

Estimación de la radiación solar diaria para modelos ecofisiológicos de rendimientos

Andrés C. Ravelo y Roberto Zanvettor

RESUMEN

Se calibra un modelo de estimación de la radiación solar diaria para las localidades de Córdoba, Río Cuarto, Marcos Juárez, Oliveros, Rafaela y Paraná. El modelo permite lograr estimaciones de radiación a partir de observaciones diarias de temperaturas máximas, mínimas y de precipitación. Los parámetros requeridos por el modelo se calcularon mediante un análisis estadístico de datos meteorológicos de los años 1985 y 1986. Los coeficientes de determinación entre valores observados y estimados de radiación solar diaria para las localidades estudiadas oscilaron entre 0,73 y 0,82 y los errores estandar de estimación fueron inferiores a 83,4 Langleys por día.

Palabras clave: Estimación, radiación solar, modelos ecofisiológicos, rendimientos.

Andrés C. Ravelo, Roberto Zanvettor. 1992. Estimating daily solar radiation for yield simulation models. Agriscientia IX Nº 2 : 79-85.

SUMMARY

A model to estimate daily solar radiation is calibrated for Córdoba, Río Cuarto, Marcos Juárez, Oliveros, Rafaela and Paraná. The model estimates solar radiation using daily maximum and minimum temperatures and rainfall. The model parameters were estimated by statistical analysis of weather data for 1985 and 1986. The determination coefficients between observed and estimated daily solar radiation for the locations considered in the study varied between 0.73 and 0.82 and standard errors of estimates were lower than 83.4 Langleys per day.

Andrés C. Ravelo y Roberto Zanvettor. Fac. Cs. Agropecuarias, UNC, C.C. 509, 5000 Córdoba, Argentina.

INTRODUCCION

La red solarimétrica de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIE) provee observaciones de radiación solar diaria para un conjunto de estaciones distribuidas en todo el país. Sin embargo, existen numerosas localidades en áreas agrícolas carentes de datos de radiación lo cual hace necesaria su estimación

Entre los trabajos que utilizan variables meteorológicas para estimar la radiación solar global, merecen destacarse: Albrecht (1955), da Mota *et al.* (1977), Wernly y Landaburu (1979), Seiler (1980), Cengiz *et al.* (1981) y Grossi Gallegos y Lopardo (1988). Por otro lado, Richardson (1981) propone la estimación de la radiación solar mediante técnicas estadísticas de valores residuales diarios de radiación solar y temperaturas máximas y mínimas. Ravelo y Seiler (1985) desarrollaron un método para la estimación de la radiación solar directa. Frulla *et al.* (1988) comparan estimaciones obtenidas mediante información provista por el satélite GOES y observaciones de radiación mediante solarímetros.

La metodología propuesta en este trabajo está diseñada para formar parte de un sistema operativo de predicción de rendimientos (Ravelo y Robledo, 1989) en el cual se requieren, entre otras variables, datos de radiación solar diaria. Estimaciones logradas por un modelo similar al descrito han sido utilizadas en los modelos ecofisiológicos de rendimientos de trigo (Ravelo *et al.*, 1987), maíz (Hodges and Ravelo, 1985) y maíz (Ravelo y Dardanelli, 1992).

El objetivo de este trabajo es estimar la radiación solar diaria en localidades que sólo poseen datos diarios de temperaturas máximas y mínimas y precipitación.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del modelo:

Este modelo fue programado en lenguaje Fortran y se basa en un proceso estacionario propuesto por Matalas (1967) que supone una distribución normal de los residuos y que la correlación serial de cada variable puede ser descripta por un modelo de autorregresión de primer orden. La expresión del modelo de Matalas es la siguiente:

$$X_{p,i}(j) = A X_{p,i-1}(j) + B e_{p,i}(j) \quad (1)$$

donde: $X_{p,i}(j)$ y $X_{p,i-1}(j)$ son matrices de 3 x 1 de días i y año p cuyos elementos son valores residuales de las variables radiación y temperaturas

$e_{p,i}(j)$ es una matriz de 3 x 1 de una variable al azar de media cero y varianza igual a la unidad.

A y B son matrices de 3 x 3 de los coeficientes de correlación simple y correlación cruzada

La aplicación de la ecuación (1) permite obtener los valores residuales diarios de las tres variables consideradas. La radiación solar y las temperaturas máximas y mínimas diarias son obtenidas al multiplicar los valores residuales por la desviación estandar y sumándoles la media aritmética. En este trabajo solo se considerará la estimación de la radiación solar.

La Figura 1 presenta el diagrama de flujo para la estimación de la radiación solar diaria. La expresión matemática del modelo es la siguiente:

$$\text{Radiación Solar (Ly/día)} = R + (\text{SRSD} * \text{SRL} * \text{Noise})$$

La ecuación consiste, básicamente, en modificar a la radiación solar media (R) mediante la adición o sustracción del producto de tres factores: una fracción de la radiación solar diaria (SRSD), un coeficiente de correlación (SRL) y un coeficiente de ajuste (Noise).

El valor de R se estima mediante la relación:

$$R = RM + AR * DR$$

siendo: RM un valor medio de la radiación medida y toma dos valores RM1 y RM2 para días sin lluvia y con lluvia, respectivamente

AR es la desviación estandar de la radiación solar anual.

DR = Cos (0,0172 * (Día Juliano - 172)), es decir una función trigonométrica del calendario juliano para modular la variación anual de la radiación. El valor máximo de DR (1,0) corresponde al día 21 de diciembre (día juliano 355) o sea el solsticio de verano en el hemisferio Sur

SRSD se estima mediante la siguiente ecuación.

$$\text{SRSD} = 0.1 * R$$

o sea el 10 % de la radiación media diaria estimada según se señaló precedentemente

SRL es un coeficiente de correlación entre las temperaturas máxima y mínima y la radiación solar y se calculan dos valores de SRL, según se trate de días sin lluvia (SRL1) o de días con lluvia (SRL2) SRL1 y SRL2 se obtienen de la siguientes ecuaciones.

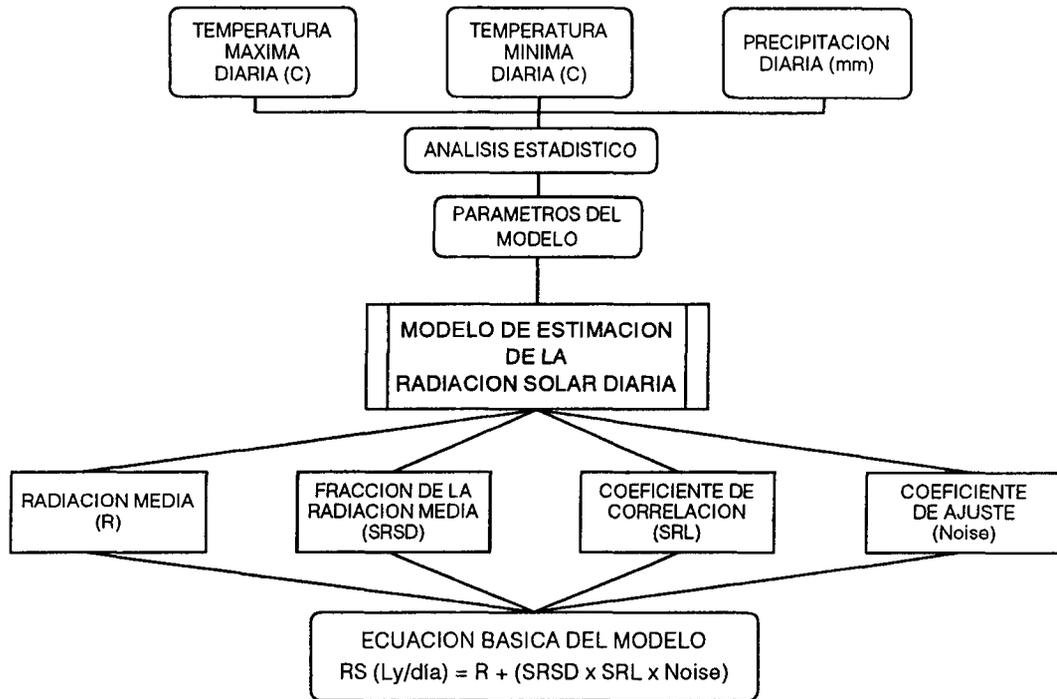


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo de estimación de la radiación.

$$SRL1 = A(1,1) * TXL1 + A(1,2) * TNL + A(1,3) * ASRL1$$

$$SRL2 = B(1,1) * TXL2 + B(1,2) * TNL + B(1,3) * ASRL2$$

siendo: A y B matrices de 3x3 de los coeficientes de intercorrelación entre los valores diarios de las temperaturas máximas, mínimas y las precipitaciones.

ASRL1 y ASRL2 son los valores de SRL1 y SRL2 del día anterior.

TXL1 y TXL2 son las diferencias térmicas normalizadas para las temperaturas máximas diarias de días sin y con lluvia respectivamente. Su cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$TXL1 = \frac{TX - \overline{TX1}}{ATX}; \quad TXL2 = \frac{TX - \overline{TX2}}{ATX}$$

ATX es la desviación estandar de las temperaturas máximas diarias.

TX es la temperatura máxima diaria observada.

$\overline{TX1}$ y $\overline{TX2}$ son las temperaturas máximas medias diarias para días sin y con lluvia respectivamente. Se estiman de la siguiente forma:

$$\overline{TX1} = TXM1 + ATX * DT$$

$$\overline{TX2} = TXM2 + ATX * DT$$

siendo: TXM1 y TXM2 son valores medios de la temperatura máxima observada.

ATX la desviación estandar.

DT = Cos (0,0172 * Día juliano - 200). Al igual que DR, el valor de DT es una función trigonométrica del calendario juliano. El valor máximo (1,0) se asigna al día 17 de enero, fecha en la cual se producen normalmente las temperaturas mas elevadas.

TNL es la diferencia térmica normalizada para la temperatura mínima diaria y se obtiene con la siguiente ecuación.

$$TNL = \frac{TN - \overline{TN}}{ATN}$$

ATN es la desviación estandar de las temperaturas mínimas diarias.

TN es la temperatura mínima observada.

\overline{TN} es la temperatura mínima media diaria. Su cálculo se logra de la siguiente forma:

$$\overline{TN} = TNM + ATN * DT$$

TNM es el valor medio de la temperatura mínima observada.

Tabla 1. Parámetros de temperaturas máximas y mínimas y de radiación utilizados por el modelo de radiación para las localidades de Córdoba, Río IV, Marcos Juárez, Rafaela, Oliveros, y Paraná.

Parámetros	Localidad					
	Córdoba **	Río IV **	M Juárez *	Rafaela *	Oliveros **	Paraná **
TXM1	27,8	26,6	26,6	27,4	26,1	25,9
TXM2	22,5	19,0	21,1	21,4	22,0	21,2
ATX	6,2	5,8	6,4	6,2	6,1	6,1
TNM	13,5	12,0	11,6	12,7	12,4	13,8
ATN	4,7	4,8	6,1	5,7	6,0	5,4
RM1	464,0	475,0	458,8	507,5	447,6	472,7
RM2	228,0	263,0	209,1	187,9	197,0	206,8
AR	186,0	195,0	165,9	181,4	175,2	177,1

** Años considerados 1985-86. - * Año considerado 1985

- TXM1 - Temperatura máxima media (días sin lluvia).
 TXM2 - Temperatura máxima media (días con lluvia).
 ATX - Desviación estandar de la temperatura máxima.
 TNM - Temperatura mínima media anual
 ATN - Desviación estandar de la temperatura mínima.
 RM1 - Radiación solar media (días sin lluvia)
 RM2 - Radiación solar media (días con lluvia)
 AR - Desviación estandar de la radiación solar.

Finalmente Noise es una variable cuyos valores fueron determinados en función de las temperaturas, la radiación solar y la ocurrencia de lluvias según la metodología de Richardson (1981). La magnitud de Noise es la siguiente

- 4,4 para SRL > 0 y días sin lluvia.
- 11,4 para SRL > 0 y días con lluvia.
- 13,2 para SRL < 0 y días sin lluvia.
- 34,3 para SRL < 0 y días con lluvia.

Datos climáticos:

Se utilizaron las temperaturas máxima y mínima y las precipitaciones diarias de las siguientes localidades: Córdoba (31° 24' S, 64° 11' W, 425 msnm), Río Cuarto (33° 07' S, 64° 14' W, 421 msnm), Marcos Juárez (32° 41' S, 62° 07' W, 115 msnm), Oliveros (32° 33' S, 60° 51' W, 27 msnm), Rafaela (31° 17' S, 61° 33' W, 100 msnm) y Paraná (31° 50' S, 60° 31' W, 110 msnm) Las observaciones de radiación solar diaria corresponden a la red solarimétrica de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales, obtenidos con un solarímetro Eppley modelo 8-48 "Black and White"

en las dos primeras localidades y con solarímetros fotovoltaicos en las restantes. Se consideraron para el análisis los años 1985 y 1986. El análisis debió limitarse a aquellas localidades para las cuales pudieron obtenerse las variables meteorológicas señaladas.

Análisis Estadístico:

Utilizando un programa estadístico (SAS), se calcularon en forma separada los promedios y la desviación estandar para días con y sin lluvia de la temperatura máxima y la radiación. Para la temperatura mínima se calculó el promedio y la desviación estandar de días con y sin lluvia. Los promedios obtenidos para radiación y temperatura máxima en días sin lluvia se incrementaron en un 15 y 10 por ciento, respectivamente. En cambio, para días con lluvia, los promedios para dichas variables se redujeron en un 25 y 10 por ciento, respectivamente. Estos ajustes permitieron obtener estimaciones más precisas de radiación al utilizar estos promedios como parámetros del modelo. Se correlacionaron los valores observados y los estimados de radiación solar para las loca-

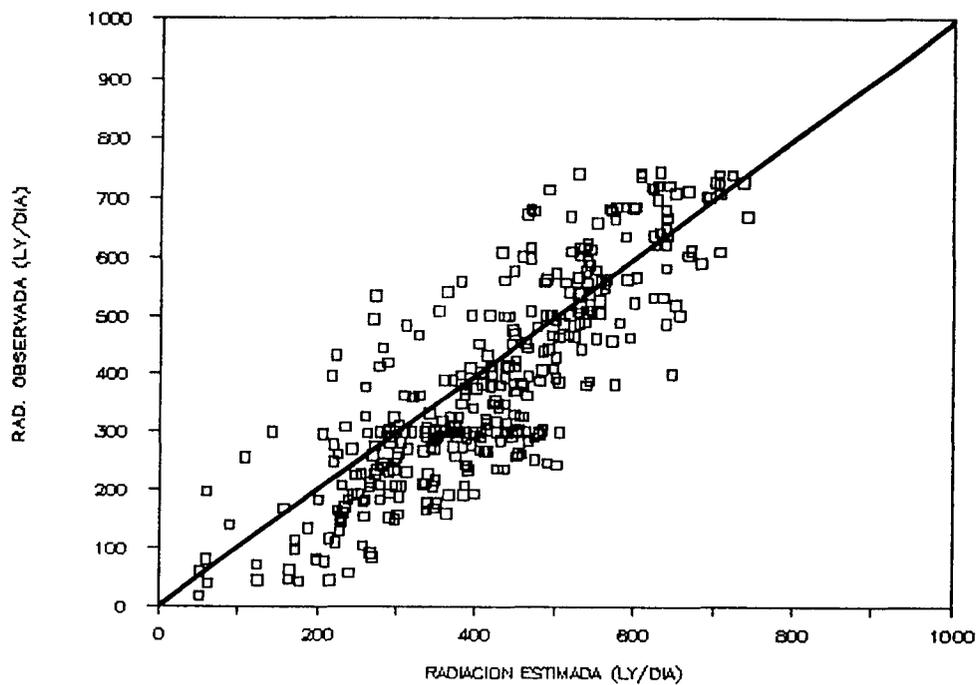


Figura 2. Relación entre valores observados y estimados de radiación solar diaria para Córdoba, 1985/86.

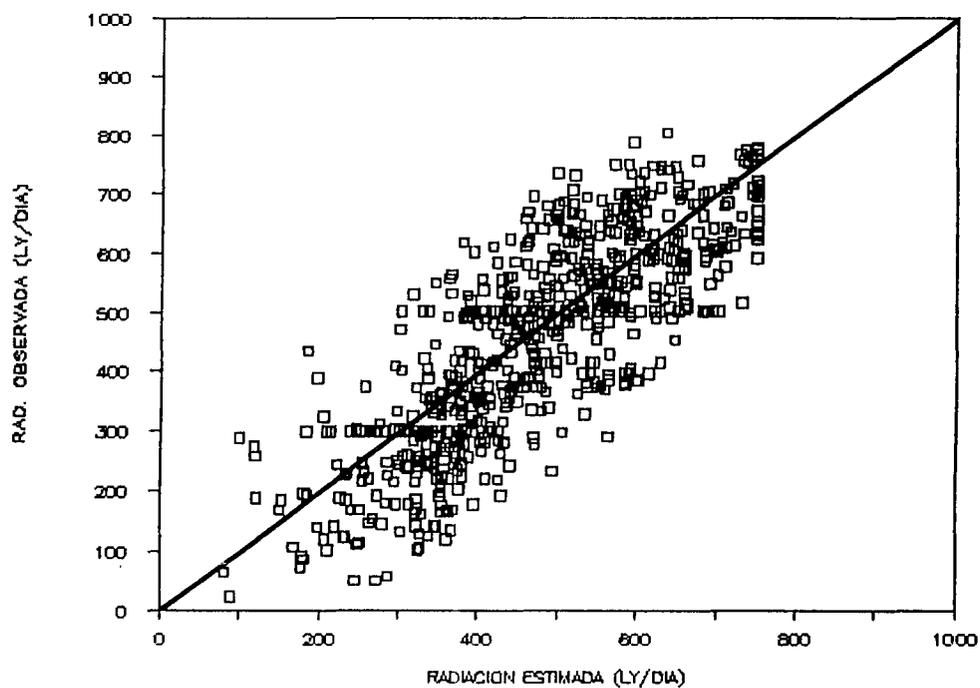


Figura 3. Relación entre valores observados y estimados de radiación solar diaria para Río Cuarto 1985/86.

Tabla 2. Valores medios de radiación, coeficientes de determinación y errores estándar de estimación.

Localidad	Radiación Observada	Radiación Estimada	Coef de Deter (R^2)	Error Estan. Estimación
Córdoba	375,3	410,5	0,74	77,1
Río Cuarto	435,1	408,0	0,73	75,8
Marcos Juárez	355,4	369,6	0,78	83,4
Rafaela	380,1	401,3	0,82	75,6
Oliveros	346,6	368,1	0,80	76,7
Paraná	380,0	402,0	0,77	83,2

lidades consideradas en el estudio, graficándose ambas variables para Córdoba y Río Cuarto.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 1 se presentan los parámetros requeridos por el modelo y obtenidos mediante el análisis estadístico de la serie considerada. Puede apreciarse que existen diferencias entre los distintos parámetros para cada localidad. En general, los parámetros térmicos son más elevados para las localidades ubicadas al norte de la región en estudio, observándose la menor desviación estándar en Río Cuarto. En cuanto a los parámetros de radiación, Rafaela posee el mayor valor para días sin lluvia (RM1) y el menor en días con lluvia (RM2) posiblemente debido a la posición latitudinal y características de las precipitaciones en dicha localidad. En Marcos Juárez se observa la menor variabilidad de la radiación.

Los parámetros de la Tabla 1 fueron utilizados para la estimación de la radiación solar diaria.

En las Figuras 2 y 3 se presenta la relación entre los valores observados y los estimados de la radiación solar para las localidades de Córdoba y Río Cuarto. En Córdoba se aprecia una sobreestimación de la radiación en término de los valores medios mientras que en Río Cuarto, la radiación estimada (REM) es inferior a la radiación observada (ROM). Los coeficientes de determinación (R^2) son 0,74 y 0,73 para Córdoba y Río Cuarto, respectivamente. Los errores estándar de estimación (EEE) son 77,1 para Córdoba y algo inferior para Río Cuarto (75,8). Los resultados indican que los valores estimados de radiación solar guardan una estrecha relación con los valores observados y los errores porcentuales de estimación varían entre el 18,5 y 18,8 por ciento (es de-

cir la relación porcentual EEE/REM). Estos errores son aceptables si son comparados con el error instrumental del 4 al 7 por ciento observado normalmente en el solarímetro Eppley (Wang y Felton, 1983).

El comportamiento del modelo es muy similar en todas las localidades. Las variables temperaturas máximas y mínimas y las precipitaciones explican entre el 73 y 82 por ciento de la variabilidad de la radiación solar.

CONCLUSIONES

El modelo propuesto puede ser utilizado para estimar la radiación diaria de localidades que estén comprendidas dentro del área estudiada, mediante la interpolación de los parámetros de las localidades consideradas.

La metodología propuesta provee estimaciones adecuadas de la radiación solar diaria para su uso en los modelos ecofisiológicos de rendimientos de trigo, maíz y maní.

El modelo puede ser incorporado a un sistema operativo de estimaciones de rendimientos si se dispone de datos de temperaturas máximas y mínimas y de precipitación diarias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro de Investigaciones Acústicas y Lumínicas (CIAL), UNC, al Dr. H. Grossi Gallegos y a la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas de la Univ. Nac. de Río Cuarto por proporcionar datos de radiación.

BIBLIOGRAFIA

- Albrecht, F. H. W., 1955. Methods of Computing Global Radiation. *Geofísica Pura e Applicata*, 38: 131-138.
- Cengiz, H. S., J. M. Gregory, and J. L. Sebaugh, 1981. Solar Radiation Prediction from other Climatic Variables. *American Soc. of Agric. Eng. (ASAE)*, 24(5): 1269-1272.
- da Mota, F. S., M. I. C. Beirsdorff and M. J. C. Acosta, 1977. Estimates of Solar Radiation in Brazil. *Agricultural Meteorology*, 18: 241-254.
- Fulla, L. A., D. A. Gagliardini, H. Grossi Gallegos, R. Lopardo, and J. D. Tarpley, 1988. Incident Solar Radiation on Argentina from the Geostationary Satellite GOES. Comparison with Ground Measurements. *Solar Energy*, 41(1): 61-69.
- Grossi Gallegos, H. y R. Lopardo, 1988. Spatial variability of the global solar radiation obtained by the so-

- larimetric network in the Argentine pampa humeda. *Solar Energy*, 40 (5): 397-404.
- Hodges, T. y A.C. Ravelo, 1985. Calibration of the CERES-maize model for southern Brazil and Argentina. 17th. Conference in Agric. and Forestry Meteor., American Meteor. Soc., 192-193.
- Matalas, N. C., 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resour. Res.*, 3(4): 937-945.
- Ravelo, A. C. y R. A. Seiler, 1985. Estimación de la radiación solar directa. *IDIA*, 433-436: 1-12.
- Ravelo, A.C., A.J. Pascale y J. IZAURRALDE, 1987. Análisis y calibración de un modelo fisiológico para trigo. *Actas III Reunión Nac. de Agrometeor.*, Vaquerías, Córdoba (Argentina), 55-65.
- Ravelo, A.C. y C. W. Robledo, 1989. Sistema automatizado de pronóstico de rendimientos de maíz en Córdoba. *Actas IV Reunión Nac. de Agrometeor.*, Río Cuarto, Córdoba (Argentina), 59-69.
- Ravelo, A. C. y J. Dardanelli, 1992. Calibración y validación de un modelo de rendimiento para maíz (*Arachis hypogaea L.*). *Revista de la Fac. de Agronomía de Buenos Aires* (En prensa).
- Richardson, C. W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Res.*, 17(1): 182-190.
- Seiler, R. A., 1980. Estimación de la radiación global en Córdoba (Argentina). *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 15(3): 355-371.
- Wang, J. Y. and M. M. Felton, 1983. *Instruments for physical environmental measurements*. Vol 1. Second Edition. Kendall/Hunt Publ. Co , 378 pp.
- Wernly, J. y M. A. Landaburu, 1979. Posibilidad de una predeterminación de la radiación global recibida en una localidad, en función de parámetros meteorológicos normales para la misma. *ASADES. Actas 5ta Reunión, Córdoba (Argentina)*, 31-52.