

# AVALIAÇÃO DO MODELO DE BRISTOW & CAMPBELL NA ESTIMATIVA DIÁRIA DA IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA O VALE DO RIO DOCE, MINAS GERAIS

MARIA JOSÉ HATEM DE SOUZA<sup>1</sup>, ARISTIDES RIBEIRO<sup>2</sup>, FERNANDO PALHA LEITE<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prof<sup>a</sup> Adjunta, Depto de Agronomia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina – MG, 38 3532 1200, CEP:30 1900 000, [mariahatem@yahoo.com.br](mailto:mariahatem@yahoo.com.br), [mjhatem@ufv.br](mailto:mjhatem@ufv.br)

<sup>2</sup> Doutor, Professor, DEA, UFV, Viçosa - MG, 31 3899 1906, CEP: 36571-000, [ribeiro@ufv.br](mailto:ribeiro@ufv.br)

<sup>3</sup> Doutor, Pesquisador, Empresa Celulose Nipo Brasileira S. A. - CENIBRA, 31 3829 5017, [fernando.palha@cenibra.com.br](mailto:fernando.palha@cenibra.com.br)

Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de Julho de 2007 – Aracaju – SE

**RESUMO:** Avaliou-se, neste trabalho, a performance do modelo de Bristow & Campbell na estimativa de totais diários da irradiância solar global (R<sub>g</sub>). Utilizaram-se dados de junho de 2000 a maio de 2006 de cinco estações do vale do Rio Doce, MG: Belo Oriente, Coqueiro, Lagoa Grande, Barão de Cocais e Cataquinho, pertencentes à Empresa Florestal Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA). Avaliou-se o desempenho do modelo, utilizando os coeficientes originalmente propostos por Bristow & Campbell, bem como o coeficiente B anual ajustado e o coeficiente B mensal ajustado. Para todas as metodologias de estimação da R<sub>g</sub>, os melhores resultados foram obtidos para Belo Oriente e Lagoa Grande. Para as demais localidades, a estimativa em base diária não apresentou boa correlação com os dados observados. A estimativa diária empregando os coeficientes B mensais, foi a que teve melhores resultados, para Belo Oriente o R<sup>2</sup> foi de 0,78 e EPE de 2,79 MJ.m<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>.

**PALAVRAS-CHAVE:** irradiância solar global diária, amplitude térmica e irradiância solar

## EVALUATING THE BRISTOW AND CAMPBELL MODEL FOR THE ESTIMATION THE DAILY TOTALS OF THE GLOBAL SOLAR IRRADIANCE RIO DOCE VALLEY – MG

**ABSTRACT:** The performance of the Bristow & Campbell model in estimating the daily totals of the global solar irradiance (R<sub>g</sub>) was evaluated. The data relative to the period from June 2000 to May 2006 from five meteorological stations in Rio Doce valley-MG, that pertain to the Empresa Florestal Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA): Belo Oriente, Coqueiro, Lagoa Grande, Barão de Cocais, and Cataquinho. The model performance was evaluated, by using those coefficients originally proposed by Bristow & Campbell, as well as the annual adjusted B coefficient and the monthly adjusted B. For all the R<sub>g</sub> estimating methodologies, the best results were obtained for Belo Oriente and Lagoa Grande. For the other localities, the daily estimate did not show a good correlation to the observed data. The daily estimate using the monthly B coefficients showed the best results (for Belo Oriente the R<sup>2</sup> = 0,78 and EPE = 2,79 MJ.m<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>).

**KEY WORDS:** daily global solar irradiance, thermal amplitude, solar irradiance

**INTRODUÇÃO:** A energia proveniente do sol é necessária aos processos físicos e biológicos, que ocorrem na superfície terrestre. Sendo fonte primária de energia para todos os processos terrestres, a energia solar constitui o principal elemento meteorológico, que determina a variação dos outros elementos (temperatura, pressão, vento, chuva, umidade, etc). Assim, a irradiância solar é responsável pelo desenvolvimento de tempestades e furacões, bem como pela circulação geral da atmosfera, tratando-se do elemento meteorológico primordial no entendimento da variação dos demais. Estudos com relação à disponibilidade de totais diários da irradiação solar global são importantes no planejamento agrícola, uma vez que esta variável é fundamental para a determinação do saldo de radiação, e para a estimativa da evapotranspiração de uma determinada cultura. Para vários locais dados de irradiação solar global ( $R_g$ ) obtidos por instrumentos, como os piranômetros ou actinógrafos, são inexistentes, entretanto, existem muitas estações meteorológicas, que não medem esta variável, mas que possuem registros de outras medições - como as de insolação, precipitação, umidade relativa, temperatura as quais podem estimar indiretamente este elemento meteorológico. Várias localidades não possuem registros históricos de insolação diária, na tentativa de sanar esta limitação alguns pesquisadores correlacionaram a  $R_g$  com outras variáveis meteorológicas, ou seja: com a precipitação, com a cobertura do céu, com a temperatura, dentre outras variáveis meteorológicas mais comumente mensuráveis. BRISTOW & CAMPBELL (1984) desenvolveram um modelo empírico que estima a irradiação solar global ( $R_g$ ) a partir da temperatura máxima ( $T_x$ ) e mínima ( $T_n$ ) do ar e da irradiação solar no topo da atmosfera ( $R_0$ ). Alguns autores testaram o modelo Bristow & Campbell, como: MEZA & VARAS (2000) para várias localidades do Chile; LIU & SCOTT (2001) para 39 locais na Austrália; THORNTON & RUNNING (1999) em 40 estações nos Estados Unidos; FERRONATO et al. (2003) em Santo Antonio de Leverger, no estado do Mato Grosso; QUEIROZ et al. (2000) para Pelotas, no estado do Rio Grande do Sul. Tais métodos tem sido de grande valia em vários estudos quando não se dispõem de dados medidos de irradiação solar global, nem de insolação, nas estações meteorológicas. Por esta razão este trabalho teve como objetivo avaliar a desempenho do modelo de Bristow & Campbell em cinco localidades do Vale do Rio Doce – MG.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Utilizaram-se dados de irradiância solar global e temperatura do ar de cinco localidades situadas na região do Vale do Rio Doce, Minas Gerais. Esses dados foram obtidos em cinco estações meteorológicas automáticas, sendo estas pertencentes à Empresa Florestal Celulose Nipo-Brasileira – CENIBRA. Na Tabela 1, apresentam-se essas estações e sua localização geográfica.

Tabela 1. Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas no estudo

Local	Latitude	Longitude	Altitude m
	Sul	Oeste	
Lagoa Grande	18° 40'	42° 55'	1012
Cataquinho	18° 42'	42° 29'	1015
Barão de Cocais	19° 29'	42° 52'	1273
Belo Oriente	19° 17'	42° 23'	233
Coqueiro	18° 33'	43° 10'	993

Empregaram-se os dados referentes ao período de junho de 2000 a maio de 2006 para as estações de Lagoa Grande, Cataquinho e Barão de Cocais, bem como os referentes ao período de junho de 2001 a maio de 2006 para as estações de Coqueiro e Belo Oriente.

Adotou-se a metodologia proposta por Bristow & Campbell (1984), para estimativa da irradiância solar global ( $R_g$ ) incidente na superfície terrestre, em função da irradiância no topo da atmosfera ( $R_0$ ) e da variação das temperaturas máxima e mínima do ar ( $\Delta T$ ), conforme a equação:

$$R_g = R_0 A \left[ 1 - \exp(-B \Delta T^C) \right] \quad (1)$$

em que, as constantes empíricas são:  $A = 0,7$ ;  $B = 0,007$  (valor médio entre 0,004 e 0,010); e  $C = 2,4$  - sendo estes os coeficientes citados na literatura. O parâmetro “A” representa a irradiância máxima em um dia de céu claro e os parâmetros “B” e “C” são os controladores da variação de

“A”, caso ocorra aumento na diferença de temperatura. A variação da temperatura foi calculada por: 
$$\Delta T = T_x - \frac{(T_n + T_{n+1})}{2} \quad (2)$$

em que,  $T_x$  é a temperatura máxima do dia (°C);  $T_n$  é a temperatura mínima do dia (°C); e  $T_{n+1}$  é a temperatura mínima do dia posterior (°C).

A irradiância solar no topo da atmosfera ( $R_o$ ) foi obtida, conforme a metodologia apresentada por Iqbal (1983). Primeiramente, estimou-se a  $R_g$  para as cinco localidades, empregando os valores dos coeficientes A, B e C sugeridos originalmente por Bristow & Campbell, posteriormente ajustou-se o modelo de Bristow & Campbell, fixando os valores dos coeficientes A e C e calculando o valor do B médio. Para tal, utilizou-se a metodologia descrita a seguir, a fim de minimizar o erro.

- Calculou-se a transmitância atmosférica diária ( $\tau$ ), ou seja, a razão entre  $R_g$  e  $R_o$  e a variação da temperatura diária ( $\Delta T$ ), Equação 2.
- De posse dos valores diários de  $\tau$  e de  $\Delta T$ , calcularam-se os valores médios mensais sendo, portanto, possível estimar o valor médio de B, para cada mês em estudo. Finalmente, calculou-se o valor médio anual de B para cada localidade. O cálculo de B foi feito de acordo

com a seguinte equação: 
$$B = \frac{\ln(1 - \frac{\tau}{A})}{\Delta T^C} \quad (3)$$

sendo  $\tau$  e  $\Delta T$  valores médios, para cada mês envolvido neste estudo. Utilizando o valor médio de B para cada localidade, estimou-se a  $R_g$  diária.

Na tentativa de melhorar a performance deste modelo, estimou-se a  $R_g$  diária por meio do coeficiente B médio mensal.

Para avaliar o desempenho da estimativa da  $R_g$  calculou-se o  $R^2$ , o erro percentual (E%), em %, o erro médio (EM) e o erro padrão de estimativa (EPE), em  $MJ.m^2.dia^{-1}$ .

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Observa-se na Tabela 2 que a melhor correlação, entre os valores estimados e observados, foi obtida para a localidade de Belo Oriente, seguida de Lagoa Grande e Cataquinho. Para as outras duas localidades a correlação utilizando o valor de B médio, originalmente proposto por Bristow & Campbell (B&C), não foi satisfatória, pois os valores de  $R^2$  foram inferiores a 0,30. Para Belo Oriente, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,64, e o coeficiente de inclinação da reta obtida entre os dados estimados e observados ( $a_1$ ) foi 1,17; enquanto para Lagoa Grande e Cataquinho o  $R^2$  foi de 0,45 e  $a_1$  de 0,90 para Cataquinho e de 0,88 para Lagoa Grande. Para estas localidades o EPE, erro padrão de estimativa, teve os menores valores. Ainda na tabela 2, verifica-se que o modelo de Bristow & Campbell (B&C) superestimou a  $R_g$  em Belo Oriente (erros com valores positivos), mas subestimou em nos outros locais (erros negativos).

Tabela 2. Coeficiente de determinação,  $R^2$ , coeficientes de inclinação da reta obtida entre os dados estimados e observados,  $a_1$ , erro percentual médio, E%, erro médio, EM, e erro padrão de estimativa, EPE, obtidos utilizando os coeficientes propostos originalmente por Bristow & Campbell, na estimação da  $R_g$  diária para as localidades em estudo

Local	$R^2$	$a_1$	E% %	EM $MJ.m^2.dia^{-1}$	EPE $MJ.m^2.dia^{-1}$
Belo Oriente	0,64	1,17	23,53	3,34	4,54
Coqueiro	0,23	0,88	-11,05	-1,87	5,78
Lagoa Grande	0,45	0,88	-7,16	-1,46	5,07
Barão de Cocais	0,23	0,73	-20,26	-3,25	6,65
Cataquinho	0,45	0,90	-4,71	-1,23	4,93

Ao utilizar o coeficiente B anual ajustado à estimativa da  $R_g$  observam-se uma diminuição nos erros e que a inclinação da reta ficou mais próxima da unidade, apesar do  $R^2$  ter diminuído (Tabela 2). Mas para a estimação da  $R_g$  empregando os valores médios mensais ajustados do coeficiente B (Tabela 3) verifica-se uma melhora na correlação dos dados estimados com os

observados para Belo Oriente ( $R^2 = 0,92$ ), Lagoa Grande ( $R^2$  de 0,85), Barão de Cocais ( $R^2 = 0,81$ ) e para Cataquinho ( $R^2$  de 0,56). Para estas mesmas localidades os valores obtidos de  $a_1$  variaram de 0,99 a 1,03 e o EPE foi inferior a  $2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Já para a localidade de Coqueiro não verificou-se correlação entre os dados observados e estimados da Rg. Provavelmente os resultados não muito satisfatórios obtidos para algumas localidades tenham sido devido à limitação do período restrito da série histórica dos dados disponível para este estudo. Nota-se que o ajuste do modelo de B&C, empregando o coeficiente B anual ajustado, melhorou a estimativa da Rg principalmente em Belo Oriente (Tabela 3) seu  $R^2$  elevou-se para 0,70, o EPE foi reduzido para  $3,02 \text{ MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$ , o EM para  $-0,43 \text{ MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$  e o E% reduzido para  $-2,09\%$ . Para as outras localidades, a melhora não foi tão perceptível, pois, apesar dos erros terem reduzido e os coeficientes  $a_1$  terem se aproximados da unidade, os coeficientes de determinação não melhoraram, tendo seus valores reduzidos. Verifica-se também que o menor valor ocorreu em Belo Oriente (0,00371), o qual é menor do que o valor citado por B&C, ou seja 0,004. Para as outras localidades em que a altitude é maior, o valor anual de B foi substancialmente superior ao de Belo Oriente.

Tabela 3.  $R^2$ ,  $a_1$ , E%, EM, e EPE, obtidos utilizando o coeficiente B anual ajustado, na estimação da Rg para as localidades em estudo

Local	B	$R^2$	$a_1$	E% %	EM $\text{MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$	EPE $\text{MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$
Belo Oriente	0,003710	0,71	1,01	-2,09	-0,43	3,02
Coqueiro	0,009591	0,00	0,89	3,52	0,37	5,63
Lagoa Grande	0,008435	0,35	0,96	2,55	-0,10	4,92
Barão de Cocais	0,012164	0,08	0,88	10,93	0,72	6,29
Cataquinho	0,008575	0,30	0,93	6,04	0,25	4,86

Ao ajustar, novamente o coeficiente B para valores mensais (Figura 1), obtiveram-se novos resultados, que podem ser observados na Tabela 4 e Figura 2. Verifica-se que o emprego do coeficiente B mensal ajustado melhorou ainda mais a performance do modelo de B&C para Belo Oriente ( $R^2$  de 0,78;  $a_1$  de 1,02; e EPE de  $2,79 \text{ MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$ ), enquanto que para as outras localidades não notou-se melhora nos resultados estimados (Tabela 4). Para Coqueiro, não se verificou correlação entre os dados observados e estimados da Rg diária, em nenhuma das três metodologias utilizadas.

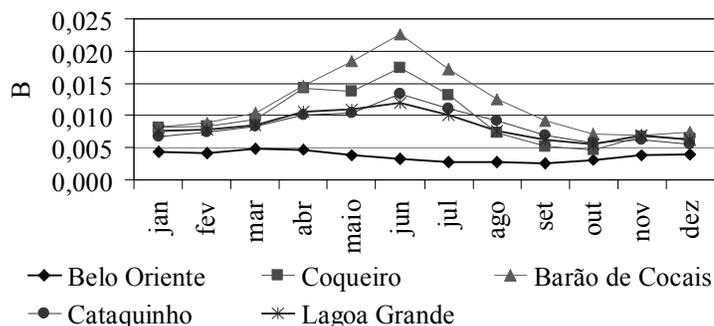


Figura 1. Coeficientes B médios mensais ajustados, relativos a Belo Oriente, Coqueiro, Lagoa Grande, Barão de Cocais e Cataquinho.

Quanto à variação mensal dos valores de B (Figura 1), observa-se que o comportamento para as localidades com maiores altitudes (Coqueiro, Lagoa Grande, Barão de Cocais e Cataquinho, todas acima de 993 m de elevação) este coeficiente atinge um máximo nos meses de inverno, comportamento este não verificado em Belo Oriente (altitude de 233 m) cujos maiores valores de B ocorreram no período de janeiro a abril. Tal variação ocorre em razão de este coeficiente depender das amplitudes térmicas, que é maior na localidade de menor altitude.

**CONCLUSÕES:** A melhor estimativa dos totais diários da irradiância solar global utilizando o modelo de Bristow & Campbell foi obtida empregando-se o coeficiente B mensal ajustado, sendo que o melhor resultado foi obtido para Belo Oriente ( $R^2$  de 0,78 e EPE de  $2,79 \text{ MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$ )

<sup>1</sup>); enquanto que para as demais localidades as estimativas diárias não apresentam resultados satisfatórios. Tabela 4.  $R^2$ ,  $a_1$ , E%, EM, e EPE, obtidos utilizando os coeficientes B médios mensais ajustados, na estimação da  $R_g$  para as localidades em estudo

Local	$R^2$	$a_1$	E% %	EM MJ.m <sup>2</sup> .dia <sup>-1</sup>	EPE
Belo Oriente	0,78	1,02	-2,56	-0,42	2,79
Coqueiro	0,00	0,96	-1,15	-0,42	4,81
Lagoa Grande	0,40	0,99	1,46	-0,47	4,70
Barão de Cocais	0,20	0,97	4,25	-0,31	5,55
Cataquinho	0,35	0,97	3,35	-0,32	4,5

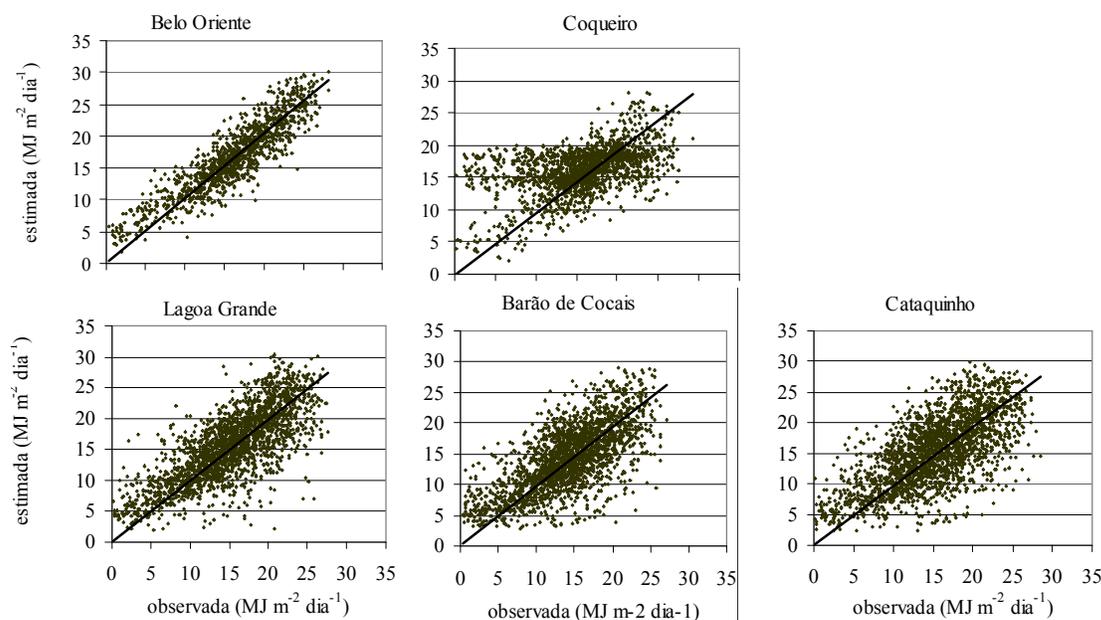


Figura 2. Irradiância solar global diária observada e estimada, utilizando os coeficientes B médios mensais ajustados, para Belo Oriente, Coqueiro, Lagoa Grande, Barão de Cocais e Cataquinho.

## REFERÊNCIAS:

- BRISTOW, K. L., CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest meteorology*. 31, p.159-166, 1984.
- FERRONATO, A., CAMPELO JÚNIOR, J. H., BEZERRA, E. L., Mendonça. Estimativa da radiação solar global baseada em medidas de temperatura do ar. In XIII Congresso Brasileiro De Agrometeorologia, Anais..., Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2003. CD-ROOM.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press, 1983. 390p.
- LIU, D.L., SCOTT, B.J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. *Agricultural and Forest meteorology*. 106, p.41-59, 2001.
- MEZA, F., VARAS, E. Estimation of monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest meteorology*. 100, p.231-241, 2000.
- QUEIROZ, M.R., NOGUEIRA, C.B.R., ASSIS, S. V. Avaliação de um método empírico para estimativa da radiação solar global – Modelo de BRISTOW – CAMPBELL. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Anais..., Rio de Janeiro –RJ, 2000. 1 CD-ROOM.
- THORNTON, P.E., RUNNING, S.W. An improved algorithm for estimating daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest meteorology*. 93, p.211-228, 1999.