

AJUSTE E AVALIAÇÃO DE MODELOS PARA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM CAMPO GRANDE – MS, BRASIL.

Ramilos Rodrigues de Brito¹, Amaury de Souza², Cícero Manoel dos Santos³, Flávio Aristone⁴, Maurício Bruno Prado da Silva⁵, Geovani da Silva Santana⁶

RESUMO: A irradiação solar global (Hg) é de grande importância para diversas aplicações. Medidas de Hg são difíceis de serem encontradas devido ao custo e às técnicas envolvidas. Vários modelos com diferentes variáveis de entrada foram desenvolvidos e usados para estimar Hg em todo o mundo. A estimativa de Hg a partir de modelos que utilizam a amplitude térmica diária (ΔT) oferece uma alternativa interessante na ausência de medidas. Dez modelos empíricos baseados em ΔT foram ajustados e avaliados para estimar Hg na região de Campo Grande, Brasil. Para indicar o desempenho de cada modelo, foram utilizados os indicadores estatísticos: MBE, RMSE, MAPE e ICW. Os resultados obtidos levam a conclusão que os modelos avaliados têm potencial para estimar Hg na região de estudo, indicando baixos erros na estimativa.

PALAVRAS-CHAVE: modelos empíricos, temperatura do ar, modelagem.

ADJUSTMENT AND EVALUATION OF MODELS FOR GLOBAL SOLAR IRRADIATION IN CAMPO GRANDE - MS, BRAZIL.

ABSTRACT: Global solar irradiation (Hg) is of great importance for many applications. Hg measurements are difficult to be founded due to the cost and techniques. Several models with different input variables were developed and used to estimate Hg worldwide. An estimate of Hg from models using the daily thermal amplitude (ΔT) offers an interesting alternative in the absence of measurements. Ten empirical models based on ΔT were adjusted and evaluated to

¹ Pós doutorando, Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias –PPGCA/UFPI/CPCE, Bom Jesus, PI.

² Prof. Doutor, Instituto de Física – UFMS, Campo Grande, MS.

³ Prof. Doutor, Faculdade de Engenharia Agrônoma – UFPA, Altamira, PA.

⁴ Prof. Doutor, Instituto de Física – UFMS, Campo Grande, MS.

⁵ Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

⁶ Engenheiro Agrônomo, Altamira, PA.

estimate Hg in the Campo Grande region, Brazil. To indicate the performance of each model, the statistical indicators were used: MBE, RMSE, MAPE and ICW. The results lead to the conclusion that the estimated models have the potential to estimate Hg in the study region, estimating with low errors.

KEYWORDS: empirical models, air temperature, modeling.

INTRODUÇÃO

A irradiação solar global (Hg) é a quantidade total de energia solar recebida pela superfície terrestre e a principal fonte de energia para a vida na Terra. O conhecimento da distribuição espacial e temporal de Hg é de grande importante em projetos de sistemas fotovoltaicos, projetos de construção e iluminação natural de ambientes, estudos de conforto térmico, sistemas solares térmicos, modelos de crescimento de culturas, evapotranspiração e sistemas híbridos (De Souza, 2018).

O monitoramento de Hg em uma determinada região é feito com instalação de piranômetros espectrais. Além dos altos custos de manutenção envolvidos e dos requisitos específicos de calibração, que exigem um técnico especializado, essas medições não são realizadas em muitas partes do mundo, tornando-se um processo desgastante e demorado. Na maioria dos países em desenvolvimento, o local não é coberto pelas estações solarimétricas. Buscando uma alternativa viável para suprir a escassez de medidas solares, pesquisadores desenvolveram métodos para estimativa de Hg.

As principais indicações da literatura atual são orientadas principalmente para técnicas de modelagem empírica e de aprendizagem de máquinas (Halabi, et al., 2018). A modelagem empírica é feita em termos de parâmetros meteorológicos ou junto com insumos adicionais. O primeiro modelo de estimativa foi proposto por Ångström - Prescott (1940). Os modelos baseados na temperatura do ar, como Hargreaves e Samani (1982) (H-S) e Bristow e Campbell (1984) (B-C), que se baseiam na amplitude térmica, foram os primeiros a serem propostos. Vários ajustes, modificações e avaliações foram feitos para diferentes regiões climáticas do mundo utilizando os modelos H-S e B-C (Liu et al., 2009; Almorox, 2011; Antonanzas-Torres et al., 2013; Dos Santos et al., 2014; Silva et al., 2012; Borges et al., 2010). Além da avaliação desses modelos para uma ampla gama de condições geográficas e climáticas, é interessante mencionar que os valores estimados de Hg afetam outros processos, como a evapotranspiração e o rendimento das culturas, quando estes utilizam estimativas de

Hg com erros. Portanto, o ajuste de coeficientes e a avaliação de desempenho tornam-se importantes para gerar um banco de dados mais confiável e ampliar sua aplicação.

Na região de Campo Grande – MS, modelos empíricos ainda não foram avaliados para quantificar e qualificar o grau de confiabilidade na estimativa de Hg e geração de uma base de dados maior. Nesse sentido, a avaliação de modelos empíricos para a condição climática local torna-se de extrema importância para pesquisadores e as partes da sociedade interessadas. Neste trabalho, dez modelos empíricos que estimam Hg com a temperatura do ar como variável de entrada, são ajustados e avaliados usando dados de 10 anos (2005 a 2014).

MATERIAL E MÉTODOS

Local e dados

Este estudo foi realizado utilizando conjuntos de dados obtidos entre 1 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2014, a partir de uma estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada em Campo Grande - MS, Brasil (20°27'S, 54°36'W e altitude 530 m). O clima local é classificado como *Aw* de acordo com Köppen, sendo definido como subtropical, quente e úmido com verão chuvoso e inverno seco, com precipitação anual de 1.500 mm. Os dados foram coletados a cada hora, em seguida foram processados e integrados para partição diária. Devido à grande variabilidade nas medições das variáveis, uma abordagem foi usada para controle de qualidade dos dados.

Modelos empíricos e validação

A forma de correlação utilizada na literatura correlaciona a transmissividade atmosférica (K_t , razão entre Hg e H_0 – irradiação solar no topo da atmosfera) em termos da temperatura do ar. Esses modelos são amplamente aceitos e facilmente ajustáveis para fins de estimativa, uma vez que os dados necessários consistem apenas na temperatura do ar.

Os modelos utilizados são para estimativa a irradiação solar global (Hg) na partição de tempo diária (Tabela 1). Os modelos empíricos utilizados neste trabalho baseiam-se no princípio de que cada corpo emite radiação de ondas longas em função de sua temperatura e o calor sensível é responsável pelas variações da temperatura, assim, é possível obter uma relação entre as diferenças de temperatura e a irradiação solar (SivaKrishna Rao et al., 2017). Os modelos de irradiação solar utilizados no presente estudo são baseados neste princípio. Neste estudo, os modelos foram amplamente utilizados na literatura e reivindicados como modelos precisos.

O modelo M1 proposto por (Bristow e Campbell, 1984) (B-C), os modelos M2 – M4 são modificações do modelo M1. Já o modelo M5 foi por (Hargreaves e Samani, 1982) (H-S), enquanto que os modelos M6 – M8 são versões modificadas de M5. Os modelos M9 e M10 são modificações baseadas na função logarítmica. Para melhor análise os modelos serão separados em três grupos, modelos M1 – M4 será classificado como grupo 1 (G1), modelos M5 – M8 como grupo 2 (G2) e modelos M9 e M10 como grupo 3 (G3). Por serem de natureza empírica, os modelos carecem de ajustes de seus coeficientes. O método dos mínimos quadrados foi utilizado para regressão no ajuste dos coeficientes dos modelos.

Tabela 1. Modelos baseados na temperatura do ar utilizados em Campo Grande.

Modelo	Nome	Equações	Coefficientes
M1	Bristow e Campbell (1984)	$\frac{H_g}{H_0} = \beta_1 \left[1 - \exp(-\beta_2 \Delta T^{\beta_3}) \right]$	β_1, β_2 e β_3
M2	Meza e Varas (2000)	$\frac{H_g}{H_0} = 0,75 \left[1 - \exp(-\beta_2 \Delta T^2) \right]$	β_2
M3	Weiss et al. (2001)	$\frac{H_g}{H_0} = 0,75 \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta_2 \Delta T^2}{H_0}\right) \right]$	β_2
M4	Abraha e Savage (2008)	$\frac{H_g}{H_0} = 0,75 \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta_2 \Delta T^2}{\Delta T_m}\right) \right]$	β_2
M5	Hargreaves e Samani (1982)	$\frac{H_g}{H_0} = \beta_1 (\Delta T)^{1/2}$	β_1
M6	Annandale et al. (2002)	$\frac{H_g}{H_0} = \beta_1 (1 + 2,7 \times 10^{-5} \times Alt) (\Delta T)^{1/2}$	β_1
M7	Hargreaves et al. (1985)	$\frac{H_g}{H_0} = \left[\beta_1 (\Delta T)^{1/2} + \beta_2 \right]$	β_1 e β_2
M8	Hunt et al. (1998)	$\frac{H_g}{H_0} = \beta_1 (\Delta T)^{1/2} + \frac{\beta_2}{H_0}$	β_1 e β_2
M9	Chen at al. (2004)	$\frac{H_g}{H_0} = \beta_1 \ln(\Delta T) + \beta_2$	β_1 e β_2
M10	Alsamamra (2019)	$\frac{H_g}{H_0} = \beta_1 \ln(\Delta T) + \beta_2 \left(\frac{T_{\min}}{T_{\max}} \right)^2$	β_1 e β_2

Os valores de $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ são coeficientes empíricos que serão ajustados localmente. ΔT é a variação diária da temperatura do ar ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$) e ΔT_m é a amplitude térmica média. T_{\max} é a temperatura do ar máxima e T_{\min} a temperatura do ar mínima no dia. H_g e H_0 são a irradiação solar global estimada pelo modelo e a irradiação solar no topo da atmosfera, respectivamente.

Na literatura podemos encontrar diferentes metodologias para ajuste dos coeficientes dos modelos e sua validação no local de interesse (De Souza, 2018; Wang et al., 2018). Neste trabalho a base de dados utilizada é correspondente a 10 anos de medidas (2005 – 2014), por isso foram adotadas as seguintes separações: para ajustar os coeficientes empíricos foram utilizados sete anos (2005 - 2011) e três anos (2012 - 2014) foram separados para validar os modelos e avaliar seu desempenho. A irradiação solar no topo da atmosfera (H_0) é um valor

teórico e calculado para a localização de interesse e depende da latitude local (ϕ , em graus), ângulo de horário (ω_s , em graus) e da declinação solar (δ , em graus) (Duffie e Beckman, 2013).

As estimativas com os modelos empíricos para estimar Hg foram comparadas com os valores medidos, através dos índices estatísticos: Mean Bias Error (MBE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), o coeficiente de determinação (R^2) e o índice de concordância “d” de Willmott (ICW) (Santos et al., 2016). O valor ideal de MBE é "zero". O RMSE fornece informações sobre o desempenho de curto prazo. O valor de RMSE é sempre positivo e quanto menor os valores obtidos, melhor será o desempenho do modelo. O MAPE (%) fornece informações da diferença relativa entre os valores medidos e os estimados por cada modelo para cada dia considerado. Naturalmente, o melhor modelo deve apresentar os maiores valores do ICW.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Coefficientes Ajustados Localmente

Os coeficientes empíricos que foram obtidos para cada um dos dez modelos são mostrados na (Tabela 2). Os coeficientes β_1 e β_3 gerados para o modelo M1 tem valores iguais a $0,679 \pm 0,011$ e $1,746 \pm 0,072$. Apenas o valor de β_2 dos modelos M7, M8 e M9 foram negativos. O modelo M5 tem coeficiente igual $\beta_1 = 0,168 \pm 0,001$, enquanto que o modelo M6 mostra coeficiente ajustado igual a $0,166 \pm 0,001$. Hargreaves e Samani (1982) indicam para seu modelo (M5) utilizar valor de $\beta_1 = 0,190$ para regiões costeiras e $\beta_1 = 0,160$ para região no interior. O ajuste local concorda com a recomendação, mostrando uma diferença de 3,750% entre os coeficientes. O modelo M8 gerou o maior valor absoluto de β_2 entre os coeficientes.

Tabela 2. Coeficientes para os modelos ajustados em Campo Grande, MS.

	Modelo	β_1	β_2	β_3
Coeficiente Diário	M1	0,679±0,011	0,029±0,004	1,746±0,072
	M2		0,013±0,000	
	M3		0,454±0,005	
	M4		0,134±0,001	
	M5	0,168±0,001		
	M6	0,166±0,001		
	M7	0,228±0,004	-0,194±0,014	
	M8	0,238±0,195	-6,543±0,634	
	M9	0,340±0,001	-0,235±0,023	
	M10	0,224±0,001	0,093±0,011	

Embora os modelos sejam empíricos, é possível interpretar fisicamente os coeficientes ajustados. Em oito locais do Estado de Alagoas, região nordeste do Brasil (Dos Santos et al., 2014) explicam com interpretação física o efeito da dinâmica atmosférica nos coeficientes ajustados de diferentes modelos empíricos baseados na temperatura do ar. Liu et al., (2009) destacam a importância da interpretação física dos coeficientes ajustados para locais da China. Portanto a dinâmica das nuvens e constituintes atmosféricos têm efeitos significativos sobre os modelos ajustados. Os resultados encontrados para os coeficientes locais concordam com encontrados por Chen et al., (2004), Chen et al., (2006), Hargreaves e Samani (1982) e Allen et al., (1998). Para a Palestina, Alsamamra (2019), obteve os seguintes coeficientes: modelo M1 ($\beta_1 = 1,751$, $\beta_2 = 0,9416$ e $\beta_3 = 0,0620$), M7 ($\beta_1 = 0,1622$ e $\beta_2 = -0,0176$) e M10 ($\beta_1 = 0,2314$ e $\beta_2 = 0,0470$). Estes coeficientes assemelhassem com os valores locais.

Os coeficientes encontrados neste trabalho são diferentes dos obtidos por Quej et al., (2016) e Almorox et al., (2011), que avaliaram os mesmos modelos. Reforçando a necessidade de ajuste dos coeficientes com dados no local de interesse. Os resultados obtidos são semelhantes aos relatados por Silva et al., (2012), cuja análise foi feita em um estudo semelhante para três regiões de Minas Gerais/Brasil. De acordo com Almorox et al., (2011) divergências que são encontradas podem ser explicadas pelas variações locais e sazonais de nebulosidade que resultam de mudanças periódicas na dinâmica atmosférica.

Desempenho estatístico dos modelos

A estimativa da irradiação solar global (Hg) foi comparada com o valor da irradiação solar medida. Na Figura 2, cada representação gráfica de (a) até (j) mostra comparações entre o Hg medido e os valores estimados obtidos pelos dez modelos empíricos com as equações lineares e os respectivos valores de R^2 .

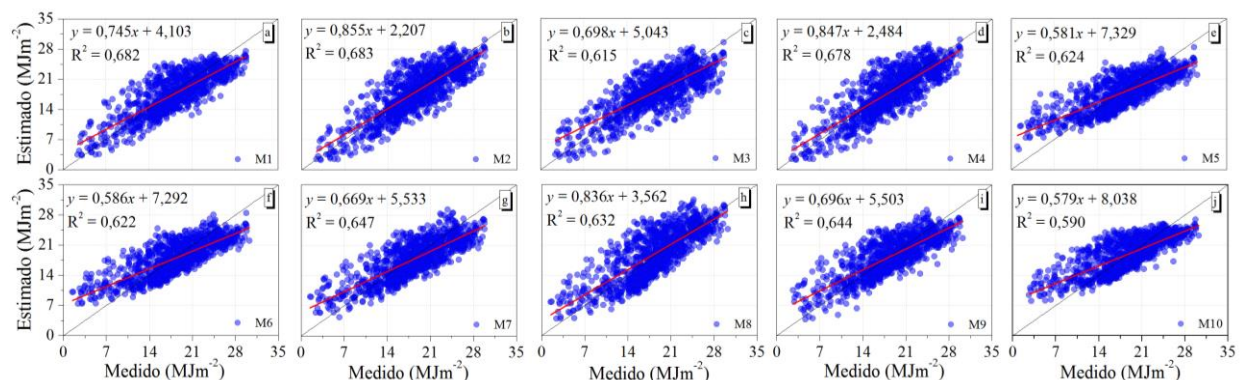


Figura 2. Valores diários da dispersão da irradiação solar medida e estimada para Campo Grande – MS com os dez modelos empíricos.

Os pontos localizados mais distantes da regressão podem ser atribuídos à atenuação de Hg que ocorre devido às diferentes condições atmosféricas, uma vez que é muito provável que um grande número de combinações de cobertura de nuvem gerará o mesmo valor para ΔT , no entanto, não é razoável esperar que cada combinação produza um único valor de Hg. Todos os modelos utilizados fornecem valores de R^2 maior que 0,590, com maior valor para M2 ($R^2 = 0,683$) e M1 ($R^2 = 0,682$), que mostra uma boa associação.

Embora os modelos baseados na temperatura do ar sejam amplamente utilizados, essencialmente devido à sua praticidade, eles têm limitações de natureza experimental. O ajuste permanente dos coeficientes deve ser realizado constantemente em função das variáveis climáticas. No entanto, a capacidade de estimativa de um modelo não pode ser julgada com base apenas nos valores do coeficiente de correlação. Assim, o desempenho de um modelo deve ser avaliado em termos do número de erros estatísticos.

Os indicadores de desempenho estatísticos MBE, RMSE, ICW e MAPE obtidos para os modelos empíricos são mostrados nas (Fig. 3a - d). Os resultados do MBE mostram que os modelos M8 e M10 superestimam as medidas ($MBE = 0,558 \text{ MJ m}^{-2}$) e ($MBE = 0,242 \text{ MJm}^{-2}$) (Figura 3a). O MBE médio para os casos de subestimativas é de $-0,407 \pm 0,158 \text{ MJm}^{-2}$. A menor subestimativa é encontrada para o modelo M6 ($MBE = -0,317 \text{ MJm}^{-2}$) e a maior para o modelo M1 ($MBE = -0,610 \text{ MJm}^{-2}$). Os valores de MBE dos demais modelos são semelhantes. Os resultados do RMSE mostram que o modelo com menor valor ($RMSE = 3,115 \text{ MJm}^{-2}$) é o M1 (Figura 3b).

Os valores de ICW variaram entre 0,856 e 0,905 (Fig. 3c). O maior valor de ICW foi obtido para o modelo M2 e o menor para o modelo M10. A irradiação solar estimada pelos modelos mostra acordos acima de 85,68% com os dados observados. Em relação aos valores de MAPE, eles variam de 15,927 % para o modelo M1 a 23,042 % para o modelo M5 (Fig. 3d). Os modelos estimaram com $|MBE| < 4\%$ que representa uma subestimativa/subestimativa baixa e ideal (próximo de zero). Os modelos M8 e M10 estimaram com RMSE compreendido no intervalo de $20 \leq RMSE < 30\%$. Enquanto que, os demais modelos estimaram com erros entre $10 \leq RMSE < 20\%$.

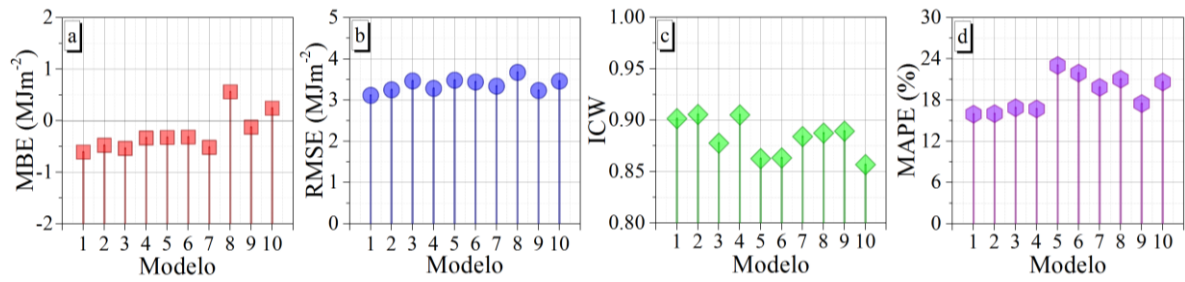


Figura 3. Índices de desempenho estatístico. a) MBE, b) RMSE, c) ICW, d) MAPE.

O desempenho dos modelos do G1 é superior ao desempenho dos modelos do G2 e G3. Indicando que o modelo M1 e suas modificações podem explicar melhor a variação de Hg em função de ΔT na região de Campo Grande que o modelo M5 e suas adaptações e, que os modelos M9 e M10. Os resultados obtidos neste trabalho assemelham-se aos obtidos por Siva Krishna Rao et al., (2017) que ajustaram nove modelos baseados na temperatura do ar para Tiruchirappalli na Índia. Os autores encontraram RMSE entre 14,950% e 19,440% e MAPE entre 14,580% e 19,110%, classificando o desempenho dos modelos como bom. Os valores de MAPE locais são inferiores aos obtidos por Almorox et al, (2011) derivaram coeficientes de sete modelos empíricos para estimar Hg usando dados medidos de temperatura para sete estações localizadas em Madri, Espanha, encontrando MAPE máximo de 29,170% e MAPE mínimo de 15,560%. Diferente dos resultados para campo grande, em Cruz das Almas – Bahia, nordeste do Brasil, Borges et al., (2010) avaliaram diferentes modelos e recomendaram o uso do modelo original de Hargreaves e Samani (M5) para estimativa de Hg.

A incorporação da amplitude térmica média (ΔT_m) M4 pode reduzir significativamente a sua sensibilidade ao ΔT . De acordo com Silva et al., (2012), o fato dos modelos avaliados serem calibrados com dados de temperatura do ar de apenas um ano pode influenciar o desempenho desses modelos no caso de um ano típico, seja em suas calibrações ou avaliações. Apesar do desempenho dos modelos serem considerado bom, sempre é possível buscar meios para melhorar o desempenho.

Com base na métrica dos índices estatísticos de validação o modelo original de Bristow e Campbell M1 (com $\beta_1 = 0,679 \pm 0,011$, $\beta_2 = 0,029 \pm 0,004$ e $\beta_3 = 1,746 \pm 0,072$) é recomendado como a primeira indicação para estimativa de Hg na região de Campo Grande. O segundo modelo mais indicado é o de Meza e Varas (2000) (M2) (com $\beta_2 = 0,013 \pm 0,000$), seguido do modelo M4. O modelo M9 também teve bom desempenho e pode ser uma opção viável. O modelo de Hunt et al., (1998) (M8) foi inferior aos demais, de acordo com os indicadores estatísticos.

CONCLUSÕES

Os coeficientes ajustados mostram dependência das condições climáticas locais, gerando valores distantes dos existentes na literatura. O melhor desempenho é encontrado para o modelo M1 e o pior para o modelo M8. O desempenho estatístico dos modelos do grupo 1 foi superior a os modelos do grupo 2. Os modelos ajustados apresentam grande potencial na previsão da irradiação global diária. Portanto, com o crescente uso da radiação solar como fonte de energia, a aplicação desses modelos pode auxiliar no desenvolvimento de projetos no presente e no futuro para instalações solarimétricas e térmicas na região onde não há estações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraha M., G. e Savage M. J. (2008). Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agric For Meteorol.*, 148, 401-416.
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. Smith M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper, n. 56. Rome: FAO, 300p.
- Almorox J. (2011). Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. *Turk J. Phys.*, 35, 53-64.
- Almorox J., Hontoria C., Benito, M. (2011). Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). *Applied Energy*, v.88, 1703-1709.
- Alsamamra, H. (2019). Estimation of Global Solar Radiation from Temperature Extremes: A Case Study of Hebron City, Palestine. *Journal of Energy and Natural Resources*, v.8, p1-5.
- Annandale J. G., Jovanic N.Z., Benade N., Allen R.G. (2002). Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrig. Sci.*, 21, 57-67.
- Antonanzas-Torres F., Sanz-Garcia A., Martinez-de-Pison F. J., Perpignan-Lamigueiro O. (2013). Evaluation and improvement of empirical models of global solar irradiation: case study northern Spain. *Renew Energy* v.60, p.604-14.

Borges V.P., Oliveira A.S., Coelho Filho M. A., Silva T. S. M., Pamponet B. M. (2010). Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.74-80.

Bristow K. L., e Campbell G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. For Meteorol.*, v.31, p.159-66.

Chen R., Ersi K., Yang J., Lu S., Zhao W. (2004). Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management* v. 45, p.1759–1769.

Chen R., Kang E. Lu, S., Yang J., Ji X., Zhang Z., Zhang J. (2006). New methods to estimate global radiation based on meteorological data in China. *Energy Conversion and Management* v.47, p.2991–2998.

De Souza K. (2018). Temperature-based model for monthly average hourly global solar radiation for the Carib bean is land of Trinidad. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10, 033701; doi: 10.1063/1.5000817.

Dos Santos C.M., De Souza J.L., Ferreira Junior R.A., Tiba C., Melo R.O., Lyra G.B., Teodoro I., Lyra G.B., Lemes M. A. M. (2014). On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern, Brazil. *Energy*, v.71, p.388-398.

Duffie J. e Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th edition, New Jersey, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

Halabi LM, Mekhilef S, Hossain M. (2018). Performance evaluation of hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system models for predicting monthly global solar radiation. *Applied Energy*, v.213, p.247–61.

Hargreaves G.H. e Samani Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig Drain Eng* v.108,225-230.

Hargreaves G.L., Hargreaves G.H., Riley J.P. (1985). Irrigation water requirement for Senegal River Basin. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.111, p.265-275.

Hunt L.A., Kucharb L., Swanton C.J. (1998). Estimation of solar radiation for use in crop modeling. *Agric. For Meteorol.*, v.91, p.293-300.

Liu X., Mei X., Li Y., Wang Q., Jensen R.J., Zhang Y., Porter J.R. (2009). Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. *Agr. Forest Meteorol.* v.149, p.1433-1446.

Meza F. e Varas E. (2000). Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agric For Meteorol.*, v.100, p.231-241.

Prescott P. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. Roy. Soc. S. Aust.*, v.64, p.114-118.

Quej V. H., Almorox J., Ibrakhimov M., Saito L. (2016). Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico. *Energy Conversion and Management* v.110, p. 448-456.

Santos C. M., Escobedo J. F., Teramoto E. T., Silva S. H. M. G. (2016). Assessment of ANN and SVM models for estimating normal direct irradiation (H_b). *Energy Conversion and Management* v.126, p.826–836.

Silva C.R., Silva, V.J., Alves, Jr. J., Carvalho, H.P. (2012). Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* v.16, p.281-288.

Siva Krishna Rao K D. V., Premalatha M., Naveen C. (2017). Models for forecasting monthly mean daily global solar radiation from in-situ measurements: Application in Tropical Climate, India. *Urban Climate*, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.11.004>.

Wang H. Sun F. Wang T. Liu W. (2018) Estimation of daily and monthly diffuse radiation from measurements of global solar radiation a case study across China. *Renewable Energy* v.126, p.226-241.

Weiss A., Hays C.J., Hu Q., Easterling W. E. (2001). Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop yield simulations. *Agron J.*, v.93, p.1321-1326.