

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN VID CON UN MODELO DE DOS CAPAS: APLICACIÓN A LA ZONA DE TOMELLOSO (ALBACETE)

M. M. Artigao (*), E. Rubio (**), V. Caselles (**),
F. Montero (***), A. Brasa (***), F. Sospedra (**) y
E. Valor (**)

martigao@pol-ab.uclm.es

(*) *Departamento de Física Aplicada. E.P.S.A.
Universidad de Castilla-La Mancha. Avda. de
España s/n, 02071 Albacete.*

(**) *Departament de Termodinàmica. Facultat de
Física. Universitat de València. C/ Dr. Moliner, 50,
46100 Burjassot.*

(***) *Departamento de Producción Vegetal y
Tecnología Agraria. E.T.S.I.A. Universidad de
Castilla-La Mancha. Avda. de España s/n, 02071
Albacete.*

ABSTRACT

This work addresses the calculation of actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard, using a two-layer model of energy partitioning. The study has been carried out in Tomelloso (Albacete), where the main land use is the vineyard. To apply this model in an operative way, estimations of the vegetation cover at Landsat scale and of the temperatures of the soil and vegetation components inside the pixel, obtained from the radiative temperature of pixel at NOAA scale, have been needed. Thus a critical issue is the properly integration of satellite measurements at different resolution and of in situ measurements in order to find a correct estimation of the evapotranspiration.

RESUMEN

En este trabajo presentamos el cálculo de la evapotranspiración en un cultivo no homogéneos y con poca cobertura vegetal como es la vid utilizando un modelo bicapa de resistencias. El estudio se ha llevado a cabo en una zona de Tomelloso (Albacete), en la que predomina el cultivo de vid. Una forma operativa de aplicar este modelo es estimando, por un lado la proporción de vegetación a escala Landsat en la época para la que se realiza el estudio, y por otro lado, las temperaturas de las distintas fuentes que aparecen en el sistema suelo-planta así como su relación con la temperatura efectiva de pixel, calculada mediante datos del satélite NOAA. Por ello, un punto crítico es la adecuada integración de datos de satélites con distinta resolución y de

medidas *in situ* para obtener una correcta estimación de la evapotranspiración.

Palabras clave: teledetección, evapotranspiración, cobertura parcial, agricultura.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es estimar la evapotranspiración en el cultivo de vid para lo cual se aplicará un modelo de dos capas en combinación con datos de satélite.

La zona de estudio corresponde a Tomelloso (39°10'N, 3°1'O, 670 m), una de las áreas piloto del proyecto EFEDA (ECHIVAL Field Experiment in a Desertification-threatened Area), fase II. La totalidad de esta zona se cultiva en seco, con predominio de la vid, en la variedad Airén, frente al cereal y el olivo. Desde un punto de vista agronómico, resulta clave la ubicación de los viñedos en los distintos tipos de suelos y la determinación de la cobertura que representan las cepas en cada momento de su estado fenológico, como paso previo al cálculo de la partición de energía en el sistema suelo-vegetación-atmósfera.

En este trabajo, se han utilizado dos imágenes Landsat-5 TM correspondientes al 4/6/94 y 23/8/94, una imagen NOAA-11 AVHRR del 23/8/94 y datos de campo de reflectividad, proporción de vegetación y un mapa de uso agrícola de la zona (escala 1:25000), así como parámetros meteorológicos y agronómicos proporcionados por la estación agrometeorológica de la Universidad de Castilla-La Mancha en Tomelloso. Con las imágenes Landsat se ha clasificado la zona de estudio mientras que la imagen NOAA se ha utilizado para calcular la temperatura radiativa de pixel.

El presente trabajo se ha estructurado de la siguiente forma: en primer lugar, se describe el procesado completo de las imágenes Landsat (corrección geométrica, clasificación, obtención de un índice de vegetación y cálculo de la proporción de vegetación para la vid). A continuación se describe el modelo utilizado para el cálculo de la evapotranspiración, así como los pasos seguidos para calcular la temperatura a partir de la imagen NOAA (corrección geométrica, correcciones atmosférica y de emisividad y expresión de la temperatura de pixel mixto de acuerdo con la geometría del viñedo). Finalmente se han validado los resultados obtenidos con datos de campo.

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA

Dado que disponemos de imágenes Landsat para dos fechas, corregimos geoméricamente una de

ella, la de junio, y corregistramos la de agosto respecto de la anterior. De esta forma, se consigue que las dos imágenes sean totalmente superponibles con un error final mínimo ($\sigma = 0.9$ pixel para la de junio y $\sigma = 1.1$ pixel para la de agosto)

La clasificación de la zona de estudio se llevó a cabo con la imagen de junio, dado que los cultivos mayoritarios son cereal, olivo y vid y en esta época del año, el cereal todavía se puede discriminar del suelo desnudo o del barbecho, cosa que no ocurre en agosto. En lugar de hacer una clasificación multitemporal, hemos optado por usar dos clasificaciones (supervisadas y aplicando un clasificador de máxima probabilidad) obtenidas a partir de dos combinaciones distintas de tres bandas (bandas 1, 3 y 4 por un lado y bandas 3, 4 y 5 por otro). La clasificación final de la zona se ha obtenido combinando los resultados de estas dos.

La elección de estas combinaciones de bandas se llevó a cabo en términos de la separabilidad entre clases para las áreas de entrenamiento y de indicadores como la matriz de correlación y la de confusión. Para elegir las áreas de entrenamiento más adecuadas se realizó una campaña de campo en la que se comparó un mapa de cultivos realizado en 1991 con los cultivos existentes en la zona actualmente, de esta forma, algunas zonas se utilizaron para la clasificación y otras para la posterior validación de la misma.

Validamos los resultados de ambas clasificaciones con las áreas elegidas a tal efecto. En base a las matrices de confusión obtenidas, tomamos los resultados de la clasificación con las bandas 1, 3 y 4 para la vid y el olivo, mientras que la combinación 3, 4 y 5 nos dio los resultados para el cereal y el barbecho. Este es el procedimiento seguido para combinar las dos clasificaciones en la clasificación definitiva que se muestra en la (Figura 1).

Una vez identificada la vid en la zona de estudio, el siguiente paso es el cálculo de la proporción de vid frente a suelo, P_v . Dado que la vid es un cultivo no homogéneo y con predominio de suelo, P_v se convierte en un parámetro clave para calcular de forma adecuada la partición de energía dentro del sistema planta-suelo. P_v a nivel de pixel, se calcula a partir de un índice de vegetación (IV). En este sentido, la selección del índice de vegetación resulta crítica ya que el efecto del suelo en las reflectividades es predominante. Entre los distintos IV que aparecen en la literatura, seleccionamos una variación del MSAVI, llamada $MSAVI_2$ (Qi et al. 1994), que consigue minimizar el efecto del suelo

sin necesidad de calcular la línea de suelo. La relación entre este índice y P_v es de la forma:

$$P_v = \frac{2MSAVI_2 \rho_{sR} + MSAVI_2(1 - MSAVI_2)}{2(1 - MSAVI_2)(\rho_{vIR} - \rho_{sIR}) + 2(1 + MSAVI_2)(\rho_{vR} - \rho_{sR})} \quad (1)$$

donde $\rho_{vR} = 0.055$, $\rho_{vIR} = 0.472$, $\rho_{sR} = 0.30$ y $\rho_{sIR} = 0.355$ son los valores de las reflectividades de la vegetación y del suelo en los canales 3 y 4 del TM para el viñedo de Tomelloso. No olvidemos que la relación (1) para P_v lleva implícito que el $MSAVI_2$ se calcule a nivel de la superficie. Para ello es necesario que las reflectividades aparentes que se derivan de los datos de satélite sean corregidas de la atenuación atmosférica y por aerosoles.

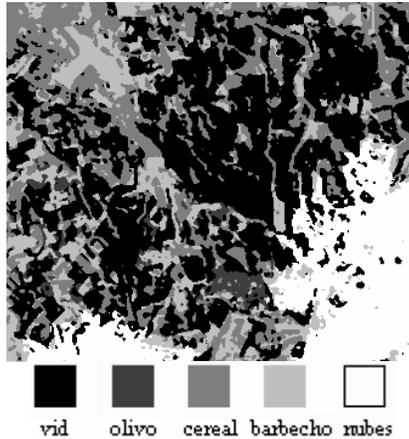


Figura 1.- Clasificación de la zona de Tomelloso.

La Figura 2 muestra la imagen de proporción de vid observada por el IFOV del sensor, P_v , para las zonas identificadas como viñedo en la Figura 1 y para la fecha en la que queremos calcular la evapotranspiración, 23 de agosto de 1994. Como puede comprobarse la P_v es bastante uniforme para todas las zonas de viñedo, con valores que oscilan entre un 11 % y un 14 %, y con un valor medio del 12 %. Estos resultados concuerdan con los datos de campo de P_v de que disponemos. Además, la uniformidad de valores de P_v es acorde con lo que cabría esperar para un cultivo del tipo de la vid.

Este mismo cálculo se repitió utilizando el NDVI y la pertinente relación entre este índice y P_v . En esta ocasión, los valores de P_v que obtuvimos oscilaron entre un 27 % y un 36 %. Estos resultados son incompatibles con la distribución típica de la variedad de vid Airén en Tomelloso y los valores máximos de diámetro de estas cepas, que en términos de proporciones se traducen en un valor máximo para P_v de un 15 %.

MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para abordar el problema de estimar los flujos de calor latente en un cultivo de vid, esto es un cultivo de secano, con una cobertura vegetal abierta (LAI~ 1) y escasa (<15 %), adoptamos un modelo de flujos y resistencias que distingue dos fuentes (o sumideros) de energía, la vegetación y el suelo, con sus correspondientes temperaturas (T_f y T_s) y presiones de vapor de agua (Figura 3). Este modelo bicapa se combina con un modelo radiativo que incorpora una detallada descripción del cultivo (estructura del cultivo y geometrías de observación e iluminación) a través de la temperatura radiativa de pixel, $T_{rad}(\theta)$, obteniendo de este modo una relación entre la temperatura efectiva, o de pixel, a nivel de la superficie, $T_{ef}(\theta)$ y las temperaturas de la vegetación y del suelo.

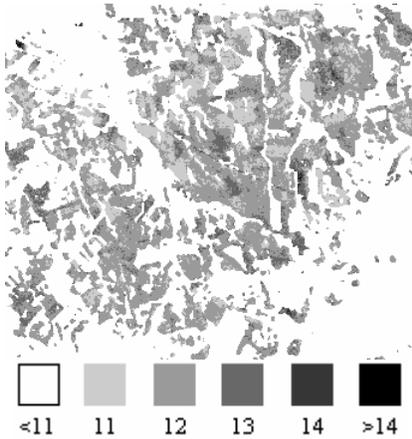


Figura 2.- Proporción de vid observada por el sensor para la zona de Tomelloso en fecha del 23 de agosto de 1994. Valores de P_v en tanto por cien.

El modelo utilizado responde al esquema clásico de resistencias en serie propuesto por Shuttleworth y Wallace (1985) y Caselles et al. (1992), entre otros. El cual, si bien no distingue entre el suelo debajo del cultivo y el suelo entre cepas, sí considera la interacción suelo-vegetación. Este modelo viene descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\lambda E = \lambda E_c + \lambda E_s \quad (2)$$

$$R_{nc} = \lambda E_c + \frac{\rho C_p}{r_a^c} (T_f - T_o) \quad (3)$$

$$R_{ns} = \lambda E_s + \frac{\rho C_p}{r_a^s} (T_s - T_o) + G \quad (4)$$

$$\rho C_p \frac{T_o - T_a}{r_a^a} = \rho C_p \frac{T_f - T_o}{r_a^c} + \rho C_p \frac{T_s - T_o}{r_a^s} \quad (5)$$

donde T_o es la temperatura aerodinámica a la altura efectiva de intercambio de calor; T_a , T_f y T_s son las temperaturas del aire a la altura de referencia, de las hojas del cultivo y de la superficie del sustrato; r_a^a , r_a^c y r_a^s son resistencias aerodinámicas, cuyas expresiones pueden encontrarse en diversos trabajos (Shuttleworth y Gurney, 1990 ; Friedl, 1995).

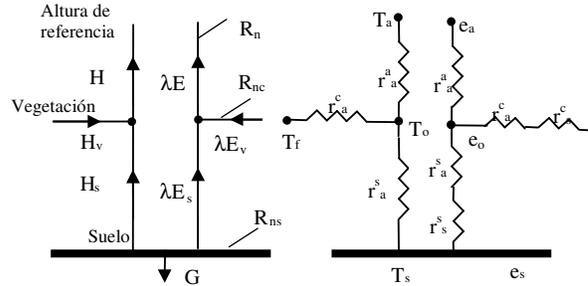


Figura 3.- Diagrama del sistema de resistencias en serie que responde a la partición de energía del cultivo y su interacción con el sustrato y la atmósfera en el modelo de Shuttleworth y Wallace (1985).

La partición de la radiación neta, R_n , entre el suelo, R_{ns} , y la cubierta vegetal, R_{nc} , se resuelve con la ley de Beer de la forma:

$$R_{ns} = R_n \exp(-C LAI / \cos(\theta)) \quad (6)$$

$$R_{nc} = R_n [1 - \exp(-C LAI / \cos(\theta))] \quad (7)$$

donde θ es el ángulo cenital solar y C es un coeficiente de extinción del cultivo a la radiación neta (Monteith y Unsworth, 1990). Una estimación del flujo geotérmico, G , se puede obtener según Norman et al. (1995) mediante la ecuación:

$$G = 0.35 R_{ns} \quad (8)$$

La resolución del sistema de ecuaciones 2-8 en términos de λE_s y λE_c conduce a la obtención de la evapotranspiración. Además de este modelo de resistencias en serie también hemos considerado el modelo de resistencias en paralelo de Norman et al. (1995) y comparado los resultados obtenidos por ambos

RESOLUCIÓN DEL MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para resolver de forma adecuada el sistema de ecuaciones descrito anteriormente, es necesario tener una buena estimación de las temperaturas del cultivo y del suelo. Dichos valores se obtienen a partir de la temperatura radiativa de pixel, $T_{ef}(\theta)$,

calculada con datos del sensor AVHRR; esto es, ya corregida de los efectos de la atmósfera y de emisividad, utilizando como datos de comprobación en un proceso iterativo, las temperaturas de la vid y del suelo medidas in situ.

Utilizamos el Método de la Cobertura Vegetal (VCM) de Valor y Caselles (1996) en combinación con el algoritmo de split-window de Coll y Caselles (1997) para obtener $T_{ef}(\theta)$. Como datos de entrada para determinar la emisividad de pixel en los canales 4 y 5 del AVHRR utilizamos los valores de emisividad del suelo y de la vid medidos in situ con el método de la caja en la variante de una tapa (Rubio et al., 1997). Con estos valores de campo y con la imagen de P_v aplicamos el método VCM y obtuvimos una imagen de emisividades efectivas promedio de los canales 4 y 5. Por último, obtuvimos una imagen de T_{ef} combinando la imagen de emisividad con el algoritmo de split-window.

Tanto la expresión analítica de la emisividad de pixel como la expresión que relaciona la temperatura de pixel T_{ef} con las temperaturas T_f y T_s (Rubio, 1998), incorporan la descripción geométrica del cultivo y la proporción de vegetación que observa el sensor en el pixel. En concreto, el modelo geométrico asimila cada cepa del cultivo por una caja de base cuadrada de paredes lambertianas de altura h y anchura igual al diámetro de la cepa, regularmente separadas de las cepas adyacentes una distancia dada.

La superposición de los datos de satélite obtenidos con distinta resolución espacial, se ha conseguido degradando las imágenes a la misma resolución, para de esta forma, moviendo una sobre otra buscar la máxima correlación entre ambas (Caselles et al., 1998).

REFERENCIAS

Caselles, V., Sobrino, J. A. y Coll, C. 1992. On the use of satellite thermal data for determining evapotranspiration in partially vegetated areas. *Int. J. Remote Sensing* 13, no. 14: 2669-2682.

Caselles, V., Artigao, M. M., Hurtado, E., Coll, C. Y Brasa, A. 1998. Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA-AVHRR images: Application to the Barrax area, Albacete, Spain. *Remote Sens. Environ.* 63: 1-10.

Coll, C. y Caselles, V. 1997. Aglobal split-window algorithm for land surface temperature from AVHRR data: Validation and algorithm comparison. *J. Geophys. Res.* 102(D14): 16697-16713.

Friedl, M. A. 1995. Modeling land surface fluxes using a sparse canopy model and radiometric surface temperature measurements. *J. Geophys. Res.* 100: 25435-25446.

Monteith, J. L. Y Unsworth, M. H. 1990. *Principles of Environmental Physics*, 291 pp.

Norman, J. M., Kustas, W. P. y Humes, K. S. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agr. and Forest Meteorol.* 77:263-293.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y. H. y Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 48: 119-126.

Rubio, E. 1998. *Hacia la optimización de la medida de la emisividad y la temperatura en teledetección*. Tesis Doctoral, Universitat de València.

Rubio, E., Caselles, V. y Badenas, C. 1997. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 μm waveband. Analysis of two field methods. *Remote Sens. Environ.* 59: 490-521.

Shuttleworth, W. J., Wallace, J. S. 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 111: 839-855.

Shuttleworth, W. J., Gurney, R. J. 1990. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116: 497-519.

Valor, E. y Caselles, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South-American areas. *Remote Sens. Environ.* 57: 167-184.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo científico y la infraestructura aportados por la Universidad de Castilla-La Mancha; así como a la ayuda económica recibida de la Comisión de Comunidades Europeas a través de los proyectos EFEDA (EPOCH-CT90-0030), EFEDA II (Contrato EV5V-CT93-0272) y ReSeDA (Contrato ENV4-CT96-0326) y AMB96-1928-CE. Al Dr. J. García y al Sr. S. Díez les agradecemos el habernos cedido el programa ATW para el tratamiento de las imágenes. Asimismo agradecemos los comentarios realizados por los profesores F. M. Santa Olalla y C. Coll.

APÉNDICE

Expresiones de las presiones de vapor (Friedl 1995)

$$e_w(T_f) = 0.611 \exp\left[\frac{17.27(T_v - 273.2)}{T_v - 35.86}\right]$$

$$e_w(T_s) = e_w^* \exp\left[\frac{g \Psi_s}{R' T_s}\right]$$

Expresiones de las resistencias aerodinámicas:

(1) Resistencia aerodinámica entre la altura efectiva de intercambio de calor y la altura de referencia

(Shuttleworth y Gurney, 1995) Válida para LAI variable, supone que longitudes de rugosidad para el momento y el calor son iguales ($z_M = z_H$).

$$r_a^a = \frac{1}{ku_*} \ln\left[\frac{z_r - d}{h - d}\right] + \frac{h}{nK_h} \left[\exp\left\{\ln\left[1 - (Z_o + d_p)/h\right]\right\} - 1\right]$$

$$u_* = \frac{ku}{\ln[(x-d)/z_o]}, \quad K_h = ku_*(h-d)$$

$$x = z_r$$

$$z_o = z'_o + 0.13h LAI^{1/2} \quad 0 < LAI < 1 \quad (\text{llevan implícito } c_d = 0.2)$$

$$z_o = 0.3h(1-d/h) \quad 1 < LAI < 7.5 \quad (\text{idem})$$

$$d = 1.1h \ln(1 + 0.67LAI^{1/4})$$

$$z'_o = 0.01 \text{ m}$$

$$Z_o = 0.13h$$

$$d_p = 0.63h$$

(Thom y Oliver, 1977; Friedl, 1995) r_a^a de la capa mixta, se basa en la hipótesis de que bajo condiciones neutras, las resistencias aerodinámicas para H y λE son iguales.

$$r_a^a = r_o^a \Phi$$

$$r_o^a = \frac{1}{k^2 u} \ln\left[\frac{z_r - d}{Z_o}\right] \quad y$$

$$\Phi = \begin{cases} 1/(1+\eta)^2 & \text{atmósfera estable} \\ 1/(1+\eta)^{3/4} & \text{atmósfera inestable} \end{cases}$$

$\eta = 5g(z_r - d)(T_s - T_a)/(T_a u^2)$, T_s la temperatura radiométrica de la superficie

(Norman et al. 1995)

$$r_a^a = r_a + r_{ex}$$

$$r_a = \frac{1}{k^2 u} \left(\ln\left[\frac{z_r - d}{z_M}\right] - \Psi_H \right) \left(\ln\left[\frac{z_r - d}{z_M}\right] - \Psi_M \right) \quad (\text{est})$$

a es la resistencia equivalente a la r_a^a de SG para $z_M = z_H$)

$$r_{ex} = \frac{1}{k^2 u} \ln\left[\frac{z_M}{z_H}\right] \left(\ln\left[\frac{z_r - d}{z_M}\right] - \Psi_M \right)$$

(2) Resistencia aerodinámica entre la superficie del sustrato y la altura efectiva de intercambio de calor

$$r_a^s = \frac{h \exp(n)}{nK_h} \left[\exp(-nz'_o/h) - \exp(-n(Z_o + d_p)/h) \right]$$

$$n = 2.5$$

(3) Resistencia aerodinámica del cultivo

$$r_a^c = \frac{(100/n)(w/u_h)^{1/2} [1 - \exp(-n/2)]^{-1}}{2LAI}$$

$$\lambda E = \lambda E_c + \lambda E_s, \quad H = H_c + H_s \quad \text{donde}$$

$$\lambda E_c = R_{nc} + H_c, \quad \lambda E_s = R_{ns} + H_s + G$$

$$\lambda E = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{[e_o - e_r]}{r_a^a}$$

$$\lambda E_c = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{[e_w(T_f) - e_o]}{(r_a^c + r_s^c)}$$

$$\lambda E_s = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{[e_w(T_s) - e_o]}{(r_a^s + r_s^s)}$$

$$H_c = \rho C_p \frac{T_f - T_o}{r_a^c}$$

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_o}{r_a^s}$$