

Estimación del flujo de calor sensible en superficie en una pradera de Kansas, USA

Juan M. Sánchez, Vicente Caselles, Enric Valor, César Coll, Raquel Nicolòs y Joan M. Galve

Dep. Termodinámica. Universidad de Valencia. Valencia. C/. Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia. Juan.M.Sanchez@uv.es.

Resumen

En este trabajo se muestra la validación del modelo de Sánchez & Caselles [1] para la estimación del flujo de calor sensible en superficie, H , a partir de datos de teledetección y con una necesidad mínima de medidas "in situ". Para ello se ha elegido una extensa zona de pradera, sobre la que los resultados del modelo de Sánchez & Caselles [1] muestran un buen acuerdo con los valores medidos, tanto a escala local como regional. Finalmente, se ha elaborado un mapa de H de la zona a partir de una imagen Landsat-TM.

1. Introducción

Los flujos de energía en superficie constituyen la base de todos los procesos físicos que ocurren en la atmósfera. Por tanto, su estudio es fundamental para el desarrollo y mejora de modelos climáticos, hidrológicos, de circulación atmosférica y de predicción meteorológica. En los últimos años la teledetección se ha convertido en la herramienta ideal para el estudio de los distintos términos de la ecuación de balance de energía, gracias a la existencia de modelos que relacionan los flujos de calor con la radiación emitida por la superficie [2-6]. Además la teledetección nos permite la estimación de dichos flujos a una escala regional, a diferencia de los modelos locales basados en medidas micrometeorológicas [7, 8].

En este trabajo nos centraremos en el estudio del flujo de calor sensible, H . Sánchez & Caselles [1] llevaron a cabo una revisión de los modelos existentes para el cálculo de H a partir de la medida de la temperatura de la superficie, mostrando las deficiencias e inconvenientes de muchos de ellos. Por este motivo, Sánchez & Caselles [1] presentaron un modelo nuevo para la estimación de H basado en la asociación de resistencias en paralelo.

De acuerdo con los modelos de asociación de resistencias en paralelo, el flujo de calor sensible sobre una zona de suelo, H_s , y sobre una zona de

vegetación, H_c , se obtiene a través de la diferencia entre la temperatura del suelo, T_s , o de la vegetación, T_c , según el caso, y la temperatura del aire sobre la zona, T_a . De esta forma [5, 6]:

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a^s + r_a^a} \quad (1)$$

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a^a} \quad (2)$$

donde ρ (kg m^{-3}) es la densidad del aire, C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) es el calor específico del aire a presión constante, r_a^a (s m^{-1}) es la resistencia aerodinámica del aire y r_a^s (s m^{-1}) es la resistencia aerodinámica del suelo. Siguiendo este esquema, Sánchez & Caselles [1] propusieron la siguiente expresión para el flujo de calor sensible total sobre una zona heterogénea:

$$H = \rho C_p \frac{T^* - T_a}{r_a^*} \quad (3)$$

donde T^* es la temperatura efectiva de la zona y r_a^* es la resistencia aerodinámica efectiva. De acuerdo con estos autores, la relación entre los flujos de calor sensible, total y parciales viene dada por la expresión:

$$H = P_v H_c + (1 - P_v) H_s \quad (4)$$

donde P_v es la proporción de vegetación de la zona.

Introduciendo las ecuaciones (1), (2) y (3) en la relación (4), se obtiene la expresión necesaria para el cálculo de r_a^* :

$$r_a^* = \frac{T_c P_v + T_s (1 - P_v) - T_a}{P_v \frac{(T_c - T_a)}{r_a^a} + (1 - P_v) \frac{(T_s - T_a)}{r_a^a + r_a^s}} \quad (5)$$

Podemos observar que el número de variables y parámetros de entrada del modelo es bastante

reducido. Así pues, solamente precisamos de la medida “in situ” de los parámetros temperatura del aire, T_a , velocidad del viento, u y altura de la vegetación o del cultivo, h (parámetro necesario para el cálculo de r_a^a y r_a^b); mientras que P_v y T^* son obtenidos directamente a través de teledetección.

2. Zona de estudio y medidas

Para este trabajo seleccionamos el área de estudio de la campaña FIFE (First ISLSCP Field Experiment), llevada a cabo dentro de una zona de pradera de unos $15 \times 15 \text{ km}^2$ de extensión situada en el centro de Kansas, USA. Las medidas de campo se realizaron durante el periodo 1987-1989, y se coordinaron con vuelos aéreos e imágenes de satélite [9]. La zona fue dividida en sectores cuadrados de $200 \times 200 \text{ m}^2$ dentro de los cuales se llevaron a cabo las medidas “in situ”. Se realizaron medidas de temperatura radiométrica de la superficie (radiómetros de infrarrojo térmico), de temperatura del aire y velocidad del viento (estaciones meteorológicas convencionales) y de flujos de calor (técnicas de correlación turbulenta y de razón de Bowen) entre otras [9]. Para este trabajo hemos utilizado una imagen Landsat-TM de la zona, dentro de la cual hemos localizado 8 puntos de medidas “in situ” (Figura 1), que usaremos para la validación del modelo de Sánchez & Caselles [1].

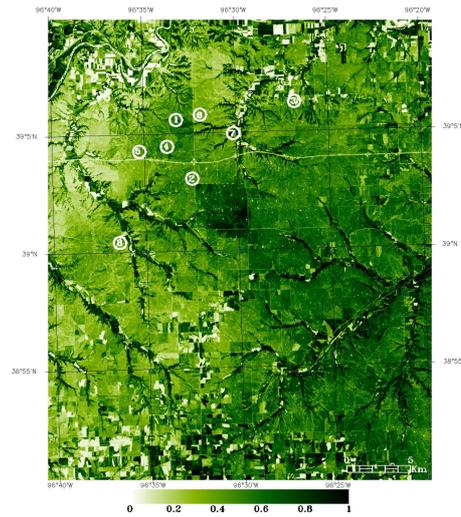


Figura 1: Imagen de P_v correspondiente a la zona de estudio (4 de Agosto de 1989), obtenida siguiendo el método de Valor & Caselles [10].

3. Resultados y discusión

3.1. Cálculo de T^*

La bondad de los resultados finales en el cálculo de H depende principalmente de una buena estimación de T^* . Por ello, en primer lugar hemos realizado una comparación entre las medidas de temperatura obtenidas de la imagen (Figura 2) y las registradas “in situ” sobre tres puntos concretos (Tabla 1). Previamente estos valores han sido corregidos de efectos atmosféricos, empleando para ello un radiosondeo coincidente con la hora de paso del satélite, y de efectos de emisividad, a partir de los valores medidos in situ para el suelo y la vegetación, $\epsilon_s=0.96$ y $\epsilon_c=0.98$.

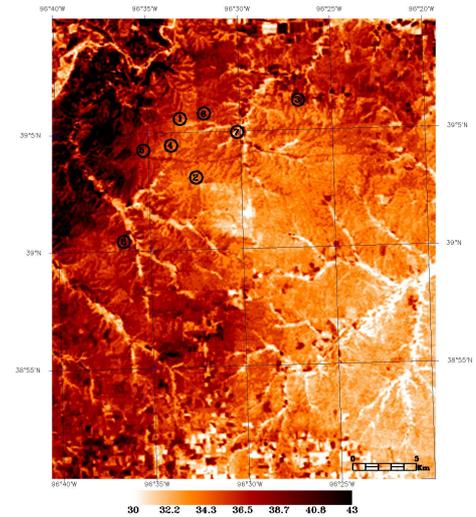


Figura 2: Imagen de $T^*(^{\circ}\text{C})$ correspondiente a la zona de estudio (4 de Agosto de 1989).

Tabla 1: Comparación de las medidas de T^* realizadas “in situ” y las obtenidas a través de satélite.

Zona	$T^*(^{\circ}\text{C})$ in situ	$T^*(^{\circ}\text{C})$ Landsat	Dif.($^{\circ}\text{C}$)
1	$34,7 \pm 0,7$	$36,0 \pm 0,3$	1,3
2	$30,9 \pm 0,9$	$32,7 \pm 0,4$	1,8
8	$37,7 \pm 1,2$	$37,5 \pm 0,4$	-0,2
		Media ($^{\circ}\text{C}$)	1,0
		σ ($^{\circ}\text{C}$)	1,1

Los errores en T^* “in situ” incluyen el error de precisión del radiómetro y la variabilidad temporal

de la medida (30 minutos), mientras que los errores en T_a^* del satélite dan cuenta de la variabilidad espacial de ésta dentro de una ventana de 3×3 píxeles.

3.2. Aplicación del modelo a escala local

En primer lugar realizamos el cálculo de H sobre las 8 zonas seleccionadas a partir de los valores particulares de T_a , u y h medidos en cada una de ellas, representativos de una extensión de 200×200 m². Los resultados son comparados con los valores de H medidos "in situ" sobre dichas zonas. La Tabla 2 muestra un análisis estadístico de esta comparación. También se han incluido los resultados del modelo de resistencias en serie [3, 4], ampliamente reconocido y utilizado, con el fin de dotar de mayor validez al modelo propuesto.

Podemos observar como los resultados de Sánchez & Caselles [1] están en buen acuerdo con los valores medidos de H , e incluso con los obtenidos a través del modelo en serie, con un error sistemático medio de $+10$ W m⁻² y una desviación estándar de ± 40 W m⁻². Estos valores son aceptables si tenemos en cuenta que el error en la medida directa "in situ" de H es de ± 15 -20 %.

Tabla 2: Comparación entre los valores de H medidos "in situ" y los calculados a través de Sánchez & Caselles [1] y del modelo en serie.

Zona	H in situ (Wm ⁻²)	H Sánchez & Caselles [1] (Wm ⁻²)		H modelo en serie (Wm ⁻²)	
			Dif.		Dif.
1	178	211	33	161	-17
2	98	63	-35	49	-49
3	133	119	-14	131	-2
4	129	156	27	147	18
5	241	264	23	244	-3
6	78	131	53	74	-4
7	88	129	41	59	-29
8	120	81	-39	32	-88
Media	150	140	10	110	-20
σ	60	70	40	70	30

3.3. Extensión del modelo a escala regional

Con el fin de mostrar la operatividad del modelo de Sánchez & Caselles [1] a una escala regional, repetiremos los cálculos de H tomando en esta ocasión unos valores de T_a , u y h únicos para las 8 zonas seleccionadas. Éstos corresponden a la media

de los valores registrados en todas esas zonas; sus desviaciones estándar dejan constancia de la representatividad espacial de dichos valores dentro de la extensa zona de estudio (15×15 km²): $T_a = 31,0 \pm 1,0$ °C, $u = 4,5 \pm 0,6$ m s⁻¹ y $h = 36 \pm 7$ cm.

La Tabla 3 muestra los resultados finales de la nueva comparación. Podemos observar como las medias a penas cambian, aunque las desviaciones estándar de las diferencias aumentan con respecto a la Tabla 2, hasta valores de ± 60 W m⁻². También se puede ver en la Tabla 3 como se obtiene el mismo valor medio de H , 150 W m⁻², tanto con la medida directa "in situ" como a través del modelo de Sánchez & Caselles [1], frente a los 120 W m⁻² del modelo en serie.

Una vez comprobada la validez del método a escala regional, podemos aplicarlo a toda la imagen. En la Figura 3 se muestra el mapa de r_a^* (s m⁻¹) obtenido a través de la expresión (5). Finalmente, en la Figura 4 se muestra el mapa de H (W m⁻²) para toda la zona de FIFE en el que se aprecia claramente como las zonas de mayor cobertura de vegetación son las que presentan un valor de H más bajo.

Tabla 3: Lo mismo que en la Tabla 2, tomando ahora para los cálculos valores "in situ" únicos para todas las zonas.

	H in situ (Wm ⁻²)	H Sánchez & Caselles [1] (Wm ⁻²)		H modelo en serie (Wm ⁻²)	
			Dif.		Dif.
Media	150	150	20	120	-20
σ	60	50	60	30	60

4. Conclusiones

Hemos validado un modelo de dos capas, basado en asociación de resistencias en paralelo [1], que nos permite estimar H en superficie a escala local y regional, a través de imágenes de satélite. Los únicos valores "in situ" necesarios para aplicar el modelo pueden tomarse de las medidas registradas en cualquier estación meteorológica convencional situada en la zona o proximidades. En este trabajo hemos utilizado una zona de pradera, sobre la que hemos obtenido unos resultados de H próximos a los valores medidos "in situ", con unos errores sistemáticos medios de $+10$ W m⁻² y $+20$ W m⁻² a escala local (200×200 m²) y regional (15×15 km²), respectivamente. Además, hemos obtenido un mapa de H sobre la zona, a partir de una imagen Landsat-TM, en el que se distingue claramente la variabilidad espacial de esta magnitud en función de las características de la superficie.

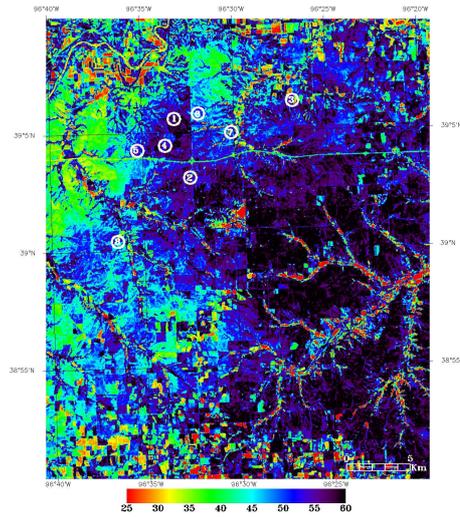


Figura 3: Imagen de r_a^* ($s\ m^{-1}$) correspondiente a la zona de estudio (4 de Agosto de 1989).

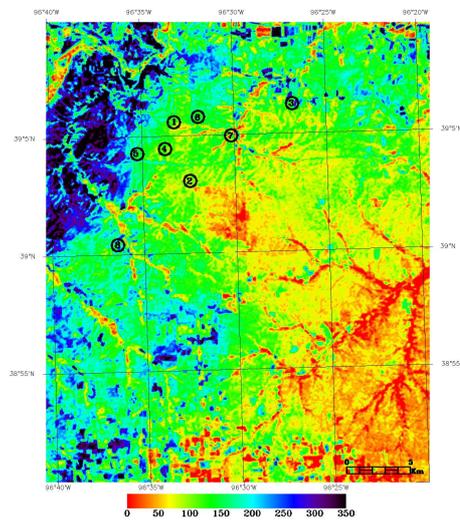


Figura 4: Imagen de H ($W\ m^{-2}$) correspondiente a la zona de estudio (4 de Agosto de 1989).

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MCyT (Acción Especial REN 2002-11605-E/CLI; Proyecto REN 2001-3116/CLI, y el contrato de investigación "Ramón y Cajal" del Dr. E. Valor), el

MEC (Proyecto CGL2004-06099-C03-01/CLI, Acción Complementaria CGL2004-0166-E y Beca FPU de R. Niclòs) y la Universitat de València (Beca "V Segles" de J.M. Sánchez).

6. Referencias

- [1] Sánchez, J. M. and Caselles, V. *Recent Research Developments in Thermal Remote Sensing*, Research Signpost. Press, Kerala, pp. 157-180, 2005.
- [2] Monteith, J. L., *Principles of environmental physics*, Edward Arnold Publisher. Press, London, 241 pp, 1973.
- [3] Shuttleworth, W. and Wallace, J. "Evaporation from sparse crops: an energy combination theory", *Quart. J. Royal Met. Society*, 111, 1143-1162, 1985.
- [4] Chehbouni, A., Lo Seen, D., Njoku, E. and Monteny, B. "Examination of the difference between radiative and aerodynamic surface temperatures over sparsely vegetated surfaces", *Remote Sensing of Environment*, 58, 177-186, 1996.
- [5] Norman, J., Kustas, W. and Humes, K. "Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature", *Agr. and Forest Met.*, 77, 263-293, 1995.
- [6] Kustas, W. P., and Norman, J. M. "Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover", *Agr. and Forest Met.*, 94, 13-29, 1999.
- [7] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. "Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements", *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56, Rome, 300 pp, 1998.
- [8] Hupet, F. and Vanclooster, M. "Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration", *J. Hydrology*, 243, 192-204, 2001.
- [9] Hall, F., Huemmrich, K., Goetz, S., Sellers, P., & Nickeson, J. "Satellite remote sensing of surface energy balance: success failures and unresolved issues in FIFE", *J. Geophys. Res.*, 97, 19061-19089, 1995.
- [10] Valor, E. and Caselles, V. "Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *Remote Sensing of Environment*, 57, 167-184, 1996.