

Comportamiento de los términos del balance de energía en una pastura

Schirmbeck, Juliano^a; Rivas, Raul^{a,b}

^(a)Instituto de Hidrología de Llanuras, ^(b) Comisión de Investigaciones Científicas
Campus Paraje Arroyo Seco, B7000, Tandil, Buenos Aires, Argentina
rivas@rec.unicen.edu.ar, jschirmbeck@rec.unicen.edu.ar

RESUMEN

El balance energía (BE) es fundamental para la estimación del flujo de calor latente (LE). En este trabajo se presenta el comportamiento de los términos del BE medidos en una estación sobre una pastura mixta y la extensión de los datos locales a la cuenca del Río Salado (Buenos Aires, Argentina) utilizando una imagen TERRA-MODIS. Los resultados muestran que la metodología utilizada permitiría cuantificar con precisión el agua utilizada por la vegetación con lo cual sería de gran utilidad para estimar la disponibilidad de forraje para el ganado vacuno.

Palabras clave: Balance de Energía, Radiación Neta, Flujo de Calor Latente

ABSTRACT

The energy balance (EB) is fundamental for estimating the latent heat flux. In this paper presents the behavior of the EB terms measured at station covered by mixed pastures, and the extension of local data to the Río Salado basin (Buenos Aires, Argentina) using a TERRA-MODIS image. Results indicate that the methodology used would allow quantifying with precision the water used by the vegetation, which makes it useful for estimating the availability of forage for cattle.

Keywords: Evapotranspiration, Net radiation, Remote Sensing

Introducción

La teledetección es una herramienta de gran utilidad para obtener información del balance de energía (BE) y del balance hídrico de una región; especialmente adquiere importancia en el monitoreo de desastres y alteraciones en el desarrollo de la biosfera.

Con datos captados desde satélite es posible estimar parámetros como albedo, cubierta vegetal, emisividad y temperatura de superficie con los cuales es viable aplicar la ecuación de BE con diferentes resoluciones espaciales y temporales (Valiente et al. 1995, Coll y Caselles 1997, Valor y Caselles 1996, Liang 2000, Liang et al. 2002, Rivas y Caselles 2004, Schirmbeck 2005, Timmermans et al., 2007).

En la ecuación de BE el término de mayor importancia para la evaluación de la productividad primaria de una región es el flujo de calor latente (LE). Si se calcula LE con una precisión espacial adecuada se puede estimar el desarrollo de la cubierta vegetal (disponibilidad de materia seca) en el área bajo análisis.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el comportamiento de los términos del BE a escala local en una parcela con cubierta vegetal mixta y la aplicación del BE para estimar LE a escala de cuenca a partir de una imagen AQUA-MODIS.

La finalidad futura de la extensión de los datos a una región es poder conocer la disponibilidad de forrajes para el consumo ganadero en la región pampeana Argentina y de esta manera cuantificar los aportes de metano a la atmósfera por parte del ganado.

Teoría

El BE puede ser definido como la manera que se distribuye la radiación neta (R_n), que es la radiación disponible para el desarrollo de los procesos que ocurren a nivel de superficie (Ecuación 1) (Di Bella et al. 2000, Friedel 2002, Schirmbeck y Rivas, 2007, Villa Nova et al. 2007).

$$R_n + G + H + LE = 0 \quad (1)$$

donde R_n corresponde a la radiación neta, G al flujo de calor en el suelo, H al flujo de calor sensible y LE al flujo de calor latente.

A escala local los términos de la ecuación 1 pueden estimarse con cierta facilidad si se dispone de una instrumentación específica (un sensor de R_n , uno de G y por medio de un conjunto de sensores que miden la capacidad de transferencia de calor en la vertical el valor de H). En la bibliografía se presentan diferentes alternativas para una adecuada estimación del BE a escala local (Jackson et al. 1977; Norman et al. 1995, Friedl 2002, Villa Nova et al 2007).

Un gran número de trabajos sobre aplicación de BE a escala regional demuestran que los términos R_n y G , son sencillos de estimar (Boegh et al., 2002, Kustas et al. 1990). LE y H no son sencillos de estimar (Wang et al., 2006) y en la generalidad de las situaciones LE se estima como término residual de la ecuación 1 y H a partir de ecuaciones o modelos específicos (Boegh et al., 2002; Kustas et al., 2004).

La R_n se puede obtener a partir del albedo (a), la emisividad (es) y la temperatura de la superficie (T_s) observada con una adecuada precisión a partir de imágenes de satélite y datos atmosféricos a escala local (temperatura del aire (T_a) y radiación solar entrante (R_s)) (Ecuación 2) (Friedl 2002, Schirmbeck y Rivas, 2007, Timmermans et al., 2007).

(2)

siendo e_a la emisividad del aire y s la constante de Stefan Boltzmann.

El término G puede ser estimado como una fracción de la R_n proporcional a la cubierta vegetal (en función del índice de vegetación de diferencia normalizada - NDVI) siguiendo la expresión propuesta por Moran et al. (1989):

$$G = 0,583 \exp(-2,13NDVI)R_n \quad (3)$$

H puede ser obtenido a partir de la Ecuación 4 (Boegh et al., 2002, Kustas et al., 2004, Wang et al., 2006)

$$H = \rho c_p \frac{T_s - T_a}{ra} \quad (4)$$

donde r es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire húmedo a una presión constante y ra la resistencia aerodinámica.

Metodología

Medidas locales

Las medidas locales se han realizado con una estación de BE compuesta por un sensor Campbell Scientific CNR1 (Figura 1) y un sensor de

G Campbell Scientific HFT3. Además, se dispone de una estación meteorológica Campbell Scientific ET106 (sensor de T_a y humedad relativa (HR), piranómetro y sensor de velocidad y dirección de viento). Ambas estaciones instaladas en el campus de la Universidad Nacional del Centro Tandil (37.32° S, 59.08° W, altitud 214 m), aproximadamente a 370 km hacia el sur de Buenos Aires, Argentina.



Fig. 1. Foto de la estación CNR1 (Campus Tandil).

La parcela tiene una cubierta vegetal mixta (*Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea* y *Lolium Multiflorum*) y esta rodeada por un área de experimento de pastoreo de ganado vacuno. La composición vegetal de la parcela es la típica de la cuenca del río Salado (CRS) Argentina y principal región de producción ganadera (52 millones de cabezas de acuerdo al Servicio de Sanidad y Calidad Agroalimentaria de Argentina) de la provincia de Buenos Aires.

Instalada a 2 metros de la superficie, la estación CNR1 discrimina la radiación de onda corta (0,305 - 2,800 μ m) entrante (R_s) y saliente ($R_{s'}$) y de onda larga (5-50 μ m) entrante (R_l) y saliente ($R_{l'}$) a la pastura. El G es medido por el sensor HFT3 instalado a 7 cm de profundidad.

Los datos meteorológicos convencionales, T_a , HR, velocidad del viento (U_2), son medidos a 2 metros de la superficie por la estación ET 106.

Los datos de los sensores CNR1 y HFT3 son almacenados en un data logger Campbell Scientific CR10X, configurado para registrar el promedio, máximo, mínimo y desviación de las lecturas efectuadas (a una frecuencia de 6 Hz) durante intervalos de 15 minutos. La estación ET106 ha sido configurada para almacenar la información con los mismos intervalos de tiempo y registrar éstos en otro data logger CR10x.

El período de datos analizados corresponde a medidas realizadas entre el 12 y el 23 de enero de 2007.

La R_n ($W m^{-2}$) fue obtenida con los datos de la CNR1 a partir de:

$$R_n = R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} \quad (5)$$

El valor de G ($W m^{-2}$) utilizado corresponde a las medidas obtenidas por el sensor HFT 3.

El H se ha calculado aplicando la ecuación 4 (considerando rc_p igual a $1,2156 J m^{-3} ^\circ C^{-1}$) donde la T_s en la parcela se ha obtenido por medio de:

$$T_s = \left(\frac{R_{l\uparrow}}{\sigma \epsilon_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

El valor de LE se ha calculado como término residual de la ecuación 1 para valores promedio de intervalos de 15 minutos.

Con la finalidad de evaluar la consistencia de los datos de LE obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación 1 se han calculado los valores de evapotranspiración de referencia (ETo). La ETo diaria se ha calculado con los datos registrados en la ET106 utilizando la aproximación de Penman Monteith (PM) propuesta por Allen et al. (1998).

Los valores de LE instantáneos se llevaron a valores diarios a partir del cociente entre R_n día (R_{nd}) y R_n instantáneo (R_{ni}) y éstos han sido los utilizados en la comparación.

Procesamiento de la imagen

La información espacial utilizada para la estimación del LE corresponde a una imagen captada el 15 de enero por el sensor TERRA-MODIS a las 10:55 hora local.

Para aplicar la ecuación 2 se han utilizado y seguido los siguientes pasos:

La R_s y la T_a corresponden a los valores medidos en la estación CNR1 y en la ET106.

La α se ha asumido de 0.985 teniendo en cuenta la alta cobertura vegetal que presenta la cuenca.

La e_a se ha calculado a partir de T_a utilizando la ecuación potencial propuesta por Brutsaert (ecuación 6.21) (1984).

El albedo se ha calculado a partir de la ecuación propuesta por Liang (2000).

$$\alpha = 0.16\rho_1 + 0.291\rho_2 + 0.243\rho_3 + 0.116\rho_4 + 0.112\rho_5 + 0.081\rho_7 - 0.0015 \quad (7)$$

La T_s ha sido calculada aplicando la ecuación split window de Sobrino et. al 2003.

$$T_s = T_{s1} + 1,52 + 1,79(T_{s1} - T_{s2}) + 1,2(T_{s1} - T_{s2})^2 \quad (8)$$

El valor de G se ha calculado aplicando la ecuación 3.

La estimación de H instantánea se ha calculado utilizando la ecuación 4 con datos meteorológicos (T_a) y de satélite (T_s).

LE instantáneo se llevo a la escala diaria considerando la proporción entre la radiación neta instantánea y diaria (con datos medidos en la estación CNR1 durante el último año).

Resultados

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la R_s^- en la estación CNR1 para los 12 días considerados en el análisis. Se observa que la mayor parte del período la R_s^- permanece por encima de $1000 W m^{-2}$ y que el máximo de radiación se observa entre las 12:45h y 13:15h. Dichas condiciones garantizan una suficiente disponibilidad de energía para el desarrollo de los procesos ocurridos a nivel de superficie (principalmente LE).

En la Tabla 1 se presenta el comportamiento diario de G , H y LE respecto a la R_n observada en la parcela con pastura mixta. Los resultados muestran el dominio del LE por sobre G y H a la escala de tiempo diaria. La reducida influencia de G en la ecuación de BE puede ser asociada a una capa de material seco que existe en los primeros cm de suelo y a la alta proporción de vegetación; el bajo valor del H se debería a la baja resistencia de la cubierta vegetal favorecida por las condiciones meteorológicas (alta humedad del aire $> 50\%$ y baja velocidad de viento $< 14 km h^{-1}$) y el alto valor de LE asociado a la disponibilidad de agua en el suelo. En áreas llanas húmedas a subhúmedas de latitudes medias se presentan situaciones de éstas características en las que la mayor parte de la R_n se usa para evapotranspirar.

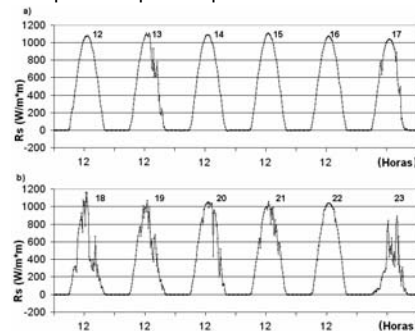


Figura 2 – Comportamiento de la radiación solar entrante en la parcela; a) datos de los días 12 a 17 y b) días 18 a 23.

Tabla 1. Comportamiento de G, H y LE respecto a Rn para el periodo considerado (%).

	G/Rn	H/Rn	LE/Rn
Min	0,0	1,0	93,0
Max	5,5	2,2	98,3
Media	3,0	2,0	95,0
σ	1,2	0,3	1,2

La Figura 3 muestra el comportamiento de los términos del BE cada 15 minutos de los días con mínima cobertura nubosa (14, 15, 16 y 22). A partir de las curvas obtenidas para cada día se puede observar claramente el peso de LE respecto a la Rn recibida por la superficie (Figura 3).

La Figura 4 muestra los resultados de la comparación entre ETo (mm día⁻¹) y LE (mm día⁻¹) (LE*Rnd/Rni) para cada día del periodo considerado. Se observa que durante todos los días analizados el LE da valores inferiores a los logrados calculando la ETo*Kc (Kc=1.1 considerando pasto corto). Los valores de LE inferiores se deben a que no existe suficiente disponibilidad de agua para abastecer la velocidad de evapotranspiración demandada por la pastura. Es importante remarcar que la diferencia puede deberse a que la ecuación de PM supone constantes al albedo y a la resistencia del cultivo. Lamentablemente en esta experiencia no se midió la humedad del suelo con lo cual no puede asegurarse a que obedece realmente la diferencia entre las medidas de LE y ETo*Kc.

La Figura 5 muestra el mapa de LE logrado para la CRS utilizando las ecuaciones 8 y 9 y sustituyendo los resultados de éstas en las ecuaciones de Rn, G y H. El valor de LE para el día 15 se obtuvo de multiplicar el valor instantáneo por 0.303 (Rnd/ Rni) valor éste logrado con los datos medidos en la CNR1.

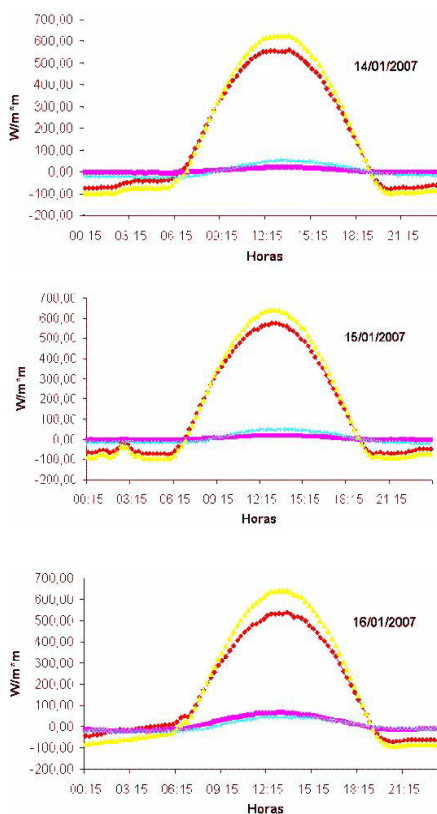
En la Tabla 2 se muestra el resultado de la comparación entre el valor de LE obtenido en la estación y el logrado con la imagen (considerando un área de 3 píxeles por 3 píxeles). El valor de LE logrado con la imagen es similar al obtenido en la estación de Rn mostrando consistencia en el resultado logrado. Con esta única comparación no es suficiente para indicar que el uso de la metodología propuesta (para estimar LE a escala espacial) es robusta, pero si, es posible indicar que: 1) dado el dominio que existe del LE el método aplicado en este trabajo sería válido y arrojaría buenos resultados, 2) las condiciones topográficas (zona llana de gran extensión con alta proporción de vegeta-

ción) y meteorológicas (alta humedad y baja velocidad de viento) del área son óptimas para la aplicación de la ecuación de BE con imágenes de satélite.

Tabla 2. LE desde imagen y estimada en terreno.

	LE(W m ⁻²)
Ventana 3x3	160,7
Estación CNR1	156,7
Diferencia	4,0

El mapa de LE permite observar la menor disponibilidad de agua existente en el suelo en la zona costera y la parte centro sur y este de la CRS (valores de 135 W m⁻²) (Figura 5).



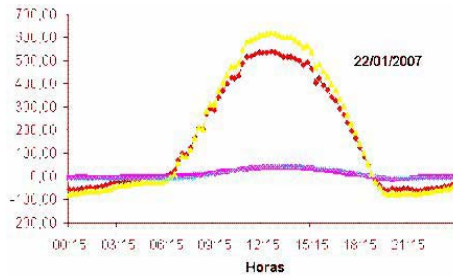


Fig. 3. Comportamiento de los términos de la ecuación de BE para 4 días despejados.

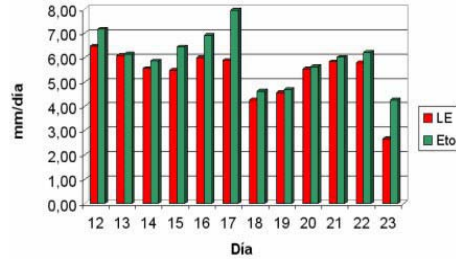


Fig. 4. Comportamiento del LE y de ETo*Kc en el período de análisis.

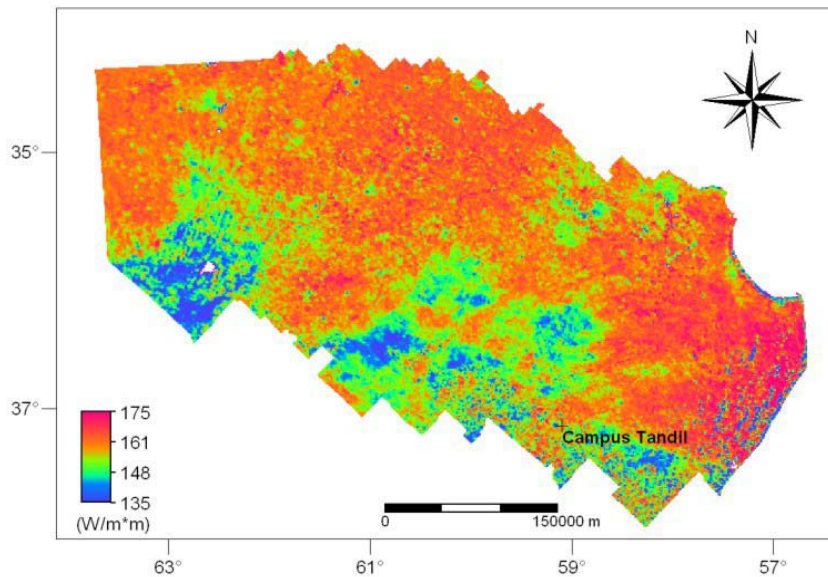


Fig. 5. Mapa de LE para la CRS logrado a partir de la imagen AQUA-MODIS.

Conclusiones

Los resultados de este trabajo muestran que del total de R_n recibida por una parcela con pastura mixta la mayor parte se pierde por transferencia de calor latente (95 %) y una mínima proporción; por flujo de calor en el suelo (3 %) y por flujo de calor sensible (2 %). Estos resultados son coincidentes con los logrados por Villa Nova et al. (2007) sobre pasturas implantadas en el área de Piracicaba (São Paulo, Brasil).

Por el comportamiento de los términos del BE a escala local se ha inferido que sería adecuado extender el mismo de manera sencilla a la CRS utilizando información lograda desde satélite. El mapa resultante de LE logrado a partir de una imagen Terra-MODIS muestra que la estimación sería adecuada y permitiría conocer con suficiente precisión la cantidad de agua del suelo utili-

zada por la vegetación. Estos mapas serían de utilidad para conocer la disponibilidad de forraje para el consumo del ganado y de esta manera evaluar la digestibilidad para cuantificar los aportes de metano a la atmósfera.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina por los recursos destinados para esta investigación (PICTO 22825).

Referencias

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56. Water Re

- sources, Development and Management Service, Rome, Italy.
- Brutsaert, W., 1984. Evaporation into the atmosphere. Theory, history, and applications. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 299 pp.
- Boegh, E., Soegaard, H., Thomsen, A., 2002. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environment* 79: 329–343.
- Coll, C., Caselles, V., 1997. A split window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, 14:16697-16713.
- Di Bella, C. M., Rebella, C. M., Paruelo J. M. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Panpa region of Argentina. *Remote Sensing of Environment* 21: 791–797
- Friedl, M.A. 2002. Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements *Remote Sensing of Environment* 79: 344–354
- Jackson, R. D., Reginato, R. J., Idso, S. B., 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13:651-656.
- Kustas, W. P., Moran, M. S., Jackson R.D., Gay, L. W., Duell, L. F. W., Kunkel, K. E., Mathias, A. D. 1990. Instantaneous and daily values of the surface energy balance over agricultural fields using remote sensing and a reference field in an arid environment. *Remote Sensing of Environment* 32: 125-141
- Kustas, W.P., Li, F., Jackson, T.J., Prueger, J.H., MacPherson, J.L., Wolde, M. 2004. Effects of remote sensing pixel resolution on modelled energy flux variability of croplands in Iowa. *Remote Sensing of Environment* 92: 535–547
- Liang, S. 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms *Remote Sensing of Environment* 76: 213-238
- Liang, S., Fang, H., Chen, M., Shuey, C. J., Walthall, C., Daughtry, C., Morisette J., Schaaf C., Strahler A., 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment* 83:149–162.
- Moran, M. S., Jackson, R. D., Raymond, L. H., Gay, L. W., & Slater, P. N. 1989. Mapping surface energy balance components by combining landsat thematic mapper and ground-based meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 30, 77–87.
- Norman, J., Kustas, W., Humes, K., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 263–293.
- Rivas, R., Caselles, V., 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing –based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93: 68-76.
- Sobrino, J. A., El Kharraz, J., Li, Z. 2003. Surface temperature and water vapour retrieval from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*. 24: 5161–5182.
- Schirmbeck J. 2005. Estimativa de evapotranspiração regional em área de ocorrência do Sistema Aquífero Guarani-Vale do Rio dos Sinos-RS: Uma aplicação de técnicas de sensoramento remoto, São Leopoldo - RS, 132 pp.
- Schirmbeck, J., Rivas, R. 2007 Estimación de la radiación neta a nivel del suelo a partir de datos captados por el sensor ETM+. *Anais del XV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*: 6159 - 6165
- Timmermans, W. J., Kustas, W. P., Anderson, M. C., French, A. N. 2007. An intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment* 108: 369–384
- Valor E., Caselles, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. *Remote Sensing of Environment* 57: 167-184.
- Villa Nova, N.A., Pereira, A.B., Shock, C.C. 2007. Estimation of Reference Evapotranspiration by an Energy Balance Approach. *Biosystems Engineering* 96: 605–615
- Wang K., Li, Z., Cribb, M., 2006. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley–Taylor parameter. *Remote Sensing of Environment* 102: 293–305