

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA DIARIA A PARTIR DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

ESTIMATING DAILY NET RADIATION FROM MULTIPLE LINEAR REGRESSION MODELS

Dora Ocampo^{*}; Raúl Rivas

Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Instituto de Hidrología de Llanuras, UNCPBA. Pinto 399, Tandil, República Argentina. C. P. 7000.

Correo-e: dora.ocampo@rec.unicen.edu.ar (* Autor para correspondencia).

RESUMEN

El conocimiento a escala diaria de la radiación neta (R_n) permite cuantificar la energía que es utilizada en los diferentes procesos que ocurren a nivel de la superficie, como la evapotranspiración. En este estudio se aplica un Modelo de Regresión Lineal Múltiple (MRLM) para la estimación de la R_n en una zona subhúmeda-húmeda de Argentina. En el modelo se utilizaron datos meteorológicos de radiación solar global o total, temperatura, humedad relativa del aire, radiación neta (medida con un radiómetro neto Kipp & Zonen) y el valor del inverso de la distancia relativa tierra-sol o factor de excentricidad. Como resultado, se obtuvieron ocho ecuaciones de estimación de la R_n . Los MRLM se evaluaron a partir de los estadísticos desviación media del error (MBE) y raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE). Los resultados mostraron un buen ajuste y un bajo error a escala diaria, destacándose los modelos que involucraron la radiación solar, temperatura, humedad relativa del aire e inverso de la distancia tierra-sol, permitiendo cálculos de la R_n con errores inferiores a $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

PALABRAS CLAVE:

Variables meteorológicas, evapotranspiración, radiómetro neto, zona subhúmeda-húmeda.

ABSTRACT

Knowledge of daily net radiation (R_n) is basic to quantifying energy used in various processes occurring at the surface level such, as evapotranspiration. This study applies a Multiple Linear Regression Model (MRLM) for the estimation of R_n in a subhumid-humid zone of Argentina. In the model we used weather data of solar radiation, temperature and relative humidity, R_n (measured with a Kipp & Zonen net radiometer) and inverse relative distance earth-sun. As a result, eight estimation equations of R_n were obtained. The MRLM models were evaluated using the statistics Mean Bias Error (MBE) and Root Mean Square Error (RMSE). The results showed good adjustment and low error at daily scale, highlighting those equations involving solar radiation, temperature, relative humidity and inverse distance earth- sun, allowing calculation of R_n with errors less than $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

KEYWORDS: Meteorological variables, evapotranspiration, net radiation, subhumid-humid zone.



Recibido: 26 de abril de 2012
Aceptado: 17 de junio de 2013
doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.04.031
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

El conocimiento a escala diaria de la radiación neta (R_n) permite cuantificar la energía que es utilizada en los diferentes procesos que ocurren a nivel de superficie, como la evapotranspiración (ET). En general, la R_n es la variable principal de entrada en los modelos de ET. En regiones de clima húmedo, como lo es gran parte de la Pampa Argentina, la mayor proporción de la R_n se emplea en el proceso de ET (entre el 50 y 60 % en climas húmedos y subhúmedos, respectivamente, según lo expresado por Jensen, Burman, & Allen [1990]). Allen, Pereira, Raes y Smith (1998) definen la R_n como la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda corta y larga. La siguiente ecuación representa la expresión general del balance de radiación:

$$R_n = R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow}$$

Donde:

$R_{s\downarrow}$ = Radiación de onda corta entrante
 $R_{s\uparrow}$ = Radiación de onda corta saliente
 $R_{l\downarrow}$ = Radiación de onda larga entrante
 $R_{l\uparrow}$ = Radiación de onda larga saliente

Generalmente, la medida de estos cuatro componentes no siempre está disponible, siendo más rutinarias las medidas de $R_{s\downarrow}$. En este sentido, Alados, Foyo-Moreno, Olmo y Alados-Arboledas (2003) expresan que las medidas de radiación de onda larga son difíciles de obtener, y por ello los modelos para estimar la R_n se centran en la relación entre R_n y $R_{s\downarrow}$. Por otra parte, el instrumental que permite la medición de la R_n resulta costoso, y por lo tanto se dispone de escasos puntos de medida a escala de la Pampa Argentina (el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y universidades han programado planes de instalación en los

INTRODUCTION

Knowledge of the daily scale of net radiation (R_n) allows quantification of energy used in different processes that occur at the surface, such as evapotranspiration (ET). In general R_n is the main input variable in ET models. In humid climate regions, such as large part of the Argentine Pampa, the largest proportion of R_n is used in the ET process (50 % and 60 % in humid and subhumid climates, respectively, according to Jensen, Burman, & Allen [1990]). Allen, Pereira, Raes and Smith (1998) define R_n as the difference between incoming and outgoing short and long-wave radiation. The following equation represents the general expression of the radiation balance:

$$R_n = R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow}$$

Where:

$R_{s\downarrow}$ = Incoming shortwave radiation
 $R_{s\uparrow}$ = Outgoing shortwave radiation
 $R_{l\downarrow}$ = Incoming longwave radiation
 $R_{l\uparrow}$ = Outgoing longwave radiation

Generally, measurements of these four components are not always available. Although $R_{s\downarrow}$ measurements are more routine, Alados, Foyo-Moreno, Olmo and Alados-Arboledas (2003) state that measurements of longwave radiation are difficult to obtain. For this reason, models for estimating R_n are focused on the relationship between R_n and $R_{s\downarrow}$. Moreover, instruments that measure R_n are costly and therefore, there are very few measurement points on the Argentine Pampa (El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria and universities have plans for installation over the next few years). As an alternative, the scientific community has applied models of estimation that involve

CUADRO 1. Modelos de estimación de la radiación neta (R_n).

TABLE 1. Net radiation (R_n) estimation models.

Referencia / Reference	Modelos de estimación / Estimation models
Brutsaert (2010)	$R_n = R_{s\downarrow} \cdot (1 - \alpha_s) + \epsilon_s \cdot R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} \quad (1)$
Allen et al. (1998) EWRI-ASCE (2005)	$R_n = R_{s\downarrow} \cdot (1 - \alpha_s) - \sigma \cdot \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] \cdot (a_1 - b_1 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(a_c \cdot \frac{R_{s\downarrow}}{R_{so}} - b_c \right) \quad (2)$

Donde $R_{s\downarrow}$: Radiación de onda corta, α_s : Albedo de la superficie (adimensional), $R_{l\downarrow}$: Radiación de onda larga entrante (o radiación atmosférica), ϵ_s : Emisividad de la superficie, $R_{l\uparrow}$: Radiación de onda larga saliente, σ : Constante de Stefan Boltzmann ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), T_{\max} : Temperatura máxima ($^{\circ}\text{K}$), T_{\min} : Temperatura mínima ($^{\circ}\text{K}$), e_a : Presión real de vapor de agua (KPa), a_1 , b_1 , a_c y b_c : Coeficientes ajustados a condiciones locales, $R_{s\downarrow}/R_{so}$: Radiación relativa de onda corta, donde R_{so} es la radiación solar de un día despejado estimada a partir de $R_{so} = (0.75 + 2.10 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a$ (z : elevación sobre el nivel de mar [m], R_a : Radiación extraterrestre). Para más detalles de los procedimientos pueden consultarse los trabajos de Allen et al. (1998), EWRI-ASCE (2005) y Ocampo y Rivas (2011).

Where $R_{s\downarrow}$: shortwave radiation, α_s : surface albedo (adimensional), $R_{l\downarrow}$: entering longwave radiation, (or atmospheric radiation), ϵ_s : emissivity from the surface, $R_{l\uparrow}$: exiting longwave radiation, σ : Stefan Boltzmann constant ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), T_{\max} : maximum temperature ($^{\circ}\text{K}$), T_{\min} : minimum temperature ($^{\circ}\text{K}$), e_a : real water vapor pressure (KPa), a_1 , b_1 , a_c and b_c : coefficients adjusted to local conditions, $R_{s\downarrow}/R_{so}$: relative shortwave radiation, where R_{so} is solar radiation on a clear day estimated from $R_{so} = (0.75 + 2.10 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a$ (z : elevation above sea level [m], R_a : extraterrestrial radiation). For more details on the procedures, consult the work of Allen et al. (1998), EWRI-ASCE (2005) and Ocampo and Rivas (2011).

próximos años). Como alternativa, la comunidad científica ha aplicado modelos de estimación que involucran información meteorológica. De los diferentes modelos de estimación existentes, dos son de aplicación generalizada, los cuales se muestran en el Cuadro 1.

La ecuación de Brutsaert (2010) considera tres de los cuatro componentes del balance de radiación, e indirectamente el cuarto a partir de los valores de albedo. Las limitaciones de aplicación se centran en la disponibilidad de medidas de radiación de onda larga. Por otro lado, Rn FAO 56 PM (ecuación 2) conforma un método de estimación de la Rn, que ha sido utilizado ampliamente y recomendado para la obtención de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) (Irmak, Irmak, Jones, Howell & Jacobs, 2003). Los procedimientos para la aplicación del método se describen en el manual 56 de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Allen et al., 1998; Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers [EWRI-ASCE], 2005). El método requiere para su aplicación no sólo de un conjunto de datos meteorológicos sino también del empleo de ecuaciones *ad hoc*, para estimar parámetros como la presión real del vapor de agua (e_a) y la radiación solar de un día despejado (R_{so}).

Ante las dificultades para disponer de medidas de la Rn y las limitaciones encontradas al aplicar métodos de estimación (Cuadro 1), es posible derivar ecuaciones de estimación a partir de información meteorológica mínima de fácil acceso. En este sentido, los MRLM pueden aplicarse a partir de datos meteorológicos (Kjaersgaard et al., 2009). Irmak et al. (2003) desarrollaron dos ecuaciones de estimación de la Rn para regiones húmedas y áridas del sudeste de Estados Unidos. La primera considera la temperatura máxima y mínima, la radiación solar medida y el inverso de la distancia relativa tierra-sol o factor de excentricidad como variables de entrada. La segunda, en cambio, parte de datos de humedad relativa, temperatura máxima y mínima del aire, y radiación solar estimada a partir de la radiación extraterrestre (R_a). Los autores utilizaron un MRLM para la obtención de las ecuaciones.

Considerando lo expresado en los párrafos anteriores, los objetivos de estudio fueron a) derivar ecuaciones de estimación de la Rn para una zona de clima subhúmedo-húmedo de la Pampa Argentina, a partir de registros típicos de estaciones meteorológicas, b) comparar los valores de la Rn estimada con los observados desde un radiómetro neto Kipp & Zonen, c) clasificar las ecuaciones a partir de índices estadísticos y, por último, d) incorporar la Rn estimada, a partir del método Rn FAO 56 PM, como método de comparación de las ecuaciones. Éste permite estimar la Rn con bajo error y puede aplicarse a un gran número de localidades donde sólo se mide la R_{s1} . El método está incluido en el manual 56 de la FAO (Allen et al., 1998) como uno de los procedimientos requeridos para la estimación de la ET, siendo válido para regiones de clima húmedo y árido.

meteorological information. Of the different estimation models existing, two are of generalized application and are shown in Table 1.

The Brutsaert (2010) equation considers three of the four components of radiation balance. The fourth is included indirectly using albedo values. Application is limited by the availability of longwave radiation measurements. Moreover, Rn FAO 56 PM (equation 2) is a method for estimating Rn that has been widely used and recommended to determine evapotranspiration of the reference crop (ET_0) (Irmak, Irmak, Jones, Howell & Jacobs, 2003). Procedures for application of the method are described in manual 56 of the United Nations Food and Agriculture Organization (Allen et al., 1998; Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers [EWRI-ASCE], 2005). For its application, the method requires not only a set of meteorological data but also the use of *ad hoc* equations, to estimate parameters such as real water vapor pressure (e_a) and solar radiation on an uncloudy day (R_{so}).

In the face of the difficulties in obtaining Rn measurements and of the limitations in applying estimation methods (Table 1), it is possible to derive estimation equation from minimum, easily accessed meteorological information. In this sense, MRLM can be applied using meteorological data (Kjaersgaard et al., 2009). Irmak et al. (2003) developed two Rn estimation equations for humid and arid regions of southeastern United States. The first considers maximum and minimum temperature, measured solar radiation and the inverse of the relative distance earth-sun, or factor of excentricity, as input variables. The second, in contrast, parts from data on relative humidity, maximum and minimum air temperature, and solar radiation estimated from extra-terrestrial radiation (R_a). The authors used MRLM to obtain the equations.

Considering the above, the objectives of this study were a) to derive Rn estimation equations for a region with subhumid-humid climate in the Argentine Pampa using typical registers from meteorological stations, b) compare estimated Rn values with those observed from a Kipp & Zonen net radiometer; c) classify the equations from statistical indexes; and finally, d) incorporate the Rn estimated with the Rn FAO 56 PM method to compare the equations. This allows estimation of Rn with a small error and it can be applied to a large number of localities where only R_{s1} is measured. The method is included in FAO Manual 56 (Allen et al., 1998) as one of the procedures required to estimate ET, valid for humid and arid climate regions.

MATERIALS AND METHODS

Study area and experimental data

In this study local measurements registered by an energy balance station (BE) located in the subhumid-humid region of the Argentine Pampa (Tandil, Buenos Aires, Argentina:

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y datos experimentales

En el presente estudio se procesaron y analizaron medidas locales registradas por una estación de balance de energía (BE) ubicada en una zona subhúmeda-húmeda de la Pampa Argentina (Tandil, Buenos Aires, Argentina: 37° 14' S y 59° 15' O, 175 m), con precipitación promedio anual de 912 mm (Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, periodo 2000-2010). La estación de BE fue instalada sobre diferentes cubiertas de cultivo (avena, pastura, soya) durante el periodo 2006-2010. El albedo promedio de estas superficies varió entre 0.18 y 0.24 (más detalles sobre los equipos consultar Carmona, Rivas, Ocampo, Schirmbeck, & Holzman, 2011). La estación está formada por un registrador de datos CR10X (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) con intervalos de lectura cada 15 min, un radiómetro neto CNR1 (Kipp & Zonen, Inc., Logan, Utah, USA), un sensor CS215 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) para registrar la temperatura y humedad relativa del aire con una precisión de $\pm 4\%$, y otros sensores que no se utilizaron en este estudio. El radiómetro neto CNR1 está constituido por dos piranómetros CM3, uno que registra la radiación entrante a la superficie ($R_{s\downarrow}$) y el otro que mide la radiación reflejada por la superficie ($R_{s\uparrow}$), de rango espectral 0.305-2.8 μm ; y dos pirgeómetros CG3up, uno que registra la radiación emitida por la atmósfera ($R_{1\uparrow}$) y el otro que mide la radiación emitida por la superficie ($R_{1\downarrow}$), de rango espectral 5-50 μm , pudiéndose medir la R_n diaria con una precisión de $\pm 10\%$. Fritschen y Fritschen (2005) mencionan que el 95 % de la señal recibida por un radiómetro es representativa para un área circular con diámetro de nueve veces la altura a la cual el instrumento se encuentra instalado (generalmente 1.5 m). Para la aplicación del MRLM, se utilizaron datos diarios del periodo comprendido entre el 5 de febrero de 2008 y el 30 de abril de 2009 ($n = 364$), y para la validación de las ecuaciones de estimación de la R_n , desde el 1 de mayo de 2009 hasta el 5 de abril de 2010 ($n = 199$).

Modelo de Regresión Lineal Múltiple (MRLM)

La selección de las variables a incorporar en el MRLM se hizo con base en dos criterios. Por un lado, las variables implicadas en las ecuaciones del Cuadro 1 se consideraron independientes, y por otro, se tomó en cuenta la disponibilidad de la información que generalmente presentan las estaciones meteorológicas (sean convencionales, agrometeorológicas o automáticas) instaladas en la Pampa Argentina. Éstas no presentan sensores de radiación neta, y en casos excepcionales la $R_{s\downarrow}$ es registrada. En resumen, considerando estos criterios, las variables seleccionadas fueron temperaturas media, máxima y mínima ($T_a, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$), humedad relativa del aire (HR) y radiación solar. También se tomó en cuenta el parámetro del inverso de la distancia relativa tierra-sol (dr) o factor de excentricidad, calculado a partir de la siguiente ecuación, donde DJ es el número de día juliano (Irmak et al., 2003):

37° 14' S and 59° 15' W, 175 m), with average annual precipitation of 912 mm (Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, period 2000-2010). The BE station was installed over different crop covers (oats, grass, soybeans) during the period 2006-2010. Average albedo of these surfaces varied between 0.18 and 0.24 (for more details on equipment, consult Carmona, Rivas, Ocampo, Schirmbeck, & Holzman, 2011). The station comprises a CR10X data recorder (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) with reading intervals of 15 min, a CNR1 net radiometer (Kipp & Zonen, Inc., Logan, Utah, USA), a CS215 sensor (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) to record air temperature and relative humidity with a precision of $\pm 4\%$, as well as other sensors that were not used in this study. The CNR1 net radiometer is composed of two CM3 pyranometers, one that records radiation incoming the surface ($R_{s\downarrow}$) and another that measures radiation reflected from the surface ($R_{s\uparrow}$), with a spectral range of 0.305-2.8 μm ; there are two CG3up pyrgeometers, one that records radiation emitted by the atmosphere ($R_{1\uparrow}$) and another that measures radiation emitted by the surface ($R_{1\downarrow}$), with a spectral range of 5-50 μm , thus, it was possible to measure daily R_n with a precision of $\pm 10\%$. Fritschen and Fritschen (2005) mention that 95 % of the signal received by a radiometer is representative for a circular area with a diameter nine times the height at which the instrument is installed (generally 1.5 m). For application of MRLM, daily data comprehended dates between February 5, 2008, and April 30, 2009 ($n = 364$) and, to validate the R_n estimation equations, from May 1, 2009, to April 5, 2010 ($n = 199$).

Multiple Linear Regression Model (MRLM)

Selection of the variables to be incorporated into the MRLM was based on two criteria. First, the variables implicated in the equations of Table 1 were considered independent, and second, we took into account the availability of the information generally collected in the meteorological stations (whether conventional, agrometeorological or automatic) installed in the Argentine Pampa. These stations do not have net radiation sensors, and in exceptional cases, $R_{s\downarrow}$ is recorded. In summary, considering these criteria, the selected variables were mean, maximum and minimum temperatures ($T_a, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$), air relative humidity (RH) and solar radiation. Also, the inverse of the relative distance earth-sun (dr) parameter, or factor of excentricity, was taken into account; this was calculated from the following equation, where DJ is the number of Julian day (Irmak et al., 2003):

$$dr = 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi}{365} * DJ$$

An MRLM was applied that would establish a relationship between a set of independent variables X_1, X_2, \dots, X_n and a dependent variable Y. The MRLM is represented by the following general expression (Salinas & Silva, 2007):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n + e$$

$$dr = 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi}{365} * DJ$$

Se aplicó un MRLM que permite establecer relación entre un conjunto de variables independientes X_1, X_2, \dots, X_n y una variable dependiente Y . El MRLM está representado por la siguiente expresión general (Salinas & Silva, 2007):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n + e$$

Donde:

Y = Rn estimada (variable dependiente)

X_1 = Variables independientes ($R_{s\downarrow}, T_a, T_{\max}, T_{\min}, HR$ y dr)

β_1 = Coeficientes obtenidos siguiendo el criterio de mínimos cuadrados

e = Error típico generado en la predicción de Y

El tipo de modelo aplicado fue predictivo ya que se esperaba, a partir del MRLM, estimar el valor de Y una vez conocidos los valores de X_i . Se partió de un modelo que incorpora la mayor cantidad de variables de entrada hasta llegar a una mínima cantidad, cubriendo las diferentes posibilidades de disponibilidad de datos de cada lugar. Aplicado el MRLM, se obtiene un resumen estadístico para cada ecuación de estimación de la Rn. Dicho resumen considera el coeficiente de determinación múltiple (R^2) y el error típico, siendo este último necesario para cuantificar el error en el pronóstico del valor de Y para cada valor de X .

Análisis de los datos

El funcionamiento de las ecuaciones se evaluó mediante la comparación de los flujos de la Rn observada desde el radiómetro neto CNR1, con los de la Rn estimada. La comparación se analizó en función de gráficos de dispersión de ambas Rn. Además del valor de la pendiente b y de R^2 , se utilizaron la desviación media del error (Mean Bias Error, MBE) y la raíz del cuadrado medio del error (Root Mean Squared Error, RMSE) que permitieron la comparación de los flujos (Willmott, 1982). Del análisis estadístico, se determinó una clasificación de las ecuaciones para conocer en detalle cuáles logran el mejor ajuste y el menor error en la estimación de la Rn. Finalmente, se añade al análisis la comparación de los valores de la Rn estimada a partir de las ecuaciones, con la obtenida a partir del método Rn FAO 56 PM (ecuación 2). Este método permite estimar la Rn con mínimos errores y puede aplicarse a un gran número de localidades donde sólo se mide la radiación solar (Jensen et al., 1990). Los coeficientes utilizados en la ecuación 2 fueron $a_1 = 0.34$ y $b_1 = -0.14$, representativos para condiciones atmosféricas medias, y $a_c = 1$ y $b_c = 0$, correspondientes a coeficientes de ajuste para zonas húmedas (Jensen et al., 1990). El ajuste de estos coeficientes, para la zona en análisis, proporcionó los mismos valores que los ajustados por Jensen et al. (1990) y Kjaersgaard et al. (2009) para el conjunto de datos utilizados en el trabajo.

Where:

Y = Estimated Rn (dependent variable)

X_1 = Independent variables ($R_{s\downarrow}, T_a, T_{\max}, T_{\min}, HR$ and dr)

β_1 = Coefficients obtained following the minimum squares criterion

e = Typical error generated in the prediction of Y

The type of model applied was predictive; it was expected that, from the MRLM, the value of Y would be estimated once the X_i values were known. We parted from a model that incorporates the highest possible number of input variables until reaching a minimum number, covering the different possibilities of data availability from each site. When MRLM is applied, a statistical summary is obtained for each Rn estimation equation. This summary considers the coefficient of multiple determination (R^2) and the typical error, which is necessary to quantify the error in the prognostic of the Y value for each X value.

Data analysis

How well the equation functioned was assessed by comparing the Rn flows observed from the net radiometer CNR1 with those of estimated Rn. The comparison was analyzed in function of dispersion graphs of both Rn. Besides the values of the b slope and R^2 , the Mean Bias Error (MBE), the mean deviation of the error and the Root Mean Squared Error (RMSE) were used, allowing comparison of the flows (Willmott, 1982). From the statistical analysis, a classification of the equations was carried out to identify in detail which of them achieved the best fit and the smallest error in Rn estimation. Finally, the comparison of the Rn values estimated by the equations with those obtained by the Rn FAO 56 PM (equation 2) method is added to the analysis. This method allowed estimation of Rn with minimal errors and it can be applied to a large number of localities where only solar radiation is measured (Jensen et al., 1990). The coefficients used in equation 2 were $a_1 = 0.34$ and $b_1 = -0.14$, representative for mean atmospheric conditions, and $a_c = 1$ and $b_c = 0$, corresponding to coefficients fit for humid zones (Jensen et al., 1990). The fit of these coefficients for the zone under study provided the same values as those fit by Jensen et al. (1990) and Kjaersgaard et al. (2009) for the set of data used in this study.

RESULTS AND DISCUSSION

Net radiation estimation equations

Analysis of MRLM between the dependent variable and the independent variables derived eight Rn estimation equations (Rn_1 - Rn_8). In each equation the interception values and the coefficients determined according to the minimum squares criterion are described. Equations Rn_1 to Rn_4 considered T_{\max}, T_{\min} and $R_{s\downarrow}$ as common input variables, while equations Rn_5 to Rn_8 considered T_a and

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuaciones de estimación de la radiación neta

El análisis del MRLM entre la variable dependiente y las variables independientes derivó en ocho ecuaciones (Rn₁-Rn₈) de estimación de la Rn. En cada ecuación se describen los valores de la intercepción y los coeficientes determinados según el criterio de mínimos cuadrados. Las ecuaciones Rn₁ a Rn₄ consideraron la T_{max}, T_{min} y la R_{s↓} como variables de entrada comunes. En cambio, las ecuaciones Rn₅ a Rn₈ consideraron la T_a y R_{s↓} (Cuadro 2). Las ecuaciones mostraron un R² entre 0.85 y 0.93 y un error típico entre 14 y 20 W·m⁻². Particularmente, las ecuaciones Rn₁, Rn₂, Rn₅ y Rn₆ presentaron un R² entre 0.92-0.93 y un bajo error en la estimación entre 14-15 W·m⁻² (Cuadro 2). En cada MRLM, los β_i fueron estadísticamente significativos (P < 0.05).

Comparación entre la radiación neta observada y estimada

El Cuadro 3 muestra los datos de entrada de las ecuaciones de regresión lineal múltiple, los parámetros de la función de ajuste y los estadísticos calculados.

R_{s↓} (Table 2). The equations showed an R² between 0.85 and 0.93 and a typical error between 14 and 20 W·m⁻². Particularly, equations Rn₁, Rn₂, Rn₅ and Rn₆ had an R² between 0.92-0.93 and a small error in the estimation between 14 and 15 W·m⁻² (Table 2). In each MRLM, the β_i is statistically significant (P < 0.05).

Comparison of observed and estimated net radiation

Table 3 shows the input data of the multiple linear regression equations, the parameters of the fit function and the calculated statistics.

Also in Table 3, the classification of the equations in function of RMSE and R² can be observed. The Rn₁ model, which had the best fit, corresponds to that which requires the maximum quantity of variables (RMSE: 18 W·m⁻²). However, it should be pointed out that models Rn₅ and Rn₆, which require fewer input variables, have results similar to those of Rn₁ (RMSE: 18 and 19 W·m⁻²). The equations that had the poorest performance are those that did not consider RH. It is observed that most of the models do not exhibit a defined trend (MBE < 13 W·m⁻²). One detail to consider is that, if

CUADRO 2. Coeficientes β_i para cada variable y resumen estadístico de cada modelo de regresión.

TABLE 2. β_i coefficients for each variable and statistical summary for each regression model.

Ecuación / Equation	Rn ₁	Rn ₂	Rn ₃	Rn ₄	Rn ₅	Rn ₆	Rn ₇	Rn ₈
β ₀	-458.25	-126.96	-577.78	-28.01	-512.38	-148.28	-851.16	-46.16
β _{Tmax}	-0.71	0.66	-2.33	-2.45	..	..	..	..
β _{Tmin}	1.29	1.87	3.03	4.25	..	..	..	..
β _{Ta}	..	..	..	..	0.41	1.12	-0.04	1.57
β _{HR}	0.97	1.04	..	..	1.08	1.21	..	..
β _{dr}	353.45	..	574.00	..	394.15	..	846.30	..
β _{R_{s↓}}	0.60	0.65	0.52	0.59	0.58	0.64	0.43	0.51
R ²	0.93	0.92	0.90	0.89	0.93	0.92	0.88	0.85
Error típico / Standard error	14	14	17	18	14	15	18	20

.. Variable no considerada en la ecuación de radiación.

.. Variable not considered in the radiation equation.

CUADRO 3. Pendiente, coeficiente de determinación y estadísticos de los valores de la radiación neta (Rn) observada y estimada.

TABLE 3. Slope, coefficient of determination and statistics of the net radiation (Rn) values observed and estimated.

Ecuación / Equation	Datos de entrada / Input data	b	R ²	MBE (W·m ⁻²)	RMSE (W·m ⁻²)	Clasificación / Classification
Rn ₁	T _{max} , T _{min} , HR, dr, R _{s↓}	0.88	0.95	2	18	1
Rn ₂	T _{max} , T _{min} , HR, R _{s↓}	0.87	0.94	6	20	4
Rn ₃	T _{max} , T _{min} , dr, R _{s↓}	0.84	0.92	7	24	5
Rn ₄	T _{max} , T _{min} , R _s	0.83	0.91	10	26	7
Rn ₅	T _a , Hr, dr, R _{s↓}	0.87	0.95	2	18	2
Rn ₆	T _a , HR, R _{s↓}	0.88	0.95	3	19	3
Rn ₇	T _a , dr, R _{s↓}	0.81	0.92	8	25	6
Rn ₈	T _a , R _{s↓}	0.79	0.91	13	28	8
Rn FAO 56 PM	T _{max} , T _{min} , R _s , e _a , α _s	0.86	0.92	38	45	9

Además, en el Cuadro 3 se observa la clasificación de las ecuaciones en función de la RMSE y el R^2 . El modelo Rn_1 , que fue el que mejor ajustó, corresponde al que requiere la máxima cantidad de variables (RMSE: $18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Sin embargo, hay que destacar que los modelos Rn_5 y Rn_6 , que requieren menor cantidad de variables de entrada, presentan resultados semejantes al Rn_1 (RMSE: 18 y $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Las ecuaciones que peor funcionaron corresponden a aquellas que no tomaron en cuenta la HR. Se observa que la mayor parte de los modelos no muestran tendencia definida ($MBE < 13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Un detalle a considerar es que si los valores de Rn son convertidos a valores de evaporación equivalente, el error en la estimación es menor de $0.7 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ para las ecuaciones Rn_1 a Rn_6 , y para la Rn_8 , es de $1 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$.

La Figura 1 muestra la dispersión de los datos de los valores observados y estimados para cada MRLM junto a la recta de ajuste (cruces). Además, en cada dispersión se agregó el resultado de la aplicación del modelo de Rn FAO 56 PM (ecuación 2) con su respectiva función de ajuste (círculos). Para el conjunto de datos analizados, la ecuación 2 (Rn FAO 56 PM) muestra una MBE de $38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y RMSE de $45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (error equivalente a $1.5 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$). En general, se denota que en todos los casos los MRLM arrojan mejores resultados que el modelo Rn FAO 56 PM.

Los MRLM presentan una sobrestimación para valores de Rn bajos y una subestimación para valores elevados, manteniendo dicho comportamiento en el conjunto de las ecuaciones. La ecuación de Rn FAO 56 PM subestima la Rn tanto para valores bajos como altos; sin embargo, presenta un error sistemático que podría eliminarse con la aplicación de coeficientes. Con respecto al funcionamiento de las ecuaciones, Irmak et al. (2003) encontraron resultados similares a partir de una ecuación de MRLM que requiere, para su aplicación, de la $R_{s\downarrow}$ medida. Estos autores demostraron que las predicciones de la Rn con $R_{s\downarrow}$ medida fueron tan buenas o mejores con relación al método Rn FAO 56 PM, en la mayoría de los casos estudiados en zonas áridas y húmedas del sudeste de Estados Unidos. De las ocho ecuaciones desarrolladas, las de mejor ajuste y menor error en la estimación son las ecuaciones Rn_1 , Rn_5 y Rn_6 (Cuadro 3), las cuales presentan variables de entrada que generalmente se toman en cuenta en los modelos de estimación de la Rn (Ortega-Farías, Antonioletti, & Oliosio, 2000).

Teniendo en cuenta la baja RMSE de las ecuaciones, es posible observar que el modelo Rn_6 es preciso y se convierte en una buena alternativa de aplicación para el área de influencia y para zonas con condiciones climáticas similares a las del estudio, en coberturas vegetales con albedos entre 0.18 y 0.24. Además, la ecuación destaca porque requiere menor cantidad de datos de entrada con relación al método propuesto por Allen et al. (1998). Por otro lado, al realizarse el ajuste lineal múltiple, los coeficientes tienen intrínsecamente contenidos los efectos de la dr , y por lo tanto su incorporación como dato de entrada no es relevante.

the Rn values are converted to equivalent evaporation values, the error in the estimation is less than $0.7 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ for equations Rn_1 to Rn_6 , and for Rn_8 , it is $1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$.

Figure 1 shows the dispersion of the data of observed and estimated values for each MRLM next to the adjustment line (crosses). Also, in each dispersion the result of the application of the Rn FAO 56 PM model (equation 2) was added to its respective fit function (circles). For the set of data analyzed, equation 2 (Rn FAO 56 PM) shows an MBE of $38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ and RMSE of $45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (error equivalent to $1.5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$). In general, in all cases MRLM yields better results than the Rn FAO 56 PM model.

MRLM overestimates low Rn values and underestimates high values; this behavior is maintained throughout the set of equations. Equation Rn FAO 56 PM underestimates Rn at both low and high values; the error, however, is systematic and can be eliminated by applying coefficients. Regarding the functioning of the equations, Irmak et al. (2003) found similar results with an MRLM equation that requires measured $R_{s\downarrow}$ for its application. These authors demonstrated that Rn predictions with measured $R_{s\downarrow}$ were as good as or better than the Rn FAO 56 PM method in most of the cases studied in arid and humid zones in southeastern United States. Of the eight equations developed, those with better fit and smaller error in the estimation are equations Rn_1 , Rn_5 and Rn_6 (Table 3), which have input variables that are generally taken into account in Rn estimation models (Ortega-Farías, Antonioletti, & Oliosio, 2000).

Keeping in mind the low RMSE of the equations, it is possible to observe that the Rn_6 model is precise, making it a good option for application in zones that have climate conditions similar to those of the study area and vegetation cover with albedos between 0.18 and 0.24. Furthermore, the equation stands out because it requires fewer entry data than the method proposed by Allen et al. (1998). Also, when the multiple linear fit is performed, the coefficients contain, intrinsically, the effects of dr , and therefore, its incorporation as an input datum is not relevant.

CONCLUSIONS

This study confirms that multiple linear regression models are an option for estimating net radiation. Estimation was best with the models that consider air temperature and relative humidity, solar radiation and the inverse of the relative distance earth-sun or factor of excentricity, obtaining RMSE values below $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. However, if the eight models are compared with the Rn FAO 56 PM model, it is concluded that all yield better results (in MBE and RMSE) and constitute an alternative for improving precision in the estimation of evapotranspiration. Improvement in the estimation of net radiation is achieved because the regression models considered introduce the local effect of cloud cover (parting from solar radiation) and the emission of the atmosphere (by effect of air humidity).

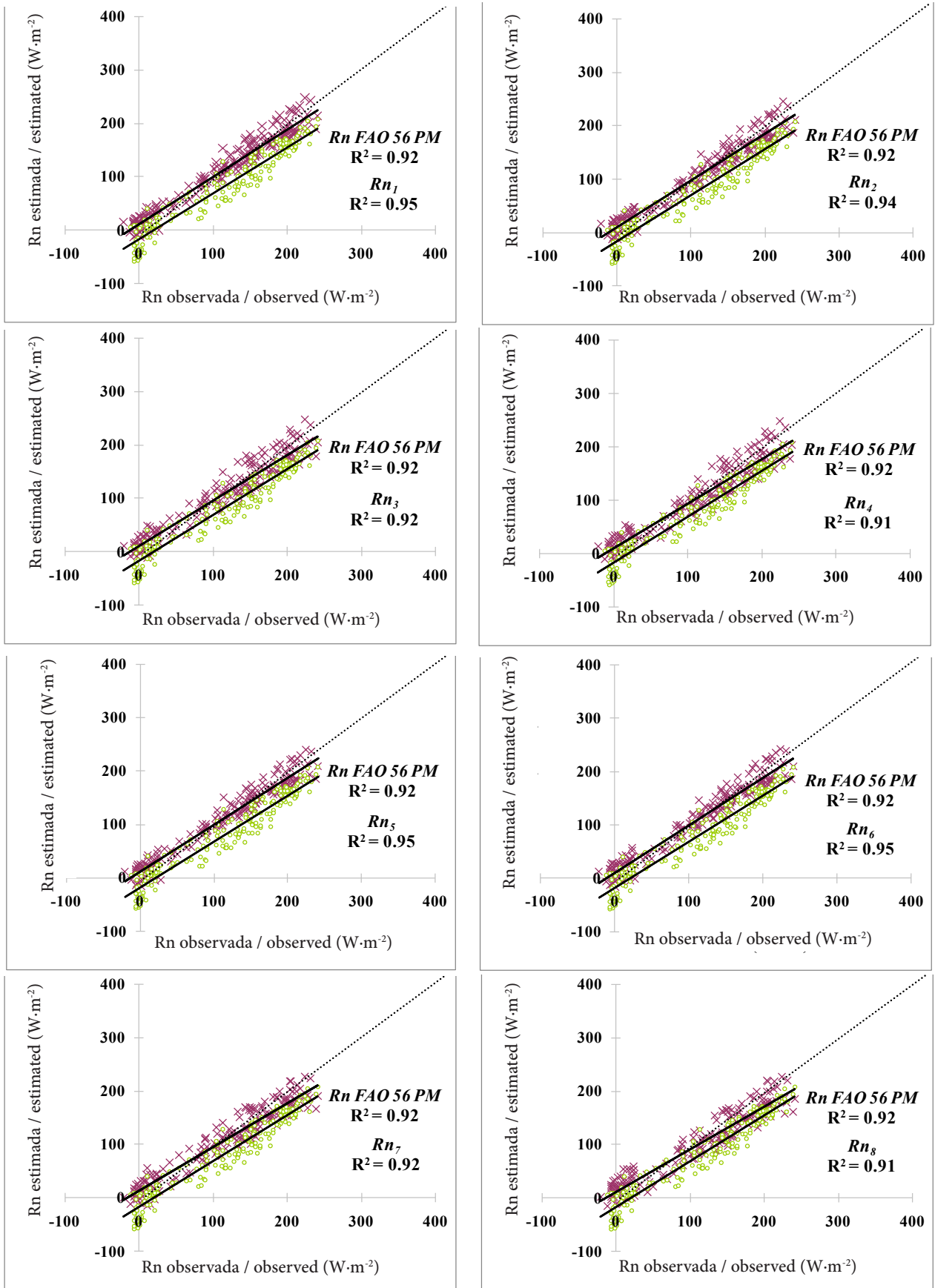


FIGURA 1. Comparación entre la radiación neta (Rn) observada y la Rn estimada a partir de las ecuaciones (Rn₁ a Rn₈) y el método Rn FAO 56 PM (línea continua recta de regresión, línea punteada recta 1:1, Rn₁ a Rn₈ (x), Rn FAO 56 PM (o).

FIGURE 1. Comparison of observed net radiation (Rn) and Rn estimated from the equations (Rn₁ to Rn₈) and the method Rn FAO 56 PM (straight continuous regression line, straight dotted line 1:1, Rn₁ to Rn₈ (x), Rn FAO 56 PM (o).

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se confirma que los modelos de regresión lineal múltiple son una alternativa para estimar la radiación neta. La estimación de ésta fue mejor con los modelos que consideran la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar y el inverso de la distancia relativa tierra-sol o factor de excentricidad, obteniendo valores de RMSE inferiores a $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Sin embargo, si se comparan los ocho modelos con el de Rn FAO 56 PM, se concluye que todos arrojan mejores resultados (en MBE y RMSE) y conforman una alternativa para mejorar la precisión de la estimación de la evapotranspiración. La mejora en la estimación de la radiación neta se logra dado que los modelos de regresión considerados introducen los efectos locales de cobertura de nubes (a partir de la radiación solar) y la emisión de la atmósfera (por efecto de la humedad del aire).

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, Argentina, por los fondos otorgados para desarrollar esta investigación (Beca de perfeccionamiento Resolución Núm. 1360/2012).

REFERENCIAS

- Alados, I., Foyo-Moreno, I., Olmo, F. J., & Alados-Arboledas, L. (2003). Relationship between net radiation and solar radiation for semi-arid shrub-land. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116, 221–227. doi: 10.1016/S0168-1923(03)00038-8
- 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*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Obtenido de: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
- Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers (EWRI-ASCE). (2005). *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the task committee on standardization of reference evapotranspiration*. Virginia, USA: Autor. Obtenido de <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/asceewri/ascestzdetmain2005.pdf>
- Brutsaert, W. (2010). *Evaporation into the atmosphere. Theory, history and applications* (1a ed.). Dordrecht, Holland: Reidel Publishing Company.
- Carmona, F., Rivas, R., Ocampo, D., Schirmbeck, J., & Holzman, M.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, Argentina, for funding this study (Grant resolution number 1360/2012).

End of English Version

- (2011). Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas. *Revista Aqua-LAC*, 3(1), 26–36. Obtenido de: <http://www.unesco.org.uy>
- Fritschen, L. J., & Fritschen, C. L. (2005). Bowen ratio energy balance method. In Hatfield, J. L., & Baker, J. M. (Eds.), *Micrometeorology in agricultural systems* (pp. 397–405). Madison, USA: American Society of Agronomie.
- Irmak, S., Irmak, A., Jones, J. W., Howell, T. A., & Jacobs, J. M. (2003). Predicting daily net radiation using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(4), 256–269. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements. Manual and reports on engineering practices N° 70*. New York, USA: American Society of Civil Engineers.
- Kjaersgaard, J. H., Cuenca, R. H., Martínez-Cob, A., Gavilán, P., Plauborg, F., Møllerup, M., & Hansen, S. (2009). Comparison of the performance of net radiation calculation models. *Theoretical and Applied Climatology*, 98(1-2), 57–66. doi: 10.1007/s00704-008-009-8
- Ocampo, D., & Rivas, R. (2011). Evaluación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala mensual y anual en Argentina: Aplicación en zonas húmedas y áridas. *Cuadernos del Curigram*, 17, 33–41.
- Ortega-Farías, S., Antonioletti, R., & Olioso, A. (2000). Net radiation model evaluation at hourly time step for mediterranean conditions. *Agronomie*, 20, 157–164. doi: 10.1051/agro:2000116
- Salinas, M. F., & Silva, C. Z. (2007). Modelos de regresión y correlación II. Regresión lineal múltiple. *Ciencia & Trabajo*, 23, 39–41. Obtenido de <http://www.cienciaytrabajo.cl/pdfs/23/pagina%2039.pdf>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1369. Obtenido de <http://climate.geog.udel.edu>