

# Radiación solar: métodos de regresión para datos del 2010-2013 en Buenos Aires

## Solar radiation: regression methods for data period 2010-2013 in Buenos Aires

M.B. Lavorato <sup>(a,b,c)</sup>, S. G. Lakkis <sup>(d,e)</sup>, P. O. Canziani <sup>(e,f)</sup>

- a. División Radar Láser, Dto. Láser, CITEDEF, Juan B. La Salle 4397, B1603ALO, Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina.
- b. Grupo TAMA, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, París 680, Haedo, Buenos Aires, Argentina.
- c. Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA).
- d. Facultad de Ciencias Agrarias, Pontificia Universidad Católica Argentina, Cap. Gral. Ramón Freire 183, C1426AVC, Buenos Aires, Argentina.
- e. Unidad de Investigación y Desarrollo de las Ingenierías, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires (UTN-FRBA).
- f. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

e-mail: [mlavorato@citedef.gob.ar](mailto:mlavorato@citedef.gob.ar)

Recibido: 20/11/13; aceptado: 15/05/15

En este trabajo se analizan diferentes modelos empíricos existentes para la estimación de la radiación solar mensual incidente en Buenos Aires, basados en parámetros meteorológicos usualmente medidos como temperatura y horas de sol, para el período comprendido entre 2010-2013. Los datos utilizados para la estimación de los modelos fueron adquiridos por medio del Servicio Meteorológico Nacional en el caso de horas de sol, mientras que la radiación solar ( $\pm 5\%$ ), presión ( $\pm 0.2$  hPa), temperatura ( $\pm 0.2$  °C), dirección y velocidad del viento ( $\pm 0.5$  m/s) así como las precipitaciones ( $\pm 0.5\%$ ) fueron adquiridas directamente de una estación meteorológica automática que opera en la Universidad Católica Argentina. Los resultados, validados por predictores estadísticos, reflejan que las mejores estimaciones para la radiación solar incidente no sólo obedecen modelos dependientes de temperatura, sino también a aquellos que involucran las horas de sol como el propuesto por Angstrom-Prescott, con un coeficiente de correlación estimado del 85%, y al propuesto en base a ecuaciones exponenciales, con una correlación cercana al 90%.

*Palabras clave:* radiación solar mensual, modelos empíricos, predictores estadísticos.

In this paper different existing models for estimating global solar radiation were tested in Buenos Aires using commonly measured meteorological data as temperature and sunshine hours covering the years 2010-2013. The Servicio Meteorológico Nacional provided the sunshine hours data while solar radiation ( $\pm 5\%$ ), atmospheric pressure ( $\pm 0.2$  hPa), temperature ( $\pm 0.2$  °C), the direction and speed of winds ( $\pm 0.5$  m/s) and precipitation ( $\pm 0.5\%$ ) have been regularly measured by the automatic weather station operating at Pontificia Universidad Católica Argentina. The results, analyzed through statistical predictors, show that the best estimation for the incident solar radiation corresponds not only to temperature based models but also to those depending on sunshine hours such as that proposed by Angstrom-Prescott with a correlation coefficient close to 85%, and also to the one proposed with a exponential relationship with almost 90% of correlation.

*Keywords:* monthly solar radiation, empirical models, statistical predictors

## I. INTRODUCCIÓN

La radiación solar es la principal fuente de energía que incide directamente en el balance energético en el sistema Tierra-Atmósfera. Del flujo de energía solar que llega a la Tierra dependen todos los fenómenos físicos, químicos y biológicos así como el clima. Por tanto, el estudio de la radiación solar es de principal interés en diferentes campos de conocimiento que abarcan desde la agronomía, ecología, ambiente, meteorología, hasta el

estudio de modelos de transferencia sol-vegetación-atmósfera, y modelos de circulación general [1],[2].

A pesar de su importancia, los datos de radiación solar son medidos con poca frecuencia si los comparamos con otras variables como la temperatura, la presión o las precipitaciones<sup>[3]</sup>. El análisis de la radiación solar para la región de interés implica obtener mediciones in situ a lo largo del tiempo; sin embargo debido a problemas técnicos o de financiación, es escasa la disponibilidad de estos datos. Varios trabajos en la bibliografía actual destacan la insuficiente información o la falta de completitud en las series espacio-temporales en las diferentes regiones estudiadas<sup>[4],[5],[6]</sup>. Para suplir esta carencia, en la práctica se han implementado diferentes técnicas basadas en la extrapolación de datos de

estaciones cercanas, datos satelitales [7],[8], procesos estocásticos multivariados o modelos empíricos. En este sentido, una de las técnicas más extensamente utilizada se basa en relaciones empíricas entre la radiación solar y diferentes variables meteorológicas comúnmente medidas. Estas variables incluyen horas de sol o duración del día<sup>[9]</sup>, temperatura<sup>[5]</sup>, precipitaciones<sup>[10]</sup>, cobertura nubosa, humedad o combinación lineal de éstas. Sin embargo, la capacidad de estos modelos depende fuertemente de no sólo las variables meteorológicas disponibles en la región a estudiar, sino también de la posibilidad de ser validados frente a mediciones in situ. En este sentido, el presente trabajo pretende evaluar diferentes modelos empíricos existentes para la estimación de la radiación solar incidente a partir de datos de radiación solar registrados durante los años 2010-2013 en Buenos Aires.

## II. MÉTODOS

### Descripción de Modelos

Para el análisis de los modelos empíricos de radiación solar, se utilizaron principalmente dos clases de modelos: los basados en las horas de sol incidente y los basados en datos de temperatura. El modelo empírico basado en cantidad de horas de sol más ampliamente difundido para estimar promedios mensuales de la radiación diaria en una superficie horizontal,  $R_s$  ( $\text{MJ/m}^2$  día) fue desarrollado por Angstrom<sup>[11]</sup> y posteriormente escrito en forma de correlación por Prescott<sup>[12]</sup> según la expresión:

$$\frac{R_s}{Ro} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \quad (1)$$

siendo  $n$  promedio mensual de horas de brillo diaria y  $N$  el promedio mensual de máxima cantidad de horas de sol o largo del día dado por:

$$N = \frac{2}{15}\omega \quad (2)$$

y  $Ro$  es el promedio mensual de la radiación solar diaria extraterrestre ( $\text{MJ/m}^2$  día);  $a$  y  $b$  constantes de regresión. Físicamente “ $a$ ” representa la transmisión total para cielo nublado y “ $b$ ” es el coeficiente de incremento de  $R_s/Ro$  con  $n/N$ . La suma de ambos coeficientes ( $a+b$ ) representa la transmisión atmosférica en condiciones de cielo despejado. La radiación solar extraterrestre en una superficie horizontal, medida en  $\text{MJ/m}^2$  día, se puede calcular a través de la expresión:

$$Ro = G \left[ \cos \varphi \cos \gamma \sin \omega + \frac{\pi \omega}{180} \sin \varphi \sin \gamma \right] \quad (3)$$

donde  $\varphi$  es la latitud de la región a estudiar,  $\gamma$  es el ángulo de declinación solar, ambos medidos en grados,

$G$  es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre y  $\omega$  la hora de salida del sol/puesta del sol en radianes, dados respectivamente por :

$$G = 1 + 0.33 \cos\left(\frac{2\pi dn}{365}\right) \quad (4)$$

y

$$\omega = ar \cos(-\tan \varphi \tan \gamma) \quad (5)$$

siendo  $d_n$ , día del año.

El modelo anteriormente descripto se conoce como el modelo de Angstrom-Prescott (AP), a primer orden. Las correlaciones que corresponden al mismo modelo, pero de orden dos (AP2) y tres (AP3) también se utilizaron en el presente trabajo, según las expresiones:

$$\frac{R_s}{Ro} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{R_s}{Ro} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\left(\frac{n}{N}\right)^2 + d\left(\frac{n}{N}\right)^3 \quad (7)$$

con  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  constantes de regresión propias de cada región de análisis,  $n$  y  $N$  definidas anteriormente.

De los modelos existentes, también fue analizado el propuesto por Hargreaves & Samani<sup>[13]</sup> (HyS) incorporando la temperatura, según la expresión:

$$\frac{R_s}{Ro} = a + b\Delta T^{0.5} \quad (8)$$

siendo  $\Delta T$  la diferencia entre temperatura máxima y mínima,  $a$  y  $b$  coeficientes de regresión.

Finalmente se evaluaron los datos adquiridos y se propuso una correlación propia (P), según la siguiente expresión:

$$\frac{R_s}{Ro} = a \times \exp\left(\left(\frac{n}{N}\right)/b\right) + c \quad (9)$$

Con  $n/N$  relación entre horas de sol y duración del día,  $a$ ,  $b$  y  $c$  coeficientes de regresión.

### Datos

Tanto los valores de irradiancia solar diaria, como los valores de temperatura, presión y humedad recolectados durante el período 2010-2013, fueron extraídos de la estación automática situada a una altura 50 m sobre el nivel del mar, dentro del campus de

Puerto Madero de la Universidad Católica Argentina, Buenos Aires ( $34^{\circ} 36' S$ ,  $58^{\circ} 26' E$ ). La estación funciona con una frecuencia de 0.003 Hz, las 24 horas, grabando datos a intervalos de 5 minutos, dentro del rango de  $1400 \text{ W/m}^2$  para radiación solar, temperatura entre  $(-20, 60) ^{\circ}\text{C}$ , precipitación y velocidad de vientos que varían entre 0 y 300mm/h y 200 km/h respectivamente. Se confeccionó así una base de datos con 302400 observaciones para el período comprendido entre Julio del 2010 y Enero del 2013. Los valores horarios medidos fueron integrados para obtener valores diarios. El control de calidad de los datos fue aplicado considerando criterios tanto estadísticos como físicos; i.e., el valor máximo de la radiación solar incidente en la superficie debe ser inferior al valor de radiación solar incidente y no puede ser un valor elevado para días lluviosos. Los valores de  $R_o$  y  $N$  fueron calculados a partir de las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

Las diferencias obtenidas entre los valores medidos y los estimados a través de los diferentes modelos empíricos usados así como el propio con una relación exponencial dependiente de las horas del sol, se determinaron por medio de los siguientes predictores estadísticos:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (10)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$MPE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n |d_i - d_e|}{\sum_{i=1}^n d_e} \times 100 \right) / n \quad (12)$$

con  $n$  número del par de datos,  $d_i$  es la diferencia entre valor estimado ( $d_e$ ) y medido ( $d_i$ ).

### III. RESULTADOS

Las figuras 1 y 2 muestran el promedio mensual de la radiación solar (global y extraterrestre) medida en  $\text{MJ/m}^2$  día, y el comportamiento de la temperatura media y horas de sol para período de análisis, respectivamente. En ambos casos se puede apreciar un comportamiento periódico a lo largo de los meses tanto de la radiación como de los parámetros meteorológicos monitoreados. En ambos casos se puede apreciar un comportamiento periódico a lo largo de los meses tanto para la radiación como para los parámetros meteorológicos monitoreados. Para evaluar cada modelo empírico existente mencionado arriba, en primer lugar se obtuvieron los valores de radiación solar mensual incidente a partir de las fórmulas (1)-(9) y posteriormente se los comparó con los valores mensuales medidos por la estación meteorológica.

La evaluación del comportamiento de cada modelo empírico se llevó a cabo a partir del coeficiente de

correlación entre valores estimados por cada modelo y valores medidos. Para ello se utilizaron los valores correspondientes a los promedios mensuales para los 39 meses en análisis. Las figuras 3-7 muestran la correlación obtenida por regresión lineal, entre los valores de radiación incidente medidos y los valores de radiación estimada derivados de cada modelo. De los modelos empíricos propuestos, los coeficientes de regresión más altos corresponden a los modelos de AP3 y P, con valores de 0.85 y 0.90 respectivamente. Esto implica por un lado que las estimaciones para la radiación solar incidente derivadas de modelos empíricos dependientes de las horas de sol implican una mejor correlación con los datos observacionales; y por el otro que la relación lineal no es necesariamente la que mejor proporciona en principio la mejor estimación para el comportamiento mensual.

Finalmente la Figura 8 muestra la comparación de todos los modelos testeados con los valores de radiación solar global medidos.

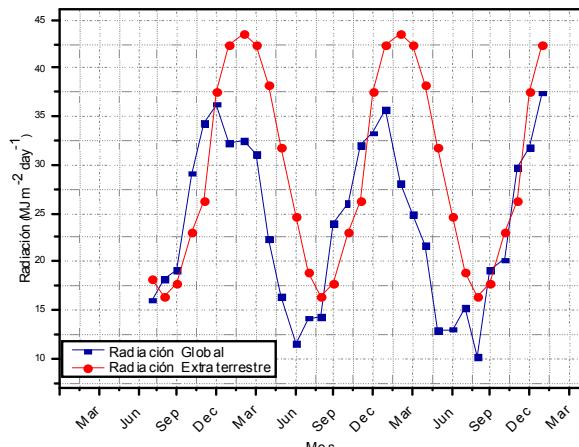


Figura 1: Radiación global y extraterrestre 2010-2013

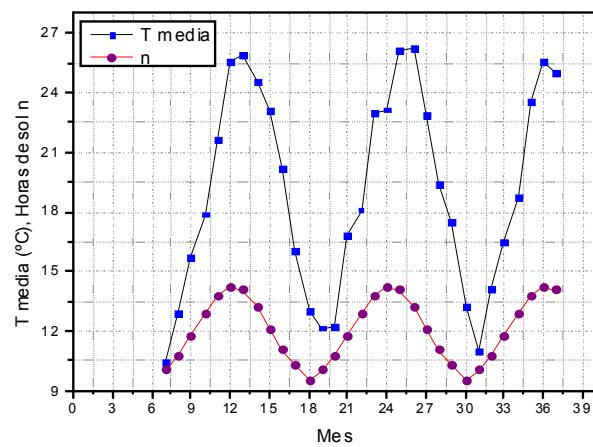


Figura 2: Temperatura media medida y horas de sol 2010-2013.

La evaluación de los métodos empíricos se completó por medio de los predictores estadísticos MPE, MBE y RMSE expresados en las fórmulas (10)-(12). La Tabla 1 muestra los resultados de estos predictores estadísticos así como los valores de las constantes  $a, b, c, d$ , cuando corresponden, de los modelos empíricos expresados

anteriormente. Respecto a la evaluación estadística, cabe señalar que valores negativos de MBE corresponden a

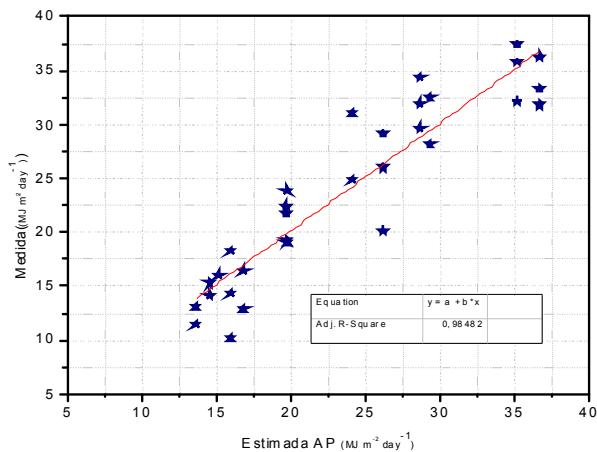


Figura 3: Correlación entre datos de radiación global medida y estimada por el modelo de Angstrom-Prescott, primer orden

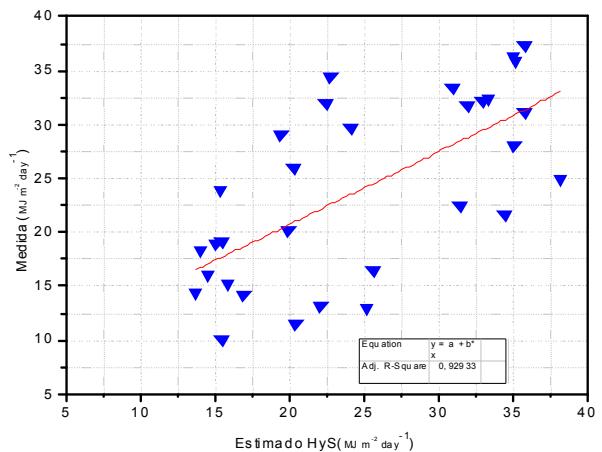


Figura 6: Idem Figura 3, pero para ajuste de Hergreaves & Samani

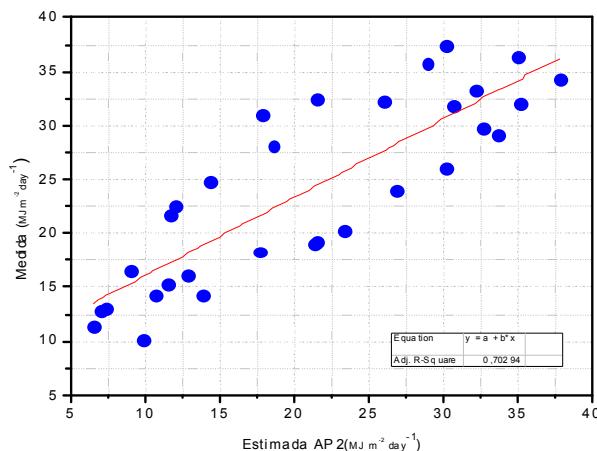


Figura 4: Idem Figura 3, pero para Angstrom-Prescott orden 2.

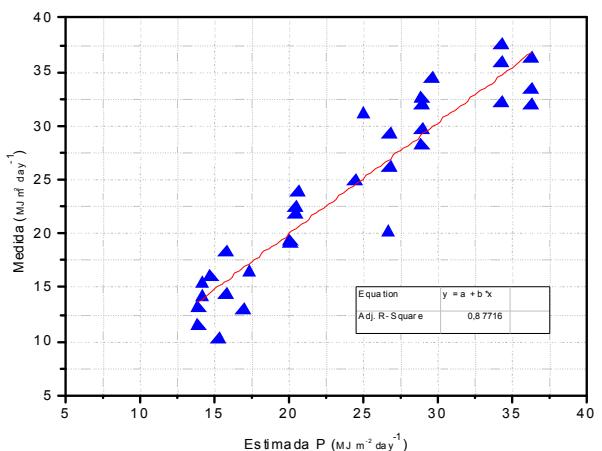


Figura 7: Idem Figura 3, pero para el ajuste Propio.

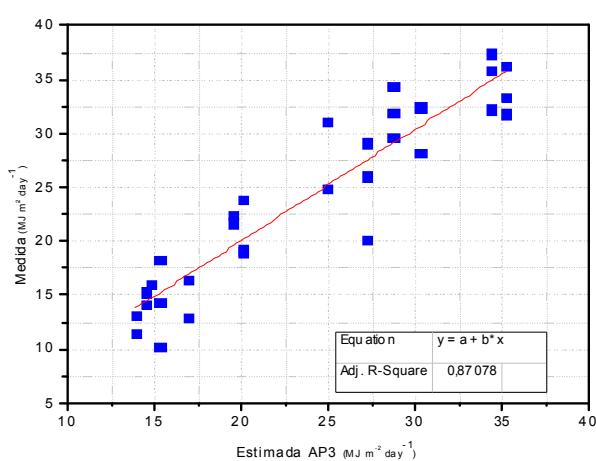


Figura 5: Idem Figura 3, pero para Angstrom-Prescott orden 3.

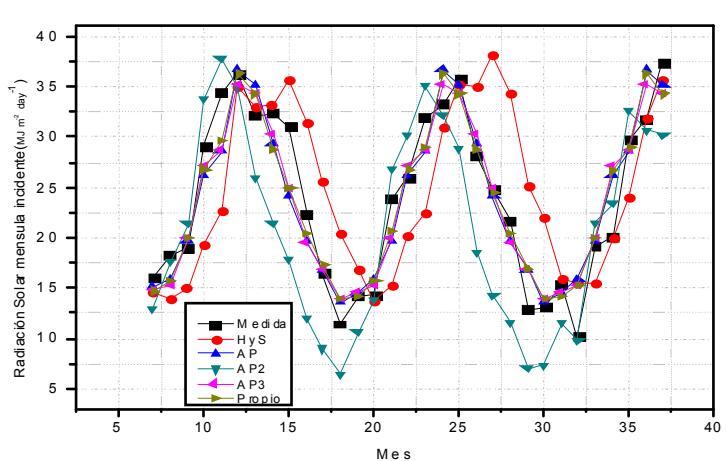


Figura 8: Radiación medida vs modelos empíricos analizados

TABLA 1: COEFICIENTES DE CADA MÉTODO EMPÍRICO Y PREDICTORES ESTADÍSTICOS

	<b>Método</b>	<b>Coeficientes Regresión</b>			<b>MBE</b>	<b>RSME</b>	<b>MPE</b>	<b>R</b>
		<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>			
1	HyS	7.28	0.67		0.8	6.82	-0.20	0.40
2	AP	0.23	0.99		0.2	3.07	-0.35	0.85
3	AP2	0.45	-1.01	1.33		3.09	6.04	-26.00
4	AP3	-18.67	56.33	-55.45	18.58	-0.18	2.94	-0.25
5	Propio	0.20	0.62	-0.25		-0.09	2.97	-0.19
								0.90

una subestimación de la radiación estimada a través de los modelos empíricos propuestos. A su vez, el test RMSE brinda información especialmente relevante para mediciones en períodos relativamente cortos, ya que permite una comparación directa término a término entre valores medidos y estimados. De los resultados de la Tabla 1, es posible inferir que los dos métodos con mejor coeficiente de correlación basados en horas de sol, si bien presentan una leve tendencia a la subestimación, muestran una mejor correlación respecto a los valores medidos.

#### IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se analizan las posibles correlaciones empíricas entre los promedios mensuales de radiación solar global, temperatura, horas de sol/duración del día medidos durante el período 2010-2013. A partir de los coeficientes de regresión y los valores de MBE, RMSE y MPE, se puede concluir que para los 39 meses analizados, los modelos empíricos que mejor ajustan la distribución periódica de la radiación solar medida son aquellos que involucran las horas de sol, tanto sea por medio de expresiones con la variable n a segundo o tercer orden, como el modelo AP3, o por medio de expresiones exponenciales como la mostrada en el ajuste propio P. y que además no sólo satisfacen la regresión lineal respecto a variables meteorológicas como la temperatura, sino que se correlacionan muy bien con Para poder determinar una expresión con un mayor grado de representatividad es necesario el monitoreo de la radiación en períodos más prolongados de tiempo y distribución espacial.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF), a la Pontificia Universidad Católica, Facultad de Ingeniería de la cual depende el PEPACG (UCA – CONICET), Facultad de Ciencias Agrarias, y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET).

#### VI. REFERENCIAS

- 1 –Garrat, J.R. Incoming shortwave fluxes at the surface-A comparison of GCM results observation. *Journal of Climate* 7, 72-80, (1994).
- 2 –Hansen, J.W. Stochastic daily solar irradiance for biological modeling applications. *Agricultural and Forest Meteorology* 94, 53-63, (1999).
- 3 –Lui, D.L., Scott, B.J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperatures observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 106, 41-59, (2001).
- 4 –Muneer, T., Younes, S., Munawwar, S. Discourses on solar radiation modeling. *Renew Sustain Energy Rev.* 11(4), 551-602, (2007).
- 5 –Rivington, M., Bellocchi, G., Matthews, K.B., Buchan, K. Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. *Agricultural and Forest Meteorology* 132, 228-243, (2005).
- 6 –Donatelli, M., Bellocchi, G. Estimates of daily global solar radiation: new developments in the software RadEst3.00. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems*, Florence, Italy. 16–18 July 2001. Inst. for Biometeorology, CNR, Florence, Italy, pp 213–214, (2001).
- 7 –Gupta, S.K., Ritchey, N. A., Wilber, A.C., Whitlock, C.H., Gibson, G.G., Stackhouse, Jr., W.P. A climatology of surface radiation budget derive Fron satellite data. *Journal of Climate* 12, 2691-2710, (1999).
- 8 –Pinker, R. T., Laszo, I., Goodrich, D., Pandithurai, G. Satellite estimates of surface radiative fluxes for extended San Pedro Basin: sensitivity to aerosols. *Agricultural and Forest Meteorology* 105, 43-54, (2000).
- 9 –Chen, R., Lu, S., Kang, E., Yanfg, J., Ji, X., 2006, Estimating daily global radiation using two types of revised models in China. *Energy Convers Manage* 47, 865-878.
- 10 –Hunt, L. A., Kuchar, L., Swanton, C.J., 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 91, 293-300
- 11 –Angstrom, A. Solar and terrestrial radiation, Q J R Meteorol Soc(UK), 50, 121-125, 1924.
- 12 –Prescott, J. A. Evaporation from water surface in relation

- to solar radiation. *Trans R Soc South Aust (Australia)*, 64, 114-125, (1940).
- 13 -Hargreaves, G. & Samani, Z. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrigal Drainage Eng (USA)*, 108, 225-230, (1982).