

Uso de datos satelitales MODIS y balance de energía para estimar la evapotranspiración*

Use of MODIS satellite data and energy balance to estimate evapotranspiration

Jesús Enrique López Avendaño^{1§}, Tomás Díaz Valdés¹, Christopher Watts Thorp², Julio César Rodríguez², Teresa de Jesús Velázquez Alcaráz¹ y Leopoldo Partida Ruvalcaba³

¹Universidad Autónoma de Sinaloa-Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-El dorado, km 17.5. Culiacán, Sinaloa. CP. 80000. Tel. (667) 8461084. (tdiaz10@hotmail.com; teresadejesus_v@yahoo.com.mx). ²Universidad de Sonora. Boulevard Luis Encinas y Rosales S/N. Col. Centro, Hermosillo, Sonora. CP. 83000. Tel. (662) 2592108, 2592169, 5960297. (jcro2001@yahoo.com.mx; cwatts@correo.fisica.uson.mx). ³Universidad Tecnológica de Culiacán. Corredor Culiacán-Imala, Culiacán, Sinaloa. CP. 80014. Tel. (667) 1041599. §Autor para correspondencia: prof.e.jesus@uas.edu.mx.

Resumen

La evapotranspiración (ET) es un factor importante para el desarrollo y producción de los cultivos agrícolas, su valor a nivel local y regional es determinante para la planeación en el manejo de los recursos hídricos; algunas técnicas como covarianza de vórtices miden evapotranspiración de manera puntual, mientras que otras, como las basadas en percepción remota y scintilometría lo hacen a escala regional. El objetivo fue estimar la ET utilizando datos del sensor MODIS y un balance de energía, y compararla contra datos obtenidos con scintilómetro y sistema de covarianza de vórtices. El trabajo se implementó en el Valle de Culiacán, México, sobre una superficie de chile Bell, durante 81 días de desarrollo del cultivo. Se utilizaron datos de índice de diferencia normalizada (NDVI) y temperatura de superficie obtenidos del sensor MODIS, un scintilómetro BLS450 para estimar el flujo de calor sensible, y un sistema de covarianza de vórtices IRGA EC-150 para medir el flujo de calor latente. La ET total obtenida fue de 255.4, 275.2 y 262.0 mm para MODIS, scintilómetro y covarianza de vórtices, respectivamente; el mejor ajuste estadístico se obtuvo comparando los datos obtenidos con MODIS y scintilómetro, donde la raíz media del error cuadrático

Abstract

Evapotranspiration (ET) is an important factor for the development and production of agricultural crops, its value at local and regional level is determinant for planning the management of water resources; some techniques such as vortex covariance measure evapotranspiration in a space-determined manner, while others, such as those based on remote sensing and scintillometry, do it on a regional scale. The objective was to estimate ET using MODIS sensor data and an energy balance, and to compare it against data obtained with scintillometer and vortex covariance system. The study was implemented in Culiacán Valley, México, on a surface of Bell pepper crop, during 81 days of crop development. Normalized difference index (NDVI) and surface temperature data from the MODIS sensor, a BLS450 scintillometer to estimate sensible heat flux, and an IRGA EC-150 vortex covariance system to measure latent heat flux, were used. The total ET obtained was 255.4, 275.2 and 262 mm for MODIS, scintillometer and covariance of vortices, respectively; (RMSE), BIAS, Willmott's concordance coefficient (d), and correlation coefficient (R) were 0.44 mm d⁻¹, -0.245 mm d⁻¹, 0.8 y

* Recibido: marzo de 2017
Aceptado: mayo de 2017

(RMSE), BIAS, coeficiente de concordancia de Willmott (d) y coeficiente de correlación (R) fueron de 0.44 mm d⁻¹, -0.245 mm d⁻¹, 0.8 y 0.75, respectivamente. El uso de datos satelitales combinado con el balance de energía sobre la superficie terrestre permite estimar de manera confiable la evapotranspiración a escala regional.

Palabras clave: Chile Bell, método de espacio triangular, método del scintilómetro, sistema de covarianza de vórtices.

Introducción

La evapotranspiración (ET) es importante en la interacción entre el suelo, vegetación y la atmósfera, es un factor en la evaluación cuantitativa del balance de agua y la energía superficial, dado que muchos procesos y parámetros del ambiente son influenciados por este fenómeno, tales como el contenido de humedad en el suelo, la productividad de la vegetación, absorción de nutrientes, balance de agua, entre otros, particularmente en las zonas áridas y semi áridas donde la disponibilidad de agua es más crítica (Liu *et al.*, 2013).

La mayoría de los métodos que se utilizan para medir o estimar la evapotranspiración son de carácter puntual; sin embargo, desde el punto de vista hidrológico y manejo de los recursos hídricos se requiere estimaciones a gran escala, las cuales pueden obtenerse utilizando técnicas como la scintilometría y la percepción remota, la validación de ET estimada a partir de técnicas de percepción remota se ha convertido en un tema central de investigación en diferentes partes del mundo, debido principalmente a la complejidad de la superficie terrestre, causada por la heterogeneidad de la cubierta vegetal y a la variabilidad de la topografía superficial (Kleissl *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2011; Samain *et al.*, 2012); y para ello, la técnica de la scintilometría es considerada como la única capaz de realizar mediciones de flujos de calor sensible (H) en dimensiones o áreas comparables con el tamaño de un pixel o varios pixeles de una imagen de satélite (Kleissl *et al.*, 2008).

El objetivo fue evaluar el método de espacio triangular (Ts-Fr) utilizando datos satelitales del sensor MODIS, y la ecuación de balance de energía; el empleo de scintilómetro

0.75, respectivamente. The use of satellite data combined with the energy balance on the land surface allows a reliable estimation of evapotranspiration at a regional scale.

Keywords: Bell pepper, scintilometer method, triangular space method, vortex covariance system.

Introduction

Evapotranspiration (ET) is an important element in the interaction between soil, vegetation and the atmosphere, is a central factor in the quantitative evaluation of water balance and surface energy, since many processes and parameters of the environment are influenced by this phenomenon such as soil moisture content, vegetation productivity, nutrient absorption, and water balance, among others, particularly in arid and semi-arid areas where water availability becomes increasingly critical (Liu *et al.*, 2013).

Most methods used to measure or estimate evapotranspiration are space-limited; however, from a hydrological and water resource management point of view, large-scale estimates are required, which can be obtained using techniques such as scintillometry and remote sensing, ET validation estimated from remote sensing techniques has become a central research topic in different parts of the world, mainly due to the complexity of the terrestrial surface, caused by the heterogeneity of the vegetation cover and the variability of the surface topography (Kleissl *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2011; Samain *et al.*, 2012); and for this, the scintillometry technique is considered the only one capable of performing measurements of sensible heat fluxes (H) in dimensions or areas comparable to the size of a pixel or several pixels of a satellite image (Kleissl *et al.*, 2008).

The objective of this paper is to evaluate the triangular space method (Ts-Fr) using satellite data from the MODIS sensor, and the energy balance equation; and the use of a scintillometer (BLS) to measure sensible heat flux (H) and a vortex covariance system (EC) to measure the latent heat flux (LE) on a homogeneous surface of Bell pepper in the Culiacán Valley.

(BLS) para medir flujo de calor sensible (H) y un sistema de covarianza de vórtices (CE) para medir flujo de calor latente (LE), sobre la superficie homogénea de chile Bell en el Valle de Culiacán.

Materiales y métodos

Este trabajo se realizó en el Valle de Culiacán en la zona centro del estado de Sinaloa, México, en una superficie de 90 ha plantadas con cultivo de chile Bell (*Capsicum annumm*, L), las coordenadas geográficas centrales del lote son 24.59569 latitud norte y 107.51875 longitud oeste (Figura 1). El período considerando es de 81 días, que comprende del 02 de febrero al 23 de abril de 2014, una descripción detallada del sitio de estudio puede consultarse en López *et al.* (2015).

Datos meteorológicos

Para la medición de los datos meteorológicos se utilizó una estación automatizada que contenía: una anemoveleta, dos sondas Vaisala y un barómetro; se instalaron además un radiómetro sobre la superficie del cultivo y dos sensores de disco HukseFlux; todos los sensores se encontraban conectados a un colector de datos CR1000 donde se almacenaba la información cada 10 minutos y se integró posteriormente en periodos de 30 min.

Estimación de flujo de calor sensible (H) con el uso de scintilómetro (BLS)

Se instaló un scintilómetro de la marca Scintec modelo BLS450 sobre el cultivo a una altura de 6.2 m con una distancia entre el receptor y transmisor de 1 250 m que medía el índice refractivo del aire (Cn^2), y mediante la técnica de la scintilometría se obtuvo la información promedio de flujo de calor sensible (H) en intervalos de tiempo de 1 min, integrándose posteriormente en periodos de 30 min. Para la aplicación de esta técnica se utilizó la ecuación 1.

$$H = -\rho_a C_p u_* T_* \quad (1)$$

Donde: H= flujo de calor sensible ($W m^{-2}$); ρ_a = densidad del aire ($kg m^{-3}$); C_p = calor específico del aire ($J kg^{-1} °K^{-1}$); u_* = velocidad de fricción del viento ($m s^{-1}$); y T_* = escalar de la temperatura del aire ($°K$). La descripción de T_* y u_* , así como una descripción detallada de la teoría de scintilometría puede revisarse en Solignac *et al.* (2009), Zeweldi *et al.* (2010),

Materials and methods

This work was carried out in the Culiacán Valley in the central area of the state of Sinaloa, México, in an area of 90 ha planted with Bell pepper (*Capsicum annumm*, L), the central geographical coordinates of the lot are 24.59569 north latitude and 107.51875 west longitude (Figure 1). The considered period was 81 days, which includes from February 2nd to April 23th, 2014, a detailed description of the study site can be consulted in López *et al.* (2015).

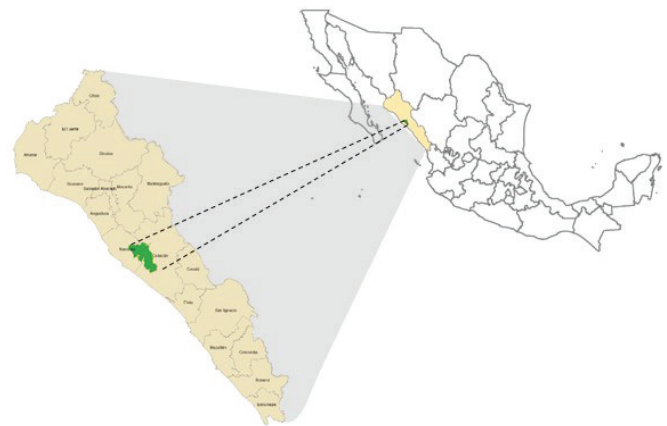


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio.
Figure 1. Geographical location of the studied area.

Weather data

For the measurement of meteorological data an automated station was used that contained: an anemoveleta, two Vaisala probes and a barometer; a radiometer and two Hukse Flux disk sensors were installed on the crop surface; all the sensors were connected to a data collector CR1000 where the information was stored every 10 minutes and was later integrated in 30 min periods.

Estimation of sensible heat flux (H) with scintilometer (BLS)

A scintilometer of the Scintec brand model BLS450 was installed on the crop at a 6.2 m height with a distance between the receiver and transmitter of 1 250 m that measured the refractive index of the air (Cn^2), and by means of the scintilometry technique there was obtained the average information of sensible heat flow (H) in time intervals of 1 min, being later integrated in periods of 30 min. For the application of this technique, equation 1 was used.

Samain *et al.* (2012); Geli *et al.* (2012) y Liu *et al.* (2013). Para determinar el valor del flujo de calor latente (LE) se utilizó la ecuación de balance de energía (ecuación 2).

$$LE = R_n - G - H \quad (2)$$

Donde: R_n = flujo de radiación solar neta ($W m^{-2}$); G = flujo de calor en el suelo ($W m^{-2}$); H = flujo de calor sensible ($W m^{-2}$); y LE = flujo de calor latente ($W m^{-2}$); y para convertir el flujo de calor latente a lámina de agua (mm) se utilizó el valor de $2.45 MJ m^{-2}$ que es la energía requerida para evaporar 1 mm de agua (Allen *et al.*, 1998).

Medición de flujo de calor latente (LE) con un sistema de covarianza de vórtices (CE)

Para medir los flujos de calor sensible (H) y latente (LE), se utilizó un sistema de covarianza de vórtices (CE) IRGA EC-150 que consta de un analizador de gas infra-rojo y un anemómetro sónico 3DCSAT3A. Los datos adquiridos a una velocidad de 20 Hz se procesaron con el software Eddypro 5.1.1 (Eddy Covariance Processing Software) integrándose la información en períodos de 30 min y posteriormente, para determinar datos faltantes (datos meteorológicos y de flujos) se utilizó la herramienta online “Eddy Covariance gap-filling y flux-partitioning tool” del Max Planck Institute for biochemistry (<http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/upload.php>).

Estimación de flujo de calor latente (LE) utilizando el método de espacio triangular con datos MODIS

Para el método de espacio triangular con información satelital, se obtuvieron los datos de temperatura de superficie (T_s) del producto MOD11A2 del sensor MODIS instalado en el satélite TERRA con una resolución espacial de 1 km y temporal de 8 días, mientras que los datos de índice de vegetación, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) por sus siglas en inglés se obtuvieron del producto MOD13Q1 del mismo sensor y con resolución espacial de 250 m y temporal de 16 días. Los datos satelitales del sensor MODIS se obtuvieron de ORNL DACC (2008a y 2008b) en la plataforma siguiente: http://daacmodis.ornl.gov/cgi-bin/modis/glbviz/1_glb/modis_subset_order_global.col5.pl. Es importante mencionar que no se aplicó el procesamiento digital de imágenes para obtener los valores de NDVI y temperatura de superficie, ya que los datos satelitales se obtuvieron ya procesados desde las plataformas web mencionadas.

$$H = -\rho_a C_p u_* T_* \quad (1)$$

Where: H = sensible heat flux ($W m^{-2}$); ρ_a = air density ($kg m^{-3}$); C_p = specific air heat ($J kg^{-1} ^\circ K^{-1}$); u_* = wind friction velocity ($m s^{-1}$); and T_* = scalar of the air temperature ($^\circ K$). The description of T_* and u_* , as well as a detailed description of the scintillometry theory can be reviewed in Solignac *et al.* (2009); Zeweldi *et al.* (2010); Samain *et al.* (2012); Geli *et al.* (2012) and Liu *et al.* (2013). The energy balance equation (equation 2) was used to determine the value of the latent heat flux (LE).

$$LE = R_n - G - H \quad (2)$$

Where: R_n = net solar radiation flux ($W m^{-2}$), G = heat flux in the soil ($W m^{-2}$), H = sensible heat flux ($W m^{-2}$) and LE = latent heat flux ($W m^{-2}$); and to convert the latent heat flux to water sheet (mm), the value of $2.45 MJ m^{-2}$ was used, which is the energy required to evaporate 1 mm of water (Allen *et al.*, 1998).

Latent heat flux (LE) measurement with a vortex covariance system (CE)

In order to measure the sensible (H) and latent (LE) fluxes, an IRGA EC-150 vortex covariance system (EC) consisting of an infra-red gas analyzer and a CSAT3A 3D sonic anemometer was used. The data acquired at a speed of 20 Hz were processed with Eddypro 5.1.1 software (Eddy Covariance Processing Software) by integrating the information in periods of 30 min and later, to determine missing data (meteorological and flow data), an online “Eddy Covariance gap-filling and flux-partitioning tool” from the Max Planck Institute for Biochemistry (<http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/upload.php>) was used.

Estimation of latent heat flux (LE) using the triangular space method with MODIS data

For the triangular space method with satellite information, the surface temperature data (T_s) of the product MOD11A2 of the MODIS sensor installed on the TERRA satellite were obtained with a spatial resolution of 1 km and a temporal resolution of 8 days, while the data of normalized difference vegetation index (NDVI) were obtained from the product MOD13Q1 of the same sensor and with spatial resolution of 250 m and temporal resolution of 16 days. The MODIS sensor satellite data was obtained from ORNL DACC (2008a y 2008b) on the following platform: <http://daacmodis.>

Para calcular el valor de flujo de calor latente (LE) se utilizó la ecuación (ecuación 3) propuesta por Jiang e Islam (1999) y adaptada de Priesley-Taylor (1977).

$$LE = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (Rn - G) \quad (3)$$

Donde: LE= flujo de calor latente ($W m^{-2}$); Rn= radiación solar neta ($W m^{-2}$); G= flujo de calor en el suelo ($W m^{-2}$); Δ = pendiente de la curva de presión a saturación del vapor de agua ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); γ = constante psicométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); el valor de ϕ se calcula con información de temperatura de la superficie terrestre y valores obtenidos del espacio geométrico determinado mediante la ecuación 4.

$$\phi = \left(\frac{T_{S_{max, i}} - T_{S_i}}{T_{S_{max, i}} - T_{S_{min}}} \right) (\phi_{max, i} - \phi_{min, i}) + \phi_{min, i} \quad (4)$$

Donde: T_{S_i} = temperatura superficial ($^\circ K$) y se obtiene del producto MOD11A2 del sensor MODIS; $T_{S_{min}}$ = valor mínimo de la temperatura superficial; ϕ_{max} = vale 1.26.

Para generar el espacio triangular se utilizó la temperatura de superficie (T_s) y un índice (ecuación 5) conocido como fracción de cobertura vegetal (Fr), que se calcula en función del índice de vegetación (NDVI), el cual parece ser más representativo de la proporcionalidad relativa entre el suelo y la vegetación dentro del pixel (Tang *et al.*, 2010).

$$Fr = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (5)$$

Para definir los límites (bordes) del espacio triangular (T_s - Fr), primeramente se dividió el rango total de valores de Fr en intervalos y se obtuvo el valor de temperatura de superficie máxima correspondiente a cada intervalo, posteriormente se aplicó una regresión lineal entre los valores máximos de T_s y cada intervalo de Fr , obteniéndose una ecuación lineal (ecuación 6).

$$T_{S_{max, i}} = a + b Fr \quad (6)$$

Donde: $T_{S_{max}} = a$ y $T_{S_{min}} = b + T_{S_{max}}$

Con la ecuación 6 se definieron los bordes “seco” y “húmedo” del espacio triangular, el cual se forma con los datos de temperatura de superficie (T_s) y la fracción de cobertura vegetal (Figura 2), de tal modo que los valores extremos coinciden con $T_{S_{max, i}} = T_{S_{max}}$, $Fr = 0$ y $T_{S_{min, i}} = T_{S_{min}}$, $Fr = 1$.

ornl.gov/cgi-bin/modis/glbviz/1_glb/modis_subset_order_global.col5.pl. It is important to mention that digital image processing was not applied to obtain the NDVI and surface temperature values, since the satellite data was already processed from the mentioned web platforms.

The equation (equation 3) proposed by Jiang and Islam (1999) and adapted from Priesley-Taylor (1977) was used to calculate the latent heat flux (LE) value.

$$LE = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (Rn - G) \quad (3)$$

Where: LE= latent heat flux ($W m^{-2}$); Rn= net solar radiation ($W m^{-2}$); G= heat flux in the soil ($W m^{-2}$); Δ = slope of the water vapor saturation pressure curve ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); γ = psychometric constant ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); the value of ϕ is calculated with temperature information of the earth’s surface and values obtained from the determined geometric space by equation 4.

$$\phi = \left(\frac{T_{S_{max, i}} - T_{S_i}}{T_{S_{max, i}} - T_{S_{min}}} \right) (\phi_{max, i} - \phi_{min, i}) + \phi_{min, i} \quad (4)$$

Where: T_{S_i} = surface temperature ($^\circ K$) and is obtained from the product MOD11A2 of the MODIS sensor; $T_{S_{min}}$ = minimum value of the surface temperature; ϕ_{max} = worth 1.26.

In order to generate the triangular space, the surface temperature (T_s) and an index (equation 5) known as the vegetation cover fraction (Fr) were used, which is calculated as a function of the vegetation index (NDVI), which seems to be more representative of the relative proportionality between the soil and the vegetation within the pixel (Tang *et al.*, 2010).

$$Fr = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (5)$$

In order to define the limits (edges) of the triangular space (T_s - Fr), first the total range of values of Fr was divided into intervals and the maximum surface temperature value corresponding to each interval was obtained, then a linear regression was applied between the maximum values of T_s and each interval of Fr , obtaining a linear equation (equation 6).

$$T_{S_{max, i}} = a + b Fr \quad (6)$$

Para el ajuste de la resolución espacial de las imágenes de Ts (MOD11A2) se generó una malla de 9*9 pixeles, con una resolución espacial de 250*250 m que abarcaba toda el área de estudio. Dado que la resolución espacial de los datos de Ts son de 1 000*1 000 m, cada pixel original se dividió en 4 pixeles de 250*250 m, y para asignarles el valor de Ts se realizó una interpolación lineal en todas direcciones considerando para ello los valores de los pixeles originales contiguos, de esta manera se pudo coincidir cada pixel de la malla de Ts con los pixeles de la malla de NDVI.

Girolimetto *et al.* (2011) trabajaron dividiendo los pixeles de imágenes Ts de gran resolución (10*10 km) en pixeles con menor resolución (2*2 km) y comparando los resultados obtenidos con imágenes MODIS de resolución de 1*1 km, obteniendo resultados razonablemente precisos de la Fracción Evaporable (FE), los autores coinciden en señalar que el espacio geométrico generado (NDVI-Ts) resume el balance energético de la región bajo estudio, y que la temperatura de superficie (Ts) es la variable más dinámica y por ende la más limitante. La malla final contenía 81 pixeles y a cada pixel le correspondía un valor de Ts y NDVI.

Se analizaron datos satelitales 11 días julianos donde coincidían temporalmente datos de Ts y NDVI: 33, 41, 49, 57, 65, 73, 81, 89, 97, 105 y 113. Para mantener la robustez de los resultados, se cuidó que el espacio triangular fuera generado con al menos 80% de los datos del conjunto.

Una vez definido el espacio triangular, se eliminaron los pixeles que quedaban fuera de éste. Y únicamente con los pixeles dentro del espacio triangular se calculó el valor de la fracción evaporable (FE) (ecuación 7) para cada uno de ellos, y finalmente se consideró el valor promedio de todos. Se asumió que la fracción evaporable (FE) permanece constante durante el día, de tal manera que la ET se obtiene mediante el producto de FE por la energía disponible durante el período considerado del día (Jiang *et al.*, 2009).

$$FE = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (7)$$

Para determinar FE de 81 días comprendidos en el período de estudio, se efectuó una interpolación lineal con los datos existentes de FE, de esta forma todos los días tuvieron un valor de FE y energía disponible (Rn-G) medida, con esto se calculó ET, la influencia de nubosidad sobre el área de estudio que se vería reflejada en la radiación solar neta que se utilizó para calcular ET. Después se analizó el comportamiento de ET con respecto a los resultados obtenidos con los otros dos métodos.

Where: $T_{s_{max}} = a$ and $T_{s_{min}} = b + T_{s_{max}}$

Equation 6 defined the “dry” and “wet” edges of the triangular space, which is formed with the surface temperature (Ts) and the vegetation cover fraction (Figure 2), so that the ends values match $T_{s_{max}, i} = T_{s_{max}}$, $Fr = 0$ and $T_{s_{min}, i} = T_{s_{min}}$, $Fr = 1$.

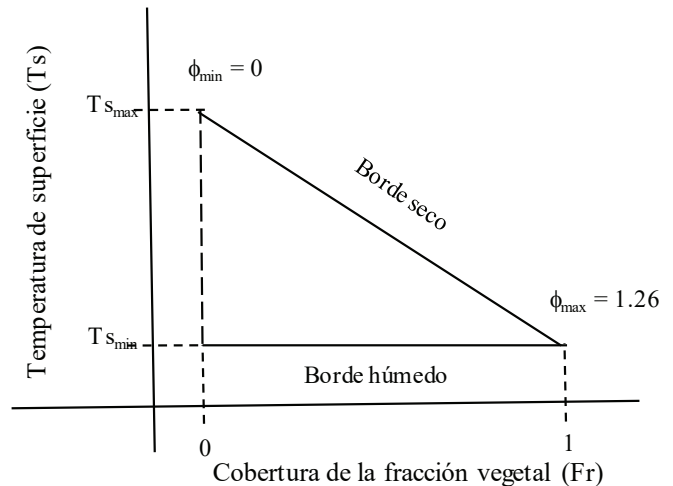


Figura 2. Diagrama esquemático del concepto de espacio triangular.

Figure 2. Schematic diagram of the triangular space concept.

To adjust the spatial resolution of the Ts images (MOD11A2) a 9*9 pixel mesh was generated, with a spatial resolution of 250*250 m covering the entire study area. Since the spatial resolution of Ts data is 1000*1000 m, each original pixel was divided into 4 pixels of 250*250 m, and to assign them the value of Ts a linear interpolation was performed in all directions considering the values of the original contiguous pixels, in this way it was possible to match each pixel of the Ts mesh with the pixels of the NDVI mesh.

Girolimetto *et al.* (2011) worked by dividing the pixels of high-resolution Ts (10*10 km) into pixels with lower resolution (2*2 km) and comparing the results obtained with MODIS images of 1*1 km resolution, obtaining reasonably accurate results of the evaporable fraction (EF), the authors agree that the geometric space generated (NDVI-Ts) summarizes the energy balance of the region under study, and that the surface temperature (Ts) is the most dynamic variable and therefore the most limiting one. The final mesh contained 81 pixels and each pixel corresponded to a value of Ts and NDVI.

Análisis estadístico

Para analizar el comportamiento de los resultados, se utilizaron seis parámetros de eficiencia estadística: el coeficiente de correlación de Pearson (R), la raíz media del error cuadrático (RMSE), el índice de concordancia (d) propuesto por Willmott (Willmott, 1981; Willmott *et al.*, 1985) y el sesgo (BIAS), el error relativo (ER) y el error estándar (ES).

Resultados y discusión

La ET medida con el sistema de covarianza de vórtices (CE), así como la estimada utilizando las técnicas de scintilometría (BLS) y percepción remota método de espacio triangular utilizando datos (MODIS) se observa en el Cuadro 1. La ET total estimada en el período evaluado fue de 275.2, 255.4 y 262 mm para BLS, MODIS y CE; como puede observarse la ET media para MODIS y CE es igual, lo mismo que la ET mínima, mientras que para BLS la ET media es ligeramente superior y la ET mínima ligeramente inferior a los determinados con los otros dos métodos, la ET máxima es muy variable en los tres modelos utilizados, lo cual se debe a la naturaleza de las variables que se miden en cada método (CE tiene un carácter puntual, BLS usa el promedio de la variación de un variable en una longitud, mientras que MODIS utiliza el promedio de la variación de dos variables en un área determinada por la resolución de los pixeles de la imagen satelital).

Cuadro 1. Valores de referencia de la evapotranspiración (ET) estimada y medida durante el periodo de estudio.

Table 1. Evapotranspiration (ET) reference values estimated and measured during the study period.

Método	Máxima (mm d ⁻¹)	Mínima (mm d ⁻¹)	Media (mm d ⁻¹)	Total (mm)
BLS	4.5	1.7	3.4	275.2
MODIS	3.9	1.9	3.2	255.4
CE	5.3	1.9	3.2	262

Es importante notar, que el valor máximo de ET estimado con BLS fue de 4.5 mm d⁻¹ y ocurrió el día 31 de marzo, coincidiendo en la fecha de ET máxima que estimó MODIS, cuyo valor fue de 3.9 mm d⁻¹, el valor de ET medido con CE para ese mismo día fue de 4.3 mm. Mientras que la ET máxima

The satellite data for 11 Julian days were analyzed, where the Ts and NDVI data coincided were: 33, 41, 49, 57, 65, 73, 81, 89, 97, 105 and 113. To maintain the robustness of the results, it was taken care that the triangular space was generated with at least 80% of the set data.

Once the triangular space was defined, the pixels outside the triangular space were removed. And only with the pixels within the triangular space, the evaporable fraction value (EF) was calculated, (equation 7) for each of them, and finally the average value of all was considered. It was assumed that the evaporable fraction (EF) remains constant during the day, so that the ET is obtained by the FE product by the energy available during the considered period of the day (Jiang *et al.*, 2009).

$$FE = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \tag{7}$$

In order to determine the EF of the 81 days included within the study period, a linear interpolation was performed with the existing EF data, thus every day had their Fe value and available energy (Rn-G) measured, with which was used to calculate the ET, the influence of the cloudiness on the study area would basically be reflected in the net solar radiation that was used to calculate ET. Subsequently, the behavior of ET was analyzed statistically with respect to the results obtained with the other two methods.

Statistic analysis

In order to analyze the behavior of the results, six parameters of statistical efficiency were used: Pearson correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), concordance index (d) proposed by Willmott (Willmott, 1981; Willmott *et al.*, 1985) and bias (BIAS), relative error (ER) and standard error (ES).

Results and discussion

The ET measured with the vortex covariance (EC) system, as well as the estimated using scintilometry (BLS) and remote sensing triangular space method using data (MODIS) is shown in Table 1. The total ET estimated for the evaluated period was 275.2, 255.4 and 262.0 mm for BLS, MODIS and CE; as can be observed, the mean ET for MODIS and CE is the same as the minimum ET, while

medida con CE ocurrió el día 23 de marzo (5.3 mm d^{-1}), mientras que los valores para MODIS y BLS para ese mismo día fueron 3.1 y 3.4 mm d^{-1} , respectivamente. En una revisión de la información meteorológica buscando la posible causa de la medición con CE, no se encontró ninguna causa que justifique la elevación de ET durante ese día, considerando el valor de flujo de calor sensible (H) medido con CE y aplicando la ecuación de balance de energía ($LE = R_n - G - H$), el valor de ET estimado disminuye considerablemente, lo que hace suponer que existe un error en la medición de calor latente (LE) con el sistema de covarianza de vórtices, debido a la falta de cierre del balance con esta técnica.

Los valores negativos de ER en el Cuadro 2, indican una subestimación MODIS para estimar ET con respecto a los otros dos métodos, mientras que al comparar los resultados estimados con BLS y los medidos con CE resultaron en una sobrestimación de los datos obtenidos con BLS. En este punto, es importante hacer notar que la escala de medición de BLS y MODIS tiene una amplitud regional, mientras que en CE es de escala puntual.

Gordillo *et al.* (2014) al comparar los resultados de ET a nivel diario con 12 imágenes satelitales con el método METRIC y covarianza de vórtices (CE) señalan una sobrestimación de ET determinada con METRIC respecto a CE, donde obtuvieron un $ER = 7.273\%$ y $ES = 0.208 \text{ mm d}^{-1}$, mientras que en esta investigación se obtuvo un $ER = -7.203\%$ y $ES = 0.233 \text{ mm d}^{-1}$, que consideró a ET diaria y un mayor número de días.

Por otro lado, Liu *et al.* (2013) al comparar los resultados de ET obtenidos en períodos anuales y durante varios años, con el método del scintilómetro y el producto MOD16 ET, encontraron un comportamiento diverso, con valores de ER entre -14.52 y 25.16% , mientras que R varió desde 0.76 hasta 0.97 .

for BLS the mean ET is slightly higher and the minimum ET slightly lower than those determined with the other two methods, the maximum ET is very variable in the three models used, which is due to the nature of the variables that are measured in each method (CE has a punctual character, BLS uses the average of the variation of a variable in a length, whereas MODIS uses the average of the variation of two variables in an area determined by the pixels resolution of the satellite image).

It is important to note that the maximum ET value estimated with BLS was 4.5 mm d^{-1} and occurred on March 31, coinciding with the maximum ET date estimated by MODIS, whose value was 3.9 mm d^{-1} , ET value measured with EC for that same day was 4.3 mm . While the maximum ET measured with EC occurred on March 23 (5.3 mm d^{-1}), while the values for MODIS and BLS for that same day were 3.1 and 3.4 mm d^{-1} , respectively. In a review of the meteorological information looking for the possible cause of the EC measurement, no cause was found to justify ET elevation during that day, considering the value of sensible heat flux (H) measured with EC and applying equation of energy balance ($LE = R_n - G - H$), the estimated ET value decreases considerably, suggesting that there is an error in latent heat measurement (LE) with the vortex covariance system due to lack of balance closure with this technique.

The negative values of ER in Table 2 indicate a MODIS underestimation to estimate ET with respect to the other two methods, while comparing the estimated results with BLS and those measured with CE resulted in an overestimation of the data obtained with BLS. At this point, it is important to note that the BLS and MODIS measurement scale has a regional amplitude, while in EC it is on a space-determined scale.

Cuadro 2. Error relativo (ER) y error estándar (ES) entre los métodos utilizados.

Table 2. Relative error (ER) and standard error (ES) among the used methods.

Método		ER (%)	ES (mm d ⁻¹)	Descripción
Valor estimado	Valor observado			
MODIS	BLS	-7.203	0.233	Subestimación de ET
MODIS	CE	-2.527	0.32	Subestimación de ET
BLS	CE	5.039	0.35	Sobrestimación de ET

Mientras que Tang *et al.* (2010) al comparar el flujo de calor sensible (H) estimado con las técnicas de scintilometría y covarianza de vórtices, muestran que el scintilómetro subestimó el valor de H medido con CE, lo que implica, que al aplicar la ecuación de balance de energía, fue mayor el valor de flujo de calor latente (LE) y por lo tanto, el scintilómetro sobrestimó el cálculo de ET con respecto al valor medido con CE, similar a lo ocurrido en este trabajo; asimismo, al aplicar el método de espacio triangular con datos MODIS para estimar el flujo de calor latente (H) indican una sobrestimación de H y subestimación de LE con respecto al scintilómetro, por lo tanto una menor ET estimada con el método de espacio triangular con datos MODIS, comportamiento similar a la presente investigación.

La estimación de ET con cualquier de los métodos depende entre otros factores, de las variables y supuestos principales que considere el método, las condiciones meteorológicas y de humedad en el suelo del sitio de estudio; el tipo, fenología y heterogeneidad general del cultivo o vegetación, así como de la escala espacial y temporal considerada para el cálculo o medición (Tang *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2011; Mu *et al.*, 2011; Samain *et al.*, 2012; Liu *et al.* 2013).

En la Figura 3 se muestra el comportamiento diario de la evapotranspiración con los tres métodos analizados, donde se observan claramente tres valores de ET “pico” medidos con el sistema CE, los valores observados fueron 4.4, 5.3 y 4.5 mm para los días 171, 195 y 211 después del trasplante (DDT).

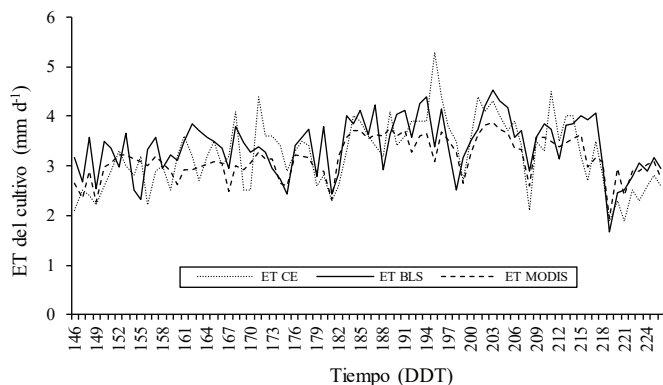


Figura 3. Comportamiento diario de la ET durante el período de estudio, estimada y observada con las técnicas utilizadas (MODIS, BLS, CE).

Figure 3. Daily behavior of ET during the study period, estimated and observed with the techniques used (MODIS, BLS, CE).

Gordillo *et al.* (2014) when comparing ET results at daily level with 12 satellite images with the METRIC method and vortex covariance (EC) indicate an ET overestimation determined with METRIC with respect to EC, where they obtained $ER= 7.273\%$ and $ES= 0.208 \text{ mm d}^{-1}$, while in the present investigation, $ER= -7.203\%$ and $ES= 0.233 \text{ mm d}^{-1}$ were obtained, considering that in this research ET is considered daily and for a greater number of days.

On the other hand, Liu *et al.* (2013) when comparing ET results obtained in annual periods and for several years, using the scintillometer method and the product MOD16 ET, found a different behavior, with ER values between -14.52 and 25.16%, while R varied from 0.76 to 0.97.

While Tang *et al.* (2010), when comparing the sensible heat flux (H) estimated with scintillometry and covariance techniques of vortices, show that the scintillometer underestimated the value of H measured with EC, implying that when applying the energy balance equation, the latent heat flux (LE) value was higher and, therefore, the scintillometer overestimated the ET calculation with respect to the value measured with EC, similar to what happened in this paper; also, applying the triangular space method with MODIS data to estimate the latent heat flux (H) indicates an overestimation of H and underestimation of LE with respect to the scintillometer, therefore a lower ET estimated with the triangular space method with MODIS data, which is a similar behavior to the one on this research.

The estimation of ET with any of the methods depends, among other factors, on the variables and main assumptions that the method, the meteorological and soil conditions of the study site consider; the type, phenology and general heterogeneity of the crop or vegetation, as well as the spatial and temporal scale considered for the calculation or measurement (Tang *et al.*, 2010; Muiu *et al.*, 2011; Samain *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2013).

Figure 3 shows the daily behavior of evapotranspiration with the three analyzed methods, where three values of “peak” ET measured with the CE system are clearly observed, the observer values were 4.4, 5.3 and 4.5 mm for days 171, 195 and 211 after transplantation (DDT).

The largest discrepancies between ET estimated with MODIS and BLS were observed during 20 days of the total of the considered period, which represented 24.6%

Las mayores discrepancias entre ET estimada con MODIS y BLS se observan durante 20 días del total del período, lo que representó 24.6% de días evaluados. Durante esos días se presentó una mayor humedad relativa promedio en el ambiente generando una sobrestimación de flujo de calor sensible (H) y por consiguiente una reducción de ET estimada con BLS. Tang *et al.* (2010) al comparar los resultados de H obtenidos con MODIS y scintilómetro plantean una posible sobrestimación de flujo de calor sensible por la presencia de fuertes lluvias en el área de estudio, lo que seguramente incrementó la humedad relativa ambiental, reduciendo la ET.

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestran los resultados del análisis estadístico de los datos estimados y observados con los tres métodos, la raíz media del error cuadrático (RMSE), el sesgo (BIAS), coeficiente de concordancia de Willmott (d) y el coeficiente de determinación de Pearson (R). Un valor de RMSE y BIAS, igual a cero indican un ajuste perfecto de los datos estimados con respecto a los datos observados, se consideran aceptables cuando RMSE no rebase 20% de la media del conjunto de datos. El coeficiente de concordancia (d) oscila entre 0 y 1, entre más cerca del 1 se encuentre el valor d, más preciso será el modelo de estimación. Finalmente, el coeficiente de correlación de Pearson (R) tiene una variación entre -1 y 1, en esta investigación se busca que el modelo de estimación replique los datos medidos, por lo tanto entre más cercano a 1 el valor R, existirá una mayor correlación entre los datos, aunque el uso de este parámetro para evaluar modelos de pronóstico o estimación presenta ciertas limitaciones por lo que es poco empleado (Willmott, 1981).

of the evaluated days. During these days, a higher average relative humidity was present in the environment, probably generating an overestimation of sensible heat flux (H) and consequently an ET reduction estimated with BLS, Tang *et al.* (2010), when comparing the results of H obtained with MODIS and scintilometer, posed a possible overestimation of sensible heat flux due to the presence of heavy rains in the study area, which probably increased the environmental relative humidity, reducing ET.

Figures 4, 5 and 6 show the results of the statistical analysis of the estimated and observed data with the three methods, the root mean square error (RMSE), bias (BIAS), Willmott's concordance coefficient (d) and the Pearson coefficient of determination (R). A value of RMSE and BIAS, equal to zero indicate a perfect fit of the estimated data with respect to the observed data, are considered acceptable when RMSE does not exceed 20% of the data set mean. The coefficient of concordance (d) ranges from 0 to 1, the closer to 1 the d value is found, the more accurate the estimation model will be. Finally, the Pearson (R) correlation coefficient has a variation between -1 and 1, in this investigation it is sought that the estimation model replicate the measured data, therefore the closer to 1 the R value, there will be a greater correlation between data, although the use of this parameter to evaluate forecast or estimation models shows certain limitations and is thus little used (Willmott, 1981).

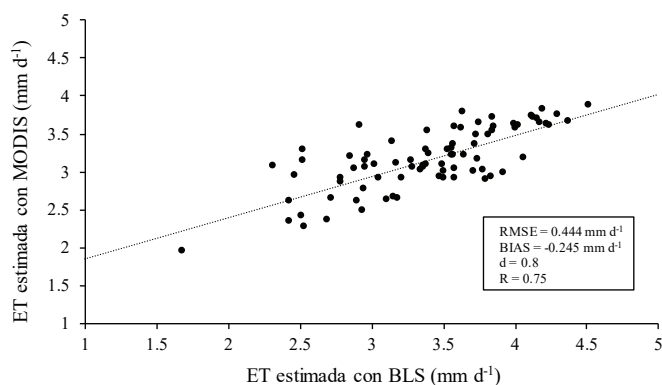


Figura 4. Valores de relación estadística entre ET estimada con MODIS y BLS.

Figure 4. Statistical relationship Values between ET estimated with MODIS and BLS.

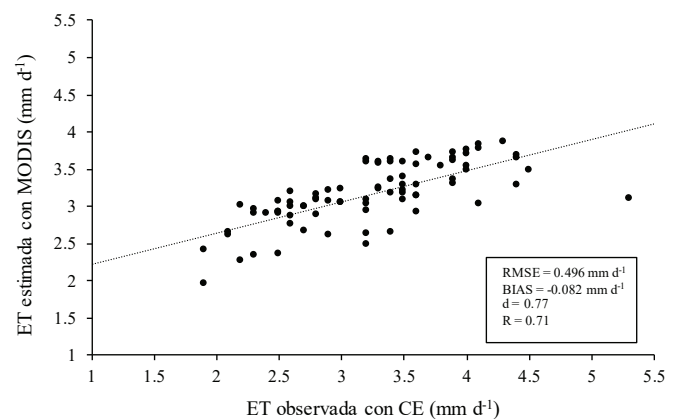


Figura 5. Statistical relationship values between ET estimated with MODIS and observed with EC.

Figure 5. Valores de relación estadística entre ET estimada con MODIS y observada con CE.

Conclusiones

En este trabajo se compararon los valores de ET obtenidos con tres métodos basados en el balance de energía aplicado sobre la superficie terrestre, dos métodos de carácter regional y uno de carácter puntual.

Con la presente investigación es posible concluir que el método de espacio triangular utilizando datos MODIS, es una herramienta adecuada para estimar la evapotranspiración, se obtuvo como un valor residual del balance de energía aplicado en la superficie terrestre; para estimar de manera diaria el valor de ET se utilizaron datos de NDVI y Temperatura superficial (T_s) obtenidas de MODIS, al comparar los valores de ET obtenidos con esta técnica, con aquellos obtenidos con los métodos del scintilómetro (BLS) y covarianza de vórtices (CE), resultaron con un error relativo (ER) de -7.2% y -2.5%, y un error estándar de 0.233 mm d^{-1} y 0.32 mm d^{-1} , respectivamente. La mejor relación estadística se dio entre la ET estimada con MODIS y BLS, donde el coeficiente de concordancia de Willmott (d) fue de 0.8, RMSE fue de 0.44 mm d^{-1} , BIAS de -0.245 mm d^{-1} y R de 0.75.

Los valores obtenidos de los parámetros estadísticos señalan que no existe una diferencia importante al comparar la ET estimada con los tres métodos, seguramente debido a que el tamaño de la superficie y las condiciones del cultivo, no permitían la heterogeneidad suficiente para mostrar diferencias entre los métodos de carácter regional y puntual. Es necesario realizar investigación en superficies mayores y vegetación diversa para incrementar la heterogeneidad.

Se concluye que el método de espacio triangular con datos MODIS es una buena alternativa para estimar ET en superficies homogéneas de cultivo, al obtenerse un buen ajuste con los datos estimados con los métodos del scintilómetro y covarianza de vórtices.

Literatura citada

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Evapotranspiration -guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56, FAO, Rome. 9. 300 pp.
 Gao, Z. Q.; Liu, C. S.; Gao, W. and Chang, N. B. 2011. A coupled remote sensing and the surface energy balance with topography algorithm (SEBTA) to estimate actual evapotranspiration over heterogeneous terrain. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15:119-139.

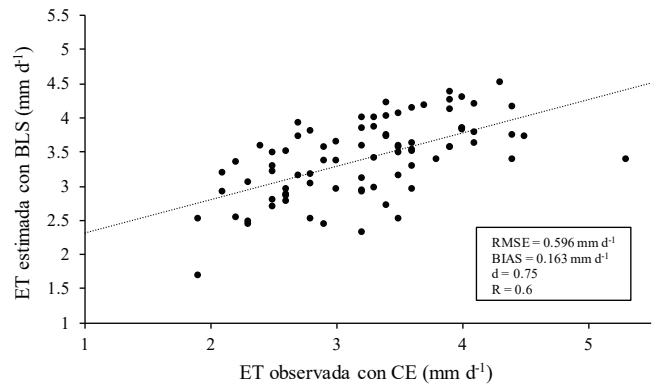


Figura 6. Valores de relación estadística entre ET observada con CE y estimada con BLS.

Figure 6. Statistical relationship values between ET observed with EC and estimated with BLS.

Conclusions

In this paper were compared the ET values obtained with three methods based on the energy balance applied to the land surface, two methods of a regional character and one of a space-limited nature.

With this research it is possible to conclude that the triangular space method using MODIS data, is an adequate tool to estimate the evapotranspiration, it was obtained as a residual value of the energy balance applied in the terrestrial surface; in order to estimate the ET values on a daily basis, data from NDVI and Surface temperature (T_s) obtained from MODIS were used, comparing ET values obtained with this technique, with those obtained with scintilometer (BLS) and vortex covariance (EC), showed a relative error (ER) of -7.2% and -2.5%, and a standard error of 0.233 mm d^{-1} and 0.32 mm d^{-1} , respectively. The best statistical relation was between ET estimated with MODIS and BLS, where Willmott's coefficient of agreement (d) was 0.8, RMSE was 0.44 mm d^{-1} , BIAS -0.245 mm d^{-1} and R of 0.75.

The values obtained from the statistical parameters indicate that there is no significant difference when comparing ET estimated with the three methods, probably due to the size of the surface and the conditions of the crop that did not allow sufficient heterogeneity to show differences between the methods of regional and limited nature. Research on larger surfaces and diverse vegetation is necessary to increase heterogeneity.

- Geli, H. M.; Neale, C. H. M. U.; Watts, D.; Osterberg, J.; De Bruin, H. A. R.; Kohsiek, W.; Pack, R. T. and Hippias, L. E. 2012. Scintillometer-based estimates of sensible heat flux using lidar-derived surface roughness. *J. Hydrometeorol.* 13:1317-1331.
- Gordillo, S. V. M.; Flores, M. H.; Tijerina, Ch. L. y Arteaga, R. R. 2014. Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5(1):143-155.
- Girolimetto, D.; Venturini, V. y Rodríguez, L. 2011. Influencia de la resolución espacial de los diagramas NDVI-Ts en el cálculo de la fracción evaporable. *Tecnología y Ciencia del Agua* 11(3):21-33.
- Jiang, L.; and Islam, S. 1999. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters.* 26(17):2773-2776.
- Jiang, L.; Islam, S.; Guo, W.; Jutla, A. S.; Senarath, S. U. S.; Ramsay, B. H. and Eltahir, E. 2009. A satellite-based daily actual evapotranspiration estimation algorithm over South Florida. *Global and Planetary Change.* 67:62-77.
- Kleissl, J.; Gomez, J.; Hong, S.-H.; Hendrickx, J. M. H.; Rahn, T. and Defoor, W. L. 2008. Large aperture scintillometer intercomparison study. *Boundary-Layer Meteorology.* 128(1):133-150.
- Kleissl, J.; Hong, S. and Hendrickx, M. H. 2009. New Mexico scintillometer network, supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models. *Am. Meteorol. Soc.* 90(2):207-218.
- Liu, S. M.; Xu, Z. W.; Wang, W. Z.; Jia, Z. Z.; Zhu, M. J.; Bai, J. and Wang, J. M. 2011. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15:1291-1306.
- Liu, S. M.; Xu, Z. W.; Zhu, Z. L.; Jia, Z. Z. and Zhu, M. J. 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *J. Hydrol.* 487:24-38.
- López, A. J. E.; Díaz, V. T.; Watts, T. Ch.; Rodríguez, J. C.; Castellanos, V. A. E.; Partida, R. L. y Velázquez, A. T. J. 2015. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de Chile Bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoam.* 33(3):209-2019.
- Mu, Q.; Zhao, M. and Running W. S. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment.* 115:1781-1800.
- ORNL DAAC (Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center for Biogeochemical Dynamics). 2008a. MODIS collection 5 land products global subsetting and visualization tool. ORNL DAAC, oak ridge, Tennessee, USA. Subset obtained for MYD11A2 product at 24.5943N, 107.5189W, time period: 2013-08-21 to 2015-11-09, and subset size: 3*3 km. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1241>.
- It is concluded that the triangular space method with MODIS data is a good alternative to estimate ET in homogeneous crop surfaces, because it was possible to obtain a good fit with the data estimated with scintillometer and vortex covariance methods.

End of the English version



- ORNL DAAC (Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center for Biogeochemical Dynamics). 2008b. MODIS collection 5 land products global subsetting and visualization tool. ORNL DAAC, oak ridge, Tennessee, USA. Subset obtained for MOD11A2 product at 24.5943N, 107.5189W, time period: 2013-08-21 to 2015-11-09, and subset size: 3*3 km. <http://dx.doi.org/10.3334/ornl daac/1241>.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review.* 100(2):81-92.
- Samain, B.; Simons, G. W. H.; Voogt, M. P.; Defloor, W.; Bink, N. J. and Pauwels, V. R. N. 2012. Consistency between hydrological model, large aperture scintillometer and remote sensing based evapotranspiration estimates for a heterogeneous catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 2095-2107.
- Solignac, P. A.; Brut, A.; Selves, J. -L.; Béteille, J. -P.; Gastellu-Etchegorry, J. -P.; Keravec, P.; Béziat, P. and Ceschia, E. 2009. Uncertainty analysis of computational methods for deriving sensible heat flux values from scintillometer measurements. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2:1383-1417.
- Tang, R.; Li, Z. -L. and Tang, T. 2010. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment* 114:540-55.
- Willmott, C. J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography.* 2(2):184-194.
- Willmott, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, R. E.; Feddema, J. J.; Klink, K. M.; Legates, D. R.; O'Donnell, J.; Rowe, C. M. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.* 90(C5):8995-9005.
- Zeweldi, D. A.; Gebremichael, M.; Wang, J.; Sammis, T.; Kleissl, J. and Miller, D. 2010. Intercomparison of sensible heat flux from large aperture scintillometer and eddy covariance methods: field experiment over a homogeneous semi-arid region. *Boundary-Layer Meteorol* 135:151-159.