

# Avaliação de modelos para a estimativa de valores diários da radiação solar global com base na temperatura do ar

## Evaluating models to estimate daily solar global radiation values based on air temperature

Marco Antônio Fonseca Conceição<sup>1</sup>, Fábio Ricardo Marin<sup>2</sup>

### NOTA TÉCNICA/TECHNICAL NOTE

**Resumo:** Os valores da radiação solar global ( $R_s$ ) são úteis para diferentes aplicações agrometeorológicas. Muitas estações, entretanto, não dispõem de registros de “ $R_s$ ” mas apresentam dados de temperatura do ar. O presente trabalho teve o objetivo de avaliar o desempenho de dois modelos de estimativa de “ $R_s$ ” com base na temperatura do ar, em quatro localidades do Brasil - Campinas (SP), Jales (SP), Petrolina (PE) e Teresina (PI). Os modelos avaliados foram os de Hargreaves (H) e de Bristow & Campbell (BC). O modelo “BC” apresentou desempenho superior em todas as localidades estudadas, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variando entre 0,67 e 0,75 e coeficientes de desempenho ( $c$ ) classificados nas categorias bom e muito bom.

**Palavras-chave:** Hargreaves, Bristol & Campbell, meteorologia

**Abstract:** Daily values of the global solar radiation ( $R_s$ ) are useful for several applications in agrometeorology. However, in many weather stations “ $R_s$ ” values are not available, but they always present air temperature records. The aim of this work was to evaluate the performance of two models to estimate “ $R_s$ ” values based on air temperature data, in four Brazilian locations - Campinas (SP), Jales (SP), Petrolina (PE) and Teresina (PI). The evaluated models were the Hargreaves (H) and the Bristow & Campbell (BC). The “BC” model presented higher performance in all locations, with  $R^2$  varying from 0,67 to 0,75 and performance coefficient ( $c$ ) classified as good and very good.

**Key words:** Hargreaves, Bristow & Campbell, meteorology

<sup>1</sup> Embrapa Uva e Vinho, Estação Experimental de Viticultura Tropical, CP 241, CEP 15700-000, Jales, SP, E-mail: marcoafco@cnpuv.embrapa.br

<sup>2</sup> Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP, E-mail: marin@cnptia.embrapa.br

## Introdução

Os valores da radiação solar global ( $R_s$ ) são utilizados em diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, em modelos de produção vegetal e em outros estudos agrometeorológicos (BALL et al., 2004). Poucos locais, entretanto, apresentam registros de “ $R_s$ ”, sendo comum a existência de informações de temperatura máxima ( $T_{max}$ ) e mínima ( $T_{min}$ ) do ar. Por essa razão, modelos em que “ $R_s$ ” possa ser estimada em função de “ $T_{max}$ ” e “ $T_{min}$ ” são de grande utilidade. Esses modelos se baseiam no fato de que em condições de nebulosidade os valores da diferença entre “ $T_{max}$ ” e “ $T_{min}$ ” (amplitude térmica), em geral, são menores do que na ausência de nuvens (ALLEN et al., 1998).

No modelo de Hargreaves (HARGREAVES & SAMANI, 1982), que passa a ser denominado modelo “H”, “ $R_s$ ” é função da radiação incidente no topo da atmosfera ( $R_a$ ) e da raiz quadrada da amplitude térmica ( $AT$ ). No de BRISTOW & CAMPBELL (1984), que passa a ser denominado modelo “BC”, a estimativa de “ $R_s$ ” se baseia, também, em “ $R_a$ ” e em uma função exponencial de “ $AT$ ”.

Diversos trabalhos, em diferentes localidades do mundo, foram realizados comparando valores diários de “ $R_s$ ” medidos e estimados empregando-se os modelos “H” e “BC”, como os de HUNT et al. (1998) no Canadá; GOODIN et al. (1999) no estado do Kansas, EUA; BALL et al. (2004) em diferentes localidades dos EUA; e TRNKA et al. (2005) em regiões da Áustria e República Tcheca.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os desempenhos dos modelos “H” e “BC” nas estimativas diárias da radiação solar global em quatro localidades brasileiras.

Nas análises foram utilizados registros meteorológicos dos municípios de Campinas, SP (22°55'S, 47°05'W, 574m), Jales, SP (20°15'S, 50°30'W, 483m), Petrolina, PE (09°23'S, 40°30'W, 370m) e Teresina, PI (05°05'S, 42°50'W, 74m). Os valores diários da radiação solar global ( $R_s$ ) e das temperaturas máxima ( $T_{max}$ ) e mínima ( $T_{min}$ ) do ar foram coletados por estações meteorológicas automáticas e estão disponibilizados na base de

dados climáticos da Embrapa Monitoramento por Satélite. As seqüências de dias utilizados nas análises nem sempre foram contínuas e corresponderam aos anos de 2004 e 2005 para as localidades de Teresina (N=438 dias) e Petrolina (N=238 dias); de 2003 a 2005 para Campinas (N=921 dias); e de 2003 a 2006 para Jales (N=907 dias).

O modelo “H”, conforme apresentado por ALLEN et al. (1998), pode ser escrito na seguinte forma:

$$R_s = R_a K_t (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (1)$$

em que  $R_s$  é a radiação solar global ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ );  $K_t$  é um coeficiente empírico ( $^{\circ}C^{-0.5}$ ), sendo igual a 0,16 para regiões continentais (ALLEN et al., 1998);  $T_{max}$  e  $T_{min}$  são as temperaturas máxima e mínima do ar ( $^{\circ}C$ ); e  $R_a$  é a radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ). Os valores diários de  $R_a$  foram calculados de acordo com metodologia baseada na latitude do local e no dia do ano (ALLEN et al., 1998).

As estimativas de  $R_s$  pelo modelo “BC” (BRISTOW & CAMPBELL, 1984) foram calculadas empregando-se a expressão:

$$R_s = A [1 - \exp(-B (T_{max} - T_{min})^C)] \quad (2)$$

em que “A”, “B” e “C” são coeficientes empíricos. Os valores dos coeficientes “A” e “C” foram mantidos fixos, sendo iguais a 0,7 e 2,4, respectivamente, enquanto que os valores de “B” variaram entre 0,004 a 0,010, com incrementos de 0,001, conforme sugestão apresentada por BRISTOW & CAMPBELL (1984).

Os valores de “ $R_s$ ” estimados foram comparados aos medidos utilizando-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o coeficiente de confiança ( $c$ ) proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997). O desempenho foi classificado como ótimo para valores de “ $c$ ” maiores que 0,85; como muito bom para valores entre 0,76 e 0,85; como bom para valores entre 0,66 e 0,75; como regular para valores entre 0,51 e 0,65; como ruim para valores entre 0,41 e 0,50; e como péssimo para valores inferiores a 0,40.

As inclinações das linhas de tendência ( $I$ ) do modelo “H”, forçando-se as retas de regressão a passarem pela origem, ficaram próximas da unidade

(Figura 1), comportamento semelhante ao observado por TRNKA et al. (2005) em nove localidades da Europa Central. O modelo tendeu a subestimar "Rs" em Teresina, Petrolina e Jales (Figuras 1a, 1b e 1d), enquanto que em Campinas ele apresentou uma tendência a superestimar "Rs" (Figura 1c).

Os valores de  $R^2$  para o modelo "H" ficaram entre 0,51 e 0,65, com uma média geral igual a 0,61 (Tabela 1). Esses valores foram inferiores aos

observados por TRNKA et al. (2005) em regiões da Áustria e República Tcheca ( $R^2$  médio de 0,83), porém próximos aos obtidos por HUNT et al. (1998), em oito estações meteorológicas do Canadá ( $R^2$  médio igual a 0,69); e por BALL et al. (2004), em treze regiões dos EUA ( $R^2$  médio igual a 0,65). Observa-se na Tabela 1 que os valores de  $R^2$  para o modelo "H" apresentaram uma correlação negativa com os valores da amplitude térmica (AT), sendo maiores para os menores valores de "AT".

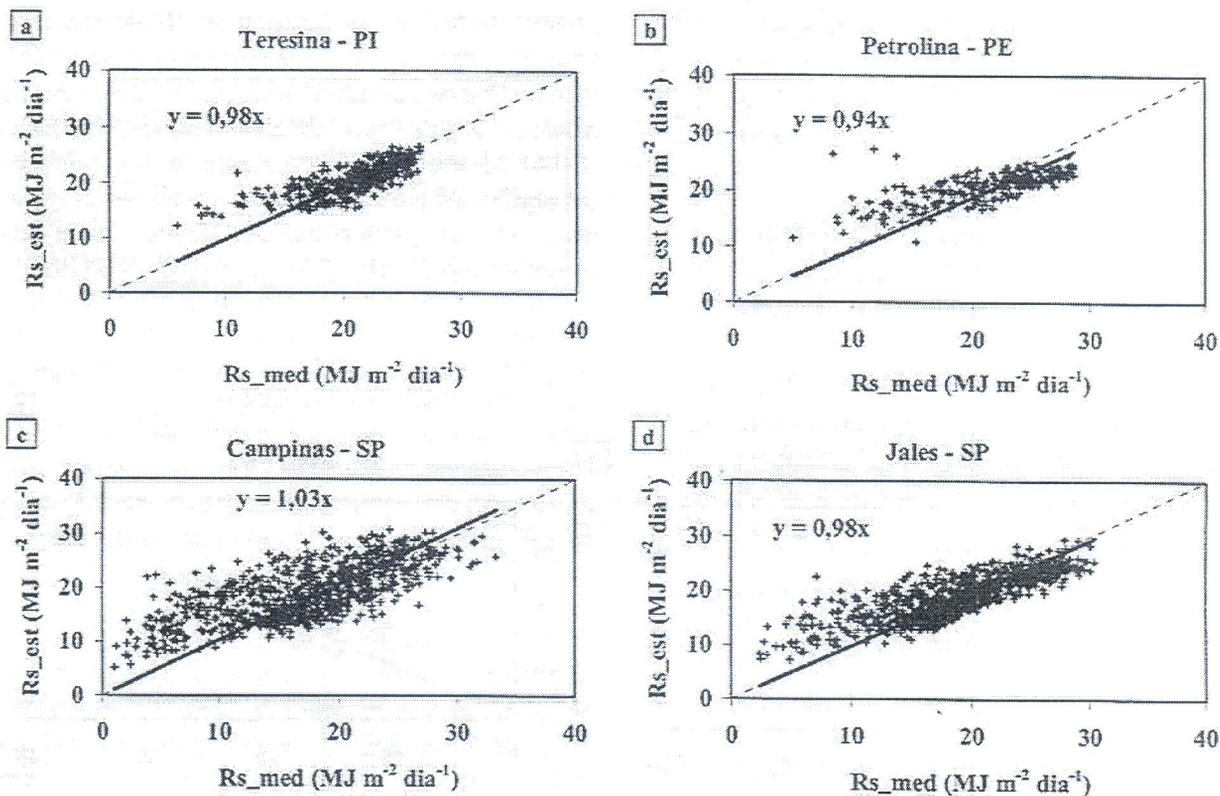


Figura 1. Regressão linear, com a linha de tendência passando pela origem, entre valores da radiação solar global medidos ( $R_{s\_med}$ ) e estimados ( $R_{s\_est}$ ) empregando-se o modelo de Hargreaves, em quatro localidades brasileiras.

Tabela 1. Valores médios da amplitude térmica (AT), da radiação solar global (Rs), do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do coeficiente de desempenho (c), considerando-se valores medidos e estimados pelos modelos de Hargreaves (H) e de Bristow & Campbell (BC) em diferentes localidades.

LOCAL	AT (°C)	Rs ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ )			$R^2$		C	
		Medida	H	BC <sup>1</sup>	H	BC <sup>1</sup>	H	BC <sup>1</sup>
CAMPINAS	13,2	17,1	18,7	17,9	0,51	0,67	0,58	0,74
JALES	12,5	18,6	18,8	19,1	0,65	0,75	0,71	0,80
PETROLINA	13,0	21,2	20,6	21,8	0,52	0,67	0,56	0,72
TERESINA	12,9	21,1	20,9	21,7	0,61	0,69	0,67	0,75
MÉDIA	12,9	19,5	19,8	20,1	0,61	0,70	0,67	0,75

<sup>1</sup>Foram empregados coeficientes "B" iguais a 0,005 em Jales, Petrolina e Teresina e a 0,004 em Campinas.

Os valores do coeficiente "B" da equação 2 que proporcionaram os melhores desempenhos do modelo "BC" foram iguais a 0,005 em Teresina, Petrolina e Jales; e igual a 0,004 em Campinas. O menor valor de "B" encontrado para Campinas deve-se ao maior valor respectivo de "AT" (Tabela 1), uma vez que, de acordo com BRISTOW & CAMPBELL (1984), o valor de "B" tende a apresentar um comportamento exponencial em relação a AT, com redução dos seus valores para um aumento de "AT". O modelo "BC" também apresentou inclinações das linhas de tendência (I) próximas de 1,00, quando as retas de regressão passaram pela origem, sendo que em todas as localidades o modelo tendeu a superestimar "Rs" (Figura 2).

Os valores de  $R^2$  encontrados para o modelo "BC", entre 0,67 e 0,75 com média igual a 0,70 (Tabela 1), se aproximaram do intervalo originalmente observado pelos autores em estimativas realizadas no estado de Washington,

EUA, que ficou entre 0,70 e 0,90 (BRISTOW & CAMPBELL, 1984). HUNT et al. (1998) e GOODIN et al. (1999) obtiveram, entretanto, valores médios inferiores ao observado no presente trabalho, sendo iguais a 0,68 e 0,56, respectivamente.

O uso na equação 2 de valores de "Tmin" correspondentes à média de dois dias consecutivos ( $Tmin_{[i]}$ ,  $Tmin_{[i+1]}$ ) foi sugerido por BRISTOW & CAMPBELL (1984), a fim de reduzir o efeito do deslocamento de massas de ar quentes ou frias. No presente trabalho, entretanto, foi utilizado apenas o valor de " $Tmin_{[i]}$ ", uma vez que os dados empregados nem sempre representaram dias consecutivos. Além disso, de acordo com BRISTOW & CAMPBELL (1984), advecções em larga escala são mais comuns em regiões de clima temperado do que em regiões tropicais, nas quais o uso de " $Tmin_{[i]}$ " pode ser recomendado. THORNTON & RUNNING (1999), a partir de dados de diferentes localidades dos Estados Unidos, chegaram a verificar que a utilização de valores diários de "Tmin" ( $Tmin_{[i]}$ )

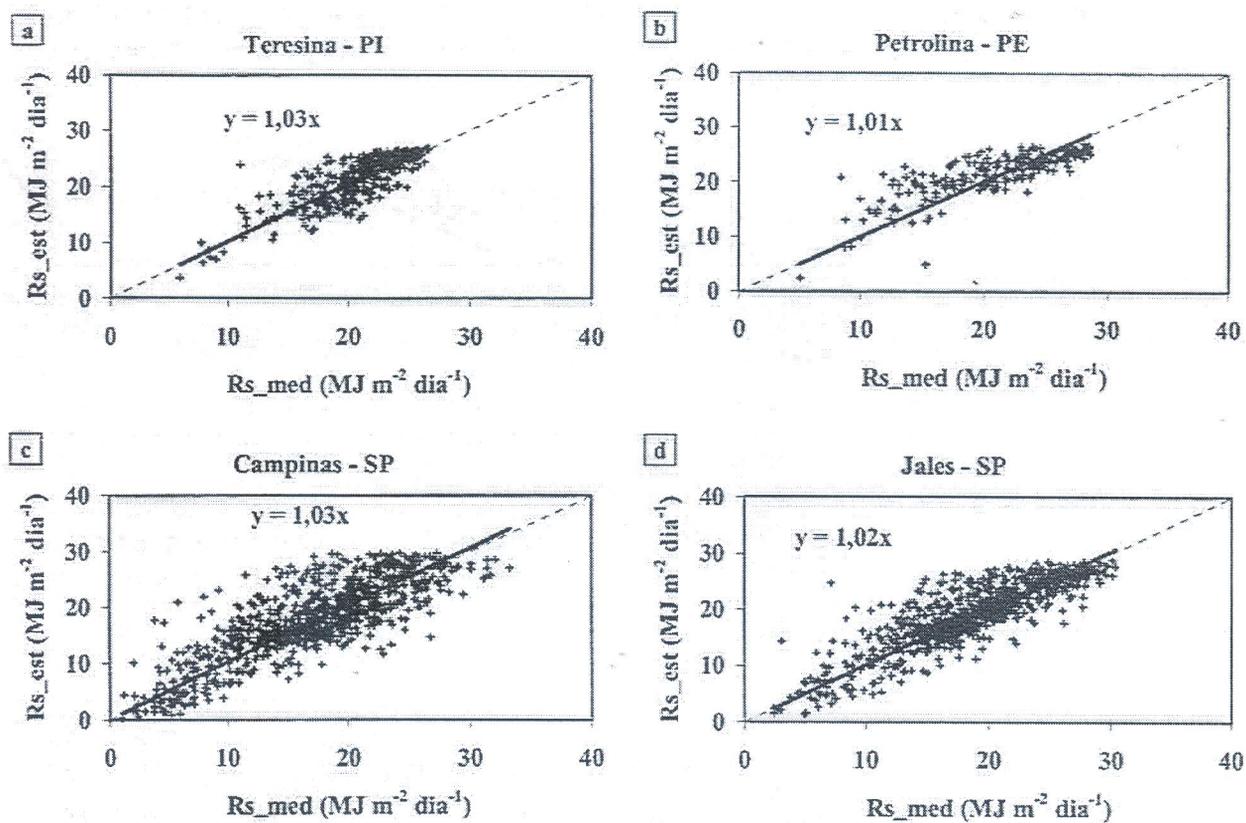


Figura 2. Regressão linear, com a linha de tendência passando pela origem, entre valores da radiação solar global medidos ( $Rs_{med}$ ) e estimados ( $Rs_{est}$ ) empregando-se o modelo de Bristow & Campbell, em quatro localidades brasileiras.

proporcionou resultados melhores do que o uso da média de “ $T_{min_{[t]}}$ ” e “ $T_{min_{[t+1]}}$ ”.

BRISTOW & CAMPBELL (1984) recomendaram, também, ajustes no valor de “AT” na presença de atividades convectivas com a formação de nuvens e ocorrência de precipitações pluviais. Como esses ajustes se baseiam em dados de três dias consecutivos e os registros utilizados nem sempre corresponderam a seqüências diárias (como já mencionado), os ajustes nos valores de “AT” não foram efetuados. Além disso, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação de métodos que se baseiam apenas na temperatura do ar, sem a inclusão de informações sobre a precipitação pluvial, procedimento que também foi adotado por outros autores (GOODIN et al., 1999; MEZA & VARAS, 2000).

O modelo “BC” apresentou valores de “ $R^2$ ” e “c” superiores aos do modelo “H” em todas as localidades (Tabela 1). O desempenho do modelo “BC” foi classificado como “Bom” para as Campinas, Petrolina e Teresina e como “Muito Bom” para Jales. Por outro lado, o modelo “H” apresentou desempenhos classificados como “Regular” para Campinas e Petrolina e como “Bom” para Jales e Teresina.

As quatro localidades estudadas representam regiões continentais do Sudeste e Nordeste do Brasil, sendo que Jales (SP) se encontra a cerca de 50km do estado do Mato Grosso do Sul, que pertence à região Centro-Oeste. Os valores mensais das temperaturas médias do ar dessas regiões variam entre 18°C e 29°C e elas apresentam um período seco mais pronunciado durante o outono e inverno (EMBRAPA, 2003). Em outras regiões semelhantes às estudadas o modelo “BC” deve apresentar, também, desempenho superior ao modelo “H” na estimativa de “ $R_s$ ”. Nessas regiões, caso não tenham sido feitos ajustes locais, pode-se adotar coeficientes “A”, “B” e “C” do modelo “BC” iguais a 0,7, 0,005 e 2,4, respectivamente. Mesmo em Campinas (SP), onde empregou-se um valor de “B” igual a 0,004, o uso do coeficiente “B” igual a 0,005 resulta em valores de  $R^2$  e “c” (0,65 e 0,70, respectivamente) superiores aos obtidos pelo modelo “H” para a mesma localidade (Tabela 1). Em outras regiões do país, entretanto, com condições climáticas diferentes, como o Sul do Brasil, as regiões litorâneas e as

localidades situadas em maiores altitudes, os modelos testados podem apresentar comportamentos diferentes aos observados no presente trabalho.

### Referências Bibliográficas

- ALLEN R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BALL, R.A.; PURCELL, L.C.; CAREY, S.K. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, p.391-397, 2004.
- BRISTOW, K.L.; CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.31, p.159-166, 1984.
- CAMARGO, A.P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- EMBRAPA. **Banco de dados climáticos do Brasil**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2003. Disponível em: <http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br>.
- GOODIN, D.G et al. Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. **Agronomy Journal**, Madison, v.91, p.845-851, 1999.
- HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v.108, n.3, p.225-230, 1982.
- HUNT, L.A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C.J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.91, p.293-300, 1998.
- MEZA, F.; VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.100, p.231-241, 2000.

THORNTON, P.E.; RUNNING, S.W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.93, p.211-228, 1999.

TRNKA, M et al. Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formulae. *Agricultural and Forest Meteorology*. Amsterdam, v.131, p.54-76, 2005.