

## **ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA, Y SU EMPLEO EN UN MODELO DE RENDIMIENTO POTENCIAL DE PAPA.**

DE LA CASA, A.; OVANDO, G.; RODRÍGUEZ, A.<sup>1</sup>

### **RESUMEN**

La estimación de la radiación solar global constituye un procedimiento necesario cuando se carece de los registros observados en una región y existe la intención de evaluar los recursos de producción primaria de un cultivo. Con este propósito fueron considerados distintos modelos simples para estimar la transmisividad atmosférica diaria y se evaluó el efecto que el reemplazo de datos observados de radiación por los estimados produce en el rendimiento potencial de papa (*Solanum tuberosum* L.) que simula el modelo SUBSTOR-Papa.

Los modelos de estimación de la radiación solar global diaria evaluados en distintos años y localidades (Río Cuarto, Marcos Juárez y Córdoba) de la provincia de Córdoba, Argentina, fueron: Angström-Prescott (A-P), Bristow y Campbell (B-C), De Jong y Stewart (D-S) y Black (B).

Las expresiones que utilizan la heliofanía (A-P) o la nubosidad (B) como variables independientes producen individualmente mejores esti-

---

<sup>1</sup> Climatología Agrícola, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. cc 509-Ciudad Universitaria, 5000 Córdoba, Argentina. delacasa@agro.uncor.edu

maciones de la radiación solar que las basadas en la amplitud térmica o su combinación con la precipitación. Los modelos (B-C) y (D-S) explican alrededor de 50% de la variabilidad observada y la raíz del cuadrado medio del error oscila entre 3,74 y 4,33 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Los rendimientos potenciales de papa que se obtienen utilizando datos de radiación estimada con el modelo (B-C) resultan casi idénticos a los obtenidos por medio de los registros observados en tres de los cuatro ciclos del cultivo evaluados.

**Palabras clave:** *radiación solar, transmisividad observada y estimada, rendimiento potencial, papa.*

## SUMMARY

Estimating global solar radiation constitutes a necessary procedure when is lacked the observed record and the primary production resources of a crop is attempted to evaluate in a region. In this sense different simple models to determine daily atmospheric transmissivity by means of meteorological information of wide availability were evaluated and also it was evaluated the effect that the radiation observed data replacement by the estimates ones produces on potential potato yield.

The estimating models of global solar radiation evaluated in different years and localities (Río Cuarto, Marcos Juárez and Córdoba) of Córdoba, Argentina, were: Angström-Prescott (A-P), Bristow and Campbell (B-C), De Jong and Stewart (D-S) and Black (B).

The expressions using sunshine (A-P) or cloudiness (B) as independent variables produce individually better estimates of solar radiation than those based on daily temperature extremes or its combination with rainfall. (B-C) and (D-S) models only explained about 50% of the observed variability and the root mean square errors were between 3,74 and 4,33 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

The potential potato yield that is obtained using (B-C) estimated radiation data results almost identical to that obtained by observed data in three of four evaluated crop cycles.

**Key words:** *solar radiation, observed and estimated transmissivity, potential yield, potato.*

## INTRODUCCIÓN

Debido a la influencia que ejerce sobre la producción primaria como así en orden a su potencial aprovechamiento energético, la

determinación de la radiación solar y la evaluación temporal y regional de su disponibilidad constituye un objetivo de carácter estratégico para el desarrollo de la sociedad.

Si bien es la fuente primaria de energía del sistema climático, la medición de la radiación solar sólo se efectúa en un número limitado de estaciones meteorológicas (Rietveld, 1977; Goodin *et al.*, 1999) y, como consecuencia, ha sido históricamente el elemento menos evaluado del clima. Por lo general, las mediciones de radiación solar constituyen información de escasa disponibilidad o que se encuentra dispersa geográficamente.

La modelación del crecimiento, desarrollo y rendimiento de un cultivo en un sitio o región, como así la implementación de distintos modelos hidrológicos o biofísicos, demanda la existencia de información meteorológica. La carencia de variables atmosféricas observadas impide el aprovechamiento de estos procedimientos de análisis y se debe recurrir de manera obligada a su estimación por distintos métodos a fin de ponerlos en funcionamiento (De Jong y Stewart, 1993). La utilización de información meteorológica alternativa de mayor disponibilidad ha sido tradicional para estimar la intensidad de la radiación solar global. Tales procedimientos se sostienen conceptualmente en la naturaleza integrada y dinámica del sistema climático, donde las variables atmosféricas se presentan de un modo interactivo y el estado del sistema tiene memoria, es decir, existe vinculación entre acontecimientos atmosféricos consecutivos.

La relación más investigada con este propósito ha sido probablemente el empleo de la heliofanía relativa como variable independiente para la determinación de la radiación global, lo que dió lugar al modelo de Angström-Prescott (A-P) (Rietveld, 1977). En la provincia de Córdoba, Seiler (1980) presentó modelos de estimación de la radiación solar a escala mensual y subrayó que las mejores alternativas de cálculo son aquellas que emplean la heliofanía relativa como elemento meteorológico básico. A pesar de su larga historia, este método no ha perdido vigencia, como se puede advertir en bibliografía reciente (Persaud *et al.*, 1997). También la nubosidad o cobertura del cielo, como una variable ligada intrín-

secamente con la heliofanía, ha sido usada para cuantificar la radiación solar global (Black, 1956; Thompson, 1976). El modelo de Black (B) emplea una parábola invertida para describir la relación entre la radiación global recibida y la nubosidad.

En los últimos años, sin embargo, y en este contexto de modelos menos complejos, ha comenzado a evaluarse la posibilidad de emplear otras variables meteorológicas a los efectos de estimar la radiación global, en particular destinada al modelamiento de la productividad de cultivos. Así, Bristow y Campbell (1984) proponen la utilización de la amplitud térmica diaria (DT) como variable independiente de una relación empírica con la radiación solar (modelo (B-C)). Goodin *et al.* (1999) emplearon esta alternativa de cálculo y lograron reducir el error de estimación, incorporando un factor de estacionalidad anual a fin de representar diferencias en la amplitud térmica diaria. De Jong y Stewart (1993) estimaron la radiación solar diaria en el Oeste de Canadá empleando, además de DT, el monto diario de precipitación en virtud de su vinculación con la condición de nubosidad (modelo (D-S)). Este último modelo, según Hayhoe (1998), provee mejores estimaciones de la radiación solar que los datos producidos por el generador de series de datos WXGEN que es usado en EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) (Sharpley y Williams, 1990).

La instalación y funcionamiento de una red solarimétrica en el territorio de la república Argentina en la década de 1980, ha permitido el relevamiento de información para evaluar los recursos energéticos de origen solar (Grossi Gallegos y Lopardo, 1988). Con datos de la red solarimétrica del sector central de la República Argentina, Ravelo y Zanvetto (1992) estimaron la radiación solar para el período 1985-86 por medio del modelo de Richardson (1981).

El objetivo del trabajo consiste en analizar, en una región circunscripta al territorio de la provincia de Córdoba, la magnitud del error que promueve la utilización de modelos simplificados para estimar la radiación solar diaria a partir de elementos meteorológicos de mayor disponibilidad en tiempo y espacio. Por otra parte, se evalúa el efecto que el uso de estas estimaciones produce en la determinación del rendimiento potencial de papa respecto a la información observada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### a) Registros meteorológicos.

Los datos de radiación solar diaria fueron suministrados por la Red Solarimétrica. Las estaciones de la provincia de Córdoba que se emplearon en el estudio, su localización geográfica y la extensión temporal de las series utilizadas se resumen en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Estaciones de la red solarimétrica en la provincia de Córdoba con información diaria de radiación solar global observada.

Estación	Posición geográfica			Características de las series	
	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altura m s.n.m.	Años considerados	Días faltantes
Río Cuarto	33°03'	64°16'	421	84, 85, 87, 88, 89	396
Marcos Juárez	32°41'	62°07'	115	78, 79, 80, 81, 82, 83, 84,	674
Córdoba	31°26'	64°11'	438	88, 89, 90, 91	17

Los registros meteorológicos empleados para ajustar localmente los modelos de estimación de la radiación, teniendo en cuenta la existencia del dato de radiación global observada, fueron observados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en las correspondientes estaciones de la red de superficie. La localización de las respectivas estaciones meteorológicas no coincide exactamente con las de radiación, razón por la cual se debe suponer algún grado de error por esta causa.

Las variables meteorológicas de registro diario que se utilizaron fueron: temperatura máxima (Tmax (°C)), temperatura mínima (Tmin (°C)), precipitación (PP (mm)), heliofanía relativa (h/H (%)). Por su parte, la nubosidad (N (octos)) es una variable de registro horario que se registra a las 2, 8, 14 y 20 horas de cada día. En este caso fue considerando como valor diario al promedio de las 8, 14, y 20 horas.

### b) Procedimiento para determinar la radiación astronómica diaria al tope de la atmósfera (Ra).

Para calcular Ra (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) se emplearon las expresiones de

Duffie y Beckman (1980), usando una constante solar de  $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

c) Procedimientos para la estimación de la transmisividad atmosférica.

El coeficiente de transmisividad diario ( $t$ ) resulta del cociente entre la radiación solar global ( $R_s$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )) y la radiación astronómica, es decir, la relación entre la intensidad de la radiación que mide el piranógrafo respecto al goce de radiación en el tope de la atmósfera. Fueron considerados los siguientes modelos de estimación.

1) Modelo de Angström-PreScott (A-P) (Rietveld, 1978):

$$t = a + b (h/H)$$

2) Modelo de Bristow y Campbell (B-C) (1984):

$$t = a [1 - \exp(-bDT_j^c)]$$

siendo  $DT_j$  la amplitud térmica del día  $j$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) que se calcula como:

$$DT_j = T_{\max_j} - (T_{\min_j} + T_{\min_{j-1}})/2$$

3) Modelo de De Jong y Stewart (D-S) (1993):

$$t = a(DT)^b (1 + cPP + dPP^2)$$

4) Modelo de Black (B) (1956):

$$t = a + bN + cN^2$$

Los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , y  $d$ , diferentes para los distintos modelos, corresponden a coeficientes empíricos de ajuste.

d) Evaluación de la transmisividad máxima de la atmósfera.

A propósito de analizar las diferencias de la transmisividad máxima entre las localidades se procedió a establecer criterios para reconocer indirectamente el estado de la atmósfera a partir de variables indicativas. La condición de transmisividad máxima diaria se definió y analizó de manera independiente cuando:

- 1) La heliofanía relativa presentó valores mayores o iguales a 0,9.
- 2) La nubosidad presentó valores menores o iguales a 0,8 octos.
- 3) La DT fue mayor o igual al octavo intervalo que se computó dividiendo el rango completo de la variable en diez partes iguales.

e) Verificación general y específica.

Los modelos de estimación de la transmisividad fueron evaluados por medio del coeficiente de determinación y el ANAVA de la regresión, en tanto la raíz del cuadrado medio del error se empleó para ponderar la magnitud del error. Para ello, con los valores de transmisividad se calculó la radiación solar global.

La verificación de los coeficientes de los respectivos modelos de radiación se realizó de dos maneras. En primer lugar, los resultados de Río Cuarto, Marcos Juárez y Córdoba, que corresponden a diferentes períodos de observación y posiciones geográficas en la provincia, se analizaron de manera general en el contexto de la información bibliográfica. En segundo lugar, para una verificación más específica de los resultados que arroja el modelo (B-C), se incorpora un análisis entre datos observados y estimados a partir de información de la ciudad de Córdoba (años 1994, 1996, 1999 y 2000) que no fue utilizada en la obtención de los coeficientes de ajuste.

Por último, se pone énfasis en la eventual diferencia que el empleo de datos estimados de radiación solar produciría en la estimación del rendimiento potencial de papa respecto al uso de los datos observados. El modelo SUBSTOR papa (Griffin *et al.*, 1993) fue utilizado para producir las estimaciones del rendimiento potencial (sin estrés hídrico ni nutricional). Se efectuaron simulaciones de rendimiento potencial de papa empleando alternativamente datos observados y estimados de radiación global. Fueron evaluados un ciclo semitemprano (entre agosto y diciembre de 1994) y tres ciclos semitardíos (entre febrero y mayo de los años 1996, 1999 y 2000) del cultivo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 2 presenta los coeficientes de regresión y las respectivas medidas de ajuste obtenidas para los diferentes modelos de estimación de la radiación evaluados con registros de Río Cuarto, Marcos Juárez y Córdoba.

**Cuadro 2.** Coeficientes de regresión y determinación de diferentes modelos para estimar la radiación solar en tres localidades de la provincia de Córdoba y en diferentes períodos del año.

Localidad	Período	Modelo															
		(A-P)			(B-C)			(D-S)			(B)						
		a	b	R <sup>2</sup>	a	b	c	R <sup>2</sup>	a	b	c	d	R <sup>2</sup>	a	b	c	R <sup>2</sup>
Río Cuarto	Annual	0,284	0,444	0,652	0,661	-0,044	1,496	0,465	0,139	0,5450	-0,015	0,00015	0,461	0,660	-0,005	-0,006	0,697
	S C				0,660	-0,027	1,6951	0,473	0,139	0,5492	-0,012	0,00011	0,465	0,669	-0,007	-0,006	0,701
Marcos Juárez	Annual	0,267	0,501	0,672	0,691	-0,054	1,313	0,482	0,127	0,5616	-0,016	0,00022	0,488	0,671	-0,011	-0,006	0,710
	S C				0,670	-0,029	1,626	0,472	0,132	0,5610	-0,015	0,00020	0,485	0,680	-0,006	-0,007	0,711
Córdoba	Annual	0,268	0,470	0,606	0,718	-0,075	1,123	0,482	0,130	0,5413	-0,028	0,00041	0,497	0,663	-0,017	-0,005	0,698
	S C				0,606	-0,036	1,587	0,507	0,136	0,5136	-0,014	0,00018	0,486	0,617	0,0071	-0,006	0,659
Córdoba	Annual				0,611	-0,029	1,691	0,503	0,135	0,5362	-0,014	0,00016	0,503	0,635	0,0016	-0,006	0,662
	S F				0,608	-0,043	1,478	0,519	0,137	0,5000	-0,047	0,0011	0,507	0,605	0,0087	-0,007	0,661

Referencias: SC: Semestre cálido; SF: Semestre frío; A, B, c, y d son coeficientes de regresión; R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación.



En un sentido comparativo se aprecia marcada uniformidad entre localidades, tanto en los coeficientes de los respectivos modelos como en las medidas de ajuste que cada modelo produce. Los procedimientos que incorporan la condición de heliofanía y cobertura de nubes tienen mayor ajuste, respecto a los modelos que emplean sólo la amplitud térmica o combinada con la precipitación. Tanto la amplitud térmica como la precipitación poseen una relación menos estrecha con la transmisividad atmosférica. El modelo (B-C) produce coeficientes de determinación similares a (D-S), a pesar que en este caso se emplean ambas variables independientes (0,46 para Río Cuarto y 0,48 para Marcos Juárez, siendo 0,507 y 0,486, con los métodos (B-C) y (D-S), respectivamente, para Córdoba).

Los coeficientes de correlación que a nivel mensual De Jong y Stewart (1993) obtuvieron para las condiciones climáticas del Oeste de Canadá con el modelo (D-S), además de resultar significativos sólo entre mayo y setiembre (meses estivales en el HN), son escasamente superiores al ajuste que el mismo modelo produce en Córdoba sin realizar ninguna discriminación temporal. Asimismo, se aprecia en el Cuadro 2 que un análisis semestral de la información (considerando como semestre frío al período de seis meses entre abril y setiembre, y como semestre cálido a los seis meses restantes) produce coeficientes de regresión y correlación semejantes al modelo anual. Por su parte, Ravelo y Zanvettor (1992) explican entre el 73 y 82 % de la variabilidad interanual de la radiación solar diaria empleando la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, o sea la misma base de información que utiliza (D-S), pero a través de un procedimiento con base estocástica que discrimina las condiciones meteorológicas y su relación entre días con y sin lluvia.

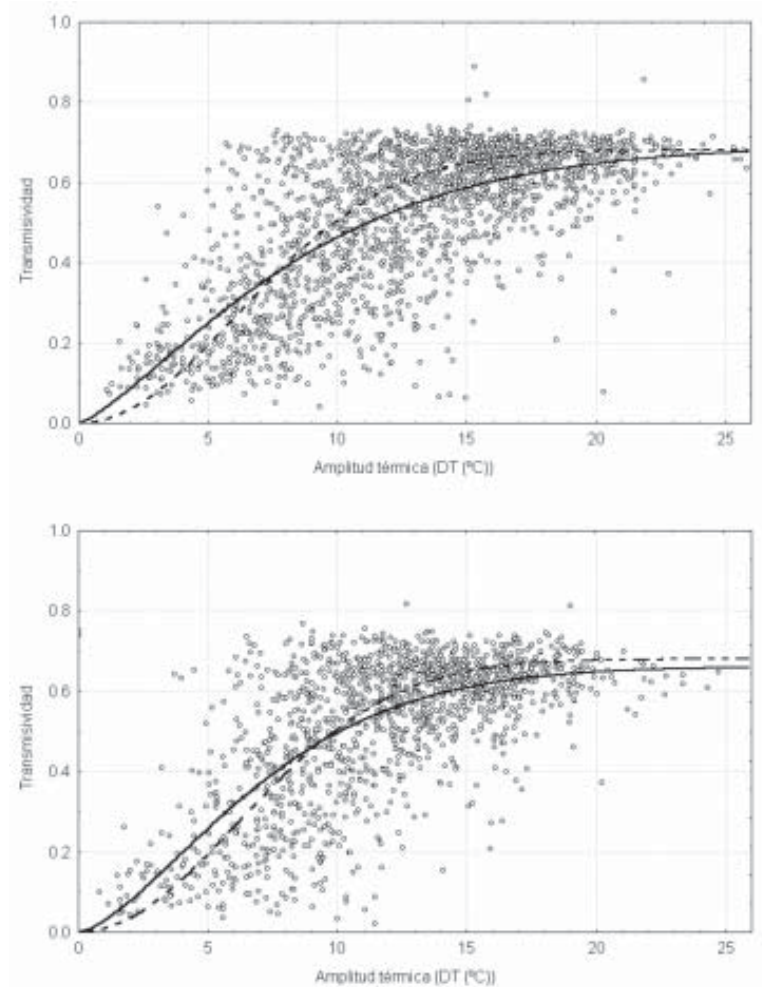
Los resultados del modelo (A-P) se corresponden con evaluaciones similares en distintas localidades a nivel mundial. Los coeficientes  $a$  y  $b$ , al igual que los coeficientes de correlación obtenidos para localidades de Córdoba, están comprendidos por la información de Rietveld (1977), que presenta una recopilación de coeficientes empíricos de ajuste correspondientes a distintas latitudes y estaciones del año. Seiler (1980) efectuó el ajuste de los modelos

(A-P) y (B) para la localidad de Pilar (Córdoba) y obtuvo coeficientes de regresión diferentes a los de este estudio como así también una correlación inferior. No obstante, la información mencionada es menos comparable por cuanto se utilizan registros mensuales de un período histórico diferente y las observaciones de radiación proceden de un piranógrafo mecánico, que posee mayor error intrínseco.

El modelo (B) presenta en las tres localidades y en diferentes semestres del año coeficientes de ajuste entre 65% y 71%, o sea un nivel de ajuste similar o superior al que ofrece el método (A-P). La nubosidad diaria muestra una correlación inversa altamente significativa respecto a DT ( $r = -0,629$  en Marcos Juárez,  $r = -0,577$  en Río Cuarto y  $r = -0,211$  en Córdoba), razón por la cual este modelo aparece como una alternativa más amplia para cuantificar la radiación global tanto por su acción directa sobre la radiación como por su influencia indirecta sobre la amplitud térmica.

Los coeficientes del modelo (B-C) no sólo resultan semejantes entre Río Cuarto y Marcos Juárez, sino que se aproximan a los que describen Goodin *et al.* (1999) para una serie de 30 años de datos diarios de Manhattan (KS, EE.UU.). El coeficiente  $a$ , o sea la transmisividad atmosférica máxima media estimada, es 0,680 en Manhattan y resulta ligeramente inferior en Río Cuarto (0,661) y algo superior en Marcos Juárez (0,691). La Figura 1 presenta la relación entre DT y trasmisividad en ambas localidades de Córdoba y los modelos empíricos de ajuste en cada caso superpuestos al modelo con los coeficientes obtenidos para Manhattan. De esta forma se aprecia la semejanza de las respectivas expresiones curvilíneas de los modelos locales respecto al modelo con carácter normal de Manhattan.

Por su parte, la propuesta de Goodin *et al.* (1999) que incluye un factor de estacionalidad para diferenciar la influencia de DT sobre  $t$  a través del año, no mostró un resultado igual de satisfactorio en Córdoba. En las localidades de Córdoba no se aprecia que DT presente el mismo rasgo de variación estacional de Manhattan, con un mínimo en invierno y un máximo en verano. En cambio, se determinaron diferencias significativas entre los valores medios mensuales de DT que pueden estar asociadas a la marcha anual de la humedad relativa.



**Figura 1.** Relación entre la amplitud térmica diaria y la transmisividad en dos lugares de la provincia de Córdoba: Marcos Juárez (arriba) y Río Cuarto (abajo). Se incluyen los valores estimados por los respectivos modelos de cada localidad (trazo continuo) y el correspondiente a Manhattan (EU) (trazo quebrado).

A propósito de los resultados de la transmisividad máxima media estimada que revelan los modelos (B) y (B-C), más elevada en Río Cuarto y Marcos Juárez que en el caso de la ciudad de Córdoba, se procedió a evaluar las diferencias existentes en los valores observados de transmisividad máxima diaria por medio de un ANAVA. Los resultados que se presentan en el Cuadro 3 indican, para todos los criterios utilizados a fin de evaluar la transmisividad de una atmósfera despejada, que existen diferencias entre localidades y que los valores de Córdoba son significativamente más bajos. Estos resultados sugieren, al margen del diferente período de observación entre localidades, como así también de una posible diferencia de calibración del instrumental, que la transmisividad máxima de la atmósfera es inferior en Córdoba, lo que puede estar supeditado a la mayor carga de polución y capacidad de condensación del aire que es propia de las grandes metrópolis.

**Cuadro 3.** Transmisividad máxima observada en localidades de Córdoba para distintos criterios de evaluar la condición de atmósfera despejada.

Localidad	Criterios								
	Hel.Rel.>0,9			N<0,8 octos			DT>octavo intervalo		
	n	Promedio	Varianza	n	Promedio	Varianza	n	Promedio	Varianza
Río Cuarto	22	0,648	0,009	337	0,662	0,004	17	0,632	0,002
Córdoba	37	0,606	0,006	304	0,624	0,003	53	0,603	0,006
Marcos Juárez	21	0,648	0,003	472	0,673	0,002	43	0,667	0,004

El Cuadro 4 sintetiza la capacidad predictiva de los modelos considerando la magnitud del error de estimación. Mientras los modelos (A-P) y (B) producen en las localidades de Córdoba un error que varía entre 3 y 3,6 MJ m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>, en los modelos (B-C) y (D-S) aumenta entre 3,7 y 4,33 MJ m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>. El error del modelo (B-C) en la provincia de Córdoba resulta similar al que determinaron Goodin *et al.* (1999) para el modelo normal de Manhattan. Al igual que en Kansas, EU, donde no se aprecia a nivel estatal una variación sistemática del error con la latitud o la estación del año, los resultados en la provincia de Córdoba muestran una marcada homogeneidad espacial. Esta homogeneidad justificaría en general la elaboración

**Cuadro 4.** Raíz del cuadrado medio del error ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) entre valores de radiación solar observada y estimada por distintos modelos para localidades de Córdoba.

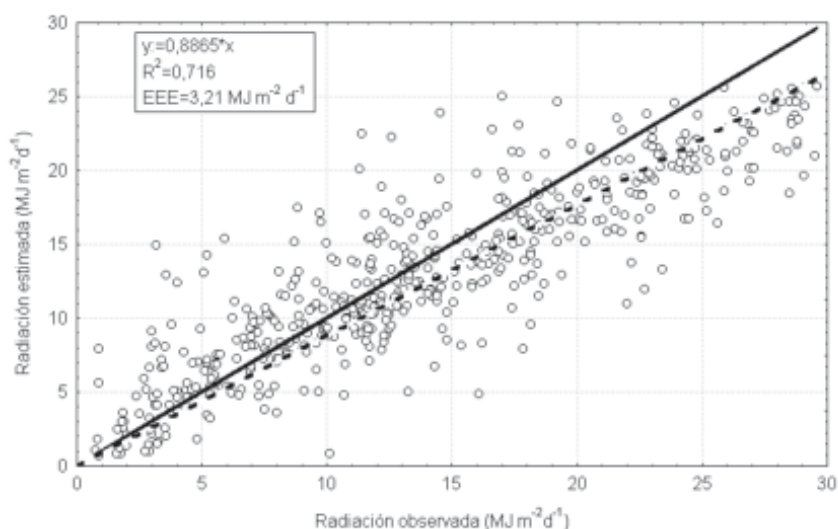
Localidad	Modelos			
	(A-P)	(B-C)	(D-S)	(B)
Río Cuarto	3,03	4,33	4,28	3,14
Marcos Juárez	3,33	4,01	3,99	3,04
Córdoba	3,60	3,74	3,82	3,13

de un único modelo a nivel provincial o, al menos, para la llanura central de la provincia, sin que esto ocasione un incremento sustancial del error de estimación.

#### Verificación específica del modelo (B-C).

La carencia de datos observados de radiación para evaluar el crecimiento, desarrollo y productividad de un cultivo, hace necesaria la utilización de información estimada (De Jong y Stewart, 1993). Aunque el modelo (B-C) presenta un error superior al de los modelos (A-P) y (B), su requerimiento de información térmica, eventualmente más disponible que los registros de heliofanía o nubosidad, lo convierte en una alternativa de interés especial. En este sentido, a partir de una serie independiente de datos de temperatura se estimaron valores diarios de radiación global que se sometieron a un análisis de correlación respecto de los datos observados. La prueba de verificación que se aprecia en la Figura 2 indica que el método (B-C) produce estimaciones satisfactorias de la radiación solar global aunque con una sistemática subestimación. Cabe acotar que la raíz del cuadro medio del error para el período analizado resulta inferior al obtenido en la etapa de elaboración del modelo.

Finalmente, en el Cuadro 5 se sintetizan algunas variables que fueron simuladas por el modelo SUBSTOR (Griffin *et al.*, 1993), empleando alternativamente datos observados y estimados de radiación durante diferentes ciclos del cultivo de papa en la ciudad de Córdoba. La comparación de los respectivos resultados por ciclo, pone de manifiesto que las diferencias suscitadas por el empleo de la radiación solar estimada son irrelevantes en tres de los



**Figura 2.** Relación entre la radiación solar diaria observada y estimada por el modelo (B-C) para la ciudad de Córdoba (trazo quebrado), junto a la recta 1:1 (trazo continuo).

**Cuadro 5.** Variables simuladas por el modelo SUBSTOR para evaluar rendimiento potencial de papa a partir de datos de radiación solar observados (RS Obs) y estimados (RS Est) por el modelo (B-C).

VARIABLE	Ciclo 1994		Ciclo 1996		Ciclo 1999		Ciclo 2000	
	RS Obs	RS Est	RS Obs	RS Est	RS Obs	RS Est	RS Obs	RS Est
Comienzo de tuberización (dap)	48	48	53	53	60	61	53	53
Madurez fisiológica (dap)	116	116	96	96	120	120	119	119
Rendimiento de tubérculo (en fresco) (Mg/ha)	63,6	63,9	19,8	19,3	47,3	35,3	41,0	41,4
Rendimiento de tubérculo (peso seco) (kg/ha)	12719	12791	3961	3874	9460	7077	8203	8298
Peso de la parte aérea a la cosecha (kg/ha)	6530	6518	514	527	2821	1408	1980	2139
Peso de tubérculo y parte aérea a la cosecha (kg/ha)	19249	19309	4476	4400	12281	8485	10183	10436
IAF máximo (m2/m2)	7,2	7,2	1,7	1,6	4,5	2,7	3,7	4,0

cuatro casos. Sólo en el ciclo 1999 se presentan diferencias fenométricas de alguna consideración. Estos resultados confirman la evaluación de De Jong y Stewart (1993) sobre el empleo de datos estimados de radiación para evaluar el rendimiento potencial de trigo en Canadá.

## **CONCLUSIONES**

En el contexto de los modelos de estimación de la radiación solar de naturaleza menos compleja que analiza el trabajo, los que emplean como variable independiente la heliofanía relativa o la nubosidad presentan mejor capacidad predictiva a escala diaria que los procedimientos basados en la amplitud térmica. Aquellos que utilizan la amplitud térmica, con la inclusión o no de la precipitación, sólo explican la mitad de la variabilidad que la radiación solar diaria presenta en la provincia de Córdoba.

Los coeficientes empíricos de ajuste presentan en general una marcada uniformidad en la región, razón por la cual sería admisible la elaboración de un modelo de estimación único para cada tipo en la llanura central de la provincia de Córdoba. La transmisividad máxima observada es inferior en Córdoba respecto a la de Río Cuarto o Marcos Juárez.

A diferencia de los resultados de regiones geográficas del HN, en Córdoba no se detectó un comportamiento estacional en los coeficientes de regresión que contribuya a mejorar los resultados de la estimación y, en este sentido, es también un argumento para elaborar un modelo anual único.

La utilización de valores estimados de radiación solar global con el modelo (B-C) produce simulaciones del rendimiento potencial de papa similares a las que se obtienen con datos observados de radiación solar global.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Red Solarimétrica (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) y al Servicio Meteorológico Nacional (Fuerza Aérea Argentina) por los datos que se suministraron para realizar este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

**BLACK, J.N., 1956.** The distribution of solar radiation over the earth's surface. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. B 7:165-189.

**BRISTOW, K.L. y G.S. CAMPBELL, 1984.** On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. Agricultural and Forest Meteorology 31:159-166.

**DE JONG, R. y D.W. STEWART, 1993.** Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. Can. J. Plant Sci. 73:509-518.

**DUFFIE, J.A. y W.A. BECKMAN, 1980.** Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons, New York. 1-109 pp.

**GOODIN, D.G., J.M.S. HUTCHINSON, R.L. VANDERLIP y M.C. KNAPP, 1999.** Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. Agronomy Journal 91:845-851.

**GRIFFIN, T.S.; B.S. JOHNSON y J.T. RITCHIE; 1993.** A simulation model for potato growth and development: Substor-potato Version 2.0. IBSNAT Research Report Series 02. Dept. of Agronomy and Soil Science.

**GROSSI GALLEGOS, H. y R. LOPARDO, 1988.** Spatial variability of the global solar radiation obtained by the solarimetric network in the Argentine pampa húmeda. Solar Energy 40(5):397-404.

**HAYHOE, H.N., 1998.** Relationship between weather variables in observed and WXGEN generated data series. Agricultural and Forest Meteorology 90:203-214.

**PERSAUD, N., D. LESOLLE y M. OUATTARA, 1997.** Coefficients of the Angström-Prescott equation for estimating global irradiance from hours of bright sunshine in Botswana and Niger. Agricultural and Forest Meteorology 88:27-35.

**RAVELO, A. y R. ZANVETTOR, 1992.** Estimación de la radiación solar diaria para modelos ecofisiológicos de rendimiento. Agriscientia IX(2):79-86.



**RICHARDSON, C.W., 1981.** Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research* 17(1):182-190.

**RIETVELD, M.R., 1977.** A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agricultural Meteorology* 19:243-525.

**SHARPLEY, A.N. y J.R. WILLIAMS (Eds.), 1990.** EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. US Department of agriculture. Technical Bulletin N°1768, 255 pp.

**SEILER, R.A., 1980.** Estimación de la radiación global en Córdoba (Argentina). *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 15(3):355-371.

**THOMPSON, E.S., 1976.** Computation of solar radiation from sky cover. *Water Resources Research* 12(5):859-865.

