

# **AValiação DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA GLOBAL PARA AS REGIÕES METROPOLITANA, VALE DO RIO DOCE E ZONA DA MATA NO ESTADO DE MINAS GERAIS COM BASE NA TEMPERATURA DO AR**

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

<sup>1</sup>Mestrando em Agronomia, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, FONE (0xx34) 9119-5593, neyjosilva@hotmail.com.

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

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

**RESUMO:** A radiação solar é fonte primária de energia para todos processos terrestres. À quantidade de radiação solar que atinge a superfície denomina-se Irradiância solar global terrestre ( $Q_g$ ). Esta, pode ser medida diretamente por aparelhos específicos ou estimada a partir de outros elementos meteorológicos. O alto custo dos aparelhos de medição direta da  $Q_g$  dificultam esse processo. Assim, esse trabalho objetivou calibrar e avaliar 06 modelos empíricos de estimativa da  $Q_g$  para as condições climáticas das regiões Metropolitana, Vale do Rio Doce e Zona da Mata no Estado de Minas Gerais. Os modelos propostos por Donatelli e Campbell com  $R^2$  0,73 e QMRE 3,11 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, Bristow e Campbell com  $R^2$  0,73 e QMRE 3,10 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, e Chen et al com  $R^2$  0,72 e QMRE 3,15 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, foram os mais eficientes apresentando os melhores ajustes e a menor RQME. Todos modelos tenderam a superestimar os menores valores de  $Q_g$  e subestimar os maiores.

**PALAVRAS-CHAVE:** radiação solar, Hargreaves, calibração

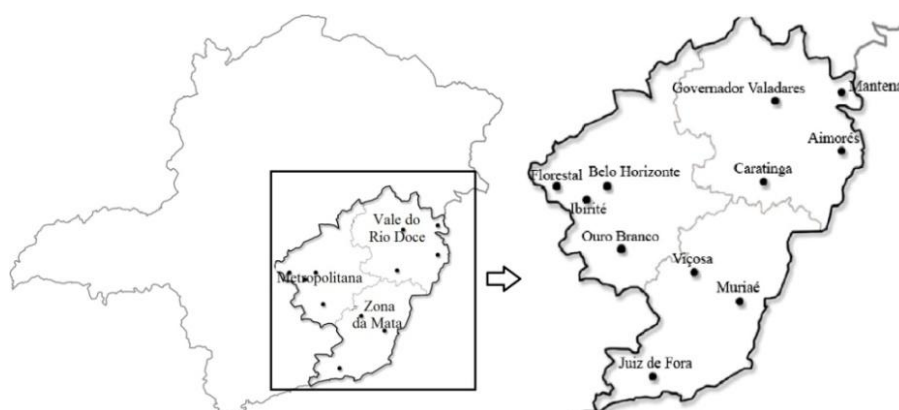
## **EVALUATION OF MODELS FOR ESTIMATION OF GLOBAL IRRADIANCE FOR METROPOLITANA, VALE DO RIO DOCE AND ZONA DA MATA REGIONS IN THE STATE OF MINAS GERAIS BASED AIR TEMPERATURE**

**ABSTRACT:** Solar radiation is the primary source of energy for all terrestrial processes. The quantity of solar radiation that reaches the surface is called a global terrestrial solar irradiance ( $Q_g$ ). This can be directly measured by specific devices or estimated by other weather elements. The high cost of the equipment for direct  $Q_g$  difficult this process. Thus, this study aimed to evaluate and calibrate 06 models of estimating  $Q_g$  for the climatic conditions of regions Metropolitana, Vale do Rio Doce and Zona da Mata in Minas Gerais. The models proposed by Donatelli and Campbell with  $R^2$  0.73 and 3.11 RMSE MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, Bristow and Campbell with  $R^2$  0.73 and 3.10 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> RMSE, and Chen et al,  $R^2$  0.72 and 3.15 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> RMSE, were the most efficient and give the best fit for lower RMSE. All the models tended to overestimate low values of  $Q_g$  and underestimate larger ones.

**KEYWORDS:** solar radiation, Hargreaves, calibration.

**INTRODUÇÃO:** A radiação solar é fonte primária de energia para todos processos terrestres, desde a fotossíntese vegetal, a manutenção da vida ao desenvolvimento de furacões e tempestades (Pereira et al., 2007). À quantidade de radiação solar que atinge a superfície denomina-se Irradiância solar global terrestre ( $Q_g$ ). Esta pode ser medida diretamente por aparelhos específicos ou estimada através de outro elemento meteorológico. Uma das dificuldades da mediação direta da  $Q_g$  é o alto custo desses equipamentos. Modelos de estimativas da  $Q_g$  através da temperatura do ar tornam-se uma alternativa a esses aparelhos. Há diversos modelos propostos sendo testados e avaliados em diferentes partes do mundo. Assim, esse trabalho objetivou calibrar e avaliar alguns desses modelos às condições climáticas das regiões Metropolitana, Vale do Rio Doce e Zona da Mata no Estado 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. As regiões onde foram submetidos os estudos de calibração e performances dos modelos foram a Metropolitana, Vale do Rio Doce e Zona da Mata que englobam as cidades ilustradas na Figura 1 e listadas na Tabela 1.



**Figura 1.** Localização das cidades das regiões Metropolitana, Vale do Rio Doce e Zona da Mata. Desenho sem escala.

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

Ordem	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude	Período	Omissões (%)
1	Aimorés	-19,50°	-41,06°	193m	2008 e 2009	1,78
2	Belo Horizonte	-19,88°	-43,97°	869m	2008 e 2009	1,78
3	Caratinga	-19,74°	-42,14°	615m	2008 e 2009	0,82
4	Florestal	-19,88°	-44,42°	742m	2009 e 2010	0,82
5	Governador Valadares	-18,79°	-41,99°	263m	2009 e 2010	2,88
6	Ibirité	-20,03°	-44,01°	816m	2009 e 2010	1,64
7	Juiz de Fora	-21,77°	-43,36°	950m	2008 e 2009	0,96
8	Mantena	-18,78°	-40,99°	270m	2008 e 2009	0,68
9	Muriaé	-21,10°	-42,38°	270m	2009 e 2010	1,78
10	Ouro Branco	-20,56°	-43,76°	1052m	2008 e 2010	0,55
11	Viçosa	-20,77°	-42,87°	712m	2008 e 2009	1,92

Os dados reportados em intervalos horários foram contabilizados para diários, obtendo-se valores de temperatura máxima e mínima e total diário de radiação solar incidente na superfície do solo. Em seguida, verificou-se a integridade e coerência dos dados utilizando o critério de eliminação feito por Liu et al. (2009): a) dados ausentes para qualquer um dos elementos  $T_{\text{máx}}$ ,  $T_{\text{mín}}$  ou  $Q_g$ ; b)  $T_{\text{máx}} < T_{\text{mín}}$ ; 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. No período analisado, escolheu-se os anos com as menores omissões, usando um ano na calibração dos coeficientes e o outro na avaliação do desempenho dos modelos empíricos que estão listados na Tabela 2.

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

Modelo nº	Equação	Coefficientes	Fonte
1	$Q_g = a \times (1 + 2,7 \times 10^{-5} \times Alt) \times \sqrt{\Delta T_1} \times Q_o$	$a$	Annandale et al. (2002)
2	$Q_g = a \times (1 - \exp(-b \times \Delta T_2^c)) \times Q_o$	$a, b, c$	Bristow e Campbell (1984)
3	$Q_g = (a \times \sqrt{\Delta T_1} + b) \times Q_o$	$a, b$	Chen et al. (2004)
4	$Q_g = a \times \left(1 - \exp\left(-b \times \frac{\Delta T_2^c}{\Delta T_m}\right)\right) \times Q_o$	$a, b, c$	Donatelli e Campbell (1998)
5	$Q_g = a \times \sqrt{\Delta T_1} \times Q_o$	$a$	Hargreaves (1981)
6	$Q_g = a \times \sqrt{\Delta T_1} \times Q_o + b$	$a, b$	Hunt et al. (1998)

Em que:  $Q_g$ , Irradiância terrestre global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $Q_o$ , Irradiância solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $Alt.$ , Altitude local (m);  $\Delta T_1$ , Diferença entre a temperatura máxima e mínima do dia ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta T_2$ , Diferença entre a temperatura máxima e a média da mínima dos dois dias consecutivos ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta T_m$ , Média mensal de  $\Delta T_2$ .

Os ajustes dos coeficientes dos modelos foram realizados 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).

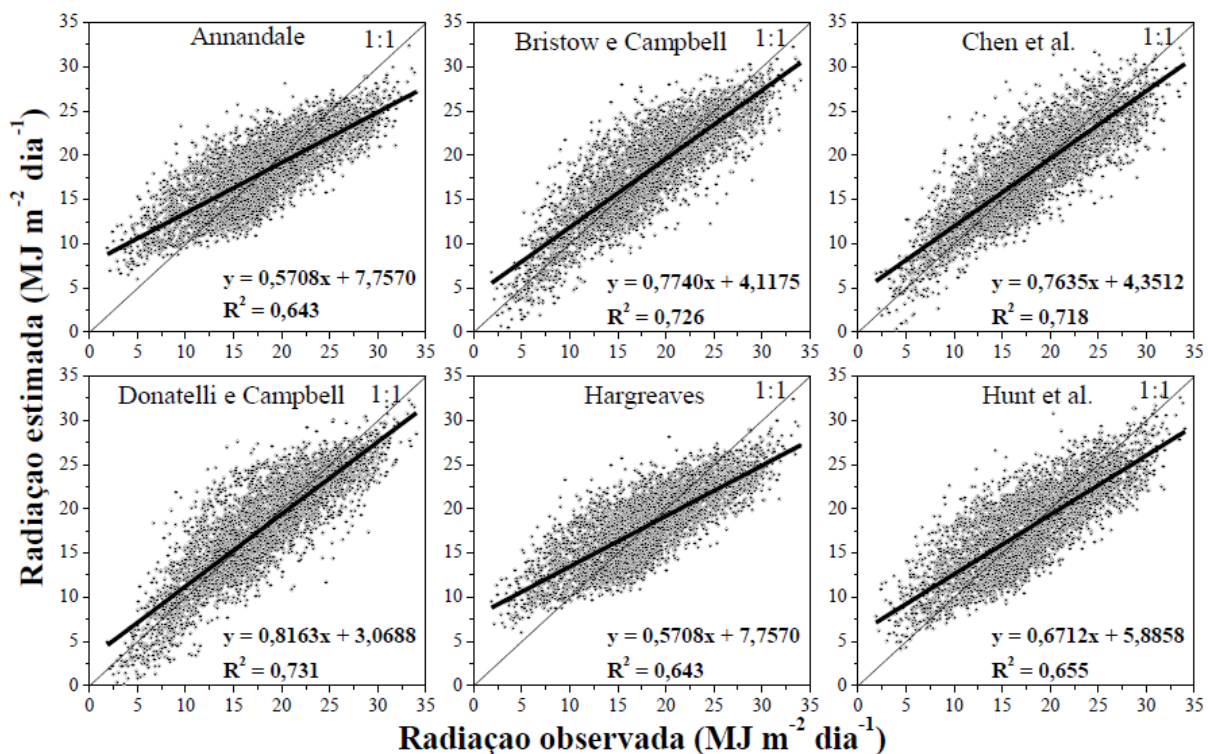
**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A Tabela 3 apresenta os coeficientes de calibração dos modelos de estimativas de  $Q_g$  avaliados.

**Tabela 3:** Coeficientes de calibração dos modelos avaliados.

Cidades	Modelos*											
	1		2		3		4		5		6	
	$a$	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$a$	$b$	$c$	$a$	$a$	$b$
Aimorés	0,175	0,734	0,016	1,924	0,300	-0,399	0,717	0,059	2,441	0,176	0,218	-4,646
Belo Horizonte	0,167	0,713	0,009	2,222	0,315	-0,458	0,662	0,027	2,851	0,170	0,171	-0,102
Caratinga	0,157	0,762	0,022	1,702	0,255	-0,309	0,751	0,092	1,702	0,159	0,218	-6,701
Florestal	0,161	0,787	0,017	1,741	0,253	-0,325	0,780	0,108	2,028	0,165	0,217	-6,687
Governador Valadares	0,162	0,763	0,027	1,607	0,254	-0,304	0,738	0,223	1,758	0,163	0,212	-5,774
Ibirité	0,170	0,658	0,010	2,312	0,320	-0,446	0,632	0,040	2,768	0,173	0,147	2,788
Juiz de Fora	0,156	34,856	0,001	1,031	0,305	-0,424	0,686	0,110	2,093	0,160	0,173	-1,357
Mantena	0,159	0,734	0,016	1,857	0,284	-0,404	0,687	0,070	2,302	0,160	0,190	-3,369
Muriaé	0,155	0,662	0,020	1,850	0,243	-0,285	0,656	0,157	1,988	0,156	0,186	-3,467
Ouro Branco	0,146	0,684	0,025	1,695	0,253	-0,328	0,639	0,123	2,058	0,150	0,173	-2,587
Viçosa	0,141	0,741	0,017	1,724	0,240	-0,316	0,701	0,075	2,144	0,144	0,184	-4,627

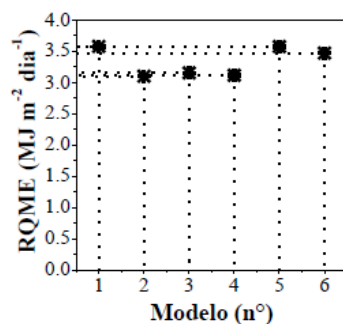
\* Modelos de estimativas de  $Q_g$ : Annandale (1); Bristow e Campbell (2); Chen et al. (3); Donatelli e Campbell (4); Hargreaves (5); Hunt et al. (6).

A Figura 2 mostra a regressão linear entre a radiação solar estimada e a observada. Nota-se que o modelo proposto por Donatelli e Campbell apresentou maior  $R^2$ , seguido pelos modelos de Bristow e Campbell e Chen et al., com valores de 0,73, 0,73 e 0,72, respectivamente. Os menores valores de  $R^2$  foram obtidos nos modelos de Annandale e Hargreaves, ambos com valor de 0,64, seguido pelo modelo de Hunt et al. com  $R^2$  de 0,66. Liu et al. (2009) encontraram  $R^2$  semelhantes aos aqui encontrados para o modelo de Bristow e Campbell para três regiões da China. Para o modelo de Hargreaves, Liu et al. (2009) e Borges et al. (2010) obtiveram  $R^2$  superiores aos encontrados. Observa-se ainda na Figura 3, que todos os modelos tiveram comportamento semelhante, superestimando baixos valores de  $Q_g$  e subestimando os mais altos. Esse resultados corroboram com os obtidos por Borges et al. (2010) para o modelo de Hargreaves. Provavelmente, isto se deva à grande concentração de dados de radiação observada em torno da média, que foi de  $17,83 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ .



**Figura 2:** Relação entre a radiação estimada e a observada conforme modelo indicado.

Os valores de RMQE para os modelos avaliados estão presente na Figura 3. Observa-se que foram próximos sendo a diferença entre a maior e menor RQME de apenas  $0,48 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . O modelo que apresentou a menor RQME foi o proposto por Bristow e Campbell com RQME de  $3,10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Logo em seguida, com RQME de  $3,11$  e  $3,15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , se encontram os modelos de Donatelli e Campbell e Chen et al., respectivamente. Os modelos propostos por Annandale et al. e Hargreaves apresentaram os maiores valores em relação aos demais, ambos com RQME de  $3,58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , seguidos pelo modelo de Hunt et al. com RQME de  $3,47 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Esses resultados contrariam aos obtidos por Borges et al. (2010) para a região do Recôncavo Sul da Bahia onde a RQME foi bastante variável entre os modelos avaliados e Hargreaves apresentou menor RQME. De maneira geral, os valores de QMRE aqui obtidos foram inferiores aos determinados por Liu et al. (2009) para as condições climáticas da China e por Fortin et al. (2008) para o Canadá.



**Figura 3:** Raiz Quadrada Média do Erro (RQME) da Irradiância global terrestre estimada pelo modelos de: Annandale (1); Bristow e Campbell (2); Chen et al. (3); Donatelli e Campbell (4); Hargreaves (5); Hunt et al (6).

**CONCLUSÃO:** Todos os modelos de estimativas da Qg apresentaram resultados compatíveis com os relatados na literatura, porém tenderam a superestimar baixos valores e subestimar os mais altos. Os modelos de Donatelli e Campbell, Bristow e Campbell e Chen et al. com RQME de 3,10, 3,11 e 3,15 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente, tiveram as melhores performances.

#### 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, p. 57-67, 2002.
- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 74-80, 2010.
- 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, p. 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, v. 28 Jun-2 Jul, 1998.
- FORTIN, J. G.; ANCTIL, F.; PARENT, L.; BOLINDER, M. A. Comparison of empirical daily surface incoming solar radiation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 48, p. 332-340, 2008.
- 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, p. 29-32, 1981.
- HUNT, L.A.; KUCCHAR, L. SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.91, n.3-4, p. 293-300, 1998.
- LIU,X.;MEL,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. **Meteorologia Agrícola**. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007, 192 p.