

## COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR UTILIZANDO A TEMPERATURA DO AR EM BOTUCATU/SP/BRASIL

M. B. P. da Silva<sup>1</sup>, L. R. Z. Ortega<sup>2</sup>, J. F. Escobedo<sup>3</sup>, J. M. S. Ferrari<sup>4</sup>, A. C. Paes<sup>5</sup>, A. S. Marques<sup>6</sup>, E. D. Pai<sup>7</sup>, C. M. dos Santos<sup>8</sup>

<sup>1,2,3,4,5,7</sup>Departamento de Engenharia Rural – FCA/UNESP – Botucatu/SP/Brasil

<sup>6</sup>Instituto Federal de São Paulo - IFSP/Birigui/SP/Brasil

<sup>8</sup>FEA/UFPA/Altamira/PA/Brasil

Tel. + 55 (14) 3811-7585 e-mail: mauricio.prado19@hotmail.com

*Recibido 16/08/18, aceptado 28/09/18*

**RESUMO:** No presente trabalho é descrito um estudo comparativo entre diferentes métodos de estimativa da irradiação solar global ( $H_G$ ) por meio da temperatura do ar: Hargreaves-Samani (H-S), Bristow-Campbel (B-C) e Almorox (AL). Os coeficientes desses modelos foram ajustados às condições locais com a base de dados de  $H_G$ , medida no período de 1996 a 2011 em Botucatu/SP/Brasil. Os modelos foram validados usando duas bases de dados: típica e atípica que mostraram que o modelo AL melhor desempenho que os demais modelos. O modelo B-C possui melhor desempenho H-S em estimar  $H_G$ .

**Palavras-chave:** Radiação solar; temperatura do ar; modelos estatísticos.

### INTRODUÇÃO

A irradiação solar global incidente em superfície horizontal ( $H_G$ ) é um dos fatores climáticos de grande importância nas áreas das engenharias, agronomia, zootecnia, ecologia entre outras, e tem grande influência nos processos em superfície terrestre, tais como: aquecimento do ar, temperatura do solo, evapotranspiração, fotossíntese, secagem e armazenamento de grãos e forragens; conforto térmico animal; modelagem computacional de desenvolvimento de culturas agrícolas; simulação hidrológica; entre outras (Chen et al., 2004; Podestá et al., 2004). A medida de  $H_G$  é ainda escassa em muitos locais que monitoram as variáveis meteorológicas no globo terrestre. A causa provável é baixos recursos que estão disponíveis nos países de terceiro mundo.

O Brasil também apresenta grandes dificuldades na realização do monitoramento de  $H_G$  e outras variáveis meteorológicas em todas suas regiões. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão oficial de monitoramento no Brasil, possui apenas em torno de 523 estações automáticas operando no país, número este que é considerado insuficiente em função de expansão continental do país (Santos et al., 2014). A solução imediata para esses problemas é a utilização de modelos de estimativas que permitem ter o conhecimento de uma variável por meio de outra medida rotineira, de mais baixo custo. Os modelos existentes podem ser classificados em estatísticos, paramétricos, e, mais recentemente, as técnicas de aprendizagem de máquina (AM's), entre outros (Silva et al., 2017).

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Irrigação e Drenagem, FCA/UNESP/Botucatu.

<sup>2</sup> Engenheira Ambiental, Mestranda em Irrigação e Drenagem, FCA/UNESP/Botucatu.

<sup>3</sup> Físico, Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Rural, FCA/UNESP/Botucatu.

<sup>4</sup> Tecnóloga em Agricultura de Precisão, Mestre em Irrigação e Drenagem, FCA/UNESP/Botucatu.

<sup>5</sup> Física, Mestrando em Energia na Agricultura, FCA/UNESP/Botucatu.

<sup>6</sup> Engenheiro da Computação, Prof. Dr. do Instituto Federal de São Paulo – IFSP/Birigui.

<sup>7</sup> Engenheiro Agrônomo, Dr. em Energia na Agricultura, FCA/UNESP/Botucatu.

<sup>8</sup> Físico, Prof. Dr. da Faculdade de Engenharia Agrônômica - UFPA/Altamira.

Entre os principais modelos estatísticos existentes para modelar  $H_G$  por meio de variáveis meteorológicas (brilho solar, temperatura e umidade relativa do ar) destaca-se os seguintes: Angstrom - Prescott (A-P), Hargreaves - Samani (H-S), Bristow-Campbell (B-C) e outros modificados como o de Almorox (AL), por exemplo. Esses modelos estatísticos geralmente são simples e tendem a ser mais precisos em suas localidades de origem e esse desempenho pode ser até extrapolado para outras regiões com clima similar.

O presente estudo apresenta uma comparação entre modelos estatísticos (H-S, B-C e AL) para estimar  $H_G$  por meio da temperatura do ar (utilizando a amplitude térmica) com uma base de dados medida no período de 1996 - 2011 em Botucatu/SP/Brasil.

## DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

### *Modelo de Hargreaves – Samani (H-S)*

O modelo desenvolvido por Hargreaves & Samani (1982), descrito na Equação 1, relaciona a raiz quadrada da amplitude térmica ( $\Delta T_1$ ) [diferença entre as temperaturas máxima ( $T_{máx}$ , °C) e mínima do ar ( $T_{mín}$ , °C)] com um coeficiente empírico ( $\alpha$ ) ajustado localmente que possui valores que variam de 0,16-0,17 para regiões continentais e 0,19-0,20 para regiões costeiras, respectivamente (Hargreaves e Samani, 1982 Borges et al., 2010). Allen et al. (1998) e Silva et al. (2012) destacam que este modelo é bastante útil para obtenção de estimativas de  $H_G$  quando há poucas variáveis meteorológicas à disposição, como a temperatura do ar.

$$(H_G/H_0) = \alpha. (\Delta T_1)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Em que:

$H_G$ : irradiação solar global ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ );

$H_0$ : irradiação solar global no topo da atmosfera ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ) [equação 2].

$$H_0 = S_0 \left(\frac{24}{\pi}\right) E_0 \left[ \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \right] \quad (2)$$

Que foi obtida como função da latitude local ( $\varphi$ ), declinação solar ( $\delta$ ), constante solar ( $S_0= 1367\ W\ m^{-2}\ min^{-1}$ ), ângulo horário ( $\omega_s$ ) e o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre ( $E_0$ ) [Iqbal, 1983];

### *Modelo de Bristow – Campbell (B-C)*

O modelo exponencial proposto por Bristow e Campbell (1984), semelhantemente ao modelo de H-S, também tem a amplitude térmica como principal variável de entrada para estimativa de  $H_G$ . Além de outros coeficientes de ajuste local. A Equação 3 mostra o modelo de B-C:

$$(H_G/H_0) = \beta_1. [1 - \exp(-\beta_2 \Delta T_2^{\beta_3})] \quad (3)$$

Em que:

$H_G$ : irradiação solar global ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ );

$H_0$ : irradiação solar global no topo da atmosfera ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ), descrita anteriormente na Equação 2.

$\Delta T_2$ : amplitude térmica (°C);

$\beta_1$ : coeficiente empírico que representa a transmissividade máxima esperada para um dia de céu claro, que dependerá da latitude e da poluição atmosférica local;

$\beta_2$ : coeficiente empírico que representa o controle da taxa de variação da amplitude térmica;

$\beta_3$ : também o controle da taxa de variação da amplitude térmica;

Alguns autores como Mesa & Varas (2000), Silva et al. (2012) e Santos et al. (2014) destacam que geralmente, em termos de valores, esses 3 coeficientes empíricos estão dispostos nos seguintes intervalos: 0,7 para  $\beta_1$ ; 0,004 a 0,01 para  $\beta_2$  e 2,4 para  $\beta_3$ ;

A metodologia adotada para obtenção de  $\Delta T_2$  foi elaborada por Bristow e Campbell (1984). Esta metodologia tem como objetivo principal reduzir o efeito em larga escala da entrada advectiva de massas de ar quente ou fria na localidade em questão (Silva et al., 2012) [Equação 4]:

$$\Delta T_2(i) = T_{m\acute{a}x}(i) - \frac{[T_{m\acute{i}n}(i) + T_{m\acute{i}n}(i+1)]}{2} \quad (4)$$

$T_{m\acute{a}x}$ : Temperatura máxima do ar (°C);

$T_{m\acute{i}n}$ : Temperatura mínima do ar (°C);

$i$ : dia atual.

#### *Modelo de Almorox (AL)*

O modelo desenvolvido por Almorox et al. (2011) consiste na estimativa de  $H_G$  por meio da amplitude térmica ( $\Delta T_1$ ), obtida pela diferença entre as temperaturas máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) e mínima ( $T_{m\acute{i}n}$ ). Além da pressão de saturação de vapor obtida em função dessas mesmas temperaturas (Equação 5):

$$H_G = \lambda_1 \cdot H_0 \cdot (\Delta T_1)^{\lambda_2} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ -\lambda_3 \cdot \left( \frac{e_s(T_{m\acute{i}n})}{e_s(T_{m\acute{a}x})} \right)^{\lambda_4} \right] \right\} \quad (5)$$

Em que:

Os 4 coeficientes empíricos do modelo de AL ( $\lambda_1 - \lambda_4$ ) são obtidos por meio de calibração local para ajustá-los às condições ambientais;  $H_0$ : Irradiação solar global no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $e_s(T_{m\acute{a}x})$  e  $e_s(T_{m\acute{i}n})$  são as pressões de saturação de vapor d'água na atmosfera (kPa). Que é obtida conforme metodologia descrita por Allen et al. (1998) no boletim FAO – 56 e é demonstrada na Equação 6:

$$e_{sx} = 0,6108 * \exp \left[ \frac{17,27 * T_x}{T_x + 237,3} \right] \quad (6)$$

Onde:

$e_{sx}$ : é a pressão de saturação de vapor d'água na atmosfera (kPa) obtida através da temperatura média do ar ( $T_x$ );  $\exp$ : 2,7183 é a base do logaritmo natural elevado à potência.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O município de Botucatu (22,85°S; 48,43°W e altitude de 786 m) está situado na região Centro-Sul do Estado de São Paulo (Figura 1). Botucatu possui grande gradiente de altitude, entre 400 a 500m na região mais baixa (depressão periférica) e entre 700 a 900 na região serrana (Planalto Ocidental), esta divergência provoca variações na temperatura do ar. O município de Botucatu possui clima temperado quente (mesotérmico), verão quente e úmido com elevada precipitação e inverno seco (Santos e Escobedo, 2016).

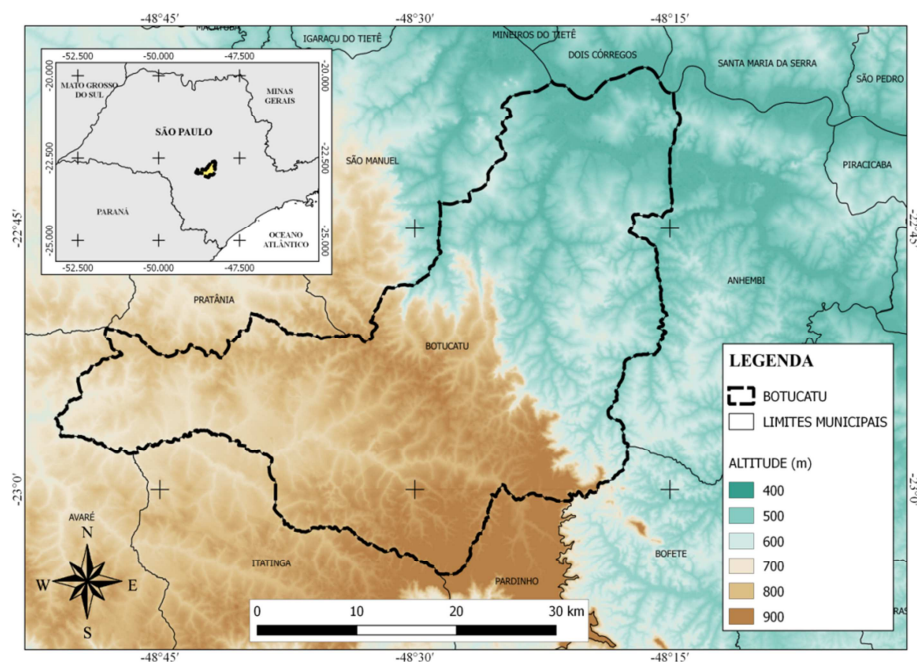


Figura 1. Localização do município de Botucatu, Estado de São Paulo (região Sudeste do Brasil).

A Figura 2 (a, b) mostra as séries climáticas de temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação acumulada. O mês mais quente é fevereiro ( $23,21 \pm 1,20^\circ\text{C}$ ), o mais frio julho ( $17,16 \pm 1,33^\circ\text{C}$ ) e a temperatura do ar média anual de  $20,46 \pm 2,21^\circ\text{C}$  (Figura 2a). A umidade relativa do ar varia de  $62,61 \pm 8,88\%$  (agosto) a  $76,26 \pm 8,24\%$  (fevereiro), com média anual de  $69,93 \pm 4,44\%$  (Figura 2a). A precipitação média anual acumulada é de 1.494,10 mm, com chuvas mensais entre  $40,12 \pm 41,76$  mm (junho) e  $270,49 \pm 110,36$  mm (janeiro) (Figura 2b). No período chuvoso, a precipitação é de natureza microclimática originada do processo de convecção livre e de eventos macroclimáticos originados na convergência de massas de ar vindas da região amazônica e do oceano atlântico sul, resultando na formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e nos sistemas frontais (Reboita et al., 2010; Teramoto e Escobedo, 2012). No período seco, a precipitação é do tipo frontal originada do encontro das massas frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas, da região Sudeste.

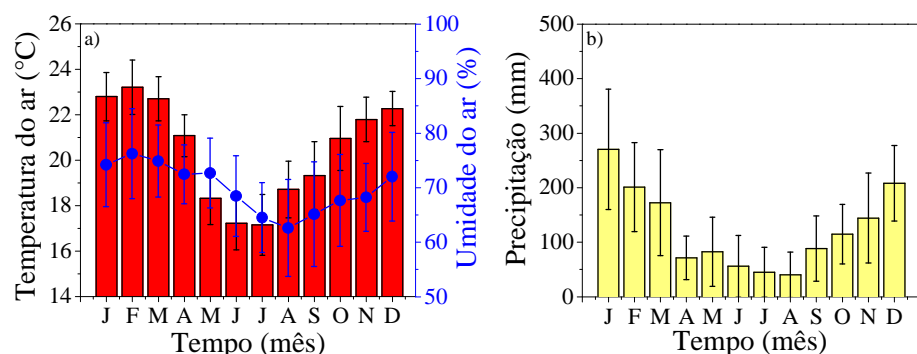


Figura 2. Séries climáticas: (a) temperatura e umidade do ar (b) precipitação.

A área de estudo (estação de radiometria solar e a estação agrometeorológica) está localizada na unidade acadêmica da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP). E destas estações foram obtidas as variáveis meteorológicas utilizadas neste trabalho: irradiação solar global ( $H_G, \text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e as temperaturas máxima ( $T_{\text{máx}}$ ) e mínima ( $T_{\text{mín}}$ ) do ar ( $^\circ\text{C}$ ). As quais foram monitoradas por um piranômetro Eppley PSP [com imprecisão do PSP variando de 1,5 a 2,0% (Huang et al., 2011)] e por um termômetro de bulbo de mercúrio e álcool (segundo as recomendações de calibração periódica da Organização Mundial de Meteorologia), respectivamente.

As Figuras [3(a) e (b)] apresentam os sensores de medidas de obtenção dos dados utilizados neste trabalho.

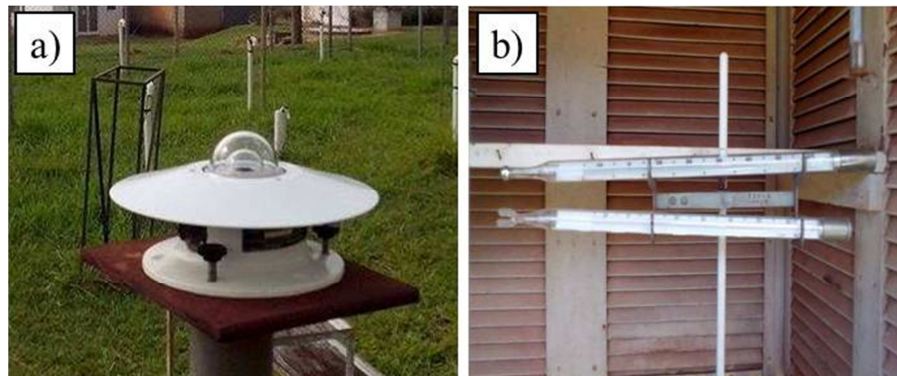


Figura 3.(a) Piranômetro PSP; (b) Termômetro de máxima e mínima.

A aquisição de dados de  $H_G$  foi realizada através de um datalogger CR23X da Campbell Scientific operando na frequência de 1Hz e armazenamento (médio) que armazena a cada 5 minutos em média. Os dados obtidos da estação radiométrica passaram por um rigoroso controle de qualidade (para eliminação de valores errôneos ou inconsistentes) através de programas desenvolvidos na plataforma Microcal<sup>TM</sup>Origin 6.0<sup>®</sup> para cálculo das irradiações em partição diária (Chaves e Escobedo, 2000). O conjunto de dados das temperaturas máximas ( $T_{máx}$ ) e mínimas ( $T_{mín}$ ) foi adquirido mediante a coleta feita por observadores meteorológicos da própria Universidade Estadual Paulista. A série de dados totais de  $H_G$ ,  $T_{máx}$  e  $T_{mín}$  correspondem a um período de 16 anos (1996-2011) de medidas em escala diária.

Para a realização da validação do desempenho dos modelos utilizados neste trabalho, foi necessário fazer a divisão dos dados de  $H_G$  utilizados considerando a metodologia dos anos: típico e atípico. Esta metodologia considera o intervalo de variação do desvio padrão da média, com o valor da irradiação média de cada ano. Na avaliação do desempenho dos modelos foram utilizados: Mean Bias Error (MBE), Relative Mean Bias Error (rMBE), Root Mean Square Error (RMSE), Relative Root Mean Square Error (rRMSE), Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e Índice de Concordância de Willmont (d) (Willmont, 1981; Santos et al., 2014; Silva et al., 2017). Estes índices estatísticos permitem observar a ocorrência de subestimativa ou superestimativa no ajustamento dos modelos. Além de espalhamento, correlação (entro os valores observados e estimados) e tendência sistemática.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)}{N'} \quad (7)$$

$$rMBE (\%) = 100 \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)}{\frac{N'}{\bar{X}}} \quad (8)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{N'} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$rRMSE (\%) = 100 \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{N'} \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{X}} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N'} (|P_i'| + |O_i'|)^2} \quad (12)$$

$P_i$  representa os valores estimados de  $H_G$  pelos modelos, os valores de  $H_G$  medida,  $|P_i'|$  o valor absoluto da diferença  $P_i - \bar{O}_i$ , em que  $\bar{O}_i$ , representa a média de  $O_i$ ,  $|O_i'|$  representa o valor absoluto da

diferença  $O_i - \bar{O}_i$ .  $\bar{X}$  é o valor médio medido e  $N$  o número de observações. indica que diferentes intervalos de rRMSE são definidos para avaliar a acurácia dos modelos (Jamieson et al., 1991; Moriassi, 2007; Heinemann et al., 2012; Li et al., 2013):

Excelente se  $rRMSE < 10\%$ ;  
 Bom se  $10\% \leq rRMSE < 20\%$ ;  
 Aceitável se  $20\% \leq rRMSE < 30\%$ ;  
 Pobre se  $rRMSE \geq 30\%$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 destaca o coeficiente de ajuste local ( $\alpha$ ) de H-S calibrado para as condições locais de Botucatu. Onde foi verificado que o coeficiente ( $\alpha = 0,171$ ) está em concordância com a metodologia proposta por Hargreaves – Samani (1982). Esses autores destacam que os valores de  $\alpha$  devem estar próximos a 0,16 em regiões continentais e 0,19 no litoral. Outros pesquisadores divulgaram algumas diferenças e similaridades em seus coeficientes calibrados utilizando a metodologia de Hargreaves - Samani (1982) [Borges et al., 2009; Chineke, 2008; Almorox et al., 2011; Silva et al., 2012; Santos et al., 2014].

No modelo de B-C foram observados os seguintes coeficientes:  $\beta_1 = 0,673$ ;  $\beta_2 = 0,047$ ;  $\beta_3 = 1,602$  (Tabela 1). Esses possuem valores bastante similares aos observados por outros autores em seus trabalhos (Bristow e Campbell, 1984; Mesa e Varas, 2000). O coeficiente  $\beta_1$  manteve valor similar,  $\beta_2$  esteve aproximadamente 10% superior e  $\beta_3$  inferior. Outros trabalhos dispostos na literatura informam diferenças e semelhanças em relação aos valores obtidos neste trabalho (Chen et al., 2004; Almorox et al., 2011; Silva et al., 2012; Santos et al., 2014).

Na calibração do modelo de AL para Botucatu, verificou – se que os valores de coeficientes ajustados localmente ( $\lambda_1 = 0,401$ ,  $\lambda_2 = 0,175$ ,  $\lambda_3 = 0,190$  e  $\lambda_4 = -4,314$ ) estiveram dentro do intervalo de variação sugeridos pelos autores que desenvolveram este modelo.

Localidade	Botucatu			
Coeficientes do modelo	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
H-S	0,171	-	-	-
B-C	0,673	0,047	1,602	-
AL	0,401	0,175	0,190	-4,314

Tabela 1. Coeficientes empíricos dos modelos de Hargreaves-Samani (H-S), Bristow-Campbell (B-C) e Almorox (AL) determinados para Botucatu, SP.

A Figura 4 (a - f) mostra as correlações obtidas na validação entre as estimativas e as medidas de  $H_G$ , para as bases de dados típico e atípico em Botucatu. As distribuições dos valores estimados pelos 3 modelos e as medidas nas duas condições de validações estão em concordância linear com as linhas ideais de comparação (1:1). As equações de regressão linear com os coeficientes de correlação  $r^t = 0,86$  (índice “t” indica ano típico) e  $r^a = 0,85$  (índice “a” indica ano atípico), mostram que os modelos AL e B-C podem estimar  $H_G$  com desempenho melhor do que H-S. O intervalo de variação dos valores de  $H_G$  (estimada) ficou entre 0,247 - 27,662 MJ M<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para todos os 3 modelos.

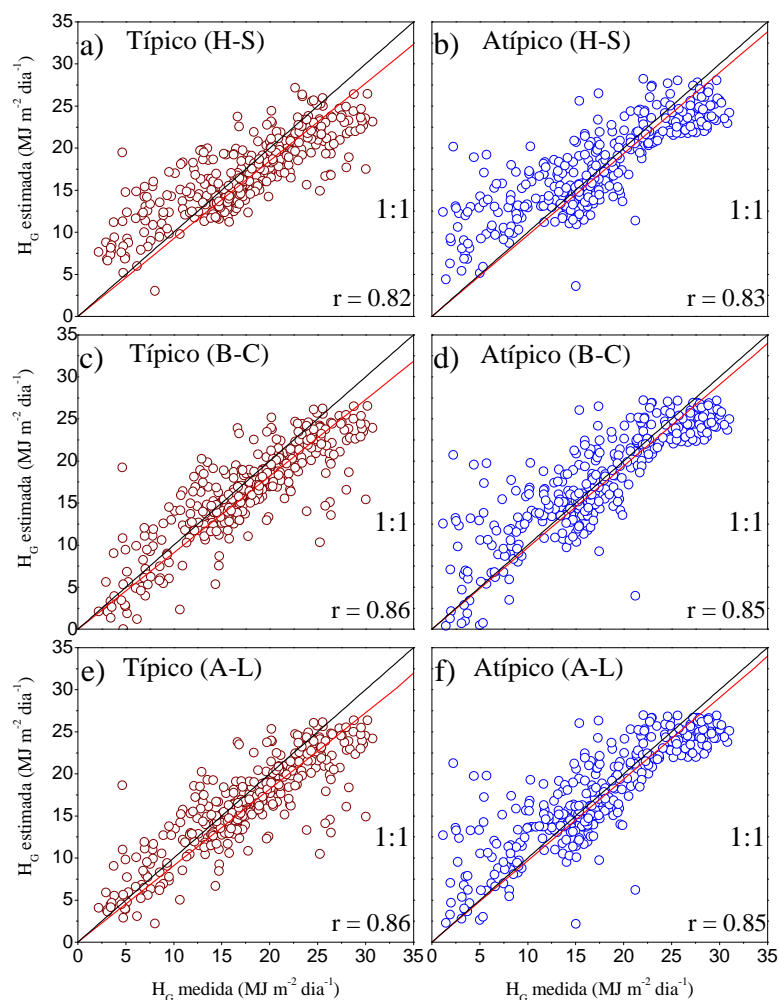


Figura 4.(a - f) Comparação entre os valores estimados por meio dos modelos estatísticos (H-S, B-C e AL) e medidos de  $H_G$  para anos típico e atípico.

Com base nos índices estatísticos [MBE (rMBE), RMSE (rRMSE) e d], mostrados na Tabela 2, pode-se analisar o desempenho estatístico dos modelos estatísticos e verificar que AL é numericamente um pouco superior aos demais modelos. Os valores de  $rMBE_{AL}^t = -6,649\%$  e  $rMBE_{AL}^a = -1,881\%$  são praticamente da mesma ordem de grandeza dos demais modelos; os valores de  $rRMSE_{AL}^t = 20,197\%$  e  $rRMSE_{AL}^a = 22,913\%$  são da mesma ordem de grandeza que  $rRMSE_{B-C}^t = 20,289\%$  e  $rRMSE_{B-C}^a = 22,939\%$  nas duas bases de validação, mostrando melhor ajuste desses dois modelos em relação a H-S; os valores de d de Willmott  $d_{AL}^t = 0,9102$  e  $d_{AL}^a = 0,909$  são da mesma ordem de grandeza de Willmott  $d_{B-C}^t = 0,912$  e  $d_{B-C}^a = 0,912$  e numericamente um pouco maior do que d do modelo de H-S.

O valor de  $rRMSE$  do modelo de H-S para Botucatu foi numericamente superior aos resultados obtidos por Esteves (2013), em 65 localidades na Espanha, e Daut et al. (2012), em duas localidades da Malásia; e foi da mesma ordem de grandeza aos valores divulgados de RMSE por Grillone et al. (2012), na Itália, e Sayed et al. (2016), nos Estados Unidos e Irã, Borges et al. (2010) em Cruz das Almas (Bahia/Brasil) e Silva et al. (2012) em 3 distintas regiões do estado de Minas Gerais (Brasil). Para o modelo de B-C os índices estatísticos (rMBE e rRMSE) deste trabalho foram inferiores aos observados por Borges et al. (2008) em Cruz das Almas (Estado da Bahia, Brasil). Almorox et al. (2011) com este mesmo modelo em 8 localidades na Espanha; Santos et al. (2014) em Alagoas (Estado brasileiro localizado na Região Nordeste). Semelhantemente isso também ocorre na comparação com os resultados encontrados por Almorox et al. (2011) em 8 localidades da Espanha; Bojanwski et al. (2013) em diversas localidades na Europa; Santos et al. (2014) em 8 localidades do Estado de Alagoas (localizado na Região Nordeste do Brasil).



Índices estatísticos	Modelos					
	H-S		B-C		AL	
	Típico	Atípico	Típico	Atípico	Típico	Atípico
MBE (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	-0,478	0,606	-1,210	0,290	-1,576	0,323
rMBE (%)	-2,745	3,533	-6,948	1,694	-6,649	1,881
RMSE (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	3,796	4,237	3,532	3,932	3,516	3,928
rRMSE (%)	21,804	24,720	20,289	22,939	20,197	22,913
<i>d</i>	0,871	0,881	0,912	0,912	0,9102	0,909

Tabela 2. Distribuição dos índices estatísticos [MBE, rMBE (%), RMSE, rRMSE (%) e *d*] para os modelos de AL, B-C e H-S considerando a metodologia dos anos típico e atípico.

Os valores de RMSE obtido pelo modelo de AL ajustado para Botucatu foram superiores aos divulgados por Almorox et al. (2011) em 4 localidades espanholas.

## CONCLUSÕES

Dos resultados apresentados e discutidos, conclui-se que:

Os modelos propostos para Botucatu/SP/Brasil se mostraram viáveis para utilização, com destaque para a adaptação do modelo de Almorox (AL). Seus desempenhos são similares aos obtidos em outras localidades. Os valores dos indicativos estatísticos em condições de validação típica e atípica: *rMBE*, com intervalo de variação de (-6,65) – 1,88%; *rRMSE*, com intervalo de variação de 20,20 – 22,91%; *d* de Willmott, superior a 0,90, indicam que o modelo AL pode ser utilizado na estimativa de H<sub>G</sub> com boa precisão e exatidão. Em estudos futuros no local, seria importante analisar o desempenho deste modelo com outras técnicas portando outras variáveis meteorológicas medidas na superfície terrestre e atmosférica. Entre as técnicas que poderiam ser testadas, destacar-se-iam: regressões múltiplas.

## REFERÊNCIAS

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. et al. (1998). Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. pp. 50. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) - Irrigation and drainage paper 56, Rome.
- Almorox, J. et al. (2011). Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). In: Applied Energy, v. 88, p. 1703-1709.
- Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. In: Q. J. R. Met. Soc., v. 50, p. 121-125.
- Borges et al. (2010). Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 1, p. 74-80.
- Bristow, K. L.; Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. In: Agricultural and Forest Meteorology, v. 31, n. 2, p. 159-166.
- Chaves, M. A.; Escobedo, J.F. (2000). A software to process daily solar radiation data. Renewable Energy 19, 339-344.
- Chen, R. et al. (2004). Validation of five global radiation models with measured daily data in China. Energy Conversion and Management, v. 45, p. 1759-1769.
- Chineke, T. C. (2008). Equations for estimating for global solar radiation in data sparse regions. In: Renewable Energy, v. 33, p. 827-831.
- Estévez, J.; Padilla, F. L. M.; Gavilán, P. (2012). Evaluation and Regional Calibration of Solar Radiation Prediction Models in Southern Spain. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 138(10), p. 868 – 879.
- Grillone, G.; Agnese, C.; D'Asaro, F. (2012). Estimation of Daily Solar Radiation from Measured Air Temperature Extremes in the Mid-Mediterranean Area. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 138(10), p. 939 – 947.
- Jamieson, P. D.; Porter, J. R.; Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARC - WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research, v.27, p.337-350.



- Santos, C.M., Escobedo, J.F. (2016). Temporal variability of atmospheric turbidity and DNI attenuation in the sugarcane region, Botucatu/SP. *Atmospheric Research*, v. 181, p. 312–321.
- Hargreaves, G. H.; Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 108, p. 225-230.
- Heinemann et al. (2012). Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation. *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 4, p.572-582.
- Huang, M. et al. (2011). Ultraviolet Radiation over Two Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China: An Innovative Model for UV Estimation. *Terr. Atmos. Ocean.Sci.*, v. 22, n. 5, p. 491-506.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Canadá: Academic Press, 390p.
- Li et al. (2013). General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy Conversion and Management*, v. 70, p. 139-148.
- Bojanowski, J. S.; Donatelli, M.; Skidmore, A. K.; Vrieling, A. (2012). An auto-calibration procedure for empirical solar radiation models. In: *Environmental Modeling e Software*, v. 49, p. 118-128.
- Mesa, F.; Varas, E. (2000). Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 100, p. 231-241.
- Moriasi, D. N. et al. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v.50, n.3, p.885-900.
- Podestá, G. P. et al. (2004). Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 123, p. 41-53.
- Prescott, J. A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. In: *Transactions of the Royal Society of Science, Australia* 64, 114–125.
- Reboita, M. S.; Gan, M. A.; Rocha, R. P.; Ambrizzi, T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, p.185-204.
- Sayed S. S. et al. (2016). Estimation of daily global solar radiation using wavelet regression, ANN, GEP and empirical models: A comparative study of selected temperature based approaches. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 149, p. 131 – 145.
- Santos, C. M. et al. (2014). On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil. *Energy*, v. 71, p. 388-398.
- Silva, C. R. et al. (2012). Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de minas gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 3, p. 281-288.
- Silva, M.B.P.; Escobedo, J.F., Rossi, T.J., Santos, C.M.; Silva, S.H.M.G. (2017). Performance of the Angstrom-Prescott Model (A-P) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar – Terrestrial – Physics*, v. 160, p. 11-23.
- Teramoto, É. T.; Escobedo, J. F. (2012). Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. In: *R. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n.9, p. 985-992.
- Willmot, C. J. (1981). On validation of models, *Physical Geography*, v. 2, p. 184-194.

## ABSTRACT

The present work is a comparative study between different methods of reserve of global solar irradiation (H-S), from Hargreaves-Samani (H-S), Bristow-Campbel (B-C) and Almorox (AL). The coefficients of these models were to leave the sites based on  $H_G$  data, measured in the period from 1996 to 2011 in Botucatu/SP/Brazil. The files were validated using two databases: the typical and atypical that improved the model. The B-C model has better H-S performance in estimating  $H_G$ .

**Keywords:** Solar radiation; Air temperature; statistical models.