

DESEMPENHO DE DIFERENTES MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM PONTA GROSSA, PR

GUSTAVO CASTILHO BERUSKI^{1,2}; ANDRÉ BELMONT PEREIRA²; PAULO CESAR SENTELHAS¹

¹Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP/ESALQ),
Departamento de Engenharia de Biosistemas, Piracicaba, SP, Brasil.

²Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Departamento de Ciências do Solo e Engenharia Agrícola,
Ponta Grossa, PR, Brasil

beruskigc@usp.br, pcsentel.esalq@usp.br

Recebido Setembro de 2013 - Aceito Setembro de 2014

RESUMO

A irradiância solar global (Q_g) é uma variável física importante que vem sendo constantemente empregada em modelos agrometeorológicos, tanto para caracterização climática, como para dar suporte a estudos radiométricos voltados ao planejamento da irrigação e à previsão de safras agrícolas. O trabalho teve como objetivo comparar medidas diárias de Q_g com estimativas dessa variável obtidas por quatro diferentes métodos de cálculo. Para tanto, no período compreendido entre 28/03/2008 a 24/08/2011, no município de Ponta Grossa, PR, procedeu-se ao estudo de análise de regressão linear simples mediante o confronto entre medidas radiométricas realizadas por piranômetro e estimativas de Q_g . A transmitância global foi condicionada pela nebulosidade atmosférica. Os modelos baseados na transmitância global média diária estimaram de forma mais satisfatória os valores de Q_g , face aos coeficientes estatísticos calculados para validação dos critérios de estimativa propostos por Angström-Prescott. Entretanto, o desempenho dos modelos baseados na determinação da transmitância global média sob condições atmosféricas extremas, considerando dias totalmente ensolarados e nublados, revelou coeficientes de Willmott mais elevados, os quais se aproximaram muito de 1, refletindo exatidão e confiabilidade dos valores calculados de Q_g , quando comparados aos valores observados em estação meteorológica automática. **Palavras-chave:** Irradiância global; transmitância global; modelagem; radiometria solar.

ABSTRACT: PERFORMANCE OF DIFFERENT MODELS USED FOR ESTIMATING THE GLOBAL SOLAR RADIATION AT PONTA GROSSA, PR, BRAZIL

Global solar irradiance (Q_g) is an important physical variable that has been used constantly in agrometeorological models, either for climatic characterization or to give support to radiometric studies developed for irrigation planning and crop production modeling. The current study aimed to compare measured daily Q_g values with estimates of this variable by means of four different methods. Thus, using daily data set for the period between March 28th of 2008 and August 8th of 2011 at Ponta Grossa, PR, Brazil, a simple linear regression between radiometric data, measured by a pyranometer and model estimates of Q_g was done. Global transmittance was conditioned by atmospheric cloudiness. The models based on mean global transmittance on daily basis performed more satisfactorily and generated Q_g values with accuracy and exactness at the study site, as confirmed by the statistical parameters used to validate the Angström-Prescott proposed method. However, the performance of the methodologies based on the determination of mean global transmittance under extreme atmospheric conditions, considering totally cloudy and sunny days, showed the highest Willmott coefficients, close to 1, reflecting the precision and reliability of the calculated Q_g values, compared to the observed values at an automatic weather station.

Keywords: Global irradiance; global transmittance; modeling; solar radiometry.

1. INTRODUÇÃO

A irradiância solar é responsável por desencadear grande parte dos processos químicos, físicos e biológicos no sistema solo-planta-atmosfera. Todavia, nem toda irradiância solar consegue efetivamente atingir a superfície terrestre, pois ao atravessar a massa óptica e interagir com os componentes atmosféricos sofre ação dos processos de reflexão, difusão e absorção. Com isso, aproximadamente 51% da irradiância solar extraterrestre está disponível para ser utilizada em processos do meio físico e biológico (Ometto, 1981), sendo a fração da radiação que efetivamente chega à superfície terrestre denominada de irradiância solar global (Q_g).

Q_g é uma importante variável do meio físico e constantemente é empregada em estudos de necessidade hídrica de culturas irrigadas, modelagem do crescimento e produção vegetal, mudanças climáticas, otimização do conforto ambiental, dentre outras aplicações. A grande problemática que envolve a coleta de dados de Q_g é o elevado custo do piranômetro, equipamento radiométrico responsável pelo registro da irradiância solar global (Souza et al., 2011). Além disso, a quantificação de Q_g exige o uso de registradores ou sistemas de aquisição de dados, bem como, de pessoal habilitado e especializado, elevando o custo dessas informações.

A falta de observações de Q_g tem sido um problema persistente em estudos de processos biofísicos em agroecossistemas. O número de estações meteorológicas que registram a irradiância diária é muito pequeno comparado ao número de estações que monitoram a temperatura e a precipitação. Nos Estados Unidos a razão entre estações que medem as componentes da radiação solar e aquelas que medem a temperatura não é maior do que 1:100; em termos globais, essa relação é da ordem de 1:500 (Thorton e Running, 1999). No nordeste da China, região do país de maior importância agrícola, há 109 estações meteorológicas, sendo que dentre estas somente 13 realizam medidas radiométricas de rotina (Wu et al., 2012). No estado do Paraná, Brasil, há 37 estações meteorológicas automáticas e 22 estações meteorológicas convencionais responsáveis pelo registro das componentes da irradiância solar; entretanto, os sensores eletrônicos nem sempre são calibrados, podendo apresentar falhas de registro por período prolongado e ausência de informações radiométricas precisas em estudos micrometeorológicos e voltados para a otimização da irrigação na agricultura.

A razão entre a irradiância solar global e a irradiância no topo da atmosfera representa a transmitância solar global, a qual juntamente com a razão de insolação, pode ser empregada na equação de Angström-PreScott para a estimativa dos coeficientes empíricos a e b (que refletem os fatores que afetam os processos de absorção e difusão da radiação solar) e que

são consideradas como variável de entrada em modelos de estimativa da irradiância global para localidades que não contam com equipamentos e mão de obra especializada na coleta dessa variável (Paulescu et al., 2008).

A equação de Angström-PreScott, proposta para estimar a irradiância global a partir da razão de insolação, foi idealizada por Angström em 1924 e modificada por PreScott dezesseis anos depois com o objetivo de contornar a dificuldade de obtenção do valor Angot (Penman, 1948). A referida equação, apesar de fazer alusão a intervalos de tempo superiores a 70 anos, tem demonstrado desempenho satisfatório para períodos menores no mundo inteiro e ainda vem sendo largamente empregada em estudos de radiometria solar, muito embora apresente algumas limitações, especialmente devido à espessura das nuvens (Li et al., 2011; Kolebaje e Mustapha, 2012; Wu et al., 2012; Sabziparvar et al., 2013).

Recentemente Li et al. (2011), empregando o modelo clássico de Angström-PreScott para estimar a irradiância solar global no Tibet, China, a partir de uma série de 15 anos de dados radiométricos em quatro diferentes estações meteorológicas, obtiveram estimativas da variável em questão com erros inferiores a 10 % em todas as localidades estudadas. Wu et al. (2012), utilizando o mesmo modelo para avaliar Q_g durante a estação de crescimento de culturas agrícolas na região nordeste da China, concluíram que tal procedimento de cálculo não é apenas eficaz e confiável, como também um meio econômico de se obter dados radiométricos em locais onde a coleta dessa variável do meio físico é escassa.

Kolebaje e Mustapha (2012) obtiveram elevada acurácia e precisão do modelo de estimativa de Q_g proposto por Angström-PreScott em quatro diferentes regiões climáticas da Nigéria. A confiabilidade e o desempenho do modelo de Angström-PreScott também foram constatados por Namrata et al. (2013), ao compararem tal modelo com seis outros modelos empíricos de estimativa da irradiância global na região de Jharkhand, Índia. Sabziparvar et al. (2013) fizeram uso do modelo proposto por Angström-PreScott para determinar a irradiância global em 15 localidades do Iran, com o objetivo de empregá-la no cálculo da evapotranspiração de referência, e verificaram que este modelo clássico de estimativa foi preciso para avaliar Q_g .

Com o intuito de examinar o desempenho de diferentes modelos de cálculo da irradiância solar mensal e diária sobre uma superfície horizontal na região de Kuala Terengganu, Malásia, Muzathik et al. (2011) verificaram, por meio do erro percentual médio, do erro quadrático médio, do teste de correlação de Fisher e do teste-t, que o modelo de estimativa proposto por Angström-PreScott esteve associado a baixas medidas de dispersão, tendo revelado alta precisão e confiabilidade sob as condições climáticas estudadas.

Cientistas do mundo inteiro têm incorporado modificações ao modelo clássico de Angström-Prescott mediante a inserção de variáveis do meio físico ou alterações na estrutura matemática da expressão de cálculo de Q_g , com o objetivo de melhorar sua precisão e exatidão, a fim de conferir confiabilidade e viabilidade de utilização sob condições atmosféricas específicas nas diferentes localidades do globo terrestre (Newland 1989; Ampratwum e Dorvlo, 1999; Almorox e Hontoria, 2004; Şen, 2007; Bakirci, 2009; Chineke e Okoro, 2010).

Para atender a necessidade de se conhecer a disponibilidade de energia solar na região dos Campos Gerais do Paraná, propõe-se o uso de modelos matemáticos desenvolvidos para estimar a irradiância global, os quais diferem entre si pelo grau de complexidade e pelo número de variáveis de entrada no modelo. É importante ressaltar que tais modelos são, em geral, restritos às condições para as quais foram inicialmente desenvolvidos, apresentando problemas de transferabilidade, quando não devidamente aferidos e calibrados (Borges et al., 2010).

Assim sendo, o presente trabalho teve como objetivo determinar a transmitância solar global, avaliar e comparar o desempenho de quatro diferentes modelos de estimativa de Q_g sob as condições climáticas de Ponta Grossa, PR, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, PR (altitude de 880m, 25°5' 12" S e 50° 3' 16" W). A área experimental conta com solo do tipo cambissolo háplico distrófico típico, de textura argilosa, e com clima classificado, segundo Köppen, como do tipo Cfb - clima subtropical úmido.

Os dados diários de irradiância solar global (Q_g) foram medidos por um piranômetro de fotodiodo de silício, da marca LI-COR, modelo LI-200X, de resposta espectral no intervalo de 0,4 e 1,2 μm , com erro absoluto típico de $\pm 3\%$ (Federer e Tanner, 1965) em estação meteorológica automática, durante o período compreendido entre 28/03/2008 e 24/08/2011. O piranômetro foi acoplado a um sistema de aquisição de dados da marca Campbell Scientific Inc., modelo CR-1000, programado para fazer leituras com uma frequência de 60 s, armazenando médias a cada 30 min. Inicialmente foram obtidos valores instantâneos de Q_g (W m^{-2}), tendo sido posteriormente integrados ao longo do dia e expressos em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Para estimativa da irradiância solar extraterrestre (Q_0), expressa em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, utilizou-se a seguinte expressão:

$$Q_0 = 37,6 (d/D)^2 [(\pi/180^\circ) hn \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \sin hn] \quad (1)$$

$$(d/D)^2 = 1 + 0,033 \cos (NDA 360/365) \quad (2)$$

em que: Φ = latitude local (graus); δ = declinação solar (graus); hn = ângulo horário ao nascer do sol (graus); d/D = distância relativa Terra-Sol, sendo d a distância média e D a distância real; NDA = número do dia do ano ou dia Juliano.

A duração do fotoperíodo foi determinada por equações empregadas por Pereira e Villa Nova (2008) e a insolação foi medida por um heliógrafo Campbell Stokes e integrada diariamente a partir de heliogramas durante o período de análise.

Para o cálculo da transmitância global diária dividiu-se os valores diários de irradiância solar global pelos de irradiância solar extraterrestre diária. Posteriormente, repetiram-se os cálculos, porém, classificando as séries radiométricas em dias nublados e ensolarados, em função da razão de insolação, a qual para dias nublados foi inferior a 0,3 e para dias ensolarados superior a 0,8.

Para estimativa de Q_g fez-se uso de quatro diferentes modelos, a saber:

1º Modelo – Estimativa de Q_g em função da transmitância global média (\overline{Tg}) para dias limpos e totalmente nublados (Pereira et al., 2002a). Sob posse de uma série de dados radiométricos disponível na localidade estudada para dias limpos, \overline{Tg} foi expressa por: $(\overline{Tg}) = a + b = 0,618$. Para dias totalmente nublados, $(\overline{Tg}) = a = 0,143$. Com base em tais coeficientes empíricos de equação de regressão, estimou-se a irradiância solar global por:

$$Q_g = Q_0 \cdot [0,143 + 0,475 \cdot n/N] \quad (3)$$

onde, n/N é a razão de insolação dada pela relação entre a insolação astronômica efetiva (n) e o fotoperíodo (N).

2º Modelo – Estimativa de Q_g em função transmitância global média diária (\overline{Tg}) para dias limpos em conformidade com o 1º modelo, e considerando a dependência latitudinal de a proposta por Glover e McCulloch (1958). Assim, a irradiância solar global foi obtida por:

$$Q_g = Q_0 \cdot [0,262 + 0,356 \cdot n/N] \quad (4)$$

3º Modelo – Baseado na transmitância global máxima obtida a partir de uma única medida radiométrica feita na passagem meridiana do Sol ($Tg_{max(1/2)}$) (Pereira et al., 2003):

$$Q_g = Q_0 \cdot [0,262 - b^* \cdot n/N] \quad (5)$$

em que:

$$b^* = Tg_{max(1/2)} - 0,262 \quad (6)$$

4º Modelo – Baseado na proposição clássica de Glover e McCulloch (1958), sendo definida por:

$$Q_g = Q_0 \cdot [0,29 \cdot \cos \Phi + 0,52 \cdot n/N] \quad (7)$$

A precisão das estimativas de Q_g foi expressa por r^2 (coeficiente de determinação) (Legates e McCabe, 1999). A

exatidão pode ser observada pela dispersão dos pares ordenados compostos por valores medidos e estimados de Q_g ao redor da reta 1:1, a qual foi quantificada pelo índice de concordância (Willmott et al., 1985). Um índice c proposto por Camargo e Sentelhas (1997) foi adotado para indicar o desempenho geral das estimativas pelos diferentes modelos de Q_g , em associação aos coeficientes de correlação de Pearson (r) e de concordância (d), o qual foi obtido pelo produto entre estes dois últimos índices estatísticos.

Para avaliar o erro das estimativas, foram calculados o erro percentual absoluto médio (MAPE) e o erro percentual absoluto suavizado (SAPE) descritos por Goodwin e Lawton (1999). Além disso, para a comparação dos dados observados e previstos da irradiância solar global os seguintes erros também foram adotados: erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM) e raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) (Borges et al., 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em Ponta Grossa, PR, para toda série radiométrica estudada verificou-se que para dias nublados os valores médios diários de T_g foram de 0,143 e em dias ensolarados os maiores valores médios diários de transmitância foram de 0,618. Sob dias de ausência de nuvens a nebulosidade é mínima ou ausente e a insolação é máxima, o que induz a obtenção dos valores mais elevados de T_g .

Outro fator que apresenta papel fundamental na transmitância global diária da atmosfera é a nebulosidade atmosférica, tendo em vista que a refletividade das nuvens é maior do que a refletividade da atmosfera na ausência de nuvens (Dantas et al., 2000). A influência das nuvens sobre T_g durante as diferentes estações do ano foi observada por Pereira et al. (2002a), evidenciando que os valores de T_g foram sempre menores em dias nublados (0,265) do que em dias ensolarados (0,770) no município de Piracicaba, SP.

A transmitância solar global diária (T_g) representa a proporção da irradiância solar determinada no limite extremo da atmosfera, que efetivamente atinge a superfície. Como T_g é proveniente da interação de Q_o com a atmosfera terrestre, é certo que a espessura da massa óptica varia conforme o ângulo zenital, o qual irá ocasionar flutuações instantâneas em T_g ao

longo do dia, apresentando valores menores ao nascer e ao pôr do Sol e máximos ao meio dia, horário em que há a máxima incidência dos raios solares na superfície da Terra.

A fim de determinar um índice de claridade para as condições de Akure, Nigéria, Adaramola (2012) analisou a razão entre Q_g/Q_o e obteve menores valores de razão de radiação para o período compreendido entre abril e agosto (estação úmida), tendo sido o oposto observado durante a estação seca. O referido autor e Chaar e Lamont (2010) verificaram em três regiões diferentes de Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos, que em meses com maior índice de nebulosidade (janeiro – abril) a transmitância global foi mais baixa, tendo sido constatado valor mais elevado de T_g durante os meses com baixa nebulosidade atmosférica.

Mediante análise sazonal de T_g calculada em Ponta Grossa, PR, verificou-se que os valores de T_g para dias nublados foram maiores para as estações de primavera/verão, enquanto que para dias ensolarados, T_g foi mais elevada para as estações de outono/inverno (Tabela 1). Os maiores valores de T_g , durante os dias ensolarados no período de outono/inverno, podem ser atribuídos aos menores índices de nebulosidade para a região de Ponta Grossa, nesta época do ano, caracterizando a estação seca no local. Valores reduzidos de T_g para os dias ensolarados, durante o período de primavera/verão, podem ser atribuídos aos maiores índices pluviométricos nesta época do ano, os quais resultam em aumento na umidade do ar e elevam os índices de nebulosidade na região em estudo.

Resultados divergentes de T_g foram reportados por Querino et al. (2011) em estudo radiométrico conduzido no Estado de Alagoas, onde durante os meses de verão a transmissão atmosférica foi sempre superior àquela observada durante o período compreendido entre os meses de maio e junho (estações de outono/inverno), com valores de T_g superiores a 70%.

Em estudo semelhante ao presente trabalho, visando a determinação da transmitância solar global, Pereira et al. (2002a) determinaram a T_g para dois períodos distintos, primavera/verão e outono/inverno, tanto para dias nublados, quanto ensolarados na localidade de Piracicaba, SP. Em estudo comparativo entre as duas localidades climáticas distintas (Ponta Grossa, PR e Piracicaba, SP) e considerando-se os mesmos períodos de análise, constatou-se que, independentemente da estação do ano, Piracicaba, SP, apresentou maior T_g em relação ao município de Ponta Grossa, PR. Os menores valores de T_g na região

Tabela 1 - Transmitância solar global diária (T_g) calculada para dias nublados e ensolarados, sob as condições climáticas do município de Ponta Grossa, PR. Média do período estudado.

Transmitância Global	Ponta Grossa	
	Primavera/Verão	Outono/Inverno
Dias Nublados	0,152	0,142
Dias Ensolarados	0,610	0,622

estudada podem ser explicados pela interferência das massas de ar frio, possivelmente a Massa Polar Atlântica ou massas de ar provenientes do oceano, bem como pela ação dos ventos marítimos úmidos influenciados pelo Anticiclone do Atlântico Sul, que ocasionam chuvas orográficas na Serra do Mar e em boa parte do Estado do Paraná (Beruski et al., 2009).

Discrepâncias na variação de T_g também podem ser averiguadas em função da latitude local. Assim, em localidades com menores latitudes a incidência de radiação solar está mais próxima da perpendicularidade em relação ao plano do Equador e, conseqüentemente, o período de saturação de energia diminui com o aumento da latitude. Variações na transmitância global em decorrência da dependência latitudinal foram observadas por Yousif et al. (2013), ao compararem duas localidades distintas do continente europeu: Marsaxlokk, em Malta, e Valladolid, na Espanha.

Todos os métodos de estimativa de Q_g avaliados no presente estudo apresentaram valores muito próximos aos medidos pelo piranômetro (Figura 1).

Ao se comparar os coeficientes de determinação (r^2) e de correlação de Pearson (r) verifica-se que todos os modelos estudados apresentaram elevada precisão. O 4º modelo

apresentou o valor mais elevado de r^2 , sendo que 99,8% das variações de Q_g medida podem ser explicadas por uma equação de regressão linear simples, evidenciando a elevada precisão. Tanto o coeficiente de determinação, quanto de correlação trazem apenas informações sobre a precisão dos modelos matemáticos utilizados, porém nada revelam sobre a sua exatidão (Pereira et al., 2003; Pereira e Villa Nova, 2008). Dessa maneira, por meio da determinação do índice de concordância (d), proposto por Willmott et al. (1985), verificou-se que o 1º e o 2º modelos apresentaram valores de d da ordem de 0,982 e 0,989, respectivamente, indicando que os valores estimados foram muito próximos dos observados. Embora os índices de concordância obtidos para o 3º e o 4º modelos de estimativa tivessem sido menores em termos comparativos, tais índices estatísticos também foram elevados para estes modelos, atingindo valores próximos a 1, dada a baixa dispersão dos dados ao redor da linha 1:1 (Figura 1).

O índice de desempenho (c) dos modelos matemáticos, definido pelo produto entre r e d , foi de 0,980 para o primeiro modelo, 0,979 para o segundo, 0,839 para o terceiro e de 0,942 para o quarto modelo. Considerando-se o critério de interpretação de desempenho de modelos agrometeorológicos

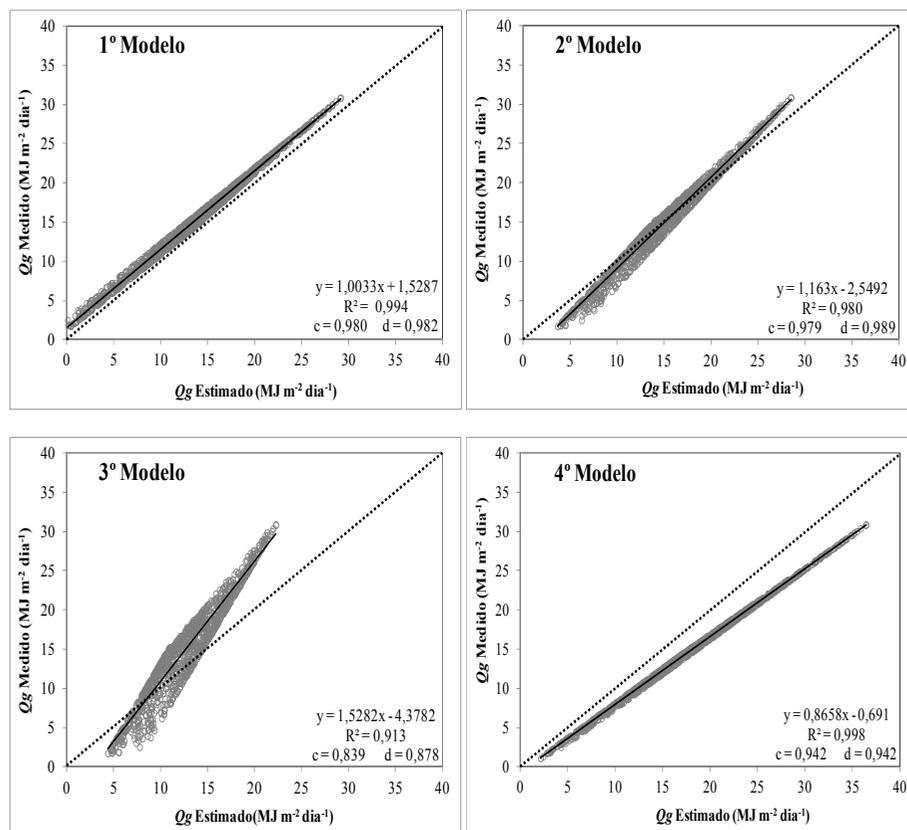


Figura 1 - Relação entre a irradiância solar global diária (Q_g) medida por piranômetro e estimada por quatro diferentes modelos, sob as condições climáticas do município de Ponta Grossa, PR.

proposto por Camargo e Sentelhas (1997), classifica-se como ótimo o desempenho obtido pelos 1º, 2º e 4º modelos de estimativa ($c > 0,85$), sendo que apenas o 3º modelo foi classificado como aquele com desempenho muito bom (c entre 0,76 e 0,85).

Wu et al. (2012), usando o modelo de Angström-Prescott para estimar Q_g no nordeste da China, obtiveram valores de coeficiente de determinação (r^2) entre 0,77 e 0,89, representando em média 83 % das variações nos valores observados de Q_g e sendo explicadas por modelos de regressão propostos a partir de dados radiométricos coletados em estações meteorológicas na região estudada.

Kolebaje e Mustapha (2012), ao analisar o desempenho de diferentes modelos de estimativa de Q_g para quatro localidades distintas da Nigéria, verificaram que o modelo proposto por Angström-Prescott apresentou um coeficiente de correlação de 0,953 e 0,872 para as regiões de Port Harcourt e Lokoja, respectivamente, e concluíram que os valores de Q_g estimados pelo modelo em questão foram os que mais se aproximaram da realidade sob as condições ambientais desse estudo. Valores semelhantes foram observados por Muzathik et al. (2011), os quais encontraram um coeficiente de correlação de Pearson da ordem de 0,855 para o modelo clássico de cálculo de Q_g , possibilitando assim, que tal método seja amplamente difundido e empregado para avaliar a variável em questão em Kuala Terengganu, Malásia.

Os valores obtidos para os erros das estimativas expressos pelo erro percentual absoluto médio (MAPE) e o erro percentual absoluto suavizado (SAPE) confirmam a viabilidade de utilização dos quatro modelos propostos para estimar a irradiância solar global sob as condições climáticas de Ponta Grossa, PR (Tabela 2). No entanto, o primeiro e o segundo modelos apresentaram valores mais baixos de MAPE e SAPE, tendo sido inferiores a 16 %, ao passo que para o 3º e o 4º modelos, tais medidas de dispersão oscilaram em torno de 20 a 23%, reforçando-se a recomendação dos dois primeiros modelos para estudos radiométricos e agrometeorológicos na região estudada.

A confirmação de que os 1º e 2º modelos de estimativa da irradiância solar global foram aqueles que mais se aproximaram de dados radiométricos medidos em estação meteorológica automática na localidade de Ponta Grossa, PR, pode ser constatada mediante os baixos valores de erro absoluto médio (EAM) e raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME), associados a tais modelos (Tabela 2).

De maneira geral, todos os modelos empregados na estimativa de Q_g para as condições meteorológicas de Ponta Grossa, PR, apresentaram tendência à superestimativa desta variável do meio físico. Os valores de superestimativa de Q_g baseados no EAM variaram de 0,99 MJ m⁻² dia⁻¹ para o primeiro modelo até 3,12 MJ m⁻² dia⁻¹ para o 4º modelo. Corroborando os valores de EAM, os valores obtidos pelo cálculo de RQME também revelam menor erro nas estimativas de Q_g a partir do uso dos modelos 1 e 2 (Tabela 2).

Bakirci (2009), utilizando dados radiométricos de 18 localidades da Turquia, calculou diferentes erros de estimativa a partir de um estudo comparativo entre a irradiância solar global medida e estimada para determinar qual o melhor método de estimativa de Q_g . O mesmo autor verificou, que mesmo com modelos apresentando elevados coeficientes de correlação (r), obtidos por meio de uma análise de regressão entre os dados medidos e estimados de Q_g , os parâmetros estatísticos que refletem os erros de estimativa foram elevados, levando a proposição de fatores de ajuste nesses modelos para as localidades estudadas.

Determinar qual o melhor modelo, em função dos valores dos erros de estimativa, evita que equações de estimativa sejam utilizadas em localidades de maneira indiscriminada e sem critérios científicos de seleção. Em estudo no Tibet, China, Li et al. (2011) confirmaram a viabilidade de utilização de diferentes modelos para estimar a irradiância solar global em função do cálculo de medidas de dispersão que expressam os erros de estimativa e obtiveram boas aproximações de Q_g , com erros inferiores a 10 % sob as condições climáticas locais.

O melhor desempenho revelado no presente estudo, tanto pelo primeiro, quanto pelo segundo modelo, está intimamente

Tabela 2 - Erro percentual absoluto médio (MAPE), erro percentual absoluto suavizado (SAPE), erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM) e raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQEM) calculados a partir da análise comparativa entre a irradiância solar global diária (Q_g) medida por piranômetro e estimada por quatro diferentes métodos, sob as condições climáticas do município de Ponta Grossa, PR.

Modelos	MAPE	SAPE	EM	EAM	RQME
	%				
1º	13,64	15,63	0,86	1,58	1,64
2º	10,61	9,25	1,06	0,99	1,21
3º	22,32	22,22	0,93	3,03	3,56
4º	22,60	20,17	1,23	3,12	3,27

relacionado com a interferência direta das condições de nebulosidade atmosférica, expressas pela transmitância global determinada localmente sob situações extremas de cobertura de nuvens a partir do monitoramento de dados radiométricos coletados em estação meteorológica automática.

No primeiro e segundo modelos, os coeficientes a e b foram obtidos através do registro da insolação efetiva a partir de heliógrafo, conferindo a ambos os modelos maior representatividade das condições meteorológicas locais, comparado aos métodos 3 e 4. Segundo Pereira et al. (2002b), os coeficientes a e b da equação de Angström-Prescott variam de acordo com a localidade, sendo dependentes da latitude, altitude e do grau de cobertura de nuvens interferindo diretamente na confiabilidade de métodos de estimativa de Q_g . O coeficiente a representa o valor da transmitância solar global na ocasião em que há cobertura total do céu por nuvens, ou seja, $n/N = 0$, enquanto que $a + b$ define a taxa de T_g em relação a n/N ou seja, taxa de transmissão da radiação solar quando n/N tende ao valor unitário (Dallacort et al., 2004).

Os valores de Q_g , estimados pelo terceiro modelo, foram menos representativos à condição radiométrica local, possivelmente por este modelo se basear na transmitância global máxima obtida a partir de uma única medida radiométrica feita na passagem meridiana do Sol (Pereira et al., 2003). Quando Q_g foi estimada a partir do modelo clássico de Angström-Prescott (4º modelo) a baixa precisão e exatidão do método, comparadas ao 1º e 2º modelos, devem-se ao não ajuste local do método, principalmente para diferentes épocas do ano.

Ajustes no modelo clássico de Angström-Prescott para estimar Q_g foram propostos por Toğrul (2009), mediante a adição de dados geográficos e meteorológicos coletados na região de Bishkek, Quirguistão, verificando-se que este modelo apresentou bons resultados de estimativa da irradiância solar global.

Estudo semelhante foi desenvolvido por Chen e Li (2012) no Nordeste da China, analisando dados de 13 estações meteorológicas. O ajuste no modelo clássico de Angström-Prescott foi obtido pela calibração dos coeficientes a e b em função das variações da transmitância global na região estudada. Mesmo sem diferenças significativas entre os locais de instalação das estações meteorológicas e os métodos de estimativa empregados, os autores verificaram que alterações nos coeficientes empíricos da equação de regressão elevaram a acurácia do modelo de estimativa de Q_g .

Apesar do 3º modelo de estimativa de Q_g ter apresentado índice de desempenho inferior aos demais, este constitui um critério rápido e expedito para avaliação desta variável do meio físico em função da intensidade máxima de radiação medida na passagem meridiana do sol, dispensando assim a utilização de uma série extensa de dados radiométricos

e a integração diária para sua determinação em projetos de engenharia solar.

4. CONCLUSÕES

Os valores de transmitância solar global para dias nublados foram de 0,152 e 0,142, para primavera/verão e outono/inverno, respectivamente. Já em dias ensolarados os valores para primavera/verão e outono/inverno de 0,610 e 0,622, respectivamente. Em ambos as ocasiões a transmitância global diária foi condicionada pela nebulosidade atmosférica, e pode ser empregada para estimar a irradiância solar global.

O primeiro e o segundo modelos de estimativa da irradiância solar global para as quais os coeficientes a e b foram obtidos através de dados meteorológicos locais, apresentaram valores mais próximos à realidade, apresentando estes modelos maior precisão e exatidão para cálculo da variável do meio físico em estudo, conferindo maior confiabilidade da estimativa de Q_g para fins radiométricos e agrometeorológicos.

5. AGRADECIMENTOS

Ao pesquisador Dr. Antônio Ribeiro da Cunha da FCA/UNESP/Botucatu pelo auxílio na triagem dos dados meteorológicos e à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor. Especial agradecimento deve ser atribuído ao CNPq pelo apoio financeiro referente à instrumentação meteorológica necessária para geração dos dados radiométricos, bem como a concessão de bolsa de produtividade em pesquisa ao terceiro autor.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADARAMOLA, M. S. Estimating global solar radiation using common meteorological data in Akure, Nigeria. **Renewable Energy**, v.4 7, p. 38-44, 2012.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. **Energy Conversion Management**, v. 45, p. 1529-1535, 2004.
- AMPRATWUM, D. B.; DORVLO, A. S. S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. **Applied Energy**, v. 63, p. 161-167, 1999.
- BAKIRCI, K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. **Energy**, v.34, p. 485-501, 2009.
- BERUSKI, G. C.; LEITE, M. L.; VIRGENS FILHO, J. S.; ADACHESKI, P. A.; OLIVEIRA, A. V. Análise probabilística da velocidade média e caracterização da direção predominante do vento no município da Lapa/PR. **Revista RA'E GA**, v. 17, p. 65-75, 2009.

- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; 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, n. 1, p. 74-80, 2010.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CHAAR, L. E.; LAMONT, L. A. Global solar radiation: Multiple on-site assessments in Abu Dhabi, UAE. **Renewable Energy**, v. 35, p. 1596-1601, 2010.
- CHEN, J. L.; LI, G. S. Assessing effect of time scale on the solar radiation sunshine duration relationship. **Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service**, v. 116, n. 2, p. 123-143, 2012.
- CHINEKE, T. C.; OKORO, U. K. Application of Sayigh “Universal Formula” for global solar radiation estimation in the Niger Delta region of Nigeria. **Renewable Energy**, v. 35, p. 734-739, 2010.
- DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. DE; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A.; SILVA, F. F. DA; TRINTINALHA, M. A. Determinação dos coeficientes da equação de Angström para a região de Palotina, estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 26, p. 329-336, 2004.
- DANTAS, R. T.; SOUZA, W. M.; ARAÚJO, J. A. P. Transmissância atmosférica em três municípios do estado da Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XI, 2000, Rio de Janeiro - RJ. **Anais: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**. Rio de Janeiro - RJ: SBMET, 2000, p. 3949-3954.
- FEDERER, C. A.; TANNER, C. B. A simple integrating pyranometer for measuring daily solar radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, p. 2301-2306, 1965.
- GLOVER, J.; McCULLOCH, J. S. G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 84, n. 360, p. 172-175, 1958.
- GOODWIN, P.; LAWTON, R. On the asymmetry of the symmetric MAPE. **International Journal of Forecasting**, v. 15, n. 2, p. 405-408, 1999.
- KOLEBAJE, O. T.; MUSTAPHA, L. O. On the performance of some predictive models for global solar radiation estimate in tropical stations: Port Harcourt and Lokoja, **The African Review of Physics**, v. 7, n. 15, p. 145-163, 2012.
- LEGATES, D. R.; McCABE Jr, G. F. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydraulic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.
- LI, H.; MA, W.; LIAN, Y.; WANG, X.; ZHAO, L. Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China. **Renewable Energy**, v. 36, p. 3141-3145, 2011.
- MUZATHIK, A. M.; NIK, W. B. W.; IBRAHIM, M. Z.; SAMO, K. B.; SOPIAN, K.; ALGHOUL, M. A. Daily global solar radiation estimate based on sunshine hours. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 6, n. 1, p. 75-80, 2011.
- NAMRATA, K.; SHARMA, S. P.; SAKSENA, S. B. L. Comparison of different models for estimation of global solar radiation in Jharkhand (India) region. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 4, p. 348-352, 2013.
- NEWLAND, F. J. A study of solar radiation models for the coastal region of South China. **Solar Energy**, v. 43, p. 227-235, 1989.
- OMETTO, J. C., 1981. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres. 440p.
- PAULESCU, M.; GRAVILA, P.; TULCAN-PAULESCU, E. Fuzzy logic algorithms for atmospheric transmittances of use in solar energy estimation. **Energy Conversion and Management**, v. 49, p. 3691-3697, 2008.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings Royal Society, London, Series A**, v. 193, p. 120-145, 1948
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C., 2002a. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. 1º ed. Guaíba: Editora Agropecuária. 478p.
- PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A.; GALVANI, E. Estimation of global solar radiation flux density in Brazil as a function of a single measurement at solar noon. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 1, p. 27-34, 2003.
- PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A. Potato maximum yield as affected by crop parameters and climatic factors in Brazil. **HortScience**, v. 43, n. 5, p. 1611-1614, 2008.
- PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 211-216, 2002b.
- QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S.; RADOW, C. V.; MARQUES FILHO, A. O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (kt), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 204-294, 2011.
- SABZIPARVAR, A. A.; MOUSAVI, R.; MAROFI, S.; EBRAHIMIPAK, N. A.; HEIDARI, M. An improved estimation of the Angstrom–Prescott radiation coefficients for the FAO56 Penman–Monteith evapotranspiration

- method. **Water Resources Management**, v. 27, p. 2839-2854, 2013.
- ŞEN, Z. Simple nonlinear solar irradiation estimation model. **Renewable Energy**, v. 32, p. 342-350, 2007.
- SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A.; GOMES, E. N. Estimativa das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação solar global horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 277-288, 2011.
- TOĞRUL, T. İ. Estimation of solar radiation from Angstroms coefficients by using geographical and meteorological data in Bishkek, Kyrgyzstan. **Journal of Thermal Science and Technology**, v. 29, n. 2, p. 99-108, 2009.
- THORTON, P. E.; RUNNING, S. W. An improved algorithm for estimation daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 131, p. 54-76, 1999.
- YOUSIF, C.; QUECEDO, G., O.; SANTOS, J. B. Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain. **Renewable Energy**, v. 49, p. 203-206, 2013.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIES, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.
- WU, Z.; DU, H.; ZHAO, D.; LI, M.; MENG, X.; ZONG, S. Estimating daily global solar radiation during the growing season in Northeast China using the Angstrom-Prescott model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, p. 495-503, 2012.