspiración de referencia (E_{To}) y combinada con el coeficiente de cultivo ajustado a la disponibilidad de agua en suelo, estimar la evapotranspiración de los cultivos, E_{Tc} (Allen *et al.*, 1998). Así, se determinan tanto los consumos de agua, como la predicción de necesidades hídricas en cultivos y por este motivo son considerados como modelos predictivos. No obstante, se deben calibrar a las condiciones locales de suelo y cubierta vegetal. Por su parte, los modelos de balance de energía se distinguen principalmente en dos tipos: de una fuente (Bastiaanssen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2007a) o de dos fuentes (Kustas,

1990; Sánchez *et al.*, 2008a), según consideren los flujos de calor latente (LE) y sensible (H) al conjunto suelo-cubierta vegetal o por separado. Estos modelos parten de la ecuación de balance de energía en superficie y determinan el flujo LE como residuo de la misma, una vez estimadas la radiación neta (R_n), el flujo de calor en suelo (G) y H. Introducen, además de los datos procedentes de teledetección en el rango del visible e infrarrojo cercano (NIR), los datos de temperaturas de superficie a partir del infrarrojo térmico, y del aire a partir de estaciones agrometeorológicas en tierra. Estos modelos permiten determinar la ET real en el instante de observación y por este motivo son considerados como modelos de diagnóstico. En el modelo de dos fuentes, el flujo de calor latente desde la cubierta vegetal verde y el suelo, se determinan por separado a partir de la ecuación de Priestley-Taylor (Norman *et al.*, 1995) dentro de la ecuación de balance de energía en superficie. Se considera un modelo de sólida base física al exigir datos de entrada precisos, tanto desde las estaciones en tierra, como los obtenidos desde plataformas remotas (bajo correcciones de atmósfera en el rango visible e infrarrojo cercano y también de emisividad en el infrarrojo térmico). Éste tipo de modelo ofrece resultados muy consistentes en gran variedad de cubiertas agronómicas y sistemas naturales complejos, tanto a nivel de campo con medida puntual, como a escala de datos remotos (González-Dugo *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2014). Una alternativa más simplificada y orientada hacia un carácter operacional, son los modelos de una fuente, los cuales estiman los flujos de balance de energía sin distinguir entre cubierta vegetal y suelo. Estos modelos se basan en el método de calibración por modelización inversa de condiciones extremas (Bastiaanssen *et al.*, 1998). Esto quiere decir que a partir de dos píxeles que definan condiciones extremas de ET en la imagen (suelo desnudo con valores cercanos a cero y un cultivo de referencia o cuerpo de agua) permiten calibrar el modelo y escalar los valores de los flujos entre estos extremos. La principal ventaja de estos modelos radica en que eliminan sesgos en la ecuación del balance de energía, debidos a la determinación de la transmisividad, la temperatura absoluta, albedo, flujo de calor del suelo, radiación neta, rugosidad de la superficie y temperatura del aire, de forma que reducen el tiempo invertido en el procesado

de los datos de entrada. Los modelos SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) (Bastiaanssen *et al.*, 1998) y METRIC (*Mapping EvapoTranspiration with high Resolution and Internalized Calibration*) (Allen *et al.*, 2007b; Allen *et al.*, 2011) son probablemente los más utilizados de este tipo. El modelo METRIC se ha diseñado para cubiertas agrícolas como una evolución de SEBAL, al estar formulado en su calibración a partir de píxeles de suelo de uso agrícola y cultivos de referencia como alfalfa o maíz. En este trabajo se ha seleccionado METRIC porque presenta la ventaja de que estas cubiertas se ajustan más a la ET de los cultivos que las masas de agua, está enfocado hacia un uso operacional, se beneficia del conocimiento de la fenología en las zonas de uso agrícola, y ha sido aplicado con éxito en cultivos herbáceos y leñosos (Carrasco-Benavides *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2012; Allen *et al.*, 2013b; Trezza *et al.*, 2013; Pôças *et al.*, 2014).

El modelo METRIC permite determinar de forma precisa la evapotranspiración sobre grandes áreas gracias a la identificación de los píxeles extremos, conocidos como *hot* y *cold* píxel. Esta identificación no es fácil y requiere de experiencia por parte del usuario, como se detallará en la sección de metodología. En este trabajo, el modelo fue aplicado en una zona vitícola, donde además existe una amplia variedad de cultivos tanto de secano como de regadío y las parcelas donde se ubican los píxeles de calibración son conocidas y accesibles a lo largo del año. Se dispuso además, de una adecuada red de estaciones meteorológicas a partir de las cuales se obtuvieron datos de velocidad de viento, temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar, para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o).

Se ha seleccionado el cultivo de la vid por ser de gran interés socioeconómico en España y particularmente en Castilla-La Mancha, región con la mayor producción vitícola de España y uno de los grandes productores mundiales. Actualmente, gran parte de la superficie cultivada con vides se ha transformado al regadío, permitiendo garantizar altas producciones y calidad de la uva. Esta transformación, que se viene produciendo en los últimos quince años, se ha implantado principalmente con riego localizado (goteo) y plantas con estructura en espaldera. De este modo, un

importante volumen de los recursos hídricos de la región se ha derivado al riego de esta cubierta, siendo necesario hoy en día el desarrollo de herramientas que permitan el seguimiento de los flujos de agua y energía en este tipo de cultivos a gran escala.

El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad del modelo de balance de energía METRIC para realizar un seguimiento de los flujos de energía en un cultivo leñoso bajo riego como es la vid y definir sus necesidades hídricas durante la temporada de crecimiento.

2. Material y Métodos

2.1. Área de estudio y medidas en campo

La zona de estudio se encuentra localizada en la provincia de Albacete, España (39° 16' 34", 1° 58' 32'). La zona tiene un clima mediterráneo semiárido, con una precipitación media de 340 mm/año y una temperatura promedio de 13,6°C (INM, 2004). El viñedo evaluado tiene una superficie total de 26 ha, compuesto por plantas de la variedades Tempranillo, Syrah, Cabernet y Merlot. El cultivo es regado mediante un sistema de riego por goteo y es conducido en espaldera vertical, con hileras orientadas en dirección nortesur y separación entre plantas de 1,5 m y entre hileras de 3 m. El manejo del riego consiste en la aplicación de láminas de agua de 22 mm cada doce días en 12 sectores de riego. El cultivo se encuentra libre de malas hierbas, ocupando el suelo desnudo un 65% de la superficie en instantes de máximo desarrollo vegetativo del cultivo.

Para obtener los valores de los componentes del balance de energía en tierra, en la parcela bajo estudio se instaló una torre de flujos turbulentos (covarianza de torbellinos, EC) desde junio hasta noviembre de 2007. Dicha estación está compuesta por un analizador infrarrojo de gases (mod. LI-7500, LI-COR, Inc.), un anemómetro sónico 3D (CSAT3, Campbell Scientific, Inc.), un radiómetro neto de cuatro vías (mod. CNR-1, Kipp & Zonen) y un set de platos de flujo de calor (mod. HFP01-SC) junto a termopares para estimar el flujo de calor del suelo (Payero *et al.*, 2005). Tanto el anemómetro sónico como el analizador de gases

se ubicaron a 3,0 m sobre el suelo. La zona de influencia en la medida de la torre, en la dirección predominante del viento (principalmente noroeste), es de una longitud aproximada de 207 m. Los datos se han procesado para obtener los flujos a intervalos de 30 minutos (Campos *et al.*, 2010). Para comparar los datos medidos con el modelo se les ha aplicado el cierre forzado del balance de energía utilizando el método del LE residual, cumpliendo en ambos casos el principio de conservación de la energía (Baltontin-Nesvara *et al.*, 2011). Asimismo, se determinó la función *foot-print* o función huella normalizada la cual corresponde a la superficie representativa en la medida de los flujos de la torre para cada día de pasada del satélite (Horst y Weil, 1994) y se utilizó para comparar con los datos de flujo instantáneos espacialmente distribuidos obtenidos desde satélite.

Los valores de ETo en el momento de adquisición de las imágenes de satélite, fueron estimados utilizando datos meteorológicos de una estación meteorológica (*anchor station*) ubicada en la finca de Las Tiesas (Barrax, Albacete) cercana a la zona de estudio. La ETo se obtuvo aplicando el modelo de ASCE-Penmann-Monteith a partir de los datos cada diez minutos, para aproximar la medida a la hora de paso del satélite.

2.2. Datos de satélite

Durante la temporada de desarrollo del viñedo, se utilizaron un total de 9 imágenes Landsat-5 TM, las cuales abarcaron desde el 24 de junio hasta el 28 de septiembre de 2007 (Figura 1a). Las fechas, indicando la órbita y la pasada (*path/row*), fueron: 24 de junio (200/33), 3 de julio (199/33), 10 de julio (200/33), 19 de julio (199/33), 26 de julio (200/33), 4 agosto (199/33), 27 agosto (200/33), 5 septiembre (199/33) y 28 de septiembre (200/33). Se ha aplicado el modelo sobre la zona de solape entre la órbita 199 y 200 de Landsat 5 para obtener mayor frecuencia de datos de satélite. Estas imágenes presentan tres bandas en el visible (0,497-0,607 μm , 0,603-0,697 μm , 0,704-0,814 μm), una en el infrarrojo cercano (0,809-1,036 μm) y dos en el infrarrojo medio (1,567-1,784 μm , 2,097-2,349 μm) con una resolución espacial de 30 m. La banda térmica (10,45-12,42 μm) presenta una resolución espacial de 120 m. Las imágenes se han suministrado corregidas geométricamente. Aunque el modelo METRIC no requiere una corrección

atmosférica precisa dado que el módulo de corrección atmosférica para los datos en el óptico y NIR viene implementado en el software profesional de teledetección, no resulta costosa su aplicación y por ello las imágenes se han corregido atmosféricamente, con el objetivo de reducir su influencia. La corrección atmosférica de los datos en el óptico se ha hecho aplicando el modelo MODTRAN4 (Berk *et al.*, 1998) implementado en el módulo FLAASH del software ENVI® para Landsat 5TM. Se ha utilizado el modelo atmosférico de verano latitud media, con el modelo de aerosoles rural, visibilidad inicial de 40 km, y determinación de aerosoles a partir del modelo de 2 bandas (K-T).

La temperatura de superficie (T_s) se ha obtenido corrigiendo el canal térmico de Landsat de atmósfera y emisividad a partir de la función invertida de Planck (Allen *et al.*, 2007b; Coll *et al.*, 2010)

$$T_s = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{B(T)} + 1\right)} \quad (1)$$

$$B(T) = \frac{L_{sen} - L_{up}}{\varepsilon\tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L_{down} \quad (2)$$

Siendo L_{sen} la radiancia registrada por el sensor, L_{up} es la radiancia emitida por la atmósfera hacia el sensor, L_{down} es la radiancia que incide sobre la superficie observada, τ es la transmisividad atmosférica y ε es la emisividad en el ancho de banda del sensor. $B(T)$ la radiancia en superficie, y k_1 y k_2 son las constantes de calibración ($k_1=607,76 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ y $k_2=1260,6 \text{ }^\circ\text{K}$) para Landsat 5. Existen varias metodologías para determinar la emisividad de la cubierta, muchas de ellas a partir del LAI (Allen *et al.*, 2007b) usando datos en el techo de la atmósfera, o de la fracción de cobertura a partir de las reflectividades corregidas atmosféricamente (Valor y Caselles, 1996). En este trabajo se obtiene la emisividad para cada píxel mediante el modelo de la cobertura vegetal a partir de los datos en el infrarrojo cercano y el rojo (Valor y Caselles, 1996):

$$\varepsilon = \varepsilon_{veg} P_V + \varepsilon_{suelo} (1 - P_V) (1 - 1,74 P_V) + 1,7372 P_V (1 - P_V) \quad (3)$$

$$P_V = \frac{1 - \frac{NDVI}{NDVI_{suelo}}}{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_{suelo}}\right) - K \left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_{veg}}\right)} \quad (4)$$

Siendo $\varepsilon_{veg}=0,985$ y $\varepsilon_{suelo}=0,960$ la emisividad de suelo y vegetación respectivamente, P_v es el porcentaje de cobertura vegetal, $NDVI_{suelo}$ y $NDVI_{veg}$ es el índice de vegetación de diferencia normalizada para suelo desnudo y cubierta efectiva completa. El factor K se calcula a partir de la reflectividad de vegetación y suelo en el infrarrojo cercano (NIR) y rojo respectivamente como $K=(\rho_{NIRveg}-\rho_{Rveg})/(\rho_{NIRsuelo}-\rho_{Rsuelo})$.

Los parámetros atmosféricos necesarios para la corrección, L_{up} , L_{down} y τ se obtienen a partir de la herramienta de corrección atmosférica del térmico (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) desarrollada para sensores en el térmico monocanal como Landsat TM, ETM+ y Landsat 8. Esta herramienta utiliza los perfiles atmosféricos de NCEP como datos de entrada del modelo MODTRAN-4.

2.3. El modelo METRIC

El modelo METRIC determina el flujo de calor latente LE ($W \cdot m^{-2}$) como residuo de la ecuación de balance de energía (Allen *et al.*, 2007b)

$$LE = R_n - H - G \quad (5)$$

Donde R_n es el flujo de radiación neta ($W m^{-2}$), H es el flujo de calor sensible ($W m^{-2}$), y G el flujo de calor en suelo ($W m^{-2}$). Para cada píxel la radiación neta se obtiene a partir de

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) \cdot R_{L\downarrow} \quad (6)$$

Siendo α el albedo de la superficie obtenido a partir de la reflectividad de la superficie en cada banda (ρ_i , $i=1,2,3,4,5$ y 7) y calculado como $\alpha=0,254 \cdot \rho_1+0,149 \cdot \rho_2+0,147 \cdot \rho_3+0,311 \cdot \rho_4+0,103 \cdot \rho_5+0,036 \cdot \rho_7$ (Tasumi *et al.*, 2008). $R_{s\downarrow}$ es la radiación de onda corta incidente ($W m^{-2}$) que se ha obtenido según el modelo ASCE-EWRI descrito en Allen *et al.* (2007a) a partir de los parámetros de la imagen (coordenadas y hora de adquisición) y datos de las estaciones meteorológicas (vapor de agua y presión atmosférica). Para superficies que no sean llanas, se utiliza el Mountain Model para el cual es necesario contar con un modelo digital de elevaciones que permita calcular el ángulo de incidencia solar en cada píxel. $R_{L\uparrow}$ es la radiación de onda larga ascendente ($W m^{-2}$) determinada a partir de la Ley de Stephan-Boltzmann teniendo en cuenta la temperatura de superficie (T_s) obtenida del canal térmico de Landsat y la emisividad

de la superficie ε_0 integrada al espectro solar (Allen *et al.*, 2007b). El término $R_{L\downarrow}=\varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4$, se obtiene a partir de la emisividad de la atmósfera ($\varepsilon_a=0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09}$) aplicando el modelo ASCE-EWRI citado anteriormente para la transmisividad atmosférica τ_{sw} .

G se determina para cada píxel como una fracción de la radiación neta (Allen *et al.*, 2007b):

$$\begin{cases} G = (0,05 + 0,18e^{-0,521 \cdot LAI}) \cdot R_n & \text{para } LAI \geq 0,5 \\ G = 1,8(T_s - 273,15) + 0,084 \cdot R_n & \text{para } LAI < 0,5 \end{cases} \quad (7)$$

El índice de área foliar-LAI ($m^2 m^{-2}$) se obtiene para cada píxel a partir del índice SAVI con el parámetro de optimización $L=0,1$ según la relación

$$LAI = -\ln[(0,69 - SAVI)/0,59] / 0,91 \quad (8)$$

H se obtiene para cada píxel a partir de la función aerodinámica

$$H = \rho_{aire} \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{r_{ah}} \quad (9)$$

Siendo ρ_{aire} la densidad del aire ($kg m^{-3}$); C_p el calor específico a presión constante ($J kg^{-1} K^{-1}$); y r_{ah} la resistencia aerodinámica entre dos alturas cerca de la superficie (normalmente entre 0,1 y 2 m) calculada como una función para cada píxel. En este modelo r_{ah} utiliza la velocidad de viento extrapolada a una altura de mezcla de 200 m, donde la temperatura es independiente de H, combinada con unas funciones de estabilización basada en la teoría de Monin-Obukhov. El parámetro ΔT (K) representa la diferencia de temperatura entre dos alturas cerca de la superficie. Esta diferencia se puede aproximar a una relación lineal con la temperatura de la superficie T_s , definida por Bastiaansen *et al.* (1998) como:

$$\Delta T = b + a \cdot T_{s \text{ datum}} \quad (10)$$

Donde a y b se determinan empíricamente. $T_{s \text{ datum}}$ es la temperatura ajustada a una elevación común, utilizando el modelo digital del terreno y un gradiente vertical de temperatura. Se calcula a partir de T_s incorporando todos los efectos de inestabilidad en el factor de rugosidad aerodinámica r_{ah} .

La determinación empírica de los factores que establecen la relación lineal (10) se hace a partir de la selección de dos píxeles de calibración. Para el caso del *hot pixel* se debe elegir dentro de la escena un píxel donde, tras realizar un balance de

agua en suelo, se pueda establecer que el valor de LE es cero. Estos píxeles son típicamente suelos desnudos procedentes de cultivo, con ausencia de vegetación y secos, con mayor valor de temperatura en la escena y por ello se denominan “caliente”. En este trabajo se ha aplicado un balance de agua en suelo siguiendo la metodología FAO56 (Allen et al., 1998) y en ninguna de las imágenes seleccionadas se registró lluvia significativa al menos tres días antes de su adquisición, por lo que la componente de evaporación de suelo ha sido nula en todas ellas. Para la selección del *cold pixel* se debe elegir una superficie con un cultivo con cobertura completa y en muy buen estado hídrico, de forma que se pueda considerar que tiene una evapotranspiración un 5% superior a la evapotranspiración de referencia de alfalfa (1,2·E_{to}). Este píxel suele marcar las temperaturas más bajas dentro de la escena y por ello se denomina “frío” (alfalfa o maíz). En este píxel se determina el flujo de energía a la hora de paso del satélite LE_{frío}. Los píxeles de calibración seleccionados en las fechas utilizadas en este trabajo vienen indicados en la Tabla 1. La selección del píxel frío se ha hecho teniendo en cuenta una serie de parcelas de alfalfa dentro de la zona de estudio, monitorizadas en campo y satélite, de forma que se encontraban en el máximo desarrollo vegetativo, evitando las épocas de corte. Así, se minimiza el efecto de la

variación temporal en el desarrollo del cultivo utilizado como referencia.

Por tanto en ambos píxeles se cumplen las ecuaciones de balance de energía, de la forma,

$$\begin{aligned}
 H_{caliente} &= (R_n - G)_{caliente} \\
 H_{frío} &= (R_n - G)_{frío} - LE_{frío}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

El factor ΔT se obtiene aplicando el modelo METRIC (Allen et al., 2007b) sobre cada uno de los píxeles promedio de una ventana de 3×3 seleccionados en la Tabla 1 para determinar los factores ΔT_{caliente} y ΔT_{frío} en cada imagen. No se detallará el cálculo en este trabajo para no exceder la longitud del mismo al ser necesario un proceso iterativo en la determinación de las resistencias de cubierta (r_{ahcaliente} y r_{ahfrío}). Los detalles se pueden consultar en la publicación del modelo METRIC (Allen et al., 2007b):

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{caliente} &= \frac{(R_n - G)_{caliente} \cdot r_{ahcaliente}}{\rho_{aire\ caliente} \cdot C_p} \\
 \Delta T_{frío} &= \frac{(R_n - G - LE)_{frío} \cdot r_{ahfrío}}{\rho_{aire\ frío} \cdot C_p}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Determinando los coeficientes a y b de la forma,

$$a = \frac{\Delta T_{caliente} - \Delta T_{frío}}{T_{s\ caliente} - T_{s\ frío}} ; \quad b = \Delta T_{caliente} - a \cdot T_{s\ caliente}
 \tag{13}$$

Tabla 1. Selección del píxel frío y caliente en cada escena Landsat junto a los valores de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), albedo, temperatura y las constantes de calibrado aplicadas en la ecuación 9.

Pixel	Fecha (Path/Row)		Coordenadas (WGS84, UTM)					
	X	Y	NDVI	Albedo	T(K)	a	b	
P. Frío	24-Jun	588737	4336771	0,863	0,23	299,3		
P. Cal.	(200/33)	600011	4328935	0,148	0,19	324,6	0,288	-86,6
P. Frío	3-Jul	574662	4318743	0,897	0,23	297,5		
P. Cal.	(199/33)	597529	4332844	0,186	0,25	321,3	0,290	-87,4
P. Frío	10-Jul	575492	4318727	0,873	0,23	298,4		
P. Cal.	(200/33)	597529	4332844	0,161	0,25	324,7	0,197	-57,2
P. Frío	19-Jul	594356	4330125	0,890	0,23	301,4		
P. Cal.	(199/33)	599996	4328955	0,180	0,23	328,1	0,256	-77,7
P. Frío	26-Jul	595236	4330006	0,872	0,21	302,7		
P. Cal.	(200/33)	596646	4331386	0,167	0,23	325,1	0,214	-63,4
P. Frío	4-Ag	592511	4339079	0,796	0,24	299,8		
P. Cal.	(199/33)	599981	4328939	0,198	0,22	325,5	0,231	-68,9
P. Frío	27-Ag	594416	4330113	0,806	0,23	299,8		
P. Cal.	(200/33)	596816	4331493	0,145	0,24	320,2	0,335	-101,4
P. Frío	5-Sep	592540	4339263	0,802	0,19	294,6		
P. Cal.	(199/33)	591580	4339923	0,139	0,25	310,1	0,204	-58,6
P. Frío	28-Sep	594391	4330098	0,909	0,21	292,5		
P. Cal.	(200/33)	584461	4332948	0,154	0,21	307,3	0,291	-84,0

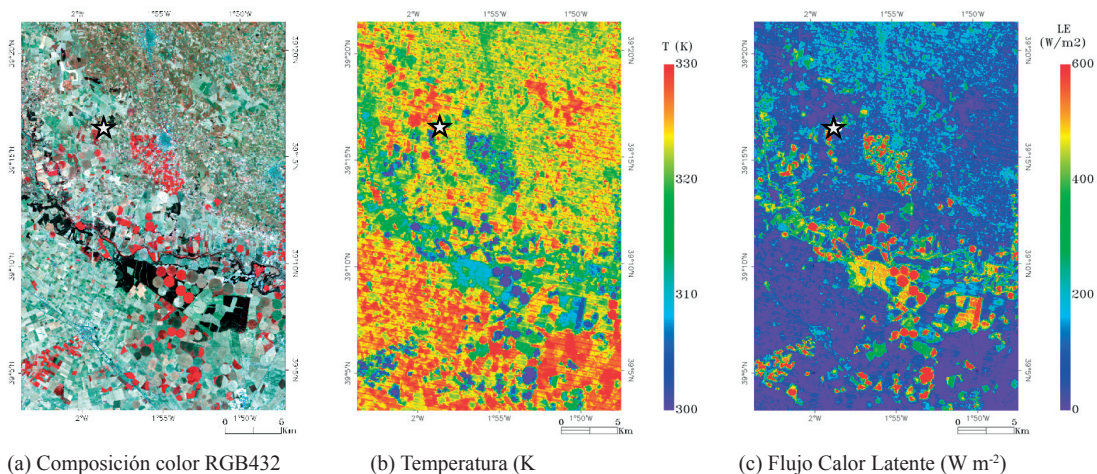


Figura 1. Imagen del satélite Landsat 5 del día 26 de julio de 2007 correspondiente a la zona de aplicación (a). Imagen de temperatura (b) y flujo de calor latente, LE ($W\ m^{-2}$) (c) para la misma fecha. En las tres imágenes se muestra la localización de la estación de flujo de covarianza (★).

2.4. Extrapolación de los flujos instantáneos a diarios

El valor de la evapotranspiración a la hora de paso del satélite ET_{inst} ($mm\ hora^{-1}$) se calcula para cada píxel dividiendo LE ($W\ m^{-2}$) por el calor latente de vaporización, y multiplicando por el factor 3600 para convertir de segundos a escala horaria. El cociente ET_{inst}/ET_{oinst} puede considerarse constante a la hora de paso del satélite, siendo ET_{oinst} la evapotranspiración de referencia a escala horaria (Allen *et al.*, 2007b). A partir de esto, la evapotranspiración de cultivo se determina como:

$$ET = \frac{ET_{inst}}{ET_{oinst}} ET_o \quad (14)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Flujos instantáneos

Se han obtenido valores de los flujos instantáneos de R_n , G , H y LE ($W\ m^{-2}$) por separado utilizando el modelo METRIC, correspondientes al área de solape entre ambas zonas de pasada 199 y 200 de las imágenes TM disponibles (Figura 1). Estos valores de los flujos instantáneos se han comparado con los medidos en campo de forma independiente con una estación de flujos turbulentos

(Figura 2). Los flujos medidos en campo han sido publicados anteriormente, mostrando un nivel de calidad adecuado para determinar la evapotranspiración del cultivo, con un satisfactorio cierre en el balance de energía y buen acuerdo con otros métodos micrometeorológicas de balance de energía como Razón de Bowen y balance de agua en suelo (Campos *et al.*, 2010; Balbontin-Nesvara *et al.*, 2011). El estadístico de comparación utilizado ha sido el RMSE (Willmott *et al.*, 1985) comparando directamente los valores obtenidos desde ambos modelos. Para dicha comparación se ha integrado el valor del flujo distribuido espacialmente con el modelo de balance de energía, teniendo en cuenta la función huella en la dirección de incidencia del viento hacia el equipo de medida en campo (Horst y Weil, 1994).

A la vista de la Figura 2, se observa que el modelo METRIC sobreestima el flujo de radiación neta con un RMSE de $43\ W\ m^{-2}$ respecto a los valores medidos. Similar comportamiento se observa en el término de flujo de calor en suelo que introduce un error de $33\ W\ m^{-2}$. Estas incertidumbres suponen en términos relativos un 8% y 29% respectivamente. Estos valores resultan similares a los obtenidos con otros modelos aplicados al mismo viñedo con datos térmicos de satélite en torno a $35-40\ W\ m^{-2}$ (Gonzalez-Dugo *et al.*, 2012a) y mayores que los flujos obtenidos con datos térmicos medidos con termómetros de infrarrojos en tierra, en torno a $27\ W\ m^{-2}$ (Gonzalez-Dugo *et al.*, 2012b).

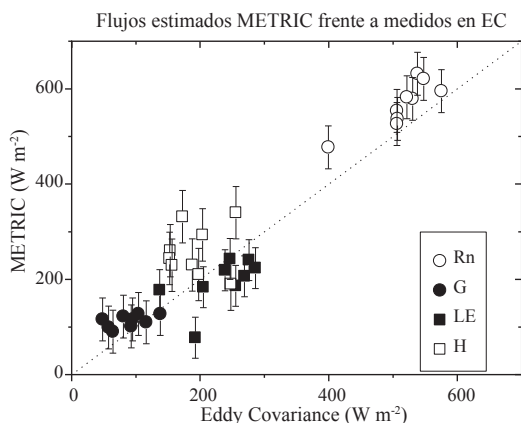


Figura 2. Comparación de los flujos estimados de radiación neta (Rn), flujo en suelo (G), calor latente (LE) y calor sensible frente a los valores medidos en la torre de flujo. En esta figura la barra de error corresponde al RMSE (Willmott *et al.*, 1985) calculado para cada uno de los flujos.

La componente de calor sensible muestra una sobreestimación de los valores medidos en campo con un RMSE de 55 W m^{-2} , que en términos relativos supone un 21 %, valores en términos absolutos sensiblemente mayores a Rn y G. Este ligero aumento es debido a la acumulación de incertidumbres en los distintos parámetros intermedios como la rugosidad, que se ha parametrizado en función del NDVI y albedo de la cubierta (Allen *et al.*, 2007b), y en menor medida, a la determinación de los parámetros de calibración en la relación del gradiente de temperatura con la temperatura de la cubierta. La determinación de la rugosidad se ha ajustado localmente utilizando las cubiertas más representativas de la zona, no obstante, en cultivos de similar cobertura y mayor altura como el olivo, se ha parametrizado la rugosidad en función de la altura con buenos resultados (Santos *et al.*, 2012; Pôças *et al.*, 2014). A la vista de los resultados de H, se entiende que el viñedo en espaldera, con un patrón de cobertura vegetal de un 35 % y una altura de 1,75 m durante el período de observación (Campos *et al.*, 2010), estaría en el límite de aplicación de esta relación. Añadido a esto, también se ha observado que la determinación de los píxeles de calibración es un punto crítico del modelo, requiriendo un buen conocimiento de la zona de aplicación y un usuario con experiencia. A pesar de estos factores de influencia sobre el error en la determinación de H, el RMSE obtenido con

METRIC es comparable al obtenido con otros modelos (Gonzalez-Dugo *et al.*, 2012a).

El flujo de calor latente se obtuvo a partir del residuo en la ecuación de balance de energía, obteniendo un RMSE de 40 W m^{-2} , suponiendo un 20% del valor promedio de la medida, por debajo del error obtenido en H y G. A la vista de la Figura 2 se infiere que las sobreestimaciones en Rn y G se compensan al tener signo opuesto en la ecuación de balance y la sobreestimación de H, debido principalmente en la determinación de la rugosidad de superficie, se traduce en una infraestimación en LE comparados con los datos de campo. Los resultados sobre LE son en términos absolutos satisfactorios, aunque las incertidumbres anteriormente descritas sobre H y G deben ser tenidas en cuenta a la hora de interpretar los resultados.

3.2. Valores diarios

Se han determinado los mapas de ET diarios en la misma zona de simulación, extrapolando los valores instantáneos descritos anteriormente a escala diaria bajo la hipótesis de que la fracción ET_{inst}/ET_{toinst} obtenida en el instante de paso del satélite se mantiene constante a nivel diario (Allen *et al.*, 2007b). Los valores obtenidos sobre la cubierta muestran la capacidad de monitorizar la ET (Figura 3.a). El valor del RMSE evaluado con valores de campo obtenidos a partir de la torre de flujo a escala diaria es de $0,58 \text{ mm día}^{-1}$, comparable a los valores obtenidos para vid con el modelo METRIC en Chile de $0,62 \text{ mm día}^{-1}$ (Carrasco-Benavides *et al.*, 2012), y con el modelo de dos fuentes de $0,5 \text{ mm día}^{-1}$ (Gonzalez-Dugo *et al.*, 2012a).

El valor del coeficiente de cultivo obtenido con METRIC presenta un valor promedio de 0,42 y un RMSE de 0,08 comparado con los datos de campo. Según se muestra en la Figura 3.b, los valores de Kc obtenidos con METRIC van paralelos a los valores medidos en campo, mostrando una adecuada capacidad de seguimiento de la cubierta por parte de METRIC. Se observa cómo en la parte final del ciclo, durante el mes de septiembre, el Kc_{METRIC} se desajusta respecto a los valores de la torre de flujo debido principalmente a la inestabilidad atmosférica, la mayor incertidumbre en la determinación de la temperatura comparado con las imágenes de

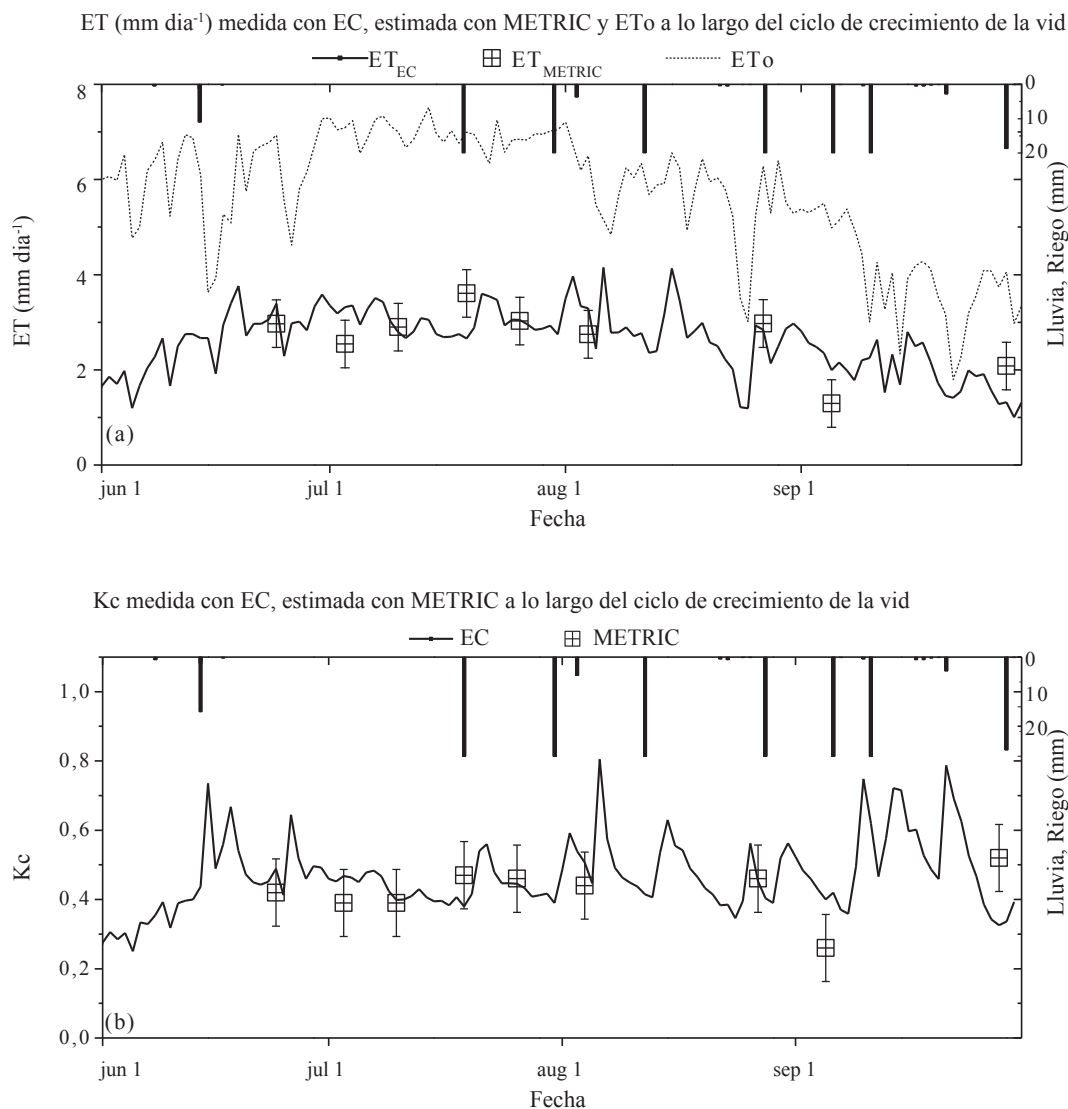


Figura 3. (a) Seguimiento temporal de la evapotranspiración real diaria (ET) con METRIC frente a los valores medidos con el equipo de covarianza de torbellino y ETo, (b) Valor del coeficiente de cultivo diario calculado con el modelo METRIC y con los datos medidos en la torre de flujo. En ambas figuras se ha mostrado la precipitación o riego (mm) en la escala superior invertida.

junio, julio y agosto, con atmósfera mucho más limpia, y a la dificultad de seleccionar los píxeles de calibración al final del verano. Los valores obtenidos de coeficiente de cultivo son similares a los estimados mediante balance de agua en suelo durante la etapa intermedia del cultivo de 0,48 (Campos *et al.*, 2010), o en vid en la zona de Chile de 0,56 (Carrasco-Benavides *et al.*, 2012). Según el manual de FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) los valores del coeficiente de cultivo para la etapa inicial, intermedia y final para una vid genérica son 0,30,

0,70 y 0,45. El valor de Kc en la etapa intermedia obtenido en este trabajo difiere del valor recomendado de FAO, mostrando la potencialidad del modelo METRIC para determinar de forma precisa la ET, el Kc y la fenología para las condiciones ambientales y de manejo específicas de la parcela.

4. Conclusión

En este trabajo se ha mostrado la capacidad de hacer un seguimiento de la evapotranspiración del

cultivo de la vid mediante un modelo de balance de energía a partir de datos de satélite y medidas meteorológicas. El potencial operacional del modelo METRIC radica en su calibración en la zona de aplicación utilizando puntos extremos de ET, como son suelo desnudo y una cubierta vegetal de referencia como alfalfa. Esto es a su vez una limitación en zonas donde no existan estas superficies o en fechas donde éstas presenten una dinámica que no permita establecerlas como referencia. No obstante, se ha demostrado que en zonas de uso agrícola con presencia de gran diversidad de cultivos es posible localizar incluso en la época final del crecimiento, parcelas que reúnen las características de cultivo de referencia. El modelo METRIC aplicado usando datos remotos al cultivo leñoso de la vid, con unas características de morfología, estructura y manejo distinto a los herbáceos, muestra resultados satisfactorios para determinar el Kc y la ET a distintas escalas temporales. El RMSE de 0,58 mm día⁻¹ en la ET y de 0,09 en el Kc resultan adecuados para hacer un seguimiento del cultivo así como para la gestión del riego. Estos resultados se han contrastado con otros estudios similares mostrando resultados comparables. Teniendo en cuenta estos resultados, se puede destacar el modelo METRIC frente a otros basados en datos remotos por su carácter operacional. Así, una limitación a esta operacionalidad que puede ser la selección de los píxeles de calibración está en fase de ser implementada de forma automática (Allen *et al.*, 2013a). En este trabajo se han aplicado modelos aerodinámicos desarrollados para cultivos herbáceos de altura similar a la vid, pero se deberían investigar otras relaciones adaptadas a cultivos leñosos dispersos de cara a mejorar los resultados del modelo. Dadas las limitaciones temporales impuestas por el conjunto de imágenes de satélite disponibles, este modelo se combinará en futuros trabajos con modelos de seguimiento diario como el balance de agua en suelo, para la predicción de estrés y la estimación de necesidades hídricas en agricultura de precisión.

Agradecimientos

Al proyecto CERESS (*Coupling land surface Energy and water balance from Remote sensing for mapping Evapotranspiration, water Stress and Soil moisture*, ref: AGL2011-30498-C02-01) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación

español. El co-autor C. Balbontín N. agradece el financiamiento del Ministerio de Educación de Chile a través de su proyecto FONDECYT Iniciación Cod. 11140843.

Referencias

- Allen, R. G., Burnett, B., Kramber, W., Huntington, J., Kjaersgaard, J., Kilic, A., Trezza, R. 2013a. Automatic calibration of the METRIC-Landsat evapotranspiration process. *Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 14. <http://dx.doi.org/10.1111/jawr.12056>
- Allen, R. G., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J. M., Bastiaanssen, W., Kjaersgaard, J. 2011. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26), 4011-4027. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8408>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. (Vol. 56), Food and Agriculture Organization.
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., Robison, C. W. 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Applications. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 395-406. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395))
- Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R. 2007b. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 380-394. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Allen, R. G., Trezza, R., Kilic, A., Tasumi, M., Li, H. 2013b. Sensitivity of Landsat-Scale Energy Balance to Aerodynamic Variability in Mountains and Complex Terrain. *Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 592-604. <http://dx.doi.org/10.1111/jawr.12055>
- Balbontin-Nesvara, C., Calera-Belmonte, A., González-Piqueras, J., Campos-Rodríguez, I., López-González, M. L., Torres-Prieto, E. 2011. Vineyard Evapotranspiration Measurements in a Semiarid Environment: Eddy Covariance and Bowen Ratio Comparison. *Agrociencia*, 45, 87-103.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., Holtslag, A. A. M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213(1-4), 198-212. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)

- Berk, A., Bernstein, L. S., Anderson, G. P., Acharya, P. K., Robertson, D. C., Chetwynd, J. H., Adler-Golden, S. M. 1998. MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, 65(3), 367-375. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00045-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00045-5)
- Campos, I., Neale, C. M. U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J. 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*, 98(1), 45-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>
- Carrasco-Benavides, M., Ortega-Farías, S., Lagos, L. O., Kleissl, J., Morales, L., Poblete-Echeverría, C., Allen, R. G. 2012. Crop coefficients and actual evapotranspiration of a drip-irrigated Merlot vineyard using multispectral satellite images. *Irrigation Science*, 30(6), 485-497. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-012-0379-4>
- Coll, C., Galve, J. M., Sánchez, J. M., Caselles, V. 2010. Validation of landsat-7/ETM+ thermal-band calibration and atmospheric correction with ground-based measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(1), 547-555. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2024934>
- González-Dugo, M. P., González-Piqueras, J., Campos, I., Andreu, A., Balbontín, C., Calera, A. 2012a. Evapotranspiration monitoring in a vineyard using satellite-based thermal remote sensing. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV*, 8531. <http://dx.doi.org/10.1117/12.974731>
- González-Dugo, M. P., González-Piqueras, J., Campos, I., Balbontín, C., Calera, A. 2012b. Estimation of surface energy fluxes in vineyard using field measurements of canopy and soil temperature. In C. M. U. Neale & M. H. Cosh (Eds.), *Remote Sensing and Hydrology* (Vol. 352, pp. 59-62). Wallingford: Int Assoc Hydrological Sciences.
- González-Dugo, M. P., Mateos, L. 2008. Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural Water Management*, 95(1), 48-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2007.09.001>
- González-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C. 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1843-1853. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.012>
- Horst, T. W., Weil, J. C., 1994. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 59, 279-296. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00119817>
- INM. 2004. Guía resumida del clima de España 1971-2000. In I. N. d. Meteorología (Ed.). Madrid.
- Kustas, W. P. 1990. Estimates of Evapotranspiration With a One- and Two-Layer Model of Heat Transfer Over Partial Canopy Cover. *Journal of Applied Meteorology*, 29(8), 704-715. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1990\)029<0704:EOEWAO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1990)029<0704:EOEWAO>2.0.CO;2)
- Norman, J. M., Kustas, W. P., Humes, K. S. 1995. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), 263-293. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
- Padilla, F. L. M., González-Dugo, M. P., Gavilán, P., Domínguez, J. 2011. Integration of vegetation indices into a water balance model to estimate evapotranspiration of wheat and corn. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1213-1225. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-1213-2011>
- Payero, J. O., Neale, C. M. U., Wright, J. L. 2005. Estimating Soil Heat Flux for Alfalfa and Clipped Tall Fescue Grass. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(3), 1-9. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.18459>
- Pôças, I., Paço, T. A., Cunha, M., Andrade, J. A., Silvestre, J., Sousa, A., Allen, R. G. 2014. Satellite-based evapotranspiration of a super-intensive olive orchard: Application of METRIC algorithms. *Biosystems Engineering*, 128, 69-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.019>
- Sánchez, J. M., Kustas, W. P., Caselles, V., Anderson, M. C. 2008a. Modelling surface energy fluxes over maize using a two source path model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1130-1143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.018>
- Sánchez, J. M., López-Urrea, R., Rubio, E., Caselles, V. 2011. Determining irrigation needs of sorghum from two-source energy balance and radiometric temperatures. *Hydrology and Earth System Sciences Discuss.*, 8, 3937-3960. <http://dx.doi.org/10.5194/hessd-8-3937-2011>
- Sánchez, J. M., 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. *Agricultural Water Management*, 137, 23-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.002>
- Sánchez, J. M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V. A., Telesca, V. 2008b. Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, 351(1-2), 58-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.041>

- Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., González-Piqueras, J., González-Dugo, M. P., Baroncini-Turrichia, G., Torres, E., Pérez-Gutiérrez, C. 2012. Water balance at plot scale for soil moisture estimation using vegetation parameters. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166-167, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.07.005>
- Santos, C., Lorite, I. J., Allen, R. G., Tasumi, M. 2012. Aerodynamic Parameterization of the Satellite-Based Energy Balance (METRIC) Model for ET Estimation in Rainfed Olive Orchards of Andalusia, Spain. *Water Resources Management*, 26(11), 3267-3283. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-0071-8>
- Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R. 2008. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 51-63. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:2\(51\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(51))
- Trezza, R., Allen, R. G., Tasumi, M. 2013. Estimation of actual evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico using MODIS and landsat imagery with the METRIC model. *Remote Sensing*, 5(10), 5397-5423. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5105397>
- Valor, E., Caselles, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57(3), 167-184. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., Rowe, C. M. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 90(NC5), 8995-9005. <http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>