

EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CULTIVOS CON CUBIERTA PARCIAL MEDIANTE LA RAZÓN DE BOWEN RADIATIVA

M. Ibáñez (*) y V. Caselles (**)

m.ibanez@macs.udl.es

(*) *Dept. de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Av. Rovira Roure 177. E25198 – Lleida.*

(**) *Dept. de Termodinàmica. C/ Doctor Moliner 50. E46100 – Burjassot (València).*

RESUMEN

La gestión del agua para usos agrícolas requiere de la estimación de la evapotranspiración a partir de imágenes de satélite en cultivos heterogéneos. El método de Norman et al. (1995) da buenos resultados pero es difícilmente aplicable a escala regional pues requiere información detallada de la superficie. Se propone un nuevo método de dos niveles basado en la razón de Bowen radiativa. El algoritmo es validado con datos tomados sobre maíz dando estimaciones de la evapotranspiración con errores del 10%. El método es aplicado a partir de unos pocos datos meteorológicos de superficie y la información aportada por los satélites. Los resultados presentados son prometedores aunque requiere posteriores validaciones.

PALABRAS CLAVE: evapotranspiración, cultivos heterogéneos, razón de Bowen radiativa.

ABSTRACT

Knowledge of evapotranspiration from satellite images over heterogeneous crops is of great interest for water management. The method proposed by Norman et al. (1995) is a good solution when detailed surface information is available but it is not easily applicable at regional scale. A new approach based in the radiative Bowen ratio is proposed. The algorithm is calibrated and validated for maize giving errors around 10%. The method uses few surface meteorological data and information from satellite images. The results are promising for remote sensing applications though they require further verification.

KEY WORDS: evapotranspiration, heterogeneous crops, radiative Bowen ratio.

INTRODUCCIÓN

El cálculo de la evapotranspiración es fundamental a la hora de estimar las necesidades hídricas de los cultivos para planificar, diseñar y programar sistemas de riego. Dada la gran variabilidad espacial de la evapotranspiración para una determinación regional de ésta se requiere la incorporación de la temperatura radiativa de la superficie y los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes de satélite.

Los modelos de un nivel aplicados en cubiertas heterogéneas no han dado resultados aceptables. No resulta posible modelizar los procesos de interacción suelo-planta-atmósfera a partir de una única temperatura radiativa de todo el sistema. Los métodos de dos niveles mejoran las estimaciones considerando una temperatura característica del suelo y otra de la cubierta vegetal. Los primeros métodos de dos niveles incorporaron la temperatura radiativa al modelo de Shuttleworth y Wallace (1985) que utilizaba un esquema de resistencias en serie para el sistema suelo-cubierta vegetal. Norman et al. (1995) presentaron un modelo de dos niveles con una disposición de resistencias en paralelo. En este caso los flujos de calor sensible desde el suelo y la cubierta vegetal no interaccionan. Este método más operativo da buenos resultados cuando se dispone de suficiente información de la superficie pero puede dar importantes errores al ser aplicado a escala regional (Zhan et al. 1996).

En este trabajo se desarrolla un método operativo que aprovechando el esquema de resistencias en paralelo introduce el concepto de la razón de Bowen radiativa. El método es calibrado en superficie en un campo de maíz. Con datos tomados en el mismo cultivo se compara el algoritmo propuesto con el método de Norman et al. (1995). Se presenta un ejemplo de aplicación de la metodología incorporando información de imágenes captadas por el sensor AVHRR.

MÉTODOS DE DOS NIVELES

Método de las resistencias (Norman et al., 1995).

La evapotranspiración se estima planteando una ecuación de balance para cada componente:

$$Rn_v = H_v + \lambda E_v \quad (1a)$$

$$Rn_s - G = H_s + \lambda E_s \quad (1b)$$

donde Rn es la radiación neta (Wm^{-2}), G el flujo de calor en el suelo (Wm^{-2}), H el flujo de calor sensible (Wm^{-2}) y λE el flujo de calor latente (Wm^{-2}). El

subíndice v se refiere a los flujos para la cubierta vegetal y el subíndice s para el suelo.

La ecuación de Priestley-Taylor para aproximar la transpiración de las plantas, el balance de energía en la vegetación y la formulación aerodinámica en la estimación del flujo de calor sensible permiten obtener la temperatura radiativa de la cubierta a partir de la expresión:

$$H_v = \rho C_p (T_v - T_a)/r_a = R_{n_v} (1 - 1.3 \Delta/(\Delta + \gamma)) \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire (kg m^{-3}), C_p es el calor específico del aire ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), r_a es la resistencia aerodinámica a la transferencia de calor sensible (sm^{-1}), T_a es la temperatura del aire a una altura de referencia (K), T_v es la temperatura de la vegetación (K), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor saturante (Pa K^{-1}) y γ es la constante psicrométrica (Pa K^{-1}).

La relación entre la temperatura de superficie captada por el sensor, la temperatura de la cubierta y la del suelo permiten determinar ésta última. El flujo de calor sensible procedente del suelo se obtiene aplicando la expresión:

$$H_s = \rho C_p (T_s - T_a)/(r_s + r_a) \quad (2)$$

donde T_s es la temperatura del suelo (K) y r_s la resistencia a la transferencia de calor sensible desde el suelo hasta el nivel de referencia (sm^{-1}).

Conocidos R_n , H y G el flujo de calor latente se obtiene como término residual en la ecuación de balance de energía considerada para cada componente. La modelización de las resistencias involucradas en estas relaciones es el principal obstáculo para la aplicación a escala regional de este método.

Método de la razón de Bowen radiativa

Esta aproximación se basa en el método razón de Bowen radiativa-balance de energía presentado en Ibáñez et al. (1998) para cubiertas completas. La razón de Bowen radiativa, β_r , se define según:

$$\beta_{r,i} = \gamma (T_i - T_a)/(e_s(T_i) - e) \quad (3)$$

donde e es la presión de vapor del aire sobre el cultivo (kPa) y $e_s(T_i)$ es la presión de vapor saturante a la temperatura T_i (kPa). Se asume la existencia de una relación lineal entre la razón de Bowen aerodinámica, β , y la razón de Bowen radiativa, para cada componente:

$$\beta_v = a_v + b_v \beta_{r,v} \quad (4a)$$

$$\beta_s = a_s + b_s \beta_{r,s} \quad (4b)$$

La transpiración de las plantas dada por la ecuación Priestley-Taylor se expresa haciendo uso del método razón de Bowen radiativa-balance de energía mediante:

$$\lambda E_v = R_{n_v} / (1 + (a_v + b_v \beta_{r,v})) \quad (5)$$

Aislado el término $\beta_{r,v}$ se obtiene la temperatura de la cubierta. La temperatura captada por el sensor permite entonces determinar la temperatura del suelo. La evaporación proveniente de éste es:

$$\lambda E_s = R_{n_s} / (1 + (a_s + b_s \beta_{r,s})) \quad (6)$$

El método precisa de la calibración de las relaciones entre las razones de Bowen aerodinámica y radiativa (Ecs. 4a y 4b) pero evita utilizar parámetros difícilmente estimables a escala regional como la velocidad del viento, altura del cultivo o área media de la hoja, necesarios en los métodos de dos niveles anteriores para la estimación de las diversas resistencias involucradas en los algoritmos.

CALIBRACIÓN Y COMPARACION

Campaña experimental y calibración.

Para la calibración del método de la razón de Bowen radiativa y su comparación con el método de las resistencias se realizó una campaña de medidas desde mayo a octubre de 1996 en una finca de maíz (*Zea mays* L.) ubicada en Bellvís (Lleida) ($41^{\circ}40'N$, $0^{\circ}52'$, altitud 206 m). La siembra del maíz se realizó el 2 de mayo y la cosecha el 11 de octubre. La altura máxima alcanzada por las plantas fue de 3.1 m correspondiente a un índice de área foliar (LAI) de 6.1.

Se dispuso de un equipo razón de Bowen-balance de energía (Campbell Sci.) que incorpora una sonda de humedad del suelo. La temperatura radiativa fue medida con dos termómetros de infrarrojos (Everest Inc.) con un ángulo de visión de 15° . Se instaló un piranómetro (SKY Instruments) y un anemómetro (Vector Instruments). Durante la campaña se realizó un seguimiento de la altura y el índice de área foliar.

Para la calibración de los parámetros a_v , b_v , a_s y b_s de las expresiones (4a) y (4b) se estudiaron los datos adquiridos sobre suelo desnudo y con cubierta completa, respectivamente. Se consideró suelo desnudo mientras el LAI fue inferior a 1 y cubierta completa con LAI mayor que 4.

Comparación

Las medidas realizadas en el periodo en el cual $1 < LAI < 4$ fueron utilizadas para comparar el método de las resistencias y el de la razón de Bowen radiativa. La aptitud de ambos se estudió a través de diferentes estadísticos. Las tablas 1 y 2 muestran los resultados obtenidos. La tabla 3 presenta el porcentaje de error cometido con cada método.

Tabla 1.- Comparación de los resultados de la aplicación del método de las resistencias frente al valor medio medido.

Riego	A	SEE (Wm^{-2})	r^2	MDA (Wm^{-2})	RECM (Wm^{-2})
I	1.01	40	0.91	30	40
II	1.08	40	0.85	40	50
III	1.12	40	0.90	50	60

Tabla 2.- Comparación de los resultados de la aplicación del método de la razón de Bowen radiativa frente al valor medio medido.

Riego	A	SEE (Wm^{-2})	r^2	MDA (Wm^{-2})	RECM (Wm^{-2})
I	0.94	40	0.96	30	40
II	0.96	40	0.87	30	40
III	1.03	60	0.94	40	50

A, pendiente de la recta de regresión forzada a pasar por el origen entre los valores estimados y los medidos; ESE, error estándar de la estimación; r^2 , coeficiente de determinación; MDA, Media de la Diferencia Absoluta; RECM, Raíz del Error Cuadrático Medio.

Tabla 3.- Valor medio de la evapotranspiración medida y porcentaje de error cometido por el método de las resistencias(A) y por el propuesto(B).

Riego	λE (Wm^{-2})	$(RECM)_A/\lambda E$ (%)	$(RECM)_B/\lambda E$ (%)
I	415	10	10
II	464	11	9
III	478	13	10

Ambos algoritmos dan buenos resultados cuando se validan con datos tomados en superficie sobre una cubierta parcial. El método de la razón de Bowen radiativa ofrece estimaciones con errores alrededor del 10%. La ventaja del método propuesto es considerable pues no requiere de la velocidad del viento, la altura del cultivo, la anchura de la hoja o la estabilidad atmosférica al evitar la estimación de las diferentes resistencias. Ello hace que el algoritmo

sea operativo y aplicable a escala regional incorporando las imágenes de satélite.

APLICACIÓN A IMÁGENES DE SATÉLITE

Validada una metodología que da buenos resultados en superficie se procedió a aplicarla a escala regional. Un primer paso en la determinación de la evapotranspiración a escala regional es la obtención de la máxima información posible de la superficie a partir de las imágenes de satélite. La información que proporciona el satélite corregida adecuadamente tiene una mayor representatividad espacial que las dadas por unas estaciones meteorológicas de superficie. En este trabajo se determinaron el albedo, la emisividad, el NDVI y la temperatura radiativa de superficie a partir de imágenes del sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA.

La metodología expuesta se aplicó a una zona del Pla d'Urgell (Lleida) de 4 km x 4 km donde el cultivo predominante es el maíz que cubre un 90% del área. Se empleó una imagen de la zona captada por el sensor AVHRR a bordo del NOAA12 a las 13.25h T.M.G. del 6 de Junio de 1998 y los datos adquiridos en siete estaciones meteorológicas próximas al área indicada.

Las reflectividades de las bandas 1 y 2 del sensor AVHRR se corrigieron del efecto atmosférico utilizando el programa SMAC para obtener las reflectividades de superficie. A partir de estas se calculó el mapa de NDVI que se presenta en la figura 1.

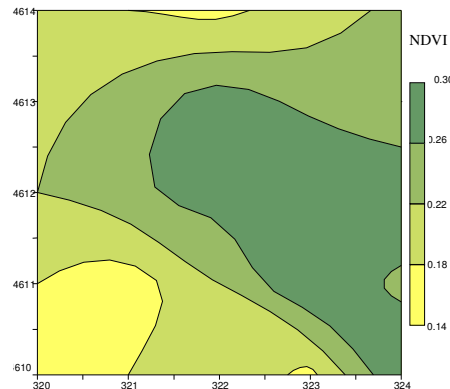


Figura 1.- Mapa de NDVI en la zona estudiada del Pla d'Urgell. 15 de Junio de 1998.

En la zona estudiada el maíz se siembra hacia principios de Mayo por lo que no alcanza cubierta completa hasta las primeras semanas de Julio.

La temperatura radiativa de superficie se obtuvo considerando la emisividad del cultivo y del suelo desnudo y aplicando el algoritmo de Coll et al. (1994) a la temperatura de brillo dada por las bandas 4 y 5 del sensor (Figura 2).

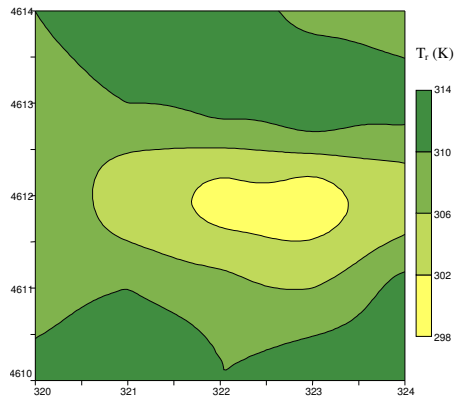


Figura 2.- Mapa de temperatura radiativa de la cubierta. 15 de Junio de 1998.

Para la aplicación del método de la razón de Bowen radiativa en cubiertas parciales se requiere un número mínimo de variables meteorológicas que se han de estimar mediante interpolación de datos tomados en estaciones en superficie. Los datos instantáneos interpolados para tener estimaciones en cada píxel de una imagen de satélite son: temperatura del aire, radiación solar y presión de vapor del aire. Junto con el albedo, el NDVI y la temperatura radiativa de cada píxel permiten aplicar el método de la razón de Bowen radiativa a escala regional para obtener la evapotranspiración en el instante de paso del satélite. El algoritmo propuesto por Jackson et al. (1983) estima el flujo de calor latente diario a partir del valor instantáneo calculado hacia el mediodía (Figura 3).

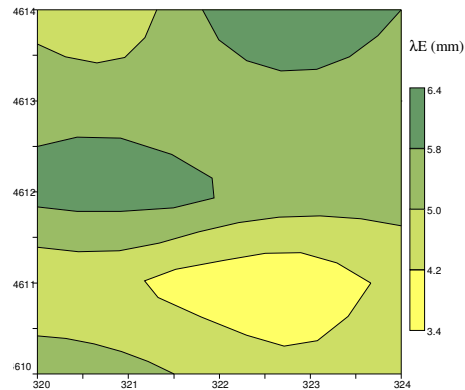


Figura 3.- Mapa de evapotranspiración diaria. 15 de Junio de 1998.

BIBLIOGRAFÍA

- Coll, C., Caselles, V. , Sobrino, J.A. and Valor, E. 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *Int. J. Remote Sens.* 15: 105-122.
- Ibáñez, M., Pérez, P.J., Caselles, V. and Castellví, F. 1998. A simple method for estimating the latent heat flux over grass from radiative Bowen ratio. *J. Appl. Meteorol.* 37: 386-392.
- Jackson, R.D., Hatfield, J.L., Reginato, R.J., Idso, S.B. and Pinter, P.J. 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agric. Water Manage.* 7: 351-362
- Norman, J.M., Kustas, W.P. and Humes, K.S. 1995. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agric. For. Meteorol.* 77: 263-293
- Zhan, X., Kustas, W.P. and Humes, K.S. 1996. An intercomparison study on models of sensible heat flux over partial canopy surfaces with remotely sensed surface temperature. *Remote Sens. Environ.* 58: 242-256

