

Evapotranspiración estimada a partir de la temperatura radiativa: 1. Métodos aerodinámico y de la razón de Bowen radiativa

M. Ibáñez* y V. Caselles**

*Dept. Medi Ambient i Ciències del Sol, Universitat de Lleida, Av. Rovira Roure 177, 25198 Lleida (Spain)

E-mail: m.ibanez@macs.udl.es

**Dept. Termodinamica, Universitat de Valencia, Doctor Moliner 50,46100 Burjassot-Valencia (Spain)

RESUMEN

La determinación de la evapotranspiración a partir de la temperatura radiativa de la cubierta es de gran interés en agronomía. La formulación aerodinámica del problema ha sido la más aplicada en los últimos años. Este trabajo examina el método aerodinámico y propone una aproximación alternativa para estimar la evapotranspiración a partir de la temperatura radiativa de cubiertas completas sin estrés hídrico, el método de la razón de Bowen radiativa. Este algoritmo, basado en el método Razón de Bowen-Balance de energía, introduce la relación entre la razón de Bowen aerodinámica y la radiativa. Ambas aproximaciones son estudiadas a partir de datos de calibración y validación adquiridos con equipos en superficie sobre cubiertas completas de hierba, trigo, alfalfa y maíz.

El método aerodinámico de resultados aceptables sobre hierba, trigo y alfalfa pero no es aplicable sobre maíz. El método de la razón de Bowen radiativa permite estimar la evapotranspiración con un error alrededor del 10% en todos los cultivos. Este algoritmo no requiere el cálculo de la resistencia aerodinámica o de la cubierta. El método desarrollado es aplicable a escala regional utilizando imágenes de satélite.

PALABRAS CLAVE: Evapotranspiración regional, método aerodinámico, razón de Bowen radiativa.

ABSTRACT

Knowledge of evapotranspiration from remotely sensed canopy temperature is of great interest in agronomy. Most efforts have been devoted to the determination of latent heat flux from surface radiative temperature using the aerodynamic formulation. This paper examines the bulk aerodynamic method and proposes an alternative algorithm for estimating evapotranspiration from radiative temperature over unstressed full canopy cover crops, the radiative Bowen ratio method. This approach, based on the Bowen ratio Energy balance method, introduces the relation between the radiative Bowen ratio and the aerodynamic Bowen ratio. Both methods are studied using calibration and validation surface data sets over four complete canopies: grass, wheat, alfalfa and maize.

The aerodynamic method gives acceptable results for grass, wheat and alfalfa crops but it is really discouraging on maize. Using the radiative Bowen ratio method errors around 10% are achieved for latent heat flux estimations. Major advantage of this method is that no a priori assumptions concerning the resistances are required. The proposed algorithm can be applied at regional scale using satellite images.

KEY WORDS: Regional evapotranspirations, aerodynamic method, radiative Bowen ratio.

INTRODUCCION

El conocimiento de la evapotranspiración es de vital importancia para estudios y aplicaciones agrícolas. Dada la alta variabilidad espacial del flujo de calor latente, las medidas en diferentes puntos de la superficie no dan una estimación regional adecuada. Son necesarios métodos de estimación de la evapotranspiración a partir de la temperatura radiativa de la superficie que podrá ser captada desde satélites. Durante estos últimos años la mayoría de los esfuerzos se han centrado en la estimación de la evapotranspiración incorporando la temperatura radiativa del sistema suelo-cubierta vegetal haciendo uso de la teoría de la similitud de Monin-Obukhov para aproximar el flujo de calor sensible. Éste es estimado mediante una ecuación

aerodinámica en la que la temperatura radiativa ha sustituido a la temperatura aerodinámica. El flujo de calor latente es calculado como término residual en la ecuación de balance de energía (Choudhury et al., 1986, Lhomme et al., 1988). La simplicidad de la formulación aerodinámica la hace atractiva para aplicaciones a escala regional pero conduce a errores del 20% (Stewart et al., 1994). La principal fuente de error es la diferencia entre la temperatura aerodinámica y la temperatura radiativa que la sustituye. Se han propuesto diferentes métodos empíricos para minimizar el efecto de esta fuente de error (Sun y Mahrt, 1995).

El método más extendido es el utilizado por Kustas et al. (1989) que propone la modelización del $(k_B^{-1})_r$. El parámetro k_B^{-1} que interviene en la resistencia aerodinámica de la cubierta es sustitui-

do por $(kB^{-1})_r$ cuando la temperatura radiativa se introduce en la formulación aerodinámica. Las limitaciones de esta solución han sido expuestas por Hall et al. (1992) y Verhoef et al. (1997). Incluso los trabajos que se centran en cultivos con cubiertas completas difieren en el valor propuesto para $(kB^{-1})_r$. Algunos autores aceptan para hierba de referencia un valor entre 2 y 3 mientras otros dan estimaciones muy diferentes (Beljaars y Holstag, 1991, Duynkerke, 1992). Sobre trigo Huband and Monteith (1986) utilizan $(kB^{-1})_r = 0$ pero Kustas et al. (1989) encontraron mejores resultados utilizando $(kB^{-1})_r = 2$ y $(kB^{-1})_r = 0.17$ u $(T_r - T_a)$, siendo u la velocidad del viento (ms^{-1}), T_r la temperatura radiativa (K) y T_a la temperatura del aire (K).

En la primera parte de este trabajo se discute el método basado en el parámetro $(kB^{-1})_r$ y se presenta una metodología alternativa más precisa basada en el método razón de Bowen-Balance de energía. El método propuesto es calibrado y validado con datos de campo en superficie. Mientras que en la segunda parte de este estudio se expone la aplicación del método razón de Bowen radiativa-balance de energía a escala regional, utilizando para ello imágenes NOAA-AVHRR.

METODOLOGIA

En esta sección se exponen dos métodos para determinar la evapotranspiración a partir de la temperatura radiativa aplicables a escala local. Para ambos métodos se asume que son disponibles medidas de radiación neta y flujo de calor en el suelo.

Método de la ecuación aerodinámica-Balance de energía

El método aerodinámico estima la evapotranspiración, λE_s , a partir de la ecuación de balance de energía simplificada:

$$\lambda E_a = R_n - G - H \quad (1)$$

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

El flujo de calor sensible se estima con la expresión:

$$H = \rho C_p \frac{T_r - T_a}{r_a} \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del aire ($kg\ m^{-3}$), C_p es el calor específico del aire ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) y r_a es la resistencia aerodinámica a la transferencia de calor sensible (sm^{-1}). La resistencia aerodinámica es función de la velocidad del viento, la estabilidad atmosférica, la altura del cultivo y el parámetro $(kB^{-1})_r$.

Método Razón de Bowen radiativa-Balance de energía

Este método original se basa en la obtención de la razón de Bowen tradicional o aerodinámica, $\beta = H/\lambda E$, sobre una cubierta completa a partir de la razón de Bowen radiativa, β_r . Esta última magnitud se define según Ibáñez et al. (1998) como:

$$\beta = \gamma \frac{T_r - T_a}{e_s(T_r) - e} \quad (3)$$

donde γ es la constante psicrométrica (kPa/K), e es la presión de vapor del aire sobre el cultivo (kPa) y $e_s(T_r)$ es la presión de vapor saturante a la temperatura radiativa T_r (kPa).

La relación entre ambas razones de Bowen se demostrará que sobre diferentes cubiertas completas es de la forma:

$$\beta = a + b\beta_r \quad (4)$$

donde a y b dependen de las características del cultivo y la situación meteorológica pero en primera aproximación para obtener un algoritmo operativo se pueden considerar constantes para cada cultivo.

El método propuesto, llamado de aquí en adelante de la razón de Bowen radiativa, introduce esta magnitud en la ecuación de balance de energía para estimar la evapotranspiración, λE_b , a partir de:

$$\gamma E_b = \frac{R_n - G}{1 + (a + b\beta_r)} \quad (5)$$

Para la calibración y validación de este modelo se han utilizado datos experimentales tomados en superficie sobre diferentes cultivos. Las medidas en superficie permiten evaluar la validez del modelo evitando los complicados efectos de la atmósfera y de la geometría superficie-sensor siempre presentes en los datos aportados por los satélites.

CALIBRACION DE LOS METODOS

Campañas experimentales

Las medidas experimentales fueron tomadas durante cuatro campañas experimentales entre 1994 y 1997 sobre hierba, maíz, trigo y alfalfa. Para ello se dispuso de un equipo Razón de Bowen-Balance de energía (Campbell Sci.) que incorpora una sonda de humedad del suelo y un equipo de correlación turbulenta, anemómetro unidimensional e higrómetro kriptón (Campbell Sci.). La temperatura radiativa fue medida con dos termómetros de infrarrojos (Everest Inc.) con un ángulo de visión de 15° . También se instaló un piranómetro (SKY

Instruments) y un anemómetro (Vector Instruments). Todas las medidas fueron tomadas a intervalos de 20 ó 30 minutos. Las correcciones realizadas en los datos adquiridos se detallan en Angus y Watts (1984) para el equipo Razón de Bowen-Balance de energía, Foken y Wichura (1996) para los equipos de correlación turbulenta y Badenas y Caselles (1992) para la temperatura radiativa de la cubierta.

Los datos fueron separados en dos bloques. Un primer bloque denominado datos de calibración comprende las medidas realizadas durante los primeros diez días de campaña sobre cada uno de los cultivos. El resto de los datos adquiridos en las cuatro campañas se estudiaron en la comparación de los métodos.

Calibración del método aerodinámico

El parámetro $(kB^{-1})_r$ se puede calcular a partir del conjunto de datos de calibración. El valor medio de esta magnitud para cada uno de los cultivos se presenta en la Tabla 1.

Los valores de $(kB^{-1})_r$ obtenidos sobre hierba y trigo concordaron con los propuestos por otros autores. Para estas cubiertas completas la temperatura radiativa debe ser inferior a la temperatura

Cultivo	Nº datos	$(\bar{kB}^{-1})_r$	$\sigma(kB^{-1})_r$
Hierba	107	0.23	2.0
Trigo	122	1.0	3.0
Alfalfa	232	1.6	5.0
Maíz	194	-2.3	9.0

Tabla 1. Valor medio y desviación estándar del parámetro $(kB^{-1})_r$, sobre los diferentes cultivos.

aerodinámica por lo tanto $(kB^{-1})_r$ debiera ser inferior a $(kB^{-1})_a$, de valor estimado entre 2 y 3 (Huband y Monteith, 1986). La gran dispersión encontrada para $(kB^{-1})_r$ alrededor de su valor medio también ha sido descrita con anterioridad (Duynkerke, 1992, Hignett, 1994). La variación diaria y estacional del parámetro estudiado es la mayor limitación del método aerodinámico (Verhoef et al., 1997).

Calibración del método razón de Bowen radiativa

En la Tabla 2 se presentan, obtenidos a partir de los datos de calibración, los parámetros a y b que relacionan la razón de Bowen radiativa y aerodinámica. Estos resultaron del ajuste de la función $B = a + b\beta_r$. Junto con a y b se muestran el coeficiente de determinación y el error de la estimación.

Los estadísticos de la tabla 2 muestran la existencia de buenas relaciones lineales entre las razones de Bowen para todos los cultivos. Los valores positivos de a se pueden relacionar con el fenómeno que ha sido llamado de los gradientes contrarios.

Cultivo	Nº datos	a	b	r^2	ESE
Hierba	107	0.05	2.45	0.91	0.07
Trigo	122	0.12	1.90	0.92	0.06
Alfalfa	232	0.02	0.84	0.70	0.06
Maíz	194	0.39	1.82	0.74	0.07

Tabla 2. Calibración del método razón de Bowen radiativa mediante el ajuste por mínimos cuadrados de la relación $\beta = a + b\beta_r$, sobre los diferentes cultivos.

ESE, error estándar de la estimación; r^2 coeficiente de determinación.

Este consiste en la existencia de flujo de calor ascendente aún cuando la temperatura radiativa de la cubierta es más baja que la temperatura del aire. Estos gradientes contrarios suceden cuando $\beta > 0$ mientras $\beta_r < 0$. Este fenómeno no se observó importante en las cubiertas de alfalfa y hierba pero debe tenerse en cuenta en el trigo y el maíz. Sun y Mahrt (1995) explicaron este resultado proponiendo la generación del flujo de calor sensible principalmente en la parte alta de la cubierta mientras que la temperatura radiativa depende de las superficies más bajas y frías.

COMPARACION DE LOS METODOS

Una vez calibrados ambos métodos con el mismo conjunto de datos se procedió a comparar las estimaciones obtenidas con el resto de los datos disponibles sobre los diferentes cultivos. En las Tablas 3 y 4 se presentan los estadísticos que evaluaron la bondad de cada uno de los métodos. Para el estudio se determinó la raíz del error cuadrático medio (RECM) y la media de la diferencia absoluta (MDA) junto con la pendiente, el error estándar de la estimación y el coeficiente de determinación de la regresión lineal de los valores de evapotranspiración estimados frente a los medidos.

Todos los estadísticos utilizados demuestran que el método que se propone basado en la razón de Bowen radiativa permiten obtener mejores estimaciones de la evapotranspiración instantánea aún cuando la velocidad del viento y la altura de la cubierta son conocidos. El maíz es un caso extremo, debido a su desarrollo vertical y la arquitectura de su cubierta vegetal no se puede utilizar el método aerodinámico en él. La causa de resultado es el amplio rango de valores que adopta el parámetro $(kB^{-1})_r$ (Tabla 1). El uso de $(kB^{-1})_r$ variable, estimado según el algoritmo propuesto Kustas et al. (1989) no mejoró los resultados.

Las menores diferencias entre los métodos comparados se encontraron para la alfalfa. El flujo de calor sensible en este cultivo era pequeño, no superó el 20% de la radiación neta en ningún instante del día. Por ello, la evapotranspiración estimada fue poco sensible a los errores cometidos en la estimación del calor sensible.

En la Tabla 5 se muestra el valor medio de la evapotranspiración medida en los datos de validación y el porcentaje de error que representa la RECM de cada método frente a ésta. El método

aerodinámico permite estimar el flujo de calor latente instantáneo con errores entre el 10 y el 20% para la hierba, el trigo y la alfalfa mientras que el método desarrollado ofrece siempre errores infe-

riores al 10%. Hay que añadir que el método de la razón de Bowen radiativa no requiere la determinación de la velocidad del viento para ser aplicado.

Cultivo	Nº datos	A	ESE (Wm ⁻²)	r ²	MDA (Wm ⁻²)	RECM (Wm ⁻²)
Hierba	105	1.04	70	0.64	60	70
Trigo	130	1.16	40	0.83	50	60
Alfalfa	238	1.07	30	0.96	30	40
Maíz	231	-	-	-	>100	>100

Tabla 3. Evaluación del método aerodinámico frente al flujo de calor latente medido utilizando diferentes estadísticos

A, pendiente de la recta de regresión forzada a pasar por el origen entre los valores estimados (E_i) y las medidas (M_i);

Media de la Diferencia Absoluta, $MDA = -\frac{1}{n} \sum |M_i - E_i|$ Raíz del Error Cuadrático Medio, $MDA = [\frac{1}{n} \sum (M_i - E_i)^2]^{1/2}$

Cultivo	Nº datos	A	ESE (Wm ⁻²)	r ²	MDA (Wm ⁻²)	RECM (Wm ⁻²)
Hierba	105	1.00	40	0.80	30	40
Trigo	130	1.00	20	0.94	10	20
Alfalfa	238	1.03	20	0.97	10	20
Maíz	231	0.96	20	0.98	20	20

Tabla 4. Evaluación del método de la razón de Bowen radiativa frente a la evapotranspiración medida estudiando diferentes estadísticos

Cultivo	$\bar{\lambda}E$ (Wm ⁻²)	(RECM) _a /λE (%)	(RECM) _b /λE (%)
Hierba	467	15	9
Trigo	283	20	7
Alfalfa	328	12	6
Maíz	301	>30	7

Tabla 5. Evapotranspiración media medida y porcentaje de error cometido en la estimación con los diferentes métodos: (a) aerodinámico y (b) de la razón de Bowen radiativa.

CONCLUSIONES

Aunque han sido muchos los intentos de mejora de los modelos de un nivel desarrollados basados en el método aerodinámico para estimar la evapotranspiración a partir de la temperatura radiativa los errores obtenidos hasta ahora siempre son muy superiores al 10%. Estos se han pretendido reducir modelizando (kB¹)_r pero la variabilidad de este parámetro ha hecho infructuosos los esfuerzos.

En este trabajo se ha comparado el método aerodinámico con el método de la razón de Bowen radiativa a partir de datos adquiridos en superficie sobre hierba, trigo, alfalfa y maíz. La calibración local y validación de ambos ha permitido obtener los siguientes resultados. El método aerodinámico sólo es aplicable en cubiertas de escasa altura. En cultivos como el maíz la variabilidad de (kB¹)_r es tan elevada que el método no es aceptable. El método de la razón de Bowen radiativa da estimaciones de la evapotranspiración con errores inferiores al 10%. Sobre los cuatro cultivos la relación lineal entre la razón de Bowen aerodinámica y la razón de Bowen radiativa es una aproximación adecuada. Los parámetros *a* y *b* son constantes y característicos del cultivo.

La metodología propuesta evita la necesidad de incorporar magnitudes tales como la velocidad del

viento o la estabilidad atmosférica, que varían espacialmente de forma considerable, introduciendo errores importantes en la determinación de la evapotranspiración cuando el algoritmo se aplica a escala regional.

BIBLIOGRAFIA

ANGUS, D. E. and WATrS, P. J. 1984. How good is Bowen ratio method? *Agricultural and Forest Meteorology*. 8: 133-150.

BADENAS, C. and CASELLES, V. 1992. A simple technique for estimating surface temperature by means of thermal infrared radiometer. *International Journal of Remote Sensing*. 13: 2951-2956.

BEUAARS, A. C. M. and HOLSTAG, A. A. M. 1991. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. *Journal of Applied Meteorology*. 30: 327-341.

CHOUDHURY, B. J., REGINATO, R. J. and IDSO, S. B. 1986. Analysis of infrared temperature observation of wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 37: 75-88.

DUYNKERKE, P. G. 1992. The roughness length for heat and other vegetation parameters for a surface of short grass. *Journal of Applied Meteorology*. 31: 579-586.

FOKEN, T. and WICHURA, B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 78: 83-105.

- HALL, F. G., HUENNRICH, K. F., GOETZ, S. J., SELLERS, P. J. and NICKESON, J. E. 1992. Satellite remote sensing of surface energy balance: Success, failures, and unresolved issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research* 97: 19061-19089.
- HIGNETT, P. 1994. Roughness length for temperature and momentum over heterogeneous terrain. *Boundary Layer Meteorology*. 68: 225-236.
- HUBAND, N. D. S. and MONTEITH, J. L. 1986. Radiative surface temperature and energy balance of a wheat canopy: 1. Comparison of radiative and aerodynamic canopy temperature. *Boundary Layer Meteorology*. 36: 1-17.
- IBÁÑEZ, M., PÉREZ, P. J., CASELLES, V. and CASTELLVI, F. 1998. A simple method for estimating surface latent heat flux over grass from radiative Bowen ratio. *Journal of Applied Meteorology*. 37: 386-394.
- KUSTAS, W. P., CHOUDHURY, B. J., MORAN, M. S., REGINATO, R. J., JACKSON, R. D., GAY, L. W. and WEAVER, H. L. 1989. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 44: 197-216.
- LHOMME, J. P., KATERJI, N., PERRIER, A. and BERTOLINI, J. M. 1988. Radiative surface temperature and convective flux calculation over crop canopies. *Boundary-Layer Meteorology*. 43: 383-392.
- STEWART, J. B., KUSTAS, W. P., HUMES, K. S., NICHOLS, W. D., MORAN, M. S. and DE BRUIN, H. A. R. 1994. Sensible heat flux-radiometric surface temperature relationship for eight semi-arid areas. *Journal of Applied Meteorology*. 33: 1110-1117.
- SUN, Y. and MAHRT, L. 1995. Relationship of surface heat flux to microscale temperature fluctuations. *Boundary-Layer Meteorology*. 76: 292-301.
- VERHOEF, A., DE BRUIN, H. A. R. and VAN DEN HURK, B. J. J. M. 1997. Some practical notes on the parameter kB-l for sparse vegetation. *Journal of Applied Meteorology*. 26, 560-572.