



ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA VIÇOSA (MG) COM DADOS DE ENTRADA DE FÁCIL MEDIÇÃO

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL PARA VIÇOSA (MG) CON DATOS DE ENTRADA DE FÁCIL MEDICIÓN

RECUPERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA PROCEDENTE DE LA BIODIGESTIÓN DE LA VIÑA EN PROCESOS INDUSTRIALES

Ana Flávia Martins Monteiro ¹
Fabrina Bolzan Martins ²

Resumo: A radiação solar global é uma variável de entrada importante em modelos energéticos e de produtividade de culturas. No entanto, o registro dessa variável é realizado por instrumentos presentes nas estações meteorológicas automáticas os quais apresentam alto custo de manutenção e calibração, sendo necessária sua estimativa. O objetivo deste trabalho foi ajustar, avaliar e validar cinco modelos de estimativa da radiação solar global para Viçosa, Minas Gerais. Três modelos utilizam como variável de entrada temperatura máxima e mínima e um deles utiliza, adicionalmente, a precipitação; enquanto que os outros dois modelos utilizam a insolação real. Para isso, foram coletados dados no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) e da plataforma do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA), no período de 1999 a 2015. O ajuste e a validação do desempenho de cada modelo foram avaliados por meio: da raiz quadrada média do erro (RQME), tendência do modelo (BIAS), coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho (c) e valor ponderado (VP), significância dos coeficientes e proximidade entre os valores observados e estimados. Em geral, os modelos apresentaram tendência de superestimação para valores de radiação inferior a 10 MJ.m⁻².dia⁻¹ e subestimação para valores superiores a 20 MJ. MJ.m⁻².dia⁻¹. Os modelos que apresentam a inclusão da insolação real e a razão da insolação foram os que obtiveram melhores resultados, tanto no ajuste quanto na validação.

Palavras-chave: Modelos empíricos. Insolação Real. Razão de Insolação. Temperatura do ar.

Abstract: Global solar radiation is an important input variable in energy models and crop productivity. However, the recording of this variable is performed by instruments present in the automatic meteorological stations, which present a high maintenance and calibration cost, being necessary their estimation. The objective of this study was to adjust, evaluate and validate five models of estimation of global solar radiation for Viçosa, Minas Gerais. Three models use as input variable maximum and minimum temperature and one of them uses, in addition, the precipitation; while the other two models use the real insolation. For this, data were collected from the Meteorological Data Bank for Teaching and Research (BDMEP) and from the Integrated Environmental Data

¹ Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos; Instituto de Recursos Naturais; Universidade Federal de Itajubá. E-mail: martiinsanaa@gmail.com

² Doutora. Professora Adjunto do Instituto de Recursos Naturais; Universidade Federal de Itajubá. E-mail: fabrinabm@gmail.com



System (SINDA) platform, from 1999 to 2015. The adjustment and validation of the performance of each model were evaluated by means of the mean square error root (RQME), model trend (BIAS), correlation coefficient (r), Willmott concordance index (d), performance index (c) and weighted value (PV), significance of the coefficients and proximity between the observed and estimated values. In general, the models tended to overestimate radiation values below 10 MJ.m-2.dia-1 and underestimation to values higher than 20 MJ.m-2.dia-1. The models that present the inclusion of the real insolation and the reason of the insolation were the ones that obtained better results, both in the adjustment and the validation.

Keywords: Empirical models. Real insolation. Reason of the insolation. Air temperature.

Resumen: La radiación solar global es una variable de entrada importante en modelos energéticos y de productividad de cultivos. Sin embargo, el registro de esta variable es realizado por instrumentos presentes en las estaciones meteorológicas automáticas que presentan alto costo de mantenimiento y calibración, siendo necesaria su estimación. El objetivo de este trabajo fue ajustar, evaluar y validar cinco modelos de estimación de la radiación solar global para Viçosa, Minas Gerais. Tres modelos utilizan como variable de entrada temperatura máxima y mínima y uno de ellos utiliza, adicionalmente, la precipitación; mientras que los otros dos modelos utilizan la insolación real. Para ello, se recogieron datos en el Banco de Datos Meteorológicos para Enseñanza e Investigación (BDMEP) y de la plataforma del Sistema Integrado de Datos Ambientales (SINDA), en el período de 1999 a 2015. El ajuste y la validación del desempeño de cada modelo fueron evaluados por ejemplo, de la raíz cuadrada media del error (RQME), tendencia del modelo (BIAS), coeficiente de correlación (r), índice de concordancia de Willmott (d), índice de rendimiento (c) y valor ponderado (VP), significancia de los coeficientes y proximidad entre los valores observados y estimados. En general, los modelos presentaron tendencia de sobreestimación para valores de radiación inferior a 10 MJ.m-2.día-1 y subestimación para valores superiores a 20 MJ.m-2.día-1. Los modelos que presentan la inclusión de la insolación real y la razón de la insolación fueron los que obtuvieron mejores resultados, tanto en el ajuste y en la validación.

Palabras-clave: Modelos empíricos. Insolación Real. Razón de insolación. Temperatura del aire.

Envio 09/02/2019

Revisão 09/03/2019

Aceite 09/03/2019

Introdução

A radiação solar global (H_s) é a principal fonte de energia do sistema Terra-Atmosfera, (Silva et al., 2012a), influenciando as relações físico-químicas e biológicas observadas em ecossistemas agrícolas e florestais, como fotossíntese, evapotranspiração, crescimento e desenvolvimento de cultivos agrícolas e florestais (Podestá et al., 2004). Além disso, constitui uma variável de entrada importante nos estudos energéticos, além de estudos voltados à agrometeorologia, como: necessidade hídrica, zoneamento agrometeorológico, evapotranspiração, sistemas de irrigação e em modelos de simulação do crescimento e produção de culturas, tornando-se necessário quantificar sua disponibilidade (Borges et al., 2010; Souza et al., 2017).

No entanto, apesar de ser uma variável meteorológica importante, a medição da H_s é restrita as estações meteorológicas automáticas (Buriol et al., 2012). Porém, o número de



estações que possuem esse registro é reduzido devido ao alto custo na aquisição, manutenção e calibração dos instrumentos (Liu et al., 2009; Almorox et al., 2011).

Por essa razão, na ausência de dados medidos de H_s , tem-se optado pela sua estimativa, principalmente através de modelos empíricos, os quais utilizam diferentes relações funcionais e a inclusão de variáveis de fácil medição, como temperatura do ar, precipitação e insolação (Adaramola, 2012; Jerszurki e Souza, 2013). Isso constitui um benefício, pois são variáveis frequentemente registradas em estações meteorológicas, o que tornam os modelos ferramentas apropriadas para estimar a H_s (Hargreaves e Samani, 1982; Thornton e Running, 1999). Grande parte dos modelos foram ajustados e avaliados em localidades diferentes os coeficientes de calibração mudaram consideravelmente. Assim, as relações empíricas variam espacialmente e temporalmente, o que torna imprescindível a calibração dos modelos para cada local (Liu et al., 2009; Almorox et al., 2011; Buriol et al., 2012).

No entanto, não há confirmação da superioridade de um modelo sobre o outro, nem da melhor relação funcional e das variáveis de entrada que devem ser consideradas nos modelos empíricos. No caso de Minas Gerais, os escassos trabalhos existentes são restritos para Lavras (Dantas et al., 2003) ou para as regiões Metropolitana, Zona da Mata e Vale do Rio Doce (Silva et al., 2012b) e para o noroeste de Minas Gerais (Silva et al., 2012a) considerando apenas a categoria de modelos baseados na temperatura do ar e precipitação. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi ajustar, avaliar e validar cinco modelos empíricos amplamente utilizados na estimativa da radiação solar global para a localidade de Viçosa, Minas Gerais.

Dados e Metodologia

Utilizaram-se dados diários de temperatura máxima e mínima do ar ($T_{máx}$, $T_{mín}$; °C), insolação real (n; horas), precipitação (P; mm) obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e radiação solar global (H_s ; MJ.m⁻².dia⁻¹), obtida do Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para a localidade de Viçosa (MG) (20°45'S, 42°52'48"O, 648m) para o período de 1999 a 2015.



Primeiramente, os dados foram submetidos a uma análise de consistência com base nos critérios de eliminação propostos por Liu et al. (2009): a) dados ausentes para qualquer uma das variáveis; b) $T_{m\acute{a}x} < T_{m\acute{i}n}$; c) $H_s/H_0 > 1$, sendo H_0 a radiação solar incidente no topo da atmosfera ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$). Os dados foram divididos em dois conjuntos independentes, sendo o primeiro (1999 a 2010) utilizado para calibrar os coeficientes dos modelos, os quais foram obtidos pelo ajuste dos modelos, e o segundo (2011 a 2015) para avaliar e validar o desempenho dos mesmos. Os modelos empíricos selecionados para o ajuste, avaliação e validação (Tabela 1) são amplamente utilizados na literatura, os quais propõem diferentes relações funcionais e a inclusão de diferentes variáveis de entrada.

Tabela 1 - Modelos empíricos utilizados na estimativa da radiação solar global para Viçosa (MG).

Símbolo	Equação	Referência
AP	$H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \frac{n}{N} \right) \right)$	Angström (1924) - Prescott (1940)
HS	$H_s = H_0 \cdot (b_0 \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5})$	Hargreaves e Samani (1982)
JS	$H_s = H_0 \cdot b_0 \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{b_1} \cdot (1 + b_2 \cdot P + b_3 \cdot P^2)$	De Jong e Stewart (1993)
EY	$H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \frac{n}{N} \right) + b_2 \cdot \left(\frac{n}{N} \right)^2 + b_3 \cdot \left(\frac{n}{N} \right)^3 \right)$	Ertekin e Yaldiz (2000)
Ch	$H_s = H_0 \cdot (b_0 \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5} + b_1)$	Chen et al. (2004)

Em que: H_s é a radiação solar global ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$). H_0 é a radiação solar incidente no topo da atmosfera ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$), dado por: $H_0 = \frac{0,0864}{\pi} \cdot 1367 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot [(h \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \delta) + (\text{cos} \alpha \cdot \text{cos} \delta \cdot \text{sen} h)]$; em que $\left(\frac{d}{D} \right)^2$ é a distância média Terra-Sol (km), dado por: $\left(\frac{d}{D} \right)^2 = 1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{NDA \cdot 360}{365} \right)$; NDA é número do dia do ano; h é o ângulo horário do nascer do Sol (graus), dado por: $h = \arccos.-(\text{tan} \alpha \cdot \text{tan} \delta)$; α é a latitude (graus); δ é a declinação solar (radianos), dado por: $\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(\frac{360 \cdot (284 + NDA)}{365} \right)$. $T_{m\acute{a}x}$ é a temperatura máxima do dia ($^{\circ}C$). $T_{m\acute{i}n}$ é a temperatura mínima do dia ($^{\circ}C$). N é a duração máxima do brilho solar ($horas.dia^{-1}$), dado por: $N =$



$0,1333 \cdot \arccos[-1 \cdot (\tan \alpha \cdot \tan \delta)]$. n é a insolação real (horas.dia⁻¹). P é a precipitação diária (mm). b_0, b_1, b_2 e b_3 são os coeficientes de calibração dos modelos (adimensional).

O ajuste dos modelos foi realizado utilizando o *software Statistica* (Statsoft, 2008), pelo procedimento *nonlinear estimation*, considerando o método dos mínimos quadrados ordinários pela aproximação de Gauss-Newton. Para avaliar o ajuste dos modelos foram utilizadas as estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME), tendência (BIAS), coeficiente de correlação (r), concordância (d), o desempenho (c) e a significância dos coeficientes pelo teste t ($\alpha=0,05$).

O RQME representa o erro médio do modelo:
$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)^2}{nd}}$$

O índice BIAS avalia a tendência do modelo:
$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

O coeficiente de correlação de Pearson determina o grau de associação entre os valores estimados e observados:
$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2}}$$

O índice d representa o quanto os valores simulados estão livres de erro: $d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{nd} (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right)$.

O índice c foi obtido pelo produto entre r e d , classificando o desempenho do modelo ($>0,85$: ótimo; 0,76 a 0,85: muito bom; 0,66 a 0,75: bom; 0,61 a 0,65: moderado; 0,51 a 0,60: fraco; 0,41 a 0,50: muito fraco e $\leq 0,40$: péssimo) (Camargo e Sentelhas, 1997): $c = r \cdot d$

Sendo E_i os dados simulados pelos modelos e \bar{E} a média dos valores simulados, O_i os dados registrados e \bar{O} a média dos valores registrados pela estação meteorológica de Viçosa e nd representa o número de observações.

A comparação entre os cinco modelos foi feita por meio do valor ponderado dos escores estatísticos (VP) (Martins e Streck, 2007; Martins et al., 2014). Para tal, foi concedido para cada estatística (RQME, BIAS, r , d , c) um peso, no qual para a melhor estatística foi atribuído peso um, para o segundo melhor resultado estatístico peso dois, e assim sucessivamente. O somatório dos pesos atribuídos a cada estatística constituiu o VP e, quanto menor o seu valor, melhor é o modelo (Martins et al., 2014).



A validação do desempenho foi realizada pela comparação dos valores observados e estimados de H_s obtidos com os coeficientes calibrados no ajuste. Foram utilizadas as estatísticas RQME, BIAS, r, d, c para validar o desempenho e selecionar o melhor modelo para a estimativa da H_s para Viçosa.

Resultados e Discussão

De maneira geral, modelos ajustados apresentaram estatísticas semelhantes entre si (RQME, BIAS, r, d, c), apesar da discrepância do VP (5 a 25). Já os coeficientes de ajuste dos modelos foram significativos pelo teste t ($\alpha=0,05$) (Tabela 2).

Tabela 2 – Estatísticas utilizadas para os ajustes dos cinco modelos de estimativa da radiação solar global, coeficientes de calibração e significância. Viçosa (MG), 1999 a 2010.

Símbolo	Estatísticas						Coeficientes			
	RQME	BIAS	r	d	c	V	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃
		S				P				
AP	3,861 (2)	0,00 3 (2)	0,75 6 (2)	0,84 6 (2)	0,63 9 (2)	10	0,279 *	0,414*	-	-
HS	4,160 (5)	0,01 2 (5)	0,72 5 (5)	0,78 3 (5)	0,56 7 (5)	25	0,147 *	-	-	-
JS	4,033 (4)	0,00 5 (4)	0,73 1 (4)	0,82 0 (4)	0,59 9 (4)	20	0,096 *	0,677*	- 0,003*	0*
EY	3,833 (1)	0,00 2 (1)	0,76 0 (1)	0,85 0 (1)	0,64 6 (1)	5	0,250 *	0,745*	- 0,658*	0,344*
Ch	4,025 (3)	0,00 4 (3)	0,73 2 (3)	0,82 4 (3)	0,60 3 (3)	15	0,199 *	- 0,172*	-	-

Em que: *Valores significativos pelo teste t ($\alpha=0,05$). - Ausência de coeficiente no modelo. Os valores entre parênteses, abaixo das estatísticas, são atribuídos para o valor do índice VP. O valor um é atribuído ao melhor modelo em cada estatística, enquanto o valor 5 é atribuído ao pior modelo. Modelos: AP – Angström-Prezcott (1940); HS – Hargreaves e Samani (1982); JS – De Jong e Stewart (1993); EY – Ertekin e Yaldiz (2000); Ch – Chen et al. (2004).



Hargreaves e Samani (1992) (*HS*) propuseram um modelo para estimar a H_s a partir da temperatura e, apesar de sua simplicidade, é fundamentado na teoria de que parte da radiação é utilizada na forma de calor sensível, havendo uma proporcionalidade direta no aumento de calor sensível durante o dia, e na diferença entre $T_{máx}$ e $T_{mín}$ (Bristow e Campbell, 1984). O modelo *HS* apresenta apenas um coeficiente empírico – b_0 (Tabela 1). Para esse modelo, o coeficiente foi de 0,147 (Tabela 2), o qual foi ligeiramente superior ao encontrado por Jerszurki e Souza (2013) (em média 0,12); porém corrobora com os resultados encontrados por Silva et al. (2012a,b) para as regiões Metropolitana, Zona da Mata, Vale do Rio Doce e noroeste de Minas Gerais; por Almorox et al. (2011) para Madrid; e, são próximos ao recomendado por Allen et al. (1998) para uma região situada no interior do continente (0,16). O modelo *HS* apresentou o pior ajuste dentre os cinco modelos estudados, com VP de 25.

Chen et al. (2004) (*Ch*) apresentaram variáveis de entrada e relação funcional semelhante ao modelo *HS* utilizando dois coeficientes empíricos – b_0 e b_1 (Tabela 1). O coeficiente b_0 para esse modelo foi de 0,199 e para b_1 foi de -0,172 (Tabela 2), semelhante aos resultados encontrados por Silva et al. (2012a) e Liu et al. (2009). O modelo *Ch* apresentou o terceiro melhor ajuste dentre os modelos avaliados, com VP de 15.

O modelo proposto por De Jong e Stewart (1993) (*JS*) utiliza dados de entrada de temperatura além da P (Tabela 1), dificultando o ajuste desse modelo, principalmente em locais que apresentam grande variação sazonal e espacial da P , exatamente o que ocorre em Minas Gerais (Reboita et al., 2015). Para o modelo *JS*, os coeficientes b_0 (0,096) e b_1 (0,677) foram discrepantes ao encontrado por Silva et al. (2012a,b). Além disso, os coeficientes b_2 e b_3 , que calibram os dados de P , apresentaram valores próximos a zero, indicando que a inclusão dessa variável exerce pouca influência na estimativa da H_s , concordando com Liu et al. (2009) e Silva et al. (2012b).

Com relação ao desempenho no ajuste dos modelos *HS*, *Ch* e *JS*, observa-se que os três modelos tiveram desempenho fraco pelo índice c (Camargo e Sentelhas, 1997). Apesar dos métodos baseados na temperatura do ar serem considerados ferramentas boas e aceitáveis na estimativa da H_s (Almorox et al., 2011), a qualidade do ajuste apresenta mudanças em função da variação sazonal desta variável, o que justifica a baixa qualidade dos ajustes desses modelos



para Viçosa. Geralmente, modelos que possuem coeficientes de calibração dependentes da P possuem ajustes fracos a moderados. Essa dificuldade na estimativa da H_s foi observada por Souza et al. (2017), para a região Amazônia e Cerrado brasileiro, Liu et al. (2009) para a China e Silva et al. (2012b) para três regiões de Minas Gerais, e está atribuído a erros de medição nos instrumentos de P e da falta de acurácia no preenchimento de falhas de registro (Souza et al., 2017).

Os outros dois modelos, AP e EY , possuem a inclusão da variável razão de insolação (n/N), sendo uma categoria de modelo bastante utilizada na estimativa da H_s (Almorox e Hontoria, 2004; Liu et al., 2009; Adaramola, 2012; Buriol et al., 2012), principalmente na área energética. Essa categoria de modelo deriva do proposto por Angström (1924), o qual verificou a linearidade entre a média da H_s diária para dias de céu claro, a insolação real (n) e do comprimento do dia – fotoperíodo (N) (Almorox e Hontoria, 2004; Liu et al., 2009). Para resolver a dificuldade em obter os dados de H_s para os dias de céu claro, Prescott (1940) sugeriu o uso de H_0 , simplificando o modelo de Angström (1924) de modo que, a partir dos coeficientes linear (b_0) e angular (b_1) da equação de regressão simples entre a razão de insolação (n/N) e H_s , fosse possível estimar H_s , sendo denominado modelo de Angström-Prescott (AP) (Blanco e Sentelhas, 2002; Dantas et al., 2003; Santos et al., 2003). Nesse modelo, o valor do coeficiente b_0 está relacionado com a H_s difusa e b_1 com a H_s direta (Buriol et al., 2012), os quais variam entre zero e um (Liu et al., 2009). O valor de b_0 (0,279) e b_1 (0,414), corroboram com os estudos de calibração utilizando o modelo AP em escala diária proposto por Liu et al. (2009) e Santos et al. (2003) para a China e Ilha Solteira (SP), respectivamente.

Outros tipos de modelos foram propostos na literatura para estimar a H_s a partir de n com a finalidade de melhorar a precisão das estimativas. Um dos aspectos dessas modificações consiste na adição de termos à equação aumentando a ordem da razão de insolação (n/N) (Liu et al., 2009). Dentre eles, a relação de terceiro grau proposta por Ertekin e Yaldiz (2000) (EY) (Tabela 1). Almorox e Hontoria (2004) e Liu et al. (2009) afirmam que os modelos modificados apresentam melhorias no desempenho da estimativa de H_s , porém com pouca variação na qualidade dos ajustes quando comparado ao modelo AP . O modelo EY apresentou a melhor qualidade de ajuste, com o menor valor de VP (5) para Viçosa (MG).



Comparado globalmente todos os modelos, observa-se que o r variou entre 0,725 a 0,760 e RQME entre 3,833 a 4,025 MJ.m⁻².dia⁻¹ (Tabela 2). Os valores inferiores de r e superiores de RQME ocorrem no modelo *HS*, que foi considerado o pior modelo para a estimativa da H_s em Viçosa. É relevante avaliar o desempenho dos modelos através da comparação conjunta das estatísticas por meio de indicadores, como o VP, impossibilitando que um modelo seja satisfatório para um índice e insatisfatório para outro (Silva et al., 2012b; Martins et al., 2014).

Resumidamente, foi possível identificar dois grupos baseados na qualidade do ajuste: o primeiro grupo (I), de melhor desempenho, considerado moderado pelo índice c , e menor valor de VP, foi composto pelos modelos: *EY* (VP de 5) e *AP* (VP de 10), os quais são dependentes das variáveis n e N . E o segundo grupo (II), de desempenho considerado fraco pelo índice c , composto pelo modelos: *Ch* (VP de 15), *JS* (VP de 20) e *HS* (VP de 25). Mesmo sendo modelos de qualidade de ajuste de desempenho fraco (grupo II), a escolha se baseou no fato da temperatura ser uma variável de fácil medição independente do tipo de estação meteorológica, constituindo uma vantagem na inclusão desta variável nos modelos de estimativa da H_s , sendo uma alternativa conveniente e atrativa. Do contrário, os modelos que apresentam a inclusão de n e n/N , apesar do melhor desempenho no ajuste, são modelos que requerem a medição dessa variável, as quais são exclusivas de estações meteorológicas convencionais (Buriol et al., 2012).

De modo geral, as discrepâncias obtidas nos valores dos coeficientes estão de acordo com as encontradas na literatura para modelos regionais com diferentes calibrações e variações na qualidade dos ajustes, os quais são esperados (Souza et al., 2017). De acordo com Meza e Varas (2000), Weiss e Hays (2004) e Souza et al. (2017), essas diferenças indicam que a calibração local é essencial para o desempenho dos modelos.

Com relação a validação, os modelos que dependem da razão de insolação (n/N) (*AP* e *EY*) foram semelhantes entre si e obtiveram os melhores resultados (Tabela 3), com destaque para o modelo *EY* que foi o único a obter um desempenho classificado como muito bom (índice $c=0,781$). Os demais modelos foram considerados bons pela classificação do desempenho, e o pior deles foi o modelo *HS* com índice $c=0,678$.



Tabela 3 – Validação dos modelos para a estimativa da radiação solar global (2011 a 2015) para a localidade de Viçosa (MG).

Símbolo	Estatísticas					
	RQME	BIAS	r	d	c	
<i>AP</i>	3,625	0,034	0,838	0,891	0,747 (bom)	
<i>HS</i>	4,069	0,025	0,815	0,832	0,678 (bom)	
<i>JS</i>	3,801	0,022	0,823	0,871	0,717 (bom)	
<i>EY</i>	3,327	0,029	0,862	0,906	0,781 (muito bom)	
Valores parênteses	<i>Ch</i>	3,783	0,020	0,823	0,874	0,719 (bom) entre

representam a classificação pelo índice c (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

Pela análise da Figura 1, o modelo *HS* foi o que apresentou os valores estimados mais distantes da reta 1:1, além da pior validação no desempenho estatístico (Tabela 3), sendo considerado o modelo menos apropriado para estimar a H_s em Viçosa. É possível observar uma semelhança entre os modelos *JS* com *Ch*, e *AP* com *EY*, porém com uma ligeira superioridade do modelo *EY* sobre os demais, sendo considerado o melhor modelo para a estimativa de H_s para Viçosa.

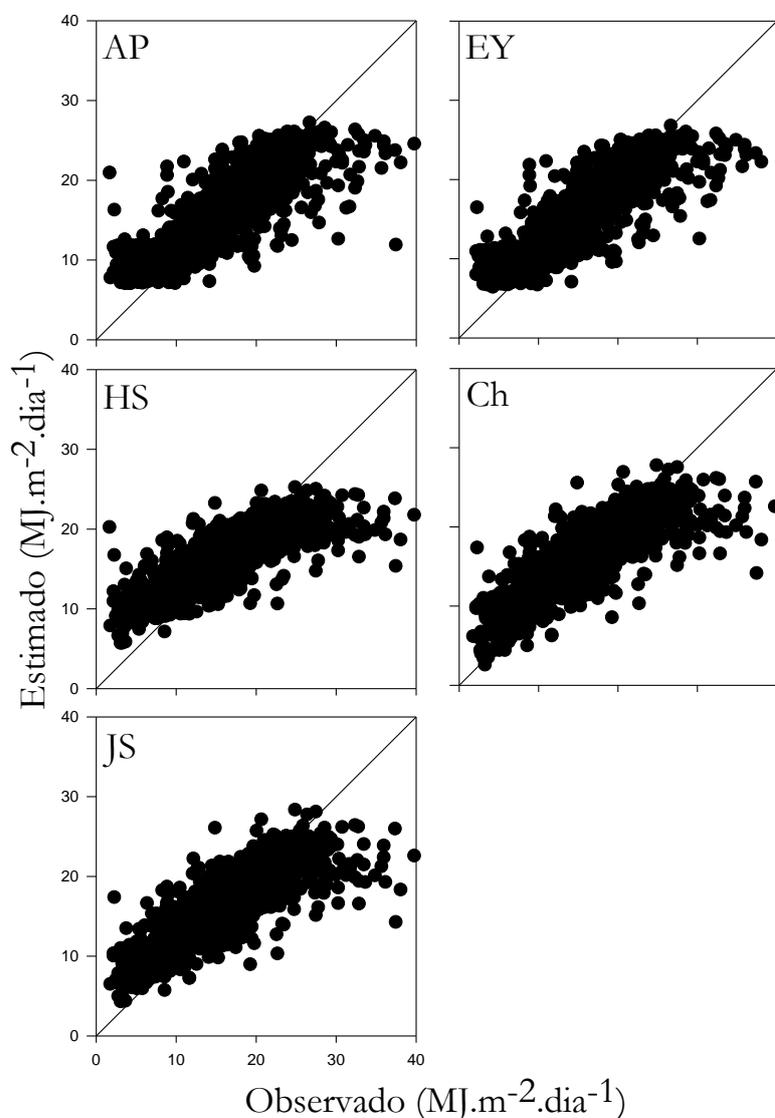


Figura 1 – Radiação solar global estimada versus observada ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) para os modelos *AP*: Angström-Prescott (1940); *HS*: Hargreaves e Samani (1982); *JS*: De Jong e Stewart (1993); *EY*: Ertekin e Yaldiz (2000) e *Ch*: Chen et al. (2004) para Viçosa. A linha cheia refere-se a reta 1:1.

A tendência geral de todos os modelos validados é superestimar os valores de H_s entre 5 e $10 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e subestimar os valores superiores a $20 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Esta mesma tendência foi constatada na China por Liu et al. (2009), em Cruz das Almas (BA) por Borges et al. (2010), nas regiões Metropolitanas, Zona da Mata, Vale do Rio Doce e noroeste de Minas Gerais por



Silva et al. (2012a,b) e em diferentes regiões do Mato Grosso por Souza et al. (2017) utilizando modelos diferentes deste estudo. Isto provavelmente se deve a limitação dos modelos em estimar a radiação abaixo e acima destes patamares. No entanto, há a necessidade de melhorias nas relações funcionais dos modelos empíricos existentes (Silva et al., 2012a), inclusão de novas variáveis, assim como o desenvolvimento de modelos mais adequados, principalmente para regiões que apresentam variação temporal e espacial de temperatura, precipitação e nebulosidade, como o que ocorre em Minas Gerais.

Conclusões

De maneira geral, os modelos que apresentam a inclusão da insolação real e razão da insolação foram os que apresentaram melhores resultados (*AP* e *EY*) e o modelo *HS*, dependente apenas da variável temperatura, foi considerado o pior.

Independente do modelo é comum a subestimativa da radiação solar global para valores acima de $20 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e superestimativa para valores abaixo de $10 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, evidenciando a necessidade de melhorias constantes nas relações funcionais e inclusão de novas variáveis, principalmente de fácil medição, na tentativa de melhorar o desempenho. Mesmo assim, entre os modelos estudados, o Ertekin e Yaldiz (2000) – *EY* – foi o que apresentou melhor estimativa da radiação solar global.

Referências

- ADARAMOLA, M. S. Estimating global solar radiation using common meteorological data in Akuri, Nigeria. **Renewable Energy**. v.47, p.38-44, 2012.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56, Roma, p.300, 1998.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C.; BENITO, M. Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). **Applied Energy**. v.88, p.1703-1709, 2011.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using Sunshine duration in Spain. **Energy Conversion and Management**. v.45, p.1529-1535, 2004.
- ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v.50, p.121-126, 1924.



Revista Hipótese



ISSN: 2446-7154

BLANCO, F. F.; SENTELHAS, P. C. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.10, p.295-300, 2002.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. de.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M. da.; PAMPONET, B. M. 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, 2010.

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.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN, A. B.; PRESTES, S. D.; HORN, J. F. C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. **Ciência Rural**. v.42, p.1563-1567, 2012.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.5, p.89-97, 1997.

CHEN, R. S.; ERSI, K.; YANG, J. P.; LU, S. H.; ZHAO, W. Z. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**. v.45, p.1759-1769, 2004.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**. v.27, p.1260-1263, 2003.

DE JONG, R.; STEWART, D. W. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. **Canadian Journal of Plant Science**. v.73, p.509-518, 1993.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey). **Energy Conversion and Management**. v.41, p.311-330, 2000.

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

INMET: **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em:
<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em 16 dez. 2017.

INPE: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em:
<<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico/index.php>>. Acesso em 02 jan. 2018.

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

LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; JENSEN, J. R.; JOHN, R. P. Calibration of the Angström-Prescott coeficientes (a,b) under diferente time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.149, p.1433-1446, 2009.



MARTINS, F. B.; PEREIRA, R. A. de A.; PINHEIRO, M. V. M.; ABREU, M. C. Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimada por duas categorias de modelos. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.29, p.505-514, 2014.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.42, p.1091-1100, 2007.

MEZA, F.; VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.100, p.231-241, 2000.

PODESTÁ, G. P.; NUÑEZ, L.; VILLANUEVA, C. A.; SKANSI, M. A. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.123, p.41-53, 2004.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**. v.64, p.114-125, 1940.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**. v.17, p.206-226, 2015.

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; FIORAVANTI, C. D.; LIMA, R. C.; VALERIO FILHO, W. V. Estimativa da radiação solar global diária em Ilha Solteira, São Paulo. In: XXXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2003. **Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA**, 2003.

SILVA, V. J. da.; SILVA, C. R. da.; FINZI, R. R.; DIAS, N. S. Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. **Ciência Rural**. v.42, p.276-282, 2012a.

SILVA, C. R. da.; SILVA, V. J. da.; ALVES JÚNIOR, 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**. v.16, p.281-288, 2012b.

SOUZA, A. P. de.; SILVA, A. C. da.; TANAKA, A. A.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de.; KLAR, A. E.; GOMES, A. W. A. Global radiation by simplified models for state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.52, p.215-227, 2017.

STATSOFT, INC. **Statistica for windows (data analyses softwares system)**. Version 8.0 2008.

THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W. Na improved algorithm for estimating incidente daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.93, p.211-228, 1999.

WEISS, A.; HAYS, C. J. Simulation of daily solar irradiance. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.123, p.187-199, 2004.