

# Estimación de la radiación neta a escala diaria/diurna a partir de datos instantáneos para la determinación de la evapotranspiración real mediante teledetección en medios semiáridos

L. Morillas<sup>(1)</sup> (lmorillas@eeza.csic.es), A. Were<sup>(1)</sup> (ana@eeza.csic.es), P. Serrano-Ortiz<sup>(2, 3)</sup> (penelope@ugr.es), M. García<sup>(1)</sup> (monica@eeza.csic.es), L. Villagarcía<sup>(4)</sup> (lvilsai@upo.es), A.S. Kowalski<sup>(2,3)</sup> (andyk@ugr.es), F. Domingo<sup>(1,5)</sup> (poveda@eeza.csic.es)

- (1) Estación Experimental de Zonas Áridas (CSIC), Almería, España.
- (2) Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada, Granada, España
- (3) Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA), Granada, España
- (4) Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España
- (5) Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Almería, Almería, España.

## RESUMEN

La teledetección se puede utilizar para estimar de forma regional la evapotranspiración a escala diaria a partir del balance de energía superficial. Una buena estimación de la Radiación neta diaria (Rnd) o diurna (RnD) resulta determinante, por ser la variable de mayor magnitud en esta ecuación, pudiendo contribuir en buena medida al error en la estimación de ET. La teledetección proporciona una medida instantánea de la Radiación neta (Rni). Para transformar esa medida instantánea en un valor de radiación neta a escala diaria o diurna, uno de los métodos más utilizados es obtener Rnd a través de una estimación previa de los ratios Rnd/Rni o RnD/Rni

En este trabajo se analiza la aplicabilidad de dos métodos, uno que estima un ratio constante (Rnd/Rni) y otro que utiliza ratios variables (RnD/Rni) a lo largo del año basándose en los cambios en el periodo diurno a lo largo del año, en un sistema semiárido del sureste español con vegetación dispersa donde se han adquirido datos experimentales de Rni. Los resultados muestran las claras limitaciones de considerar un ratio constante a lo largo del año mientras que el método que aquí se propone para estimar ratios variables estima RnD con un RMSE del 7% cuando se utilizan datos del radiómetro de neta para parametrizar el modelo y del 8% cuando el ratio se parametriza con datos modelizados. Esto último sugiere que el método de estimación de ratios variables propuesto en este trabajo puede ser aplicable a escala regional utilizando imágenes de satélite.

## ABSTRACT

Remote sensing can be used to estimate evapotranspiration at regional scales based on the surface energy balance. It is critical to obtain accurate estimates of daily net radiation (Rnd) or diurnal net radiation (RnD) as being the variable of greater magnitude in the surface energy balance contributes the most to the error in ET estimates.

Remote sensing data provide instantaneous estimates of net radiation (Rni). In order to transform instantaneous Rni estimates into daily or diurnal values, one of the most common approaches consists in estimating Rnd/Rni or RnD/Rni ratios to transform the available Rni into Rnd or RnD. This work evaluates the applicability of two methods, one using a constant ratio along the year and another using variable ratios based on the changes in the diurnal period along the year. The work has been developed in a semiarid ecosystem with sparse vegetation where Rni has been measured with a net radiometer. Results show that using a constant ratio along the year is unfeasible while the variable ratios model provides estimates of RnD with an RMSE of 7% when the model is calibrated using net radiometer data, and with an RMSE of 8% when the model is parameterized with modeled data, suggesting that the method developed in this research can be applicable at a regional scales using satellite images.

**Keywords:** Remote Sensing, Net Radiation, Temporal Scaling, Semiarid Areas, Evapotranspiration, Surface Energy Balance.

## 1. INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración o flujo de calor latente (ET) es especialmente relevante en el balance hídrico y energético de los ambientes áridos y semiáridos pudiendo llegar a devolverse a la atmósfera por este proceso del 90 al 100% del agua que llueve. Los métodos tradicionales de estimación de ET se ven limitados a una escala espacial muy local, lo que reduce en gran medida

sus posibilidades de aplicación. La teledetección es, hasta ahora, la única fuente de información que puede emplearse para obtener estimaciones de ET a distintas escalas, tanto espaciales como temporales (Gomez & Oliosio, 2005).

La teledetección facilita de forma remota algunos de los datos necesarios para el cálculo del balance energético en superficie ( $R_n - G = ET + H$ ), donde  $R_n$  es la Radiación neta,  $H$  el calor sensible y  $G$  el flujo de calor al suelo, del cual puede inferirse de forma residual ET. En el balance de energía superficial  $R_n$  representa la cantidad total de energía disponible en el sistema para el resto de procesos energéticos, tanto físicos como fisiológicos, de ahí la importancia de su correcta estimación.

La teledetección es fuente de datos físicos instantáneos mientras que los flujos naturales se integran a lo largo del tiempo de forma continua (Kustas & Norman, 1996). Uno de los principales retos en la aplicación de la teledetección para la estimación de estos flujos dinámicos es la búsqueda de un modo eficaz para escalar los datos instantáneos a la escala temporal diaria.

Para conocer el promedio de la radiación neta diaria ( $R_{nd}$ ) a partir de la radiación neta instantánea ( $R_{ni}$ ) medida por teledetección, Seguin & Itier (1983) calcularon el ratio  $C_i = R_{nd}/R_{ni}$  con datos medidos durante tres periodos estivales en un área experimental en Avignon, Francia. Asumiendo que dicho ratio se mantenía constante a lo largo de todo el año, para obtener  $R_{nd}$  aplicaron dicho factor a los datos de  $R_{ni}$  obtenidos diariamente en un rango horario cercano al mediodía. Algunos autores plantean la inconsistencia de que dicho ratio  $C_i$  sea constante a lo largo del año (Wassenar *et al.*, 2002) y las limitaciones de su aplicación de forma indistinta a áreas de diferentes latitudes (Sánchez Tomas *et al.*, 2005).

Jackson *et al.* (1983) demostraron que el ratio entre la irradiancia total diurna ( $SD$ ) y la irradiancia instantánea ( $Si$ ) no es constante a lo largo del año y que es función de la latitud, el día del año y la hora a la que se mida  $Si$ . En este trabajo plantearon la posibilidad de asumir la igualdad entre este ratio y el de ET diurna y la instantánea ( $ETD/ETi$ ), basándose en la idea de que el curso diurno de la irradiancia y ET esta igualmente descrito por una función sinusoidal. De este modo construyeron y aplicaron exitosamente un método directo de cálculo de ETD a partir de  $SD/Si$  y  $ETi$ . El trabajo posterior de Zhang & Lemeur (1994) apoya la aplicabilidad de este método para estimar la ETD y demuestra como su evolución diurna responde al patrón de radiación solar incidente.

Por otra parte, Samani *et al.* (2005) propusieron escalar la radiación neta diurna ( $R_{nD}$ ) a partir del ratio diurno/instantáneo de la radiación solar incidente ( $SD/Si$ ) y el dato de  $R_{ni}$ , al considerar cierta la equivalencia entre  $R_{nD}/R_{ni}$  y  $SD/Si$ . Otros autores han estimado la  $R_n$  diaria a partir de valores instantáneos en función de la geometría solar (Lagouarde & Brunet, 1983; Bisht *et al.*, 2005).

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo de este trabajo es evaluar dos métodos, el de Seguin & Itier (1983) y Jackson *et al.* (1983) modificado, para la estimación de la radiación neta diaria y diurna respectivamente a partir de datos instantáneos en un ecosistema semiárido y analizar el rango horario sobre el que pueden aplicarse con éxito.

## **3. MATERIAL Y MÉTODOS**

### *3.1 Datos experimentales*

Los datos empleados en el presente estudios fueron obtenidos en el área de experimentación de el Llano de los Juanes situada en la Sierra de Gádor de Almería, a 1600 metros de altitud, (36°55'41.7''N; 2°45'1.7''W). Dicha área presenta una vegetación dispersa de carácter arbustivo con predominancia de dos especies: *Festuca scariosa* (19%) y *Genista pumila ssp pumila* (11.5%). Las medidas de radiación se hicieron con un radiómetro de radiación neta (NR-Lite; Kipp & Zonen) situado sobre superficies representativas de la vegetación de el Llano de los Juanes. Los valores de radiación neta se registraron cada minuto y se promediaron y almacenaron cada 30 con un datalogger (CR23X, Campbell Scientific) durante un año hidrológico completo (2004 – 2005). Cada uno de los valores almacenados cada 30 minutos se consideró un valor instantáneo y a partir de estos se han calculado los promedios diarios y diurnos de la radiación neta. Además se seleccionaron los días claros (193 días con representaciones de las cuatro estaciones) para evitar la influencia de nubes sobre la radiación neta, y por ser condición necesaria para el empleo exitoso de muchos de los datos procedentes de teledetección. Sobre estos días se realizaron todos los análisis de este trabajo.

### 3.2 Métodos aplicados

#### 3.2.1. Aplicación de la aproximación de Seguin & Itier (1983)

Para la aplicación del ratio  $Ci = Rnd/Rni$  al calculo de la Rn diaria se utilizó el valor constante de 0.3 propuesto por Seguin & Itier (1983) y se aplicó a los datos de radiación neta instantánea (Rni) de las 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, y 15:00 horas de los días seleccionados. Además se calcularon los ratios Rnd/Rni medidos en todos estos días.

La calidad de las estimaciones se evaluó a través del error cuadrático medio (RMSE) entre los promedios diurnos de la Rn estimada y observada (anual y para los periodos de primavera-verano y de otoño-Invierno), y el  $R^2$  de la recta de regresión entre ambos.

#### 3.2.2. Aplicación de la aproximación de Jackson *et al.* (1983) modificada

El método propuesto en este trabajo estima un ratio variable diurno/instantáneo de la Rn ( $RnD/Rni$ ), basado en la evolución a lo largo del día y del año de la Rni. Este ratio multiplicado por la Rn instantánea cerca del mediodía, adquirida por sensores remotos, proporciona estimaciones de la radiación neta diurna.

En este trabajo se ha considerado que la principal fuente de variación de Rni a lo largo del día, es la radiación solar incidente ( $Si$ ). En este sentido, Samani *et al.*, (2005) ya propusieron la igualdad de los ratios diurno/instantáneo de la radiación neta (Rn) y de  $Si$  (Ec.1) para el periodo diurno (N) considerando positiva la radiación neta instantánea en todo N.

$$\frac{RnD}{Rni} \approx \frac{SD}{Si} \quad (1)$$

En el presente trabajo se ha adaptado la metodología de Jackson *et al.*, (1983) que estima el ratio  $SD/Si$  para estimar el ratio  $RnD/Rni$ . Esta metodología ha de aplicarse para una función positiva (Samani *et al.*, 2005) por ello ha de tenerse en cuenta el curso de la Rni y no de la  $Si$ , ya que la Rni no es siempre positiva durante el periodo diurno (N) sino durante un periodo de  $N'$  horas.

La adaptación de la metodología propuesta por Jackson *et al.*, (1983) se resume en las cinco siguientes ecuaciones, donde  $Rn_{max}$  es la radiación neta máxima al mediodía,  $RnD$  es la Radiación neta diurna acumulada, y  $N'$  es la amplitud del periodo durante el cual la radiación neta es positiva:

$$Rni = Rn_{max} \sin\left(\frac{\pi t'}{N'}\right) \quad (2)$$

$$RnD = \int_0^{N'} Rn_{max} \sin\left(\frac{\pi t'}{N'}\right) dt' = \left(\frac{2N'}{\pi}\right) Rn_{max} \quad (3)$$

$$J' = RnD / Rni = 2N' / [\pi \sin(\pi t' / N')] \quad (4)$$

$$t' = t'_i - t'_a \quad (5)$$

Donde  $t'_i$  es la hora a la que se toma la medida de radiación neta instantánea, que puede ser el momento de paso del satélite, y  $t'_a$  es la hora de la mañana en la que la radiación neta se hace positiva.

Los  $J'$  obtenidos a partir de la ec. 4 son el ratio entre la  $Rn$  total acumulada y  $Rni$ . Para estimar la radiación neta promediada ( $\overline{RnD}$ ) para el periodo diurno ( $N$ ) se asume que los valores de  $Rni$  entre  $N$  y  $N'$  son despreciables en el cálculo de  $\overline{RnD}$  por lo que emplearemos para su estimación el ratio  $J'/N$ . El método de Jackson *et al.*, (1983) modificado para el cálculo de la  $\overline{RnD}$  presenta similitudes con la aproximación de Bisht *et al.*, (2005) basada en Lagouarde & Brunet (1983).

$N'$  y  $t'_a$  se calculan en este trabajo de dos formas:

3.2.2.1. Estimación de  $N'$  y  $t'_a$  a partir de datos experimentales medidos con radiómetro de neta

Se usaron los datos experimentales para evaluar la aplicabilidad del método de Jackson *et al.*, (1983) modificado y conocer en que rango horario cercano al medio día puede emplearse exitosamente este método. Para ello, con los valores observados de  $N'$  y  $t'_a$  se calculan seis ratios  $J'$  tomando como  $t'_i$  para cada uno las 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00 y 15:00 horas

3.2.2.2. Estimación de  $N'$  y  $t'_a$  a partir de datos modelizados

Se pretende ampliar las posibilidades de aplicación del método Jackson *et al.*, (1983) modificado, para cuando no se dispone de datos experimentales, modelizando  $N'$  y  $t'_a$ . Para ello, se generó un modelo lineal que relaciona los  $N'$  y  $t'_a$  observados experimentalmente con las horas de luz ( $N$ ) y la hora de amanecer ( $t_a$ ) que pueden ser fácilmente obtenidos del US Naval Observatory, Astronomical Application Department (<http://aa.usno.navy.mil/>) en función de la hora solar y las coordenadas geográficas. Con los datos de  $N'$  y  $t'_a$  estimados a partir de este modelo se recalculó el ratio  $J'$  para la hora instantánea de referencia  $t'_i = 12.00$ .

La modelización de  $N'$  y  $t'_a$  permitiría calcular la  $\overline{RnD}$  a escala regional utilizando imágenes de satélite que proporcionarían la  $Rni$ .

La evaluación del error con este método se realizó empleando los mismos estimadores que para la metodología anterior.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1. Aplicación de la aproximación de Seguin & Itier (1983)

Al comparar el promedio de la radiación neta diaria ( $\overline{RnD}$ ) observada con la estimada calculada con el ratio constante ( $Ci$ ) propuesto por Seguin & Itier (1983) y con el dato de radiación neta instantánea ( $Rni$ ) medido a las 12:00 horas, se obtuvo un RMSE anual (65.44%) mayor que cuando se utilizaron los valores de  $Rni$  medidos a las otras horas (Ver Tabla. 1). Las estimaciones mejoran a medida que aplicamos el  $Ci$  a datos de  $Rni$  mas alejados del medio día (RMSE anual del 22.24% con  $Rni$  de las 15:00 horas), aunque los valores de  $R^2$  indican que los patrones de  $RnD$  calculados con los  $Rni$  de todas las horas fueron muy similares entre si

Tabla 1. Análisis del error cometido en el calculo de la radiación neta diaria promediada estimada a partir del factor  $Ci = 0.3$  propuesto por Seguin & Itier y los valores de radiación neta instantánea medida dentro del rango temporal cercano al medio día comprendido entre las 10:00 horas y las 15:00 horas. RMSE es el error cuadrático medio anual, RMSE prim-ver y RMSE oto-inv son el error cuadrático medio para el periodo primavera-verano y para otoño-invierno respectivamente, RMSE (valor) es el error cuadrático medio anual expresado en  $Wm^{-2}$ , y  $R^2$  es el estimador de la regresión de los valores estimados frente a los medidos de  $\overline{RnD}$ .

10:00			12:00			14:00		
RMSE	24.42%	RMSE (valor) 21.48	RMSE	65.44%	RMSE (valor) 57.57	RMSE	41.03%	RMSE (valor) 36.09
RMSE prim-ver	15.78%	$R^2$ 0.94	RMSE prim-ver	50.04%	$R^2$ 0.95	RMSE prim-ver	21.74%	$R^2$ 0.93
RMSE oto-inv	33.32%		RMSE oto-inv	82.85%		RMSE oto-inv	59.07%	
11:00			13:00			15:00		
RMSE	48.35%	RMSE (valor) 42.53	RMSE	64.17%	RMSE (valor) 56.45	RMSE	22.24%	RMSE (valor) 19.56
RMSE prim-ver	34.73%	$R^2$ 0.94	RMSE prim-ver	44.84%	$R^2$ 0.93	RMSE prim-ver	13.78%	$R^2$ 0.94
RMSE oto-inv	63.20%		RMSE oto-inv	84.94%		RMSE oto-inv	30.75%	

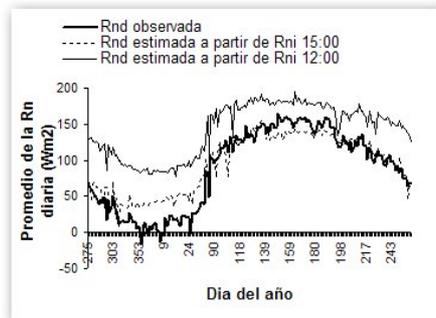


Figura 1. Radiación neta diaria ( $RnD$ ) estimada a partir de los datos de Radiación neta instantánea ( $Rni$ ) a las 12:00 y 15:00 comparada con la  $RnD$  observada

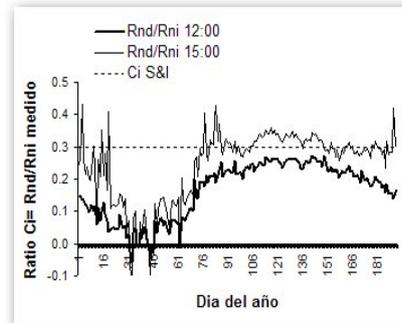


Figura 2. Comparativa de los ratios observados entre la Radiación neta diaria y la Radiación neta instantánea ( $RnD/Rni$ ) medida a las 12:00 y las 15:00 y el ratio  $Ci = RnD/Rni = 0.3$  propuesto por Seguin & Itier (1983).

En la figura 1 se observa que la  $RnD$  estimada con la  $Rni$  de las 12:00 sobreestimó los valores observados durante todo el año aunque esto no ocurrió al utilizar valores de  $Rni$  medidos a otras horas (p.e. 15:00) en el que el ajuste fue bastante bueno durante gran parte del año.

La figura 2 muestra la comparación entre los valores de  $RnD/Rni$  calculados a partir de los datos instantáneos de  $Rni$  (para las 12:00 y las 15:00) y el valor de  $Ci$  propuesto por Seguin & Itier (1983).  $RnD/Rni$  presenta una marcada evolución estacional, que contrasta con la constancia de  $Ci$ , además muestra como los valores máximos de  $Rni$  medidos a las 12:00 afectan al ratio  $RnD/Rni$  frente a los medidos a otras horas con valores menores de  $Rni$ . Esto explica que las diferencias entre

valores observados y estimados de Rnd sean menores en primavera – verano que en otoño – invierno, además de que el cálculo de Rnd sea peor a las horas de mayor irradiancia (Tabla 1).

#### 4.2. Aplicación de la aproximación de Jackson et al. (1983) modificada

##### 4.2.1. Con datos experimentales

Las estimas del promedio de la Radiación neta diaria obtenida aplicando los ratios  $J'/N$  a los respectivos datos de Rni entre las 10:00 y las 15:00 horas, presentan una calidad variable que oscila dentro del rango del 6.01 al 26.4% de RMSE (Tabla 2).

Tabla 2- Análisis de las estimas de la radiación neta diaria promediada ( $\overline{RnD}$ ) calculadas a partir del ratio  $J'/N$  y la radiación neta instantánea (Rni) medida dentro del rango temporal cercano al medio día comprendido entre las 10:00 y las 15:00 horas. RMSE es el error cuadrático medio anual, RMSE prim-ver y RMSE oto-inv son el error cuadrático medio para el periodo primavera-verano y para otoño-invierno respectivamente, RMSE (valor) es el error cuadrático medio anual expresado en  $Wm^{-2}$ , y  $R^2$  es el estimador de la regresión de los valores estimados frente a los medidos de  $\overline{RnD}$ .

10:00				12:00				14:00			
RMSE	11.54%	RMSE (valor)	26.24	RMSE	6.01%	RMSE (valor)	17.55	RMSE	8.24%	RMSE (valor)	18.74
RMSE prim-ver	9.38%	$R^2$	0.91	RMSE prim-ver	7.42%	$R^2$	0.96	RMSE prim-ver	9.05%	$R^2$	0.93
RMSE oto-inv	14.07%			RMSE oto-inv	8.02%			RMSE oto-inv	6.63%		
11:00				13:00				15:00			
RMSE	8.08%	RMSE (valor)	18.37	RMSE	8.06%	RMSE (valor)	18.31	RMSE	26.44%	RMSE (valor)	60.11
RMSE prim-ver	7.70%	$R^2$	0.94	RMSE prim-ver	7.48%	$R^2$	0.94	RMSE prim-ver	14.03%	$R^2$	0.55
RMSE oto-inv	8.49%			RMSE oto-inv	8.73%			RMSE oto-inv	38.05%		

Las mejores estimaciones se obtienen aplicando el método a partir de los valores instantáneos del medio día (12:00) con un error cuadrático medio anual del 6.01%. El error en las estimas obtenidas a partir del dato instantáneo del medio día es mas constante a lo largo del año, presentando valores muy parecidos en los dos periodos estacionales estudiados (otoño–invierno; 8.02% y primavera–verano; 7.42%). En la figura 3 podemos apreciar la similitud entre los datos estimados a partir del dato instantáneo del mediodía y los datos medidos ( $R^2= 0.96$ ).

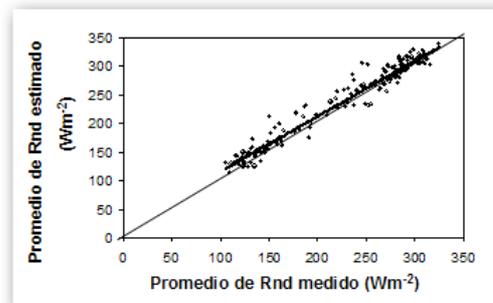


Fig.3 Promedio de Rnd estimado aplicando el ratio de Jackson calculado a partir de  $N'$  y  $t_a'$  observados y la radiación instantánea a las 12:00 frente al promedio medido.

Las estimaciones obtenidas presentan un mayor error a medida que empleamos datos instantáneos más alejados del medio día, siendo la estima de las 15:00 horas la que tiene mayor error ( $R^2= 0.55$ ), con un 26.44% de error anual y mayor diferencia estacional (38.05 % de error para el periodo otoño - invierno y 14.03% para primavera –verano).

##### 4.2.2. Con datos modelizados

$N'$  y  $t_a'$  son más oscilantes que sus homólogos solares ( $N$  y  $t_a$ ) (Ver Fig. 4) y su determinación es más complicada ya que dependen de multitud de factores que los afectan de forma mas local: temperatura, humedad de suelo, estado de la vegetación, albedo, entre otras, no evaluados en este trabajo.

En la figura 4 se muestra la evolución anual de  $N'$  y  $N$  (Fig. 4.A) y de  $t_a'$  y  $t_a$  (Fig.4.B) así como las ecuaciones para obtener  $N'$  y  $t_a'$  a partir de  $N$  y  $t_a$  respectivamente.

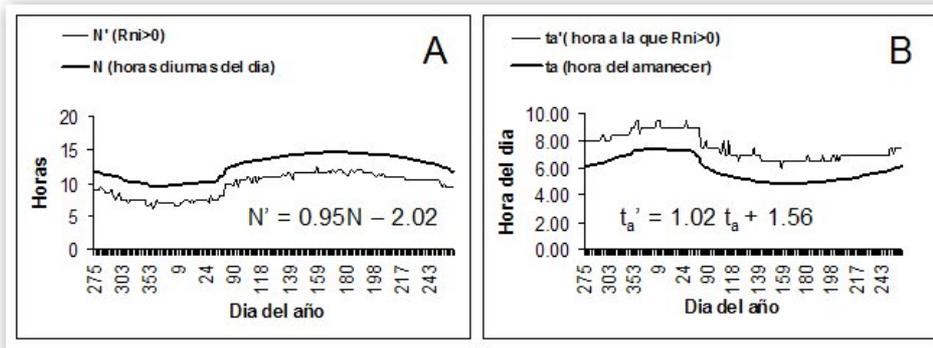


Figura 4. A/ Evolución anual del periodo diurno completo ( $N$ ) y del periodo diurno para el que se cumple que  $R_n$  es  $>0$  ( $N'$ ). Se muestra el modelo de regresión que relaciona ambas variable. B/ Evolución anual de la hora de amanecer ( $t_a$ ) y la hora a la que la Radiación neta instantánea ( $R_{ni}$ ) comienza a ser mayor que cero ( $t_a'$ ). Se muestra el modelo de regresión que relaciona ambas variables.

Tabla 3. Análisis del error cometido en el calculo del promedio de la Radiación neta diurna estimado a partir del ratio de Jackson et al., (1983) calculado con  $N'$  Y  $t_a'$  modelados y aplicado al valor de Radiación neta instantánea medida. El valor del RMSE viene dado en  $Wm^{-2}$ .

12:00			
RMSE	7.05%	RMSE (valor)	16.02
RMSE prim-ver	6.73%	$R^2$	0.97
RMSE oto-inv	7.38%	Pendiente	0.96

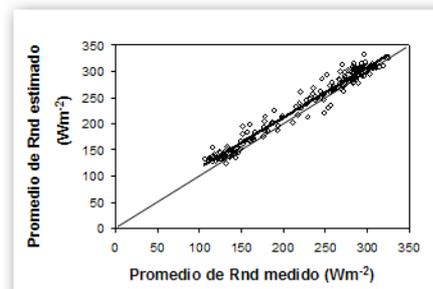


Figura 5. Promedio de la  $R_n$  diurna estimado aplicando el ratio de Jackson calculado a partir de  $N'$  y  $t_a'$  modelizados y la radiación instantánea a las 12:00 frente al medido.

Las estimaciones de  $\overline{RnD}$  calculadas a partir de los datos los de  $N'$  y  $t_a'$  obtenidos a través del modelo lineal y de  $R_{ni}$  a las 12:00 h (la hora que proporcionaba mejores resultados) presentan muy pocas diferencias con las estimadas a partir de  $N'$  y  $t_a'$  procedentes de los datos experimentales con un 7% y 6% de error anual respectivamente (Ver Tablas 2 y 3). La exactitud de las estimas vuelve a mantenerse en niveles muy similares para los dos periodos estacionales tomados como referencia (6.73 % de error para el periodo primavera-verano y 7.38% para el periodo otoño-invierno). En la figura 2 podemos apreciar el ajuste entre los datos estimados y los datos medidos ( $R^2=0.97$ ).

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo evalúa la posibilidad de estimar la Rn diaria y diurna a partir de datos instantáneos (Rni) utilizando un ratio Rnd/Rni y RnD/Rni respectivamente. Los resultados del estudio demuestran que ninguno de estos dos ratios se mantienen constantes a lo largo del año sino que presentan una clara estacionalidad por lo que el hecho de considerar un ratio constante como el planteado por Seguin & Itier (1983) conlleva serias limitaciones.

La estimación de un ratio variable RnD/Rni a lo largo del año, se ha planteado en este trabajo como una modificación del de Jackson *et al.* (1983). A la luz de los resultados, que ofrecen estimaciones del promedio de la Rn diurna con un error anual del 6.01% o del 7.05% según procedan los datos  $N'$  y  $t_a'$ , empleados de datos experimentales o modelizados, podemos considerar como válida la base teórica de la metodología empleada que aplica el método de Jackson *et al.*, (1983) desarrollado para la irradiancia, adaptado en nuestro caso para el cálculo del ratio RnD/Rni. A partir de estos análisis podemos concluir que, en condiciones similares a las de este estudio, la aplicación de este ratio variable con observaciones instantáneas de Rn procedentes de teledetección ofrecerá resultados óptimos cuando el dato instantáneo haya sido tomado al mediodía, pero puede aplicarse a datos Rni adquiridos entre las 11:00 y las 14:00 con errores en torno al 8.5%, rango de horas en las cuales suelen darse las adquisiciones de imágenes.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido financiación de varios proyectos de investigación: PROBASE (Ref.: CGL2006-11619/HID) financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia; AQUASEM ('Balance hídrico en zonas degradadas semiáridas', P06-RNM-01732), BACAEMA ('Balance de carbono y de agua en ecosistemas de matorral mediterráneo en Andalucía: Efecto del cambio climático', RNM-332) y CAMBIO ('Efectos del cambio global sobre la biodiversidad y el funcionamiento ecosistémico mediante la identificación de áreas sensibles y de referencia en el SE ibérico', RNM 1280) financiados por la Junta de Andalucía. Los autores agradecen a Alfredo Durán Sánchez y a Montserrat Guerrero Berenguel su gran ayuda en los trabajos de campo y a Sebastián Vidal y Ramón Ordiales por apoyo informático.

## 7. REFERENCIAS

- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., Jiang, L. (2005): Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment* 97(1): 52-67.
- Gómez, M., Oliso, A., Sobrino, J. A., y Jacob, F. (2005): Retrieval of evapotranspiration over the Alpillles/ReSeDA experimental site using airborne POLDER sensor and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment* 96(3-4): 399-408.
- Jackson, R. D., Hatfield, J. L., Reginato, R. J., Idso, S. B. y Pinter, Jr., P. J. (1983): Estimates of daily evapotranspiration from one time of day measurements. *Agricultural Water Management*, 7: 351 – 362.
- Jacob, F. y Oliso, A. (2005): Derivation of diurnal courses of albedo and reflected solar irradiance from airborne POLDER data acquired near solar noon. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 110(10): 1-18.
- Kustas, W. P. y Norman, J. M. (1996): Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal* 41(4): 495-516.

- Lagouarde, J. P., Brunet, Y., Kerr, Y., Imbernont, J. (1991): Estimating the daily upward longwave radiation from NOAA-AVHRR data for mapping net radiation. *Advances in Space Research* 11(3): 151-161.
- Samani, Z., Bawazir, S. A., Bleiweiss, M., Skaggs, R. y Tran, V. D. (2007): Estimating daily net radiation over vegetation canopy through remote sensing and climatic data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133(4): 291-297.
- Sanchez Tomas, J. M., Caselles Miralles, V., Nicolòs Corts, R., Valor Micò, E. y Coll Company C. (2005): Calculo de la evapotranspiracion real diaria en la zona norte de Finlandia empleando tecnicas de teledeteccion. *Geofocus* 5: 278-300.
- Seguin, B. y B. Itier (1983): Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing* 4(2): 371-383.
- Wassenaar T., O., A., Hasager, C., Jacob, F., y Chehbouni, A. (2002): Estimation of evapotranspiration on heterogeneous pixels. *First International symposium on recent advances in quantitative remote sensing*, 16 - 20 September 2002, Valencia, Spain.
- Zhang, L. y R. Lemeur (1995): Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 74 (1-2): 139-154.