

PARAMETRIZACIÓN DE k_B^{-1} PARA ESTIMAR EL FLUJO DE CALOR SENSIBLE CON IMÁGENES AVHRR

M. IBÁÑEZ, P.J. PÉREZ y F. CASTELLVÍ

m.ibanez@macs.udl.es

Dept. Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida, Av. Rovira Roure 177, E25198 Lleida

RESUMEN: La necesidad de evaluar la evapotranspiración a escala regional para la gestión de regadíos ha hecho que sean innumerables los intentos por aplicar imágenes AVHRR-NOAA en la determinación del flujo de calor sensible. La principal limitación de estos métodos es la estimación de la resistencia aerodinámica. El parámetro crítico en la expresión de la resistencia aerodinámica es k_B^{-1} . La parametrización de k_B^{-1} ha sido infructuosa a escala regional por no disponer hasta ahora de medidas de flujo de calor sensible a escala del píxel AVHRR en superficies heterogéneas y durante toda una temporada de riegos. Para resolver esta medida de flujo se ha desarrollado el cintilómetro. En la primera parte de este trabajo se estudia la representatividad espacial de las medidas del cintilómetro. El núcleo de esta aportación consiste en la correlación entre el parámetro k_B^{-1} , el NDVI y la altura solar. Los buenos resultados obtenidos ($r^2=0.81$) ofrecen una nueva metodología para determinar el flujo de calor sensible. La estimación de k_B^{-1} , las imágenes AVHRR y los datos meteorológicos permiten calcular el flujo de calor sensible durante toda la temporada de riegos con errores inferiores al 20%.

Palabras clave: Parámetro k_B^{-1} , flujo de calor sensible, imágenes AVHRR.

ABSTRACT: Because the knowledge of evapotranspiration at regional scale is of great interest for irrigated areas management many efforts have been devoted to apply AVHRR-NOAA images to determine sensible heat flux. A shortcoming of these methods is the estimation of the aerodynamic resistance. The critical parameter to know the aerodynamic resistance is k_B^{-1} . The parametrization of k_B^{-1} has been unsuccessful at regional scale because sensible heat flux measurements at AVHRR pixel scale have been recently available. The scintillometer was developed to fill this gap. The spatial representation of scintillometer measurements is discussed in the first part of this work. The aim of this communication was to find a suitable relationship to estimate k_B^{-1} from the NDVI and the solar height. The good results obtained ($r^2=0.81$) give us the chance to propose a new methodology to determine sensible heat flux. The estimation of k_B^{-1} , the AVHRR images and the meteorological data allow us to compute sensible heat fluxes along the irrigation period with an error smaller than 20%.

Key words: Parameter k_B^{-1} , sensible heat flux, AVHRR images.

INTRODUCCIÓN

Estimar la evapotranspiración diaria en zonas agrícolas irrigadas de clima semiárido es fundamental dado el coste social y económico que tiene el agua de riego en estas áreas. La necesidad de evaluar el flujo de calor latente a escala regional ha hecho que sean innumerables los intentos para aplicar la información aportada por los satélites para determinar la evapotranspiración (Kustas *et al.*, 1994; Caselles *et al.*, 1998). La principal limitación de estos métodos es la estimación de la resis-

tencia aerodinámica de la superficie a escala del píxel AVHRR (Verhoef *et al.*, 1997; Ibáñez *et al.*, 1999).

Sustituyendo la temperatura aerodinámica por la temperatura radiativa en la expresión del flujo de calor sensible (H) basada en la teoría de similitud de Monin-Obukhov resulta la expresión:

$$H = \rho C_p \frac{T_r - T_a}{r_{a,H}}$$

Donde ρ es la densidad del aire (kg m^{-3}), C_p es el calor específico del aire ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T_s y T_a son las temperaturas radiativas del sistema suelo – cubierta vegetal y del aire (K) y $r_{a,H}$ es la resistencia aerodinámica a la transferencia de calor (sm^{-1}).

La resistencia a la transferencia de calor es una función complicada de la velocidad del viento, la estabilidad atmosférica y las características de rugosidad de la superficie. El parámetro crítico en la expresión de la resistencia aerodinámica es el término $kB^{-1} = \ln(z_{0M}/z_{0H})$, donde z_{0M} y z_{0H} son las alturas de rugosidad para el flujo de momento y de calor (m). Se han realizado muchos esfuerzos por determinar kB^{-1} en diferentes condiciones (Stewart *et al.*, 1994; Blyth y Dolman, 1995) casi siempre con medidas en superficie. El seguimiento de este parámetro a escala regional ha resultado imposible por la falta de la técnica adecuada para la medida del flujo de calor sensible a una escala comparable a la de los píxeles de las imágenes AVHRR.

Para resolver la cuestión se ha desarrollado el Large Aperture Scintillometer (LAS) (De Bruin *et al.*, 1995; Nieveen *et al.*, 1998). El cintilómetro es un instrumento que mide la intensidad de las fluctuaciones turbulentas del índice de refracción del aire a partir de las fluctuaciones de intensidad de una señal recibida. La señal es emitida por una fuente situada de 0.25 a 5 km del receptor. La intensidad de turbulencia espacial se determina a través del parámetro de estructura para el índice de refracción, C_n^2 . Con algunos datos adicionales se obtiene un flujo de calor sensible medio entre emisor y receptor. El método del cintilómetro de gran apertura fue propuesto por Wang *et al.* (1978).

El objetivo de este trabajo es proponer una nueva metodología para estimar el flujo de calor sensible. La integración de las medidas en superficie con el LAS y las medidas aportadas por el sensor AVHRR-NOAA permiten la parametrización local de kB^{-1} . La estimación de este parámetro incorporado a la resistencia aerodinámica ofrece la posibilidad de estimar el flujo de calor sensible a escala regional.

LOCALIZACIÓN Y DATOS DISPONIBLES

Para la realización del estudio se ha dispuesto de los datos de un cintilómetro y de estaciones meteorológicas automáticas en el Pla d'Urgell (Lleida). La zona en la que se mide el flujo de calor sensible es explotada intensamente con cultivos de regadío de todo tipo: frutales, maíz, alfalfa, etc. Dado el reducido tamaño de las fincas la heterogeneidad a escala de píxel AVHRR es grande.

El emisor y el receptor del cintilómetro se han situado a 4.5 km de distancia entre sí en sendas colinas a unos 50m de altitud sobre una zona completamente lla-

na. El equipo almacena cada 10 minutos el valor medio de un potencial eléctrico que se relaciona directamente con el parámetro de estructura para el índice de refracción del aire. Este parámetro permite medir el parámetro de estructura para la temperatura, C_T^2 , y determinar el flujo de calor sensible medio en el citado intervalo. El área a la que el LAS es sensible es la superficie entre el emisor y el receptor y una cierta extensión a barlovento que no ha sido aún bien estudiada.

En la zona de aplicación se dispone de 10 estaciones meteorológicas automáticas. A partir de estas estaciones y aplicando técnicas de interpolación se puede estimar la radiación solar, la temperatura del aire, la presión de vapor y el viento en toda la zona. Los datos disponibles han sido valores medios de intervalos de 30 minutos.

Para el estudio se escogieron 34 imágenes AVHRR-NOAA del año 1999, según la disponibilidad de imágenes libres de nubes en la zona, entre Abril y Octubre. Después de las correcciones radiométrica y geométrica se calculó la temperatura radiativa de superficie aplicando un algoritmo tipo ventana partida propuesto por Coll *et al.* (1994).

Se instaló una torre meteorológica de 10m para disponer de medidas propias de diferentes variables meteorológica, especialmente de la velocidad y la dirección de viento para tener un perfil de éste.

METODOLOGÍA

El parámetro crítico en el cálculo de la resistencia aerodinámica es kB^{-1} . En la actualidad no existe acuerdo sobre este parámetro en cubiertas heterogéneas a la vez que no hay ningún estudio en el que se presente el seguimiento a lo largo de toda una temporada de riegos de esta magnitud. Las medidas continuas del cintilómetro y de las diferentes estaciones meteorológicas lo han hecho posible en el presente trabajo. El parámetro kB^{-1} se ha podido obtener en cada píxel de la imagen AVHRR a partir de su relación con el flujo de calor sensible que de forma simplificada se expresa:

$$kB^{-1} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot u \cdot (T_s - T_a)}{H \cdot \ln((z-d)/z_{0M})} - \ln \left(\frac{z-d}{z_{0M}} \right) \quad (2)$$

Donde u es la velocidad del viento (m s^{-1}), d la altura del plano de desplazamiento cero (m) y H el flujo de calor sensible medido con el LAS (W m^{-2}).

En el trabajo se han seguido dos metodologías para responder a las siguientes cuestiones: ¿A qué área es sensible el cintilómetro en sus medidas de flujo? ¿Existe realmente correlación entre las condiciones de esta superficie y el parámetro kB^{-1} ?

Para abordar la primera cuestión, la representatividad espacial de las medidas del cintilómetro,

se determinó kB^{-1} tres días consecutivos en seis semanas diferentes. Con condiciones de tiempo anticiclónico la variación relativa de kB^{-1} ha de ser mínima en días sucesivos, atendiendo a la naturaleza del parámetro. Se esperaba un valor prácticamente constante cuando las condiciones meteorológicas y de la cubierta vegetal no sufren variaciones importantes. Se ha estudiado el comportamiento de kB^{-1} en días sucesivos tomando diferentes áreas en superficie, es decir, introduciendo diferentes valores medios de las temperaturas del aire y de la superficie en la ecuación (2). La Figura 1 muestra un esquema de las 5 zonas de control estudiadas, superficies cuadradas de 1,3,5,7, 9 km de lado, respectivamente.

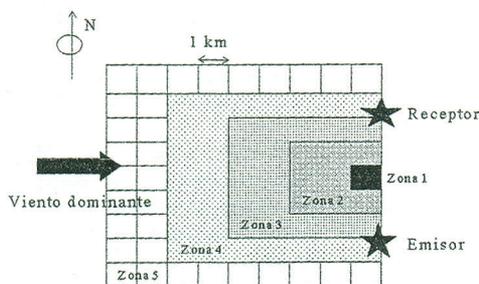


Figura 1. Zonas cuadradas estudiadas de 1 a 81 km^2 a barlovento del cintilómetro.

Para estudiar las posibilidades de estimación del parámetro kB^{-1} a partir de informaciones aportadas por las imágenes de satélite y mejorar las estimaciones del flujo de calor sensible a partir de imágenes de satélite a escala regional se ha optado por seleccionar 12 fechas en las que se conoce tanto kB^{-1} como el NDVI y otros parámetros meteorológicos: radiación solar, altura del sol, velocidad del viento, etc. Con estos 12 conjuntos de datos se han estudiado diferentes correlaciones. La mejor relación ha sido aplicada para estimar el flujo de calor sensible en diez fechas no incluidas en el estudio de correlación y comparar los valores estimados con los medidos por el cintilómetro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó el parámetro kB^{-1} en 18 fechas, en tres días sucesivos todos los meses entre abril y septiembre. Para cada grupo mensual se calculó la desviación estándar. El proceso se repitió para cada una de las cinco zonas consideradas, presentadas esquemáticamente en la figura 1. Los resultados de esta metodología se muestran en la tabla 1. Los valores medios de la desviación estándar para las zonas 1 a 5 son 2.53, 1.39, 1.14,

2.39 y 2.69, respectivamente. Este resultado aunque no es concluyente permite afirmar que el área de estudio más estrechamente relacionada con la señal captada por el cintilómetro es la zona 3.

	1	2	3	4	5
Abril	3.65	1.51	1.5	3.02	4.54
Mayo	2.74	1.42	1.21	2.81	3.52
Junio	2.47	1.26	1.02	2.40	2.21
Julio	2.11	1.35	0.90	1.56	1.75
Agosto	1.86	1.40	0.85	1.62	1.95
Septiembre	2.32	1.40	1.33	2.93	2.78

Tabla 1. Desviación estándar cada mes en las 5 zonas estudiadas

A partir de este resultado la segunda parte del estudio se centró en la zona 3. En esta área se determinó kB^{-1} dos veces por mes. Los valores encontrados de kB^{-1} son razonables según la literatura existente sobre el tema (Figura 2).

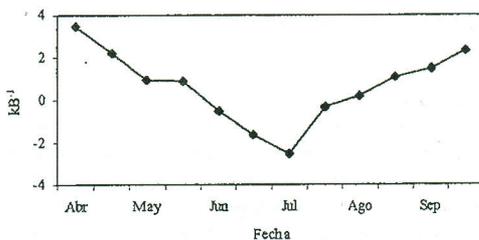


Figura 2. Evolución del parámetro kB^{-1} en la temporada de riegos.

A lo largo de la temporada de riegos va aumentando la densidad de la vegetación, principalmente debido al desarrollo de los cultivos de maíz, girasol y frutales. Este incremento del LAI medio en la zona se relaciona con la disminución de kB^{-1} . A medida que avanza la temporada la altura de las fuentes de flujo de calor sensible crece más rápidamente que la altura de los cultivos debido al efecto del incremento de densidad. Por ello z_{OH} alcanza valores superiores a z_{OM} . En los meses de agosto y septiembre varios cultivos empiezan a secarse una vez han alcanzado la madurez y se sigue un proceso en sentido inverso.

Para cada una de las fechas en las que se obtuvo kB^{-1} también se determinó en la zona 3 el NDVI, la altura solar (h), la radiación solar y la velocidad del viento en el instante de paso del satélite. La mejor correlación obtenida considerando estas variables frente a kB^{-1} fue la siguiente (Tabla 2):

$$kB^{-1} = -28.4 \cdot NDVI + 10.1 \cdot \text{sen}(h) \quad (3)$$

La regresión multilínea dio un coeficiente de determinación elevado, $r^2 = 0.81$. La expresión (3) permite estimar kB^{-1} cualquier día de la temporada en la zona estudiada.

	NDVI	sen (h)	kB^{-1}
Abril	0.16	0.7341	3.5
	0.2	0.7769	2.2
Mayo	0.28	0.8155	1
	0.3	0.8408	0.9
Junio	0.32	0.8613	-0.5
	0.34	0.8698	-1.6
Julio	0.35	0.8684	-2.5
	0.36	0.8567	-0.3
Agosto	0.27	0.8265	0.2
	0.23	0.7869	1.1
Septiembre	0.19	0.721	1.5
	0.14	0.6547	2.3

Tabla 2. Valores de kB^{-1} , NDVI y $\text{sen}(h)$ encontrados en las doce fechas.

A modo de validación se escogieron diez fechas a lo largo de la temporada diferentes a las tratadas anteriormente. Con imágenes AVHRR y datos de superficie en estas fechas se puede obtener el flujo de calor sensible al aplicar la expresión propuesta para kB^{-1} . El resultado se contrastó a través del RMSE con las medidas del cintilómetro. El RMSE medio de las diez fechas fue $RMSE = 40 \text{ Wm}^{-2}$ siendo el valor medio de los flujos medidos $H = 243 \text{ Wm}^{-2}$.

CONCLUSIONES

Es posible proponer una metodología para estimar el flujo de calor sensible a partir de medidas en estaciones meteorológicas y las imágenes de satélite con errores aceptables. Para ello es necesario disponer de un cintilómetro que aporte medidas del flujo de calor sensible a una escala comparable a las medidas de temperatura de superficie tomadas por el sensor AVHRR. Las medidas de este equipo están bien correlacionadas con un área de $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ a barlovento de la trayectoria de medida. La metodología propuesta consiste en calibrar una ecuación que relacione el parámetro kB^{-1} con el índice de vegetación y la altura solar para poder utilizar ésta en posteriores ocasiones. No se pretende la universalidad de esta calibración pero se propone que dados los buenos resultados obtenidos se estudie en diferentes zonas de interés.

BIBLIOGRAFÍA

- BLYTH, E. M. y A. J. DOLMAN, 1995. The roughness length for feat sparse vegetation. *J. Appl. Meteor.* 34, 583-585.
- CASELLES, V., M. M. ARTIGAO, E. HURTADO, C. COLL y A. BRASA, 1998. Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA-AVHRR images: Application to the Barrax area, Albacete, Spain. *Rem. Sens. Environ.* 63, 1-10.
- COLL, C., V. CASELLES, J. A. SOBRINO y E. VALOR, 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *Int. J. Rem. Sens.*, 15, 105-122.
- DE BRUIN, H. A. R., B. J. VAN DEN HURK y W. KOHSIEK, 1995. The scintillation method tested over a dry vineyard area. *Bound.-Lay. Meteor.* 76, 25-40.
- IBÁÑEZ, M., P. J. PÉREZ, J. I. ROSELL y F. CASTELVI, 1999. Estimation of the latent heat flux over full canopy covers from radiative temperature. *J. Appl. Meteor.* 38, 423-431.
- KUSTAS, W. P., E. M. PERRY, P. C. DORAISWAMY y M. S. MORAN, 1994. Using satellite remote sensing to extrapolate evapotranspiration estimates in time and space over a semiarid rangeland basin. *Rem. Sens. Environ.* 49, 275-286.
- NIEVEEN, J. P., A. E. GREEN y W. KOHSIEK, 1998. Using a large aperture scintillometer to measure absorption and refractive index fluctuations. *Bound.-Lay. Meteor.* 87, 101-116.
- STEWART, J. B., W. P. KUSTAS, K. S. HUMES, W. D. NICHOLS, M. S. MORAN y H. A. R. DEE BRUIN, 1994. Sensible heat flux-radiometric surface temperature relationship for eight semiarid areas. *J. Appl. Meteor.* 33, 1110-1117.
- VERHOEF, A., H. A. R. DE BRUIN y B. J. van de HURK, 1997. Some practical notes on the parameter kB^{-1} for sparse vegetation. *J. Appl. Meteor.* 36, 560-572.
- WANG, T., G. R. OCHS y S. F. CLIFFORD, 1978. A saturation resistant optical scintillometer to measure $Cn2$. *J. Opt.Soc.Am.* 68, 334-338.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a la cesión de las imágenes del sensor AVHRR-NOAA por el CREPAD (Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial), a los datos meteorológicos por el Departament de Agricultura, Ramaderia i Pesca y el Servei de Meteorologia de la Generalitat de Catalunya y a los datos del cintilómetro por el Meteorology and Air Pollution Department de la Agricultural University of Wageningen.