



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

Calibração e validação de modelos de estimativa de Radiação Solar Global para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul



João Rodrigo de Castro¹, Santiago Viana Cuadra², Luciana Barros Pinto³, Alexandre Bryan Heinemann⁴, João Marcelo H. de Souza⁵, Renã Araújo⁶

^{1, 5, 6}Meteorologista, Mestrando em Meteorologia, PPG em Meteorologia - Universidade Federal de Pelotas, joaorodrigo2005@gmail.com¹

²Doutor Pesquisador Embrapa Clima Temperado (CPACT)

³Doutora Profª. Faculdade de Meteorologia – Universidade Federal de Pelotas

⁴Doutor Pesquisador Embrapa Arroz e Feijão (CNPAPF)

RESUMO: Radiação Solar Global (Rs) é o elemento base para o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas. No caso particular do arroz de terras baixas (irrigado), sistema adotado na Região Sul do Brasil, a radiação solar incidente é uma das principais variáveis ambientais relacionadas com a produtividade. Apesar da importância dessa variável, a mesma nem sempre é registrada, seja nas estações convencionais ou em estações automáticas, devido ao elevado custo dos sensores. Sendo assim, métodos de estimativa da Rs apresentam-se como uma alternativa para suprir esta lacuna. O presente trabalho apresenta os resultados da calibração e validação de seis modelos de estimativa de Rs baseados na amplitude térmica diária para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul; modelo Bristow-Campbell (BC), Donatelli-Campbell (CD), Donatelli-Bellocchi (DB), Donatelli (DCBB), Hargreaves por Hunt (HG1) e Hargreaves por Chen (HG2). Foram utilizados dados diários de dez estações meteorológicas automáticas dentro de período de 2008 à 2014, considerando dois locais para cada uma das regiões orizícolas, onde os anos pares foram utilizados para a calibração dos modelos e os anos ímpares para a validação. Para avaliar a qualidade das estimativas foram considerados o Erro Médio Absoluto (EMA), a Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RQME) e o coeficiente de correlação (r). Também foi aplicado o teste de *Wilcox* para verificar se as estimativas dos diferentes modelos são semelhantes. O melhor ajuste obtido foi para o modelo BC na Região da Campanha, com EMA de $3,31 \pm 0,16 \text{ MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$. O pior desempenho foi o observado na Região da Planície Costeira Externa, obtido pelo modelo DB com valor do EMA de $7,24 \pm 5,14 \text{ MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$. De acordo com o teste de *Wilcox* os modelos HG1, HG2, BC e DC não apresentaram evidência para diferença entre si na estimativa de Rs. Já os modelos DB e DCBB apresentaram evidência de diferença ao nível de significância de 1%.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação Solar Global, Modelos de Estimativa, Arroz Irrigado.

Calibration and validation of Global Solar Radiation estimation models for rice growing regions in the Rio Grande do Sul state.

ABSTRACT: Global Solar radiation (Rs) is the basic element for the growth and development of agricultural crops. In the particular case of lowland rice (irrigated), adopted system in south of Brazil, the incident solar radiation is one the majors environmental variables related to yield. Despite the importance of this variable it is not always recorded, neither by conventional or by automatic weather stations, mainly by the high relative cost. Thus, Rs estimation methods are important alternatives for obtaining this variable. This paper presents the calibration and validation results for six Rs estimation models based on daily temperature range over rice production regions of Rio Grande do Sul state: Bristow-Campbell (BC), Donatelli-Campbell (CD), Donatelli-Bellocchi (DB), Donatelli (DCBB), Hargreaves by Hunt (HG1) and Hargreaves by Chen (HG2). Were used the daily observations from ten automatic weather stations, considering two sites for each of the rice-growing regions. To measure the

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

quality of the estimates were considered the Mean Absolute Error (MAE), the Root Mean Square Error (RMSE) and the correlation coefficient (r). In addition, the Wilcoxon test was applied to verify the estimates of the different models are similar. The best fit was achieved with the BC model in the Campaign Region, with $MAE 3.31 \pm 0.16 MJ m^2 d^{-1}$. The worst performance was observed in the region Foreign Coastal Plain, obtained by the DB model with MAE of $7.24 \pm 5.14 MJ m^2 d^{-1}$. According to the test of the Wilcoxon HG1 models, HG2, BC and DC showed no evidence for differences in the estimated Rs. Have the DB and DCBB models presented evidence difference to the 1% significance level.

Key words: Solar Global Radiation, estimation models, Irrigated Rice

INTRODUÇÃO

A radiação solar é uma das variáveis que exercem um impacto direto na produtividade das lavouras de arroz, sendo por isso uma variável importante para os estudos sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura. Na ausência de registros confiáveis, já que para isso são necessários equipamentos caros, uma alternativa é a utilização de equações empíricas de estimativa de radiação solar baseadas em outras variáveis de fácil obtenção, como por exemplo, a temperatura do ar (T), radiação extraterrestre (R_a) e precipitação pluviométrica. Além de estimativas baseadas em variáveis meteorológicas simples, atualmente é possível fazer estimativas de Radiação Solar Global (R_s) a partir de produtos de satélites meteorológicos os quais possibilitam uma cobertura regular de todo o globo terrestre (CEBALLOS et al., 2004; PINTO et al., 2010).

No Brasil e no mundo, há vários estudos para diferentes regiões utilizando apenas um método ou um conjunto de equações de estimativa de R_s (FIETZ; FISCH, 2009; SILVA et al, 2012; SALIMA; CHALUVA, 2012; JERSZURKI; SOUZA, 2013) e embora obtenham resultados distintos, a magnitude das diferenças entre a radiação medida com instrumentos e as estimadas pelos métodos empíricos é muitas vezes pequena, indicando que os métodos empíricos são uma boa alternativa para preencher séries de dados que apresentem falhas em relação à observação de R_s ou estimar seus valores em locais que simplesmente esse tipo de variável não é registrada.

Baseado nesta importância, o objetivo deste estudo é realizar a calibração e validação de seis modelos de estimativa de R_s para as regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a estimativa de R_s foram utilizados os modelos de: Bristow-Campbell – BC (1984) (Equação 1); Donatelli-Campbell – DC (1998) (Equação 2); Donatelli-Bellocchi – DB (2001) (Equação 3); Donatelli et al. – DCBB (2003) (Equação 4), Hunt et al. – HG1 (2008) (Equação 5), e Chen et al. – HG2 (2004) (Equação 6). O conjunto de equações acima, bem como as variáveis utilizadas é apresentado na tabela 1.

Depois de obtidos os parâmetros empíricos de cada modelo, pelo método dos mínimos quadrados, as validações destes foram realizadas utilizando os dados referentes aos anos ímpares dentro do período de dados para cada uma das cidades pertencentes às regiões orizícolas (Tabela 2), sendo as validações realizadas com os dados pertencentes aos anos pares. Os dados anuais foram separados em dois períodos: entre safra (compreendido entre os meses de Abril a Setembro) e safra (compreendido entre os meses de Outubro a Março).

Para avaliar a acurácia nas estimativas de radiação solar obtidas pelos diferentes modelos, foram utilizadas três medidas estatísticas descritivas e análise gráfica de diagramas de dispersão entre os dados observados e estimados. Foram utilizadas as seguintes medidas: i) coeficiente de correlação (r), EMA (Erro Médio Absoluto) e EQM (Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro).

$$EMA = \frac{1}{n} \sum |Rad_{est} - Rad|$$

$$RQME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Rad_{est} - Rad)^2}$$

O teste de Wilcoxon com nível de significância de 1% foi realizado para verificar se havia indícios de diferença entre as estimativas de Rs.

Tabela 1 - Equações de estimativa de Rs utilizando a temperatura do ar.

Modelos	nº eq.
$R_{sBC} = 0.75 \left[1 - \exp \left(\frac{-b \Delta T_i^c}{\Delta T_{avg}} \right) \right] R_a$	eq. 1
$R_{sDC} = 0.75 \left[1 - \exp \left(-b \left(0.017 \exp \left(\exp(-0.053 \Delta T_{avg}) \right) \right) \Delta T_i^2 f_1(T_{min}) \right) \right] R_a$	eq. 2
$R_{sDB} = 0.75 [1 - f_2(i)] \left[1 - \exp \left(\frac{-b \Delta T_i^c}{\Delta T_{avg}} \right) \right] R_a$	eq. 3
$R_{sDCBB} = 0.75 [1 + f_2(i)] \left[\frac{-b \Delta T_i^2 f_1(T_{min})}{\Delta T_{avg}} \right] R_a$	eq. 4
$R_{sHG1} = b R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} + c$	eq. 5
$R_{sHG2} = (b \sqrt{T_{max} - T_{min}} + c) R_a$	eq. 6

Nas equações acima as variáveis são: Ra = radiação solar potencial diária ($MJm^{-2}dia^{-1}$) calculada a partir de equações astronômicas; $\Delta T = T_{max} - (T_{min} + T_{min+1})/2$; ΔT_{avg} = é a temperatura semanal móvel, baseada na média móvel centrada na temperatura mínima e máxima ($^{\circ}C$).

Tabela 2 – Cidades pertencentes às regiões orizícolas e período de dados utilizados

Região Orizícola	Cidade	Período de dados
Sul	Pelotas - Santa Vitória do Palmar	2008 – 2014
Fronteira Oeste	São Borja - Uruguaiana	2008 – 2014
Campanha	Bagé - Santana do Livramento	2008 – 2014
Depressão Central	Encruzilhada do Sul - Santa Maria	2008 – 2014
Planície Costeira Externa	Porto Alegre - Torres	2008 – 2014

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos de EMA são apresentados na tabela 3 e referem-se às validações para o período correspondente à safra de arroz (período safra). O modelo que apresentou o melhor desempenho foi o modelo BC para a região da Campanha com EMA médio de $3,31 \pm 0,16 MJ m^2 d^{-1}$, seguido pelo modelo HG1 que apresentou EMA médio de $3,61 \pm 0,08 MJ m^2 d^{-1}$ para a região Central.

Considerando o EMA médio das regiões, se observa na tabela 3 que há uma clara divisão geográfica em relação ao desempenho dos modelos, sendo: o modelo BC indicado para as regiões Oeste e Campanha; o modelo HG1 indicado para as regiões Central e Planície Costeira Externa; e por fim, o modelo DC indicado para a região Sul.

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

Pontualmente o melhor ajuste obtido foi para a cidade de Santana do Livramento (região da Campanha) onde o EMA obtido foi de $3,15 \text{ MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$ com o modelo DB, embora este modelo não tenha apresentado um bom desempenho, juntamente com o modelo DCBB, especialmente nas regiões Sul e Planície Costeira Externa.

As médias do EMA obtidos pelos modelos considerando todas as estimativas variou de $3,93 \pm 0,72 \text{ MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$ (modelo BC) à $5,24 \pm 2,42 \text{ MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$ (modelo DCBB). O melhor desempenho médio do modelo BC também foi verificado por Heinemann et al. (2012) em um estudo realizado para o estado de Goiás, onde as médias do EMA variaram de $2,67 \pm 0,58 \text{ MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$ (modelo BC) à $2,99 \pm 0,17 \text{ MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$ (modelo DCBB), o que mostra bom desempenho por parte do modelo BC mesmo sob diferentes regimes climáticos.

Tabela 3 – Erro Médio Absoluto ($\text{MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$) para as diferentes regiões orizícolas. A paleta de cores varia do azul (menores valores) ao vermelho (maiores valores).

Regiões e cidades	HG1	HG2	BC	DC	DB	DCBB
Região Central						
Encruzilhada do Sul	3.673	3.903	3.705	3.723	4.062	4.156
Santa Maria	3.547	3.602	3.651	3.548	3.645	4.086
média	3.61	3.753	3.678	3.636	3.853	4.121
desv.padrão	0.088777772	0.213419402	0.038533023	0.1234136	0.2949528	0.049186
Região Sul						
Pelotas	3.736	3.919	3.744	3.721	3.667	4.163
Santa V. do Palmar	4.555	4.661	4.523	4.537	10.173	9.554
média	4.145	4.29	4.133	4.129	6.92	6.859
desv.padrão	0.579134372	0.524734351	0.550768911	0.5770427	4.5999037	3.811579
Fronteira Oeste						
São Borja	3.662	3.759	3.541	3.573	4.005	4.301
Uruguaina	4.645	4.734	4.524	4.595	4.731	5.012
média	4.153	4.246	4.032	4.084	4.368	4.656
desv.padrão	0.695255471	0.689569196	0.69529559	0.7224833	0.5136718	0.503083
Região da Campanha						
Bagé	3.561	3.769	3.428	3.606	3.53	3.962
Santana do Livramento	3.458	3.69	3.197	3.295	3.154	3.407
média	3.509	3.73	3.313	3.45	3.342	3.685
desv.padrão	0.072778605	0.055838278	0.163018111	0.2197558	0.2655419	0.392386
Planície Costeira Externa						
Porto Alegre	3.443	3.545	3.427	3.412	3.604	3.765
Torres	5.37	5.331	5.529	5.501	10.87	9.951
média	4.406	4.438	4.478	4.456	7.237	6.858
desv.padrão	1.362491462	1.262906652	1.486330706	1.4774386	5.1382771	4.3743

Por outro lado, quando avaliados o RQME (tabela não mostrada) e o índice de correlação, o modelo que apresentou melhor desempenho em todas as regiões, exceto a região da Campanha, foi o modelo HG1 com um RQME médio de 5,2 e índice de correlação médio de 0,74. Em estudo realizado em 3 regiões do estado de Minas Gerais, Silva et al. (2012) observaram que os modelos HG1, DC e BC apresentaram comportamento semelhante com RQME de $\sim 3,25$ sendo o modelo HG1 o indicado por estes autores para estimativas de Rs para aquela região devido ao desempenho e também à facilidade de aplicação.



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:



O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

A predominância de resultados semelhantes entre os diferentes modelos (valores de EMA muito próximos) foi averiguada com a utilização do teste de *Wilcox*. Em todas as regiões os modelos HG1, HG2, BC e DC não apresentaram evidência de diferença entre si, exceto na região da Planície Costeira Externa onde os modelos DC e BC foram considerados diferentes entre si, com valor-p menor que 0,01 ($p=0,003$).

Somente na região Sul o modelo considerado de melhor desempenho (DC) não apresentou evidência de igualdade com os modelos HG1, HG2 e DC. Neste caso em particular o único modelo com evidência de igualdade foi o modelo BC ($p=0,045$).

CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o modelo HG1, devido ao seu melhor desempenho na maioria das regiões e facilidade de aplicação e calibração, é um bom recurso para a estimativa de radiação solar global para as regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

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.

CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J.; SOUZA, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery, **Journal of Geophysical Research**, v. 109, D02211, doi: 10.1029/2003JD003531, 2004.

CHEN, R.; ERSI, K.; YANG, J.; LU, S.; ZHAO, W. 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: CONGRESS OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR AGRONOMY, 5., Nitra, Slovak Republic, 1998.

DONATELLI, M.; BELLOCCHI, G.; FONTANA, F. RadEst 3: a software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. **European Journal of Agronomy**, v.18, p.363-367, 2003.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.449-553, 2009.

HEINEMANN, A. B.; VAN OORT, P. A. J.; FERNANDES, D. S.; MAIA, A. H. N. Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation. **Bragantia**, Campinas, v.71, n.4, p.572-582, 2012.

HUNT, L.A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C.J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.91, p.293-300, 1998.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. Parametrização das equações de Hargreaves & Samani e Angstrom-PreScott para estimativa da radiação solar na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n.3, p.383-389, 2013.



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros



PINTO, L. I. C.; COSTA, M. H.; DINIZ, L. M. F.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F. COMPARAÇÃO DE PRODUTOS DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE À SUPERFÍCIE PARA A AMÉRICA DO SUL. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n.4, p.469-478, 2010.

SALIMA, G.; CHAVULA, G. M. S. Determining Angstrom Constants for Estimating Solar Radiation in Malawi. **International Journal of Geosciences**, v. 3, p.391-397, 2012.

SILVA, C. R.; SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande**, v.16, n.3, p.281-288, 2012