

## **AValiação DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR COM BASE NA TEMPERATURA DO AR PARA O NORTE DE MINAS GERAIS.**

FÁBIO J. CARVALHO<sup>1</sup>, CLÁUDIO R. SILVA<sup>2</sup>, HEYDER F. NASCIMENTO<sup>3</sup>, LUCAS A. BARBOSA<sup>3</sup>, MARCO TÚLIO G. PAULA<sup>3</sup>, VALDINEY J. SILVA<sup>5</sup>, RAFAEL R. FINZI<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Graduando em Agronomia, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Fone (34) 9159 6020, fabiojanoni@hotmail.com.

<sup>2</sup>Eng. Agrônomo, Prof. Doutor, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

<sup>3</sup>Graduando em Agronomia, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

<sup>4</sup>Graduando em Agronomia, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Bolsista PET/MEC.

<sup>5</sup>Mestrando em Agronomia, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de Julho de 2011 – SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari - ES.

**RESUMO:** Estimar a radiação solar global com base na temperatura do ar diária oferece uma alternativa importante em ocasiões aonde a mesma não pode ser medida por aparelhos convencionais. O trabalho avaliou dados de 9 cidades do Norte de Minas Gerais extraídos das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no período de 2008 a 2010. Com base nestes dados foram testadas 6 equações que utilizam a temperatura diária do ar para o cálculo da radiação global (Qg). As equações foram previamente calibradas para cada cidade estudada. O resultado obtido foi satisfatório, principalmente para os modelos de Bristow e Campbell e de Donatelli e Campbell, sendo a RQME entre Qg estimado e do Qg observado, em média, de 2,96 e 3,04 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Considerando que os dados de temperatura são mais fáceis de serem obtidos, para os estudos que não requerem grande exatidão na estimativa da radiação solar incidente na superfície, todos os modelos se tornam atrativos de utilização.

**PALAVRAS-CHAVE:** Irradiância, Bristow e Campbell, métodos empíricos.

## **EVALUATION OF MODELS FOR ESTIMATION OF SOLAR RADIATION BASED ON THE AIR TEMPERATURE TO THE NORTH OF MINAS GERAIS.**

**ABSTRACT:** To estimate the global solar radiation based on daily air temperature provides an important alternative in instances where it can not be measured by conventional devices. The study evaluated data from 9 cities in North of Minas Gerais extracted from meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET) for the period from 2008 to 2010. Based on these data were tested 6 models based on the daily air temperature to estimate the global radiation (Qg). The equations were previously calibrated for each city studied. For the models evaluated, the model of Bristow and Campbell and Donatelli and Campbell had the best estimate of the daily incident radiation with RMSE of 2,96 and 3,04 MJ m<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>, respectively. Whereas the temperature data are easier to obtain, for studies that do not require great accuracy in estimating the solar radiation incident on the surface, all the models become attractive to use.

**KEYWORDS:** Irradiance; Bristow and Campbell; empirical methods.

**INTRODUÇÃO:** A radiação solar é a principal fonte primária de energia para os processos físicos e químicos na superfície terrestre e atmosfera. Afeta diretamente também os seres vivos, sendo envolvida em processos como a fotossíntese, evaporação e transpiração (PEREIRA et al., 2002). Calcular a radiação solar que chega a superfície terrestre é de extrema importância para vários estudos. Entretanto os dados referentes à energia solar são de difícil obtenção, uma vez que instrumentos para sua medição, como o piranômetro ou actinômetro, não estão presentes na maioria das estações convencionais. Por este motivo, várias equações empíricas foram criadas, procurando por meio de dados de mais fácil obtenção como a temperatura do ar, quantificar a radiação solar. Assim, para regiões aonde não existam registros, há a possibilidade da estimativa da radiação. O trabalho teve como objetivo calibrar e analisar o desempenho de seis modelos empíricos, que estimam a radiação solar global baseadas na temperatura do ar, para a região Norte de Minas Gerais.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O experimento foi realizado a partir dos dados coletados nas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no período de 2008 a 2010, no qual são armazenados e disponíveis no endereço eletrônico <http://www.inmet.gov.br> de responsabilidade da própria instituição federal. A região na qual foram submetidos os estudos de calibração e performances dos modelos foi Norte de Minas que engloba as cidades listadas na Tabela 1 e ilustradas na Figura 1.

**Tabela 1.** Localização geográfica das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a serem utilizadas no estudo.

Ordem	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude	Período	Omissões (%)
1	Águas Vermelhas	-15,75°	-41,45°	750 m	2009/2010	0,96
2	Chapada Gaúcha	-15,30°	-45,61°	880 m	2008/2009	0,96
3	Espinosa	-14,91°	-42,80°	570 m	2009/2010	2,05
4	Mocambinho	-15,08°	-44,01°	460 m	2009/2010	0,95
5	Montalvânia	-14,40°	-44,40°	512 m	2009/2010	1,10
6	Pirapora	-17,25°	-44,83°	503 m	2008/2009	0,96
7	Rio Pardo de Minas	-15,72°	-42,43°	853 m	2009/2010	1,92
8	Salinas	-16,16°	-42,30°	495 m	2008/2009	0,55
9	São Romão	-16,36°	-45,12°	460 m	2008/2009	0,96

Os dados inicialmente reportados em intervalos horários foram contabilizados para valores diários, obtendo-se os valores de temperatura máxima e mínima e total diário de radiação solar incidente na superfície do solo. Logo em seguida os mesmos foram submetidos a uma triagem para verificar a integridade e coerência dos dados. Para tanto foi utilizado o critério de eliminação feito por Liu et al. (2009), em que, a) dados ausentes para qualquer um dos elementos  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  ou  $Q_g$ ; b)  $T_{\max} < T_{\min}$ ; c)  $Q_g/Q_o > 1$ . A porcentagem de omissões foi calculada dividindo os dados diários perdidos pelo total de dias do período considerado e estão apresentados na Tabela 1. Dentro do período analisado, um ano foi usado na calibração dos coeficientes e o outro na avaliação do desempenho dos modelos. O critério de escolha foram os anos que apresentaram as menores porcentagens de omissões. Os modelos empíricos utilizados estão listados na Tabela 2.



**Figura 1.** Localização das cidades da região Norte de Minas. Desenho sem escala.

**Tabela 2.** Resumo dos modelos estudados.

Modelo n°.	Equação	Coefficientes	Fonte
1	$Q_g = a \times (1 + 2,7 \times 10^{-3} \times Alt) \times \sqrt{\Delta T_1} \times Q_0$	$a$	Annandale et al. (2002)
2	$Q_g = a \times (1 - \exp(-b \times \Delta T_1^2)) \times Q_0$	$a, b, c$	Bristow e Campbell (1984)
3	$Q_g = (a \times \sqrt{\Delta T_1} + b) \times Q_0$	$a, b$	Chen et al. (2004)
4	$Q_g = a \times \left(1 - \exp\left(-b \times \frac{\Delta T_1^2}{\Delta T_m}\right)\right) \times Q_0$	$a, b, c$	Donatelli e Campbell (1998)
5	$Q_g = a \times \sqrt{\Delta T_1} \times Q_0$	$a$	Hargreaves (1981)
6	$Q_g = a \times \sqrt{\Delta T_1} \times Q_0 + b$	$a, b$	Hunt et al. (1998)

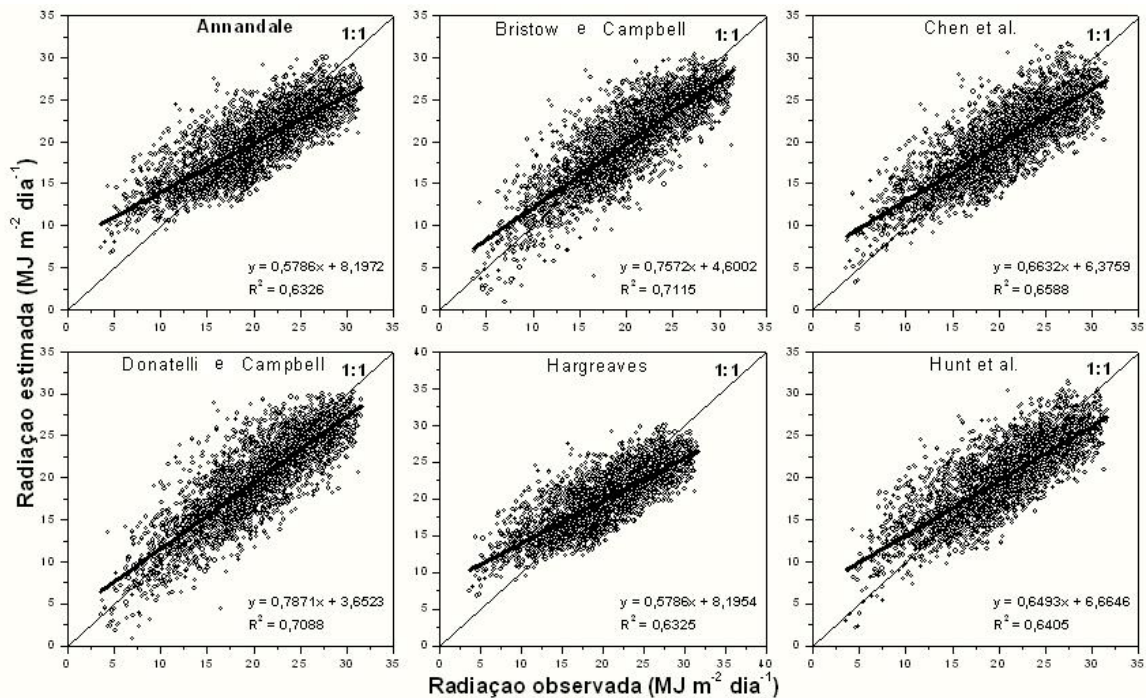
Em que:  $Q_g$  – Irradiância terrestre global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );  $Q_0$  – Irradiância solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );  $Alt$  – Altitude do local (m);  $\Delta T_1$  – Diferença entre a temperatura máxima e a mínima do dia ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta T_2$  – Diferença entre a temperatura máxima e a média da temperatura mínima dos dois dias consecutivos ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta T_m$  – Média mensal de  $\Delta T_2$ . O ajuste dos coeficientes dos modelos foi realizado a partir do método dos mínimos quadrados da diferença entre os valores observados e estimados. Também foram utilizadas outras ferramentas estatísticas como: regressão linear, coeficiente de determinação e raiz quadrada média do erro (RQME).

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Os coeficientes calculados e utilizados nas equações encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3.** Coeficientes dos modelos empíricos calibrados para as diferentes cidades da região Noroeste de Minas Gerais. Equações analisadas: 1) Annandale et al., 2) Bristow e Campbell, 3) Chen et al., 4) Donatelli e Campbell, 5) Hargreaves, 6) Hunt et al.

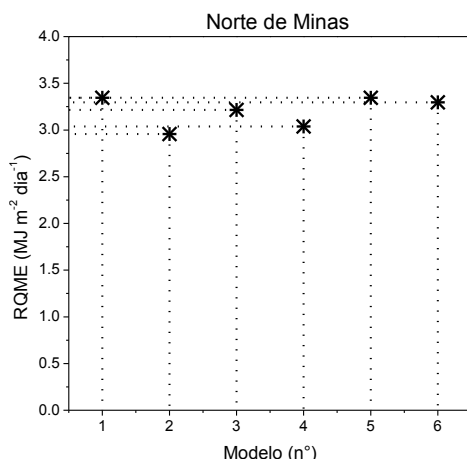
Modelo	1	2			3		4			5	6	
Coefficiente	$a$	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$a$	$b$	$c$	$a$	$a$	$b$
Águas Vermelhas	0,147	0,791	0,046	1,270	0,150	0,000	0,791	0,538	1,270	0,150	0,150	0,000
Chapada Gaúcha	0,172	0,756	0,009	2,142	0,282	-0,358	0,756	0,094	2,139	0,176	0,155	2,558
Espinosa	0,179	0,725	0,013	2,086	0,230	-0,163	0,706	0,071	2,438	0,181	0,173	1,067
Mocambinho	0,166	0,698	0,009	2,168	0,213	-0,162	0,773	0,167	1,882	0,168	0,207	-4,938
Montalvânia	0,160	0,781	0,014	1,802	0,217	-0,206	0,748	0,099	2,156	0,163	0,190	-3,711
Pirapora	0,163	0,676	0,008	2,306	0,180	-0,050	0,676	0,085	2,305	0,166	0,179	-1,650
Rio Pardo de Minas	0,155	0,807	0,032	1,453	0,228	-0,239	0,773	0,213	1,717	0,159	0,180	-2,588
Salinas	0,148	0,763	0,029	1,468	0,202	-0,193	0,763	0,340	1,467	0,150	0,205	-7,212
São Romão	0,158	0,708	0,008	2,172	0,192	-0,125	0,708	0,094	2,170	0,160	0,183	-3,126

Os coeficientes encontrados se assemelham com os valores encontrados por Liu et al.(2009), na China. Dos valores obtidos pelas equações foi criado um gráfico comparando radiação estimada com a observada, gerando uma regressão linear, que se encontra na Figura 2.



**Figura 2.** Regressão linear para cada modelo estudado para o Norte de Minas. A regressão foi gerada a partir da radiação observada e da radiação estimada.

Todas as equações superestimam o valor da radiação observada até o valor aproximado de  $17,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Após este valor as equações começam a subestimar o valor da radiação observada. Quanto mais baixa ou mais alta a radiação, maior é o erro da equação. Provavelmente, isto se deva a grande concentração de dados de radiação observada em torno da média, que foi de  $20,59 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . O melhor resultado de ajuste foi para o método de Bristow e Campbell, seguido do modelo de Donatelli e Campbell que explicaram 71,1% e 70,8% da variação unitária na radiação observada. A Figura 3 apresenta os RQME obtidos para cada modelo, comprovando que os modelos Bristow e Campbell e Donatelli e Campbell apresentaram melhores resultados com um erro de  $2,96$  e  $3,04 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , respectivamente. O modelo com maior erro foi o de Hunt et. al.. Entretanto a diferença do erro entre este modelo com o de Bristow e Campbell é de apenas  $0,34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ .



**Figura 3.** Raiz Quadrada do Erro Médio (RMQE) em função dos modelos empíricos na região Norte de Minas Gerais: 1) Annandale et al., 2) Bristow e Campbell, 3) Chen et al., 4) Donatelli e Campbell, 5) Hargreaves, 6) Hunt et al.

**CONCLUSÃO:** Para os modelos avaliados, os modelos de Bristow e Campbell e Donatelli e Campbell apresentaram a melhor estimativa da radiação incidente diária com RQME de 2,96 e 3,04 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Considerando que os dados de temperatura são mais fáceis de serem obtidos, para os estudos que não requerem grande exatidão na estimativa da radiação solar incidente na superfície, todos os modelos se tornam atrativos de utilização, seja o de Bristow e Campbell, com menor erro, ou então o de Hargreaves, que possui uma equação mais sucinta e fácil de ser utilizada comparada às outras.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANNANDALE, J.G.; JOVANIC, N.Z.; BENADE, N.; ALLEN, R.G. Software for missing data error analysis of Penman–Monteith reference evapotranspiration. **Irrigation Science**, v.21,p57–67, 2002.
- BRISTOW, K.L., CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.31, p.159-166, 1984.
- CHEN, R.S.; ERSI, K.; YANG, J.P.; LU, S.H.; ZHAO, W.Z. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**,v.45, n.1759–1769, 2004.
- DONATELLI, M.; CAMPBELL, G.S. A simple model to estimate global solar radiation. In: **Proceedings of 5th Congress of the European Society for Agronomy**, 1998, Nitra, Slovakia Republic, 28 June–2 July 1998.
- HARGREAVES, G.H. Responding to tropical climates. In: **The 1980–81 Food and Climate Review**, The Food and Climate Forum, Aspen Institute for Humanistic Studies, Boulder, Colo, pp. 29–32. 1981.
- HUNT, L.A.; KUCHAR, L. SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.91, n.3-4, 1 p. 293-300, 1998.
- LIU,X.;MEI,X.;LI,Y.; ZHANG;Y.; WANG,Q.; JENSEN,R.J.; PORTER,J.R. Calibration of the Angstrom-PreScott coefficients (a, b) under different timescales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.697–710, 2009a.
- PEREIRA, A. R.; Angelocci, L. R.; Sentelhas, P, C. **Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba- RS: Livraria e editora Agropecuária Ltda. 478p. 2002.