

Irradiação Solar Global Média Horária Mensal Para o Agreste do Estado de Alagoas, Modelada por Temperatura do Ar

Cícero Manoel dos Santos¹, Jose Leonaldo de Souza², Chigueru Tiba³, Renato Américo de Araújo Neto⁴, Ricardo Araujo Ferreira Junior⁵ e Maurício Bruno Prado da Silva⁶

^{1,2,4,6}Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió–AL, ciceromanoel2007@gmail.com, leonaldojs@yahoo.com.br, renato.eng.agronomo@hotmail.com, mauricio.prado19@hotmail.com,

³Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE tiba@ufpe.br e ⁵Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu-SP ricardo_ceca@hotmail.com.

RESUMO – A radiação solar é variável meteorológica de fundamental importância como parâmetro de entrada para modelos computacionais que simulam o crescimento e a produção de culturas agrícolas. Porém, seu conhecimento é limitado pelos elevados custos de manutenção e calibração dos sensores destinados a observá-la. O trabalho tem como objetivo ajustar coeficientes empíricos e estimar a irradiação solar global média horária mensal (H_g^h), com quatro modelos empíricos baseados na temperatura do ar (modelo 1, modelo 2, modelo 3 e modelo 4), nas regiões de Palmeira dos Índios e Arapiraca, com dados meteorológicos observados no período de setembro de 2007 a dezembro de 2009. O desempenho dos modelos calibrados é analisado por meio de testes de erros estatísticos. Observou-se que os coeficientes ajustados indicaram ser dependentes da região de estudo, mostrando não ocorrer um padrão ao longo do ano. Na região de Palmeira dos Índios, o modelo 3 estimou melhor a H_g^h e resultou em pequenos erros. Já na região de Arapiraca, a melhor estimativa de H_g^h foi encontrado com o modelo 4, que resultou em baixos erros.

Palavras-chave: irradiação solar global, modelos empíricos, modelos de previsão de safra, agricultura, Alagoas.

Introdução

A radiação solar é de fundamental importância para diversas aplicações, com destaque para estudos climáticos, agricultura (disponibilidade hídrica e produtividade potencial) e utilização como recursos energéticos renováveis (conversão em energia elétrica ou aquecimento natural). Na agricultura esta radiação é responsável pelo processo fotossintético que corresponde à conversão de energia radiante [faixa da luz visível solar (0,40 • • • 0,70• m), que corresponde a Radiação Fotossinteticamente Ativa] em energia química na forma de carboidratos, e sua relação com a produção potencial da cultura (MONTEITH, 1977; TEI et. al., 1996; LIZASO et. al., 2005). Outra utilização da radiação solar na agricultura é na determinação da evapotranspiração - transferência de água para a atmosfera na forma de vapor a partir da evaporação do solo e transpiração das plantas, útil no conhecimento do uso de água pela planta e conseqüentemente da produtividade (ALLEN, 1996; PERERIRA et. al, 2002).

Atualmente, o crescente uso de modelos computacionais disponíveis que visam prever o crescimento e a produtividade de culturas agrícolas está requerendo como variável de entrada dados de radiação solar. Para a cultura do milho, por exemplo, existem modelos

com grande detalhamento, tais como: CERES-Maize, Hibrid-Maize, AquaCrop, DSSAT (JONES et. al., 1986; HENG et. al., 2009; JONES et. al., 2003; YANG et. al., 2006). Estas são ferramentas poderosas que possibilitam estimar o potencial produtivo da cultura para determinada região. Todavia, pela escassez de informações solarimétricas confiáveis – ocasionada pelo elevado custo de manutenção e calibração dos sensores – em determinadas regiões para diferentes aplicações e estudos diversos, a modelagem empírica (matemática) torna-se uma ferramenta importante para corrigir dados históricos e suprir a demanda existente. Dentre as variáveis meteorológicas a temperatura do ar é mais comumente observada em estações que a radiação solar. Por isso, modelos empíricos têm sido sugeridos para estimar com boa acurácia a radiação solar com base na temperatura do ar (BRISTOW e CAMPBELL, 1984; HARGREAVES e SAMANI, 1982; ANNANDALE et. al., 2002; HARGREAVES et. al., 1985; HUNT et. al., 1998) e a partir dessas informações efetivar-se-á melhor seu uso, principalmente, em modelagem e culturas agrícolas.

O presente trabalho objetiva estimar a irradiação solar global média horária mensal (H_g^h) nas regiões de Palmeira dos Índios e Arapiraca – Agreste do Estado de Alagoas, com dados de temperatura do ar observados no período de setembro de 2007 a dezembro de 2009. Com a estimativa da H_g^h por modelos empíricos, poder-se-á fazer também a estimativa da evapotranspiração, que é parâmetro fundamental no balanço hídrico e manejo adequado da irrigação (diminuindo custos de instalação e economia da água) para cultivos agrícolas.

Material e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizaram-se dados meteorológicos de temperatura do ar e irradiação solar global média horária mensal (H_g^h , MJm^{-2}), obtidos em estações solarimétricas automáticas localizadas na região de Palmeira dos Índios (9°24'19,9"S; 36°39'22,7"W e 328m) e Arapiraca (9°47'54,8"S; 37°36'23,4"W e 239m), no período de setembro de 2007 a dezembro de 2009. A região é caracterizada por ser de clima semiárido e megatérmico. Baseada na suposição de que a diferença entre a temperatura diária do ar máxima e mínima fornece indicação geral do grau de nebulosidade, Hargreaves e Samani (1982) propuseram a estimativa da irradiação solar global diária (H_g^d) (Eq. 1 – modelo 1). Este modelo foi modificado por outros autores Annandale et. al., (2002) (Eq. 2 – modelo 2), Hargreaves et. al., (1985) (Eq. 3 – modelo 3) e Hunt et. al., (1998) (Eq. 4 – modelo 4). Foi adicionado o índice h sobrescrito em H_g e H_0 , para indicar que os modelos serão avaliados em escala horária (média horária mensal).

$$\frac{H_g^h}{H_o^h} = \beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{H_g^h}{H_o^h} = \beta_1 (1 + 2,7 \times 10^{-5} \times \text{Altitude}) (\Delta T)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\frac{H_g^h}{H_o^h} = \left(\beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} + \beta_2 \right) \quad (3)$$

$$\frac{H_g^h}{H_o^h} = \beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} + \frac{\beta_2}{H_o^h} \quad (4)$$

em que \bullet_1 e \bullet_2 são coeficientes empíricos a serem ajustados com dados locais. A irradiação solar global que chega ao topo da atmosfera (H_0 , MJm^{-2}) foi obtida de acordo com (IQBAL, 1983). A amplitude térmica (regime de temperatura) foi obtida da seguinte relação (Eq. 5).

$$\Delta T = T_{\max}(i) - T_{\min}(i) \quad (5)$$

em que, $\bullet T$ é a variação horária da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) da hora considerada; $T_{\max}(i)$ e $T_{\min}(i)$ as temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$) da hora (i), respectivamente. Para a verificação do desempenho dos modelos foram utilizados alguns índices estatísticos para medidas de erros e avaliação de variação: média dos desvios (med) (SANTOS, 2012), desvio padrão da população de desvios (dpp) (SANTOS, 2012), índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1981) e o Teste-t estatístico (DAVID et. al., 2008).

Resultados e Discussão

Os coeficientes gerados pelos modelos (Tab.1) mostraram ser dependentes da região de estudo. O regime de temperatura não teve efeito significativo sobre o ajuste dos coeficientes dos modelos, não indicando um padrão para estação chuvosa (abril a agosto) e estação seca (setembro a março). Os coeficientes \bullet_1 dos modelos 1 e 2 mostraram ser significativos a 5%, sendo observado pouca divergência. Por outro lado os coeficientes \bullet_1 e \bullet_2 do modelo 3 e \bullet_1 do modelo 4, mostraram ser não significativo, enquanto \bullet_2 do modelo 4 são significativos a 5%. Na região de Palmeira dos Índios o coeficiente \bullet_1 do modelo 1 indicou máximo de 0,56 no mês de novembro e mínimo de 0,39 no mês de fevereiro. O coeficiente \bullet_1 do modelo 2 foi diferente entre as regiões. Os coeficientes \bullet_1 e \bullet_2 dos modelos 3 e 4 apresentaram valores com discrepâncias, para a região de Palmeira dos Índios \bullet_1 e \bullet_2 do modelo 4 foram positivos, enquanto o modelo 3 não mostrou o mesmo padrão. Observaram-se pequenos desvios padrões médios para os coeficientes ajustados, indicando boa estimativa para os coeficientes. De maneira geral, todos os coeficientes gerados não apresentaram nenhum padrão anual (para os meses) para as regiões estudadas. Tais divergências podem ser

explicadas pelas variações locais e sazonais da nebulosidade, que decorre das alterações periódicas da dinâmica atmosférica (ALMOROX et. al., 2005).

Na região de Palmeira dos Índios o modelo 3 melhor estimou H_g^h , superestimando nos meses de janeiro, abril, junho, setembro e novembro, não apresentando nenhum padrão para estação seca ou chuvosa (Tab. 2). Segundo Spokas & Forcela (2006) a superestimava da H_g^h para dias secos e úmidos são afetadas através da influência na cobertura de nuvens (dias parcialmente nublados sem precipitação, aerossóis e poeira). Os índices de concordância d entre a H_{ge}^h e H_g^h ficaram compreendidos entre 0,86 e 0,99. O dpp apresentou amplitude de $0,26 \text{ MJm}^{-2}$. Maiores picos entre a irradiação observada e estimada foram observados para os meses de março e outubro em Palmeira dos Índios, ambos com H_g^h e H_{ge}^h próximos de $3,2 \text{ MJm}^{-2}$. O teste t avaliado para o nível de significância de 5% indicou que os dados estimados não diferem estatisticamente dos observados ($t = -0,98 < t_{0,05}$). Na região de Arapiraca todos os modelos desempenharam bons ajustes entre a irradiação solar observada e estimada, sendo que o modelo 4 (Tab. 2) foi o que mostrou melhor eficiência em estimar H_g^h . Os índices de concordância entre H_g^h e H_{ge}^h variaram de 0,72 a 0,99. No período chuvoso foi identificado para med valor máximo de $0,22 \text{ MJm}^{-2}$ e mínimo em modulo de $0,15 \text{ MJm}^{-2}$, com dpp variando de 0,13 a $0,69 \text{ MJm}^{-2}$. De maneira geral, o modelo teve tendência de superestimar os valores observados. Nos meses de janeiro, fevereiro, março e maio houve subestimativa (med < 0). O teste t indicou não haver diferença significativa ($t = 1,013 < t_{0,05}$).

As Figs. 1. (a) e (b) mostram a variação anual da H_g^h observada e H_{ge}^h estimada pelos modelos empíricos, que melhor estimaram. Observa-se uma grande semelhança entre a distribuição das curvas da variação anual de H_g^h e H_{ge}^h , maiores picos nos meses pertencentes à estação seca (setembro a março) e menores picos na estação chuvosa (abril a agosto). Isto é ocasionado pela mudança de posição do sol durante o ano. A evolução começa às 6h00 com valores médios próximos de $0,5 \text{ MJm}^{-2}$, cresce até às 12h00, com máximo próximo $3,50 \text{ MJm}^{-2}$, decrescendo até o nível de zero energia, às 18h00. Nas Figs. 1. (a) e (b) nota-se que a evolução diária da H_{ge}^h e H_g^h apresenta uma variação quase simétrica do nascer do sol até o meio dia, e do meio dia até ao pôr do sol. De acordo com Spokas e Forcela (2006), este aspecto está ligada a variação diária da radiação com o ângulo de incidência. Embora tenham sido propostos para estimar a radiação solar diária ou mensal, estes modelos foram capazes de estimar com boa acurácia a H_g^h .

Conclusão

Em geral, os modelos estimaram H_g^h com bons ajustes. Na região de Palmeira dos Índios a melhor estimativa foi verificada com o modelo 3, enquanto a região de Arapiraca indicou melhor estimativa com o modelo 4. Embora tenham sido propostos para estimar a radiação solar diária ou mensal, estes modelos foram capazes de estimar com boa acurácia a H_g^h nas regiões estudadas.

Literatura Citada

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 122, p.97-106, 2006.

ALMOROX, J; BENITO, M.; HONTORIA, C. Estimation of monthly Ångström – Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, v. 30, p. 931 – 936, 2005.

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.

DAVID, M. L.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. Estatística: Teoria e Aplicações, Editora LTC, 5 ° edição, Tradução Teresa Cristina Padilha de Souza, - [Reimpr.] – Rio de Janeiro, LTC, 2011, 752 páginas, + CD-ROM, 2008.

HARGREAVES, G.L.; HARGREAVES, G.H; RILEY, J.P. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drain, Engineering*, v.111, p.265-275, 1985.

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

HENG, L. K.; STEDUTO, P.; ROJAS – LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, v. 101, p.448-459, 2009.

HUNT, L. A.; KUCHARB, L.; SWANTON, C.J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*. V.91, p. 293–300, 1998.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation, New York: Academic Press, 390p, 1983.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. CERES – Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A & M Uni. Press, College Station, TX. 1986.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G. POTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, V.; GISSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. *European Journal Agronomy*, v. 18, p. 235 – 265, 2003.

LIZASO, J. L.; BATCHELOR, W. D.; BOOTE, K. J.; WESGATE, M. E. Development of a leaf – level canopy assimilation model for CERES – Maize. *Agronomy Journal*, v. 97, 9.722-733, 2005.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philos. Trans. Royal London. London, v.2081, p.277-294, 1977.

SANTOS, C. M. Irradiação solar global com diferentes modelos para Alagoas. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, 2012.

SPOKAS, K.; FORCELA, F. Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data. Weed Science, v.54, p.184 – 189, 2006.

TEI, F.; SCAIFEI, A.; AIKMAN, D. P. Growth of lettuce, onion, and beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. Annals of botany, v.78, p.633-643, 1996.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. Physical Geography, Delaware, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

YANG, H.; DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; WALTER, D. Features, Applications, and limitations of the hybrid-Maize simulation model. Agronomy Journal, v.98, p.737-748, 2006.

Tabela 1. Coeficientes (Coef.) e média dos desvios padrões (<DP>) dos modelos, para Palmeira dos Índios e Arapiraca. *significativo a 5% e ** não significativo a 5%.

Palmeira dos Índios						
Modelos	1		3		4	
Mês\ Coef.	• ₁	• ₁	• ₁	• ₂	• ₁	• ₂
Janeiro	0,48*	0,48*	0,46**	0,03**	0,48**	0,02*
Fevereiro	0,39*	0,38*	0,68**	-0,34**	0,38**	0,02*
Março	0,48*	0,48*	0,31**	0,22**	0,47**	0,02*
Abril	0,51*	0,50*	0,85**	-0,41**	0,45**	0,14*
Mai	0,41*	0,41*	-0,23**	0,70**	0,35**	0,13*
Junho	0,44*	0,44*	0,05**	0,43**	0,40**	0,09*
Julho	0,44*	0,44*	0,16**	0,32**	0,41**	0,07*
Agosto	0,47*	0,46*	-0,13**	0,66**	0,29**	0,40*
Setembro	0,48*	0,48*	0,32**	0,17**	0,42**	0,15*
Outubro	0,52*	0,52*	0,55**	-0,03**	0,40**	0,38*
Novembro	0,56*	0,56*	0,40**	0,19**	0,44**	0,40*
Dezembro	0,49*	0,49*	0,17**	0,40**	0,43**	0,22*
<DP> (±)	0,03	0,03	0,32	0,38	0,03	0,07
Arapiraca						
Modelos	1		3		4	
Mês\ Coef.	• ₁	• ₁	• ₁	• ₂	• ₁	• ₂
Janeiro	0,45*	0,45*	0,23**	0,29**	0,46**	-0,04*
Fevereiro	0,43*	0,43*	0,21**	0,29**	0,44**	-0,03*
Março	0,46*	0,46*	0,53**	-0,09**	0,46**	-0,01*
Abril	0,48*	0,48*	1,08**	-0,73**	0,43**	0,15*
Mai	0,42*	0,42*	-0,07**	0,55**	0,35**	0,16*
Junho	0,45*	0,45*	0,47**	-0,01**	0,38**	0,13*
Julho	0,41*	0,41*	0,02**	0,50**	0,38**	0,08*
Agosto	0,42*	0,42*	0,43**	-0,02**	0,36**	0,14*
Setembro	0,46*	0,46*	1,28**	-1,04**	0,34**	0,34*
Outubro	0,47*	0,47*	2,43**	-2,63**	0,21**	0,87*
Novembro	0,45*	0,45*	0,56**	-0,15**	0,38**	0,25*
Dezembro	0,44*	0,44*	1,30**	-1,17**	0,33**	0,41*
<DP> (±)	0,03	0,03	0,38	0,48	0,03	0,08

Tabela 2. Indicativos estatísticos para os modelos que melhor estimaram H_g^h para Palmeira dos Índios e Arapiraca.

Palmeira dos Índios - modelo 3				Arapiraca - modelo 4		
Mês	med (MJm^{-2})	dpp (MJm^{-2})	d	med (MJm^{-2})	dpp (MJm^{-2})	d
Janeiro	0,09	0,24	0,98	0,09	0,13	0,99
Fevereiro	-0,31	0,29	0,93	0,10	0,15	0,99
Março	-0,08	0,29	0,97	0,17	0,20	0,98
Abril	0,27	0,58	0,88	0,22	0,26	0,96
Mai	-0,44	0,41	0,88	-0,15	0,28	0,97
Junho	0,17	0,16	0,98	0,13	0,16	0,99
Julho	-0,03	0,17	0,99	-0,02	0,16	0,99
Agosto	0,05	0,20	0,99	0,07	0,19	0,99
Setembro	0,06	0,26	0,97	0,13	0,26	0,96
Outubro	0,07	0,33	0,96	0,01	0,47	0,85
Novembro	0,33	0,43	0,86	-0,10	0,36	0,93
Dezembro	0,05	0,33	0,96	-0,02	0,69	0,72

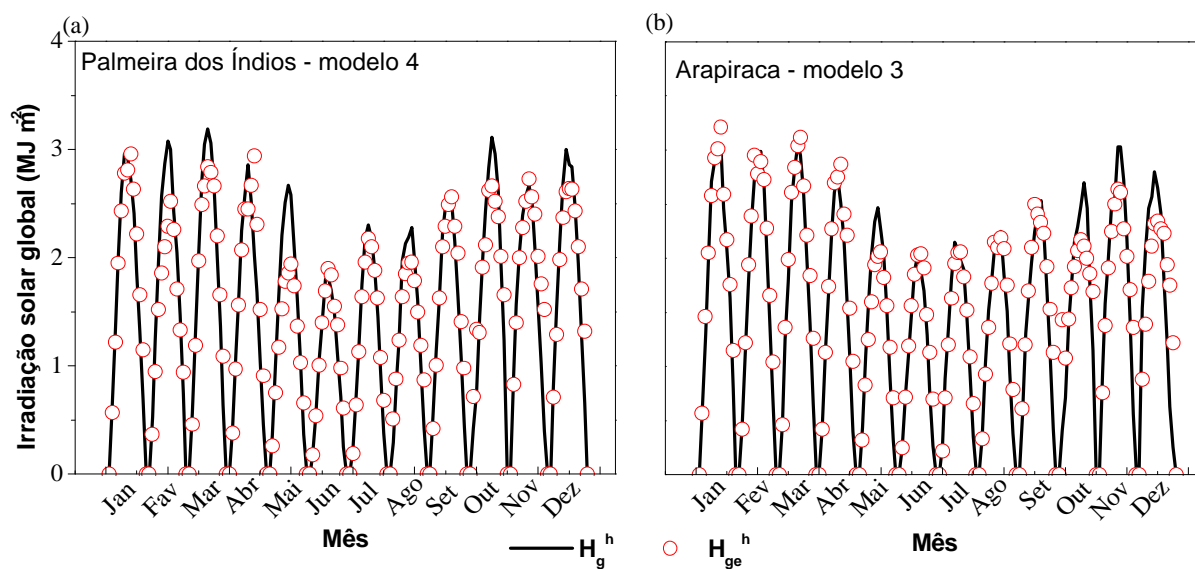


Figura 1. Variação anual da irradiação solar global média horária mensal observada (H_g^h) e estimada (H_{ge}^h) pelos modelos empíricos que melhor estimaram em a) Palmeira dos Índios e b) Arapiraca.