

## Estimativa de irradiação global utilizando o modelo de Bristow-Campbell na cidade de Avaré, São Paulo

## Estimation of global irradiation using the Bristow-Campbell model in the city of Avaré, São Paulo

### RESUMO

Felipe Vilela Fernandes  
[felipefernandes.1999@alunos.utfpr.edu.br](mailto:felipefernandes.1999@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Rodrigo Augusto Modesto  
[rodrigomodesto@utfpr.edu.br](mailto:rodrigomodesto@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Edson Luís Bassetto  
[bassetto@utfpr.edu.br](mailto:bassetto@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Maikon W. Militão de Carvalho  
[maikoncarvalho@alunos.utfpr.edu.br](mailto:maikoncarvalho@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Neste trabalho, é realizado um estudo de caso para validar a proposta de um modelo de estimativa de irradiação solar na cidade de Avaré, São Paulo, Brasil, baseado no modelo de Bristow e Campbell (1984). Através de uma base de dados com variáveis importadas da estação meteorológica automática de Avaré (A725), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi possível ajustar o modelo as condições da cidade. O percentual de erros (RMSE=1,5% e MAE=1,15%) denotam que o modelo possui boa acurácia e desempenho, representando uma alternativa viável quando não há disponibilidade de equipamento de medição, normalmente, devido seu elevado custo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Irradiação solar. Modelos estatísticos. Temperatura.

### ABSTRACT

In this work, a case study is carried out to validate the proposal for a model for estimating solar irradiation in the city of Avaré, São Paulo, Brazil, based on the model by Bristow and Campbell (1984). Through a database with variables imported from the Avaré automatic meteorological station (A725), from the National Meteorological Institute (INMET), it was possible to adjust the model to city conditions. The percentage of errors (RMSE = 1.5% and MAE = 1.15%) denote that the model has good accuracy and performance, representing a viable alternative when measurement equipment is not available, usually due to its high cost.

**KEYWORDS:** Solar irradiation. Statistic models. Temperature.

**Recebido:**

**Aprovado:**

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

A irradiação solar é o termo designado para a energia proveniente do sol que atinge uma determinada superfície terrestre, num dado instante. Por sua existência, diversos processos biológicos, físicos e químicos ocorrem, envolvendo solo, planta e atmosfera. Essa variável medida em unidades de energia por área ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) é empregada em estudos e projetos de engenharia como na conversão de energia solar térmica e fotovoltaica, na agronomia em casas de vegetação e na arquitetura no conforto térmico de edificações (Varejão, 2006).

Do total de irradiação que incide na atmosfera, apenas 51% da irradiação solar extraterrestre ( $H_o - \text{MJ}/\text{m}^2$ ) chega à superfície e é utilizada nos processos físicos e biológicos, chamada de radiação global ( $H_g - \text{MJ}/\text{m}^2$ ). A fração da radiação que não chega à superfície sofre processos de reflexão, difusão e absorção na interação com a atmosfera (Ometto, 1968).

Porém deve-se destacar que o monitoramento da irradiação solar ( $H_g$ ), na maioria das localidades não é realizado periodicamente, tendo em vista alguns fatores com o elevado custo dos equipamentos, operacionalização e manutenção. Uma proposta para minimizar esse problema é estimar a radiação utilizando de modelos ou correlações empíricas. Entre os modelos clássicos destacam-se o modelo de Angstrom Prescott (1940) que relaciona a fração da radiação global ( $K_T = H_g / H_o$ ) com a razão de insolação ( $n$ ), Hargreaves e Samani (1982) e Bristow e Campbell (1984) que relaciona a  $H_g$  com a temperatura do ar ( $\Delta T$ ) como variável de referência para o modelo.

Diante disto o trabalho propõe estimar a ( $H_g$ ) a partir de modelos de referência clássico com ( $T_a$ ) como variável de entrada. Para sua elaboração, são, utilizando dados obtidos da estação do INMET (A725) entre os anos de 2006 a 2014 para a cidade de Avaré, localizada no interior do Estado de São Paulo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados para elaboração do modelo foram obtidos entre os anos de 2006 a 2014 pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (A725) instalado na cidade de Avaré – SP, situada em uma região com clima subtropical. A região, ilustrada na Figura (1) tem característica climáticas subtropical, apresentando temperaturas médias anuais não superiores a  $20^\circ\text{C}$ , e temperatura mínima anual não inferior a  $0^\circ\text{C}$  (INMET, 1979).

Figura 1 - Municípios limítrofes a Avaré



Fonte: Wikipédia (2020).

A estação meteorológica automática de Avaré (A725), possui alguns sensores conectados a uma unidade de memória central que registra medidas instantâneas, armazenando a média de minutos a cada hora. As variáveis monitoradas são: a umidade relativa do ar máxima ( $U_{\max}$  - percentual) e mínima ( $U_{\min}$  - percentual), temperatura do ar máxima ( $T_{\text{armax}}$  - °C) e mínima ( $T_{\text{armin}}$  - °C), temperatura do ponto de orvalho máxima ( $T_{\text{pmax}}$  - °C) e mínima ( $T_{\text{pmin}}$  - °C), pressão atmosférica máxima ( $P_{\max}$  - hPa) e mínima ( $P_{\min}$  - hPa) e velocidade do vento e rajada, em metros por segundo. A partir destes dados foram calculadas outras variáveis necessárias para elaboração do modelo de estimava da incidência da radiação solar (Hg).

A energia solar que atinge uma região plana e horizontal, localizada fora da influência da atmosfera, depende da latitude ( $\phi$  - °), da declinação ( $\delta$  - °) e do ângulo zenital ( $z$  - °). A energia solar que atinge a superfície terrestre num determinado instante e local, pode ser separada em duas componentes. A primeira dela é a radiação direta, que provém diretamente do disco solar. E a segunda é a radiação difusa, que é resultante do espalhamento causado pela atmosfera (Varejão, 2006).

A rotação da Terra em torno de seu eixo causa mudanças diurnas na renda da radiação, e a posição desse eixo em relação ao sol causa mudanças sazonais na radiação solar. Ademais, a diferença entre a linha que expressa o plano eclíptico, que é o plano de revolução da Terra ao redor do Sol, e a linha do equador, formam a variável denominada declinação solar (Muhammad Iqbal, 1983).

A declinação solar varia a cada instante, mas pode ser calculada utilizando o número do dia do ano (NDA) como variável conforme Eq. (1), sendo sempre o mesmo valor para o mesmo dia juliano.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot (NDA - 80)}{365} \right] \quad (1)$$

Para referenciamento local, o ângulo entre o vetor posição do Sol e a vertical local, num dado instante, chama-se ângulo zenital ( $z$ ) e pode ser calculado conforme a Eq. (2) (Varejão, 2006).

$$z = \cos^{-1}(\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos h) \quad (2)$$

A variável calculada da Eq. 2 é o ângulo zenital, onde  $\phi$  é a latitude, e  $h$  é o ângulo horário ao nascer do sol, segundo a Eq. (3).

$$h = (12 - H_d) \cdot 15^\circ \quad (3)$$

Onde  $H_d$  é a hora, e o décimo de hora, portanto, o horário legal, ou também chamado de hora solar verdadeira (HSV) em formato decimal.

Segundo Varejão (2006), ( $H$ ) traduz o valor do ângulo que a Terra deve girar a partir do instante do nascimento até a culminação do Sol. E ele pode ser calculado através da Eq. (4).

$$H = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (4)$$

Para estimar as incidências de radiação extraterrestre, horária e diária, é necessário calcular o fator de correção de excentricidade da Terra dado pela Eq. (5).

$$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot NDA}{365} \right) \quad (5)$$

Finalmente, a incidência de radiação extraterrestre pode ser calculada conforme apresentado pelas Eq. (6) e (7):

$$H_{0\text{diária}} = 37,6 * \left(\frac{d}{D}\right)^2 * (H * \text{sen}\phi * \text{sen}\delta + \text{cos}\phi * \text{cos}\delta * \text{sen}H) \quad (6)$$

$$H_{0\text{horária}} = 4,921 * \left(\frac{d}{D}\right)^2 * (\text{sen}\delta * \text{sen}\phi + \text{cos}\delta * \text{cos}\phi * \text{cos}h) \quad (7)$$

Assim, o valor calculado para ( $H_0$ ) na Eq. (6), pode ser empregado no modelo de estimativa de Bristow e Campbell (1984) para estimar o valor de radiação solar ( $H_g$ ). Estes autores elaboraram um modelo que relaciona ( $H_g$ ) com os valores de temperatura ( $T_{\text{armax}}$ ) e ( $T_{\text{armin}}$ ).

$$K_T = A[1 - \exp(-B\Delta T^C)] = \frac{H_g}{H_0} \quad (8)$$

A Eq. (8), relaciona os coeficientes empíricos A, B e C com a variável  $K_T$  e o valor dessa variável deve sempre ser inferior a 1, pois devido a difusão e dispersão da irradiação decorrente na atmosfera, o valor de  $H_g$  é sempre inferior a  $H_0$ . O coeficiente empírico B pode ser calculado utilizando a temperatura média mensal  $\overline{\Delta T}$ , conforme a Eq. (9). Fisicamente, ele representa o controle da taxa de variação da amplitude térmica, assim como o coeficiente empírico C dado pela Eq. (10) (Silva, 2018).

$$B = 0,036 * \exp(-0,154 * \overline{\Delta T}) \quad (9)$$

$$\Delta T(J) = T_{\text{máx}}(J) - ((T_{\text{min}}(J) + T_{\text{min}}(J+1))/2) \quad (10)$$

Onde J representa o número do dia.

O coeficiente A representa a transmitância máxima esperada num dia de céu claro, fator dependente da latitude e da poluição atmosférica local. Alguns autores, como Mesa e Varas (2000), Silva *et al.* (2012) e Santos *et al.* (2014) afirmam que, geralmente, os valores para os coeficientes são de 0,7 para A, 0,004-0,01 para B, e 2,4 para C (Silva, 2018).

Para avaliar e validar o modelo realizado, foram utilizados alguns indicadores estatísticos, como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que descreve a qualidade do modelo testado, pois é ele que mede a variabilidade nos dados de um modelo de regressão e calculado conforme a Eq. (11).

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (11)$$

Os indicadores estatísticos erro quadrático médio (RMSE), que representa o quanto a estimativa se aproxima do valor medido e o erro absoluto médio (MAE), que representa a diferença média dos valores estimados pelo medido são dados pelas Eq. (12) e (13).

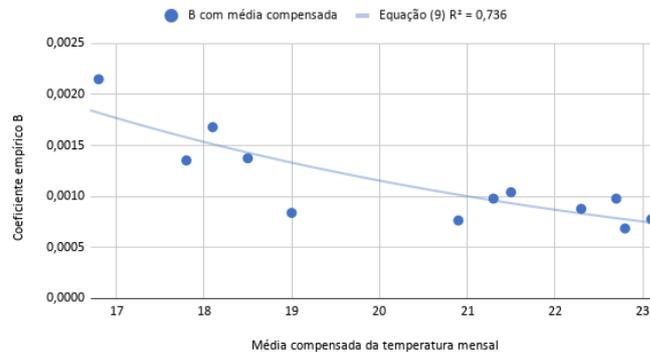
$$RMSE = \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i|^2} \quad (12)$$

$$MAE = n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (13)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores mensais, ajustados dos coeficientes B do modelo de Bristow e Campbell estão apresentados no gráfico da Figura 2 e foram obtidos através da Eq. (9), utilizando os valores de média compensada da temperatura mensal.

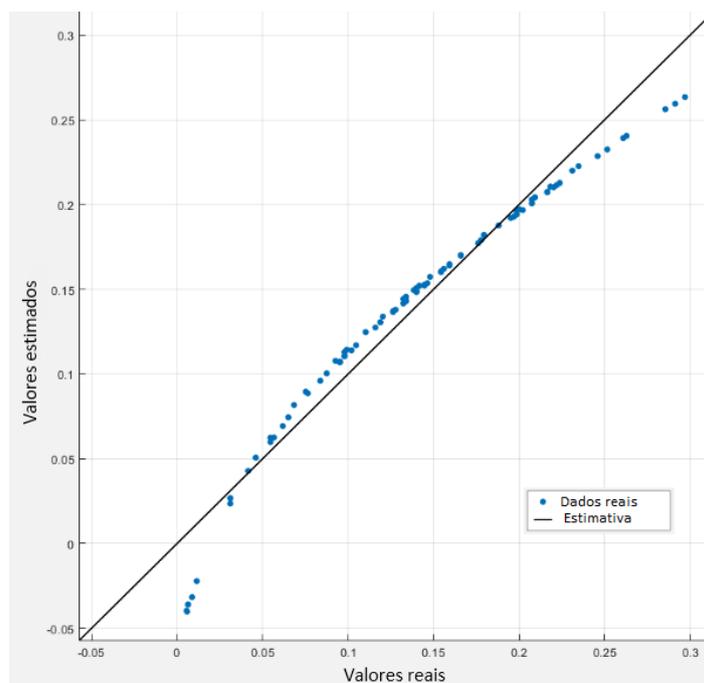
Figura 2 – Valores do coeficiente B



Fonte: Normal Climatológico de 1981-2010 (INMET).

Constatou-se adequado utilizar a média compensada da temperatura local com posse de todos os valores para os coeficientes empíricos foi possível elaborar um gráfico de dispersão para os valores estimados pelo modelo e os valores reais. O gráfico foi construído a partir de uma análise de regressão linear feita, considerando a diferença entre extremos de temperaturas diárias (máximo e mínimo) ( $\Delta T$ ) como variável independente, e transmissividade ( $K_T$ ) como uma variável dependente, conforme prevê Bristow e Campbell (1984), e ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Relação entre dados reais e estimados de transmissividade



Fonte: autoria própria (2020).

Dentre os modelos de regressão gerados o que apresentou o melhor resultado, obteve um coeficiente de determinação de 0,95. O valor do erro quadrático médio (RMSE) foi de 0,014931, podendo ser aproximado de 1,5%. O que qualifica o modelo como excelente, por apresentar boa acurácia devido ao RMSE inferior a 10%, de acordo com a Tabela 2.

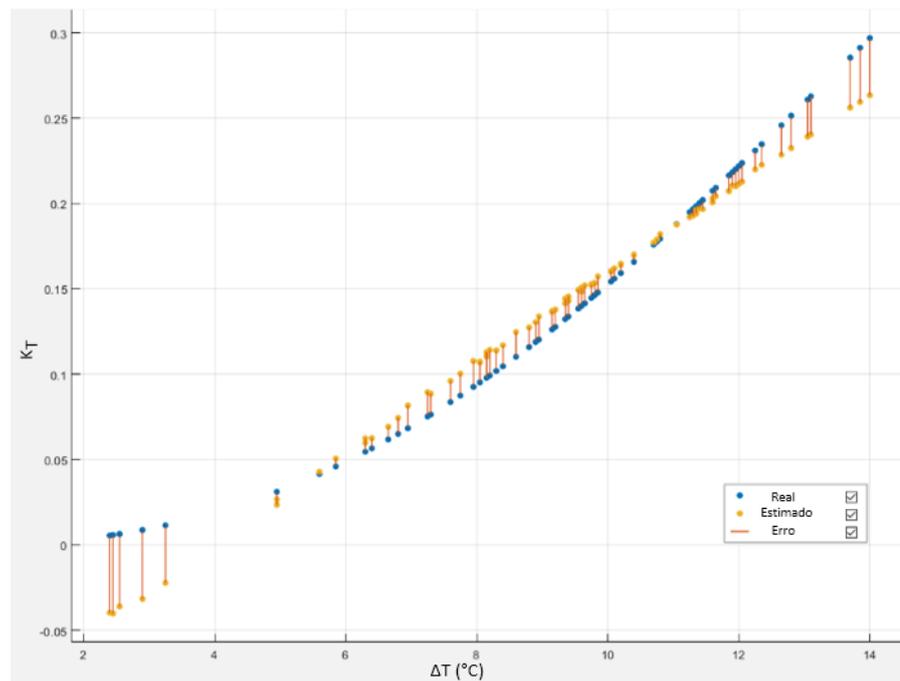
Tabela 1 – Interpretações do erro quadrático médio (RMSE)

RMSE	Classificação do modelo
RMSE<10%	Excelente
10%≤RMSE<20%	Bom
20%≤RMSE<30%	Aceitável
RMSE≥30%	Pobre

Fonte: (Jamieson et al., 1991; Moriasi, 2007; Heinemann et al., 2012; Li et al., 2013).

Além disso, o valor do MAE sendo 1,15% reitera que o modelo apresenta boa performance. Na figura 4, é possível visualizar um gráfico relacionando os valores reais, estimados e os respectivos erros.

Figura 4 – Relação de transmitância estimada, real e erros



Fonte: autoria própria (2020).

## CONCLUSÃO

O modelo de estimativa proposto para a cidade de Avaré apresentou indicadores de que são viáveis considerando que o baixo percentual de erros faz com que os valores de radiação na localidade possam ser estimados com boa exatidão e precisão. Além disto, os resultados são similares aos obtidos em outras localidades como Pullman, Tacoma, Seattle, localizadas no norte do estado norte

americano de Washington, Great Falls, localizada no estado de Montana, Botucatu, estado de São Paulo, Brasil e entre outros.

#### REFERÊNCIAS

ANGSTRÖM, A. **Solar and atmospheric radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, p. 121-126, 1924.

BRISTOW, K.L. e CAMPBELL, G.S. **ON THE RELATIONSHIP BETWEEN INCOMING SOLAR RADIATION AND DAILY MAXIMUM AND MINIMUM TEMPERATURE**, p.159-166, 1984.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. **Estimating potential evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 108, p. 225-230, 1982.

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.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil (1931-1960)**, 2 ed. Rio de Janeiro, 1979.

IQBAL, Muhammad. **AN INTRODUCTION TO SOLAR RADIATION**. Vancouver, British Columbia, Canada: Academic Press, 1983.

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.

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.

OMETTO, J. C. **Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida, insolação. 1968. 64 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.**

PRESCOTT, J.A. **Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Transactions of the Royal Society of South Australia**, v. 64, p. 114-480, 1940.

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.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia. Versão digital 2. ed. Recife, Brasil, 2006. 449 p**

ZOU, Kelly H.; TUNCALI, Kemal; SILVERMAN, Stuart G. **Correlation and Simple Linear Regression. Boston, Estados Unidos, 2003.**