



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros



Modelo de estimativa da irradiância solar difusa em função da transmissividade atmosférica para Botucatu-SP

Alexandre Dal Pai¹; João Francisco Escobedo²; Enzo Dal Pai³; Daniel Gonçalves Gomes Júnior⁴

¹ Físico, Prof. Assistente Doutor, Depto. de Bioprocessos e Biotecnologia, FCA/UNESP, Botucatu – SP, Fone: (14)3880-7162, adalpai@fca.unesp.br

² Físico, Prof. Adjunto, Depto. de Engenharia Rural, FCA/UNESP, Botucatu – SP

³ Eng. Agrônomo, Prof. Doutor, Depto. Engenharia Rural, FCA/UNESP, Botucatu – SP

⁴ Mestrando, Programa de PG Irrigação e Drenagem, Depto. Engenharia Rural, FCA/UNESP, Botucatu – SP

RESUMO: A radiação solar difusa guarda importância em diversas áreas do conhecimento, como produtividade vegetal, iluminação passiva, conversão fototérmica, dentre outras. Sua medida é de difícil realização, seja pela falta de precisão dos métodos (método do anel de sombreamento requer fatores de correção para a parcela obstruída pelo elemento sombreador), seja pelo custo elevado dos equipamentos (método da diferença necessita de um piranômetro, um pireliômetro e um rastreador solar). Neste caso, dados obtidos via modelo de estimativa permitem um conhecimento melhor dos níveis incidentes na localidade de interesse. Portanto, o objetivo deste trabalho é propor um modelo de estimativa da irradiância solar difusa em função da irradiância solar global e extraterrestre na partição de tempo 5 minutos. Os anos de 1996, 1997 e 1998 foram utilizados no desenvolvimento do modelo, enquanto que o ano de 1999 foi destinado à validação. Os dados, em W/m², foram cedidos pelo Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônomicas/UNESP/Botucatu. As irradiâncias global e difusa foram medidas por piranômetros PSP-Eppley, estando o sensor da difusa sob um anel de sombreamento MEO de 10cm de largura e 40cm de raio. Foram aplicados filtros de qualidade nas medidas. Foram aplicados fatores de correção na medida da irradiância difusa. Para validação dos modelos foram utilizados os indicadores estatísticos MBE e RMSE. A validação mostrou que o modelo foi eficiente na estimativa da irradiância difusa, com um desvio inferior a 2%. No entanto, quando o modelo foi validado com dados mensais, os desvios ficaram entre -30% a 50%, apresentando dependência sazonal.

PALAVRAS-CHAVE: transmissividade atmosférica, irradiância difusa, modelagem, densidade de fluxo

Diffuse solar irradiance estimate model as a function of atmospheric transmissivity for Botucatu-SP

ABSTRACT: Diffuse solar radiation is important in several areas of knowledge such as plant productivity, passive lighting and photo thermal conversion. Its measurement is difficult to perform due to lack of precision of the methods (shading ring method requires correction factors for the portion blocked by the shading element) and the high cost of equipment (method of difference requires a pyranometer and a pihelyometer coupled to a solar tracker). In this case, data obtained via estimation model allow a better understanding of the quantities that affect the region. Therefore, the aim of this work is to propose a diffuse solar irradiance estimate model due to the global and extraterrestrial solar irradiances in 5 minutes time partition. The years 1996, 1997 and 1998 were used to develop the model, while the year 1999 was for the validation. The data in W/m² were provided by Solar Radiometry Laboratory of the Faculty of Agricultural Sciences/UNESP/Botucatu. The global and diffuse irradiance were measured by pyranometers PSP-Eppley, with the diffuse sensor under a MEO shadingring of 10cm

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

wideand 40 cm radius. Quality filter shave been applied in measurements. Correction factors were applied to the measurement of diffuse irradiance. MBE and RMSE statistical indicators were used to validate the models. The validation showed that the model was efficient to estimate the diffuse irradiance, with a deviation less than 2%. However, when the model was validated using monthly data, the deviations ranged from-30% to50%, with seasonal dependency.

KEY WORDS: atmospheric transmissivity, diffuse irradiance, modelling, flux density

INTRODUÇÃO

A radiação solar é fonte inesgotável de energia para diversos processos de conversão energética, e o seu conhecimento contribui para estudos nas áreas de engenharia, meteorologia, biologia, arquitetura, agronomia, florestal, dentre outros. Essa forma de energia é melhor aproveitada por meio do conhecimento dos níveis quantitativos da irradiação incidente numa determinada localidade e, nesse sentido, o monitoramento contínuo é importante no levantamento do potencial solar da região (Gonzalez e Calbó, 1999; Sanchez-Lorenzo et al, 2013; Khahro et al, 2015).

As bases de dados de radiação solar de várias estações meteorológicas espalhadas no mundo frequentemente são compostas por medidas da radiação global, sendo que poucas medem a radiação difusa e são raras as estações que monitoram a radiação direta devido ao elevado investimento despendido nos aparelhos de medição. Uma solução para formação de uma base de dados dessas três radiações então é medir duas dessas componentes, e estimar a outra por diferença. Dessa forma, para localidades que medem somente a radiação global, recomenda-se o uso de equações estatísticas para estimativa das radiações direta e difusa (Hay, 1979; Boukelia et al, 2014).

A radiação solar total que incide em uma superfície terrestre compreende parte do ultravioleta do espectro, com comprimentos de onda entre 0,3 μ m e 0,4 μ m; espectro visível, com comprimentos entre 0,4 μ m e 0,7 μ m; e parte do infravermelho próximo ao espectro visível, entre 0,7 μ m e 5,0 μ m e é denominada radiação solar global. Ela é composta por duas parcelas: a radiação solar direta e a radiação solar difusa. A radiação solar direta é a parcela da radiação global que não apresenta interação com a atmosfera e, portanto não é atenuada pelos processos de absorção, reflexão e espalhamento. Já a parcela da radiação solar global espalhada pela atmosfera é conhecida como radiação solar difusa e é fruto dos espalhamentos Rayleigh (partículas pequenas da ordem de 10% do comprimento de onda da radiação incidente - gases) e Mie (partículas da ordem do comprimento de onda da radiação incidente - aerossóis) (IQBAL, 1983). Condições de elevada nebulosidade, além de dificultarem a passagem de radiação solar, promovem um espalhamento mais uniforme (Rayleigh), característico da transmissividade atmosférica baixa. Já para uma atmosfera sem nuvens e de transmissividade atmosférica elevada, há maior probabilidade da presença de aerossóis, ocorrendo um espalhamento mais direcional (Mie) (Battles, 1995; Vartiainen, 1999).

O primeiro trabalho que relacionou a radiação difusa com a radiação global foi proposto por Liu e Jordan (1960), correlacionando a fração difusa com a transmissividade atmosférica K_t (razão entre as irradiações global e extraterrestre). Embora sua correlação fora desenvolvida para valores diários, vários pesquisadores utilizaram este procedimento para estimar a radiação difusa em outras partições de tempo, como é o caso das partições de tempo média-5-minutos (Suehrcke e McCormick, 1988), horária (Orgill e Hollands, 1977; Skartveit e Olseth, 1987) e mensal (Iqbal, 1979; Lalas et al, 1987).

A radiação difusa depende da altitude, latitude, declinação solar, turbidez atmosférica, vapor d'água e da distribuição de nuvens. No entanto, a concentração dessas variáveis apresenta dependência temporal e espacial, causando grande variabilidade nos valores da radiação difusa. Nesse sentido, os vários modelos de estimativa encontrados na literatura apresentam divergências em função da atmosfera

local, além das técnicas de medida, instrumentação dentre outros (Vignola e McDaniels, 1984; Zangvil e Aviv, 1987; Soler, 1990; Li et al, 2012; Bakirci, 2015).

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de estimativa da irradiância solar difusa em função da transmissividade atmosférica na partição de tempo média-5-minutos e validá-lo com um conjunto de dados independente. A importância da partição de tempo média-5-minutos se deve ao fato de que muitos trabalhos baseados em dados de irradiância solar obtidos de instrumentos a bordo satélites meteorológicos utilizarem partições de tempo menores.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de irradiância solar global e difusa utilizados no estudo foram monitorados e cedidos pelo Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu localizado na Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP/Botucatu (latitude 22.9° S, longitude 48,45° O, altitude 740m). Utilizou-se os anos de 1996, 1997 e 1998 para desenvolvimento do modelo de estimativa e separou-se o ano de 1999 para a validação.

A irradiância solar global (I_G) foi monitorada por um piranômetro modelo PSP da Eppley. A irradiância solar difusa (I_d) foi monitorada por um piranômetro modelo PSP da Eppley posicionado à sombra de um anel de sombreamento Melo-Escobedo (MEO) de 0,1m de largura e 0,4m de raio. Na montagem do método de medida do anel de sombreamento MEO, o anel é mantido fixo enquanto que se translada o sensor paralelamente ao eixo polar para compensar as variações da declinação solar. A figura 1 mostra os equipamentos utilizados na medida das irradiâncias solares global e difusa.



Figura 1. Sensores utilizados na medida das irradiâncias solares global e difusa.

A irradiância solar difusa precisou ser corrigida em função do sombreamento causado pelo anel. As Eqs (1) e (2) mostram as equações de perda e de correção utilizados na montagem MEO (Oliveira et al, 2002).

$$F_{perda} = \left(\frac{2b}{\pi R}\right) \cdot \cos \delta \cdot \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos \phi}\right]^2 \int_0^{w_z} \cos Z d\omega \quad (1)$$

$$F_G = \frac{1}{1 - F_{perda}} \quad (2)$$

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

onde b é a largura do anel e R o raio do anel. Os sensores foram conectados a um sistema de monitoramento automatizado Campbell modelo CR-3000, com uma frequência de varredura de 5 s e armazenando valores na partição de tempo média 5 minutos no formato W/m². A irradiância solar extraterrestre foi calculada pela Eq (3).

$$I_o = 1367 * E_o * \cos\theta_z \quad (3)$$

onde 1367 W/m² é a constante solar, E_o a excentricidade da órbita terrestre e θ_z o ângulo zenital.

O modelo de estimativa foi desenvolvido em função da transmissividade atmosférica, dada pela razão entre irradiâncias solares global e extraterrestre (Eq. (4)).

$$K_T = \frac{I_G}{I_o} \quad (4)$$

Dos 210240 dados disponíveis nos quatro anos de monitoramento, 14769 deles (representando 7,03% do total) foram removidos devido à aplicação dos filtros mostrados na Tabela 1 (Kudish e Evseev, 2008). Os valores de corte são devido a desalinhamento, fios danificados, falta de eletricidade e reflexões internas ocorridas no anel de sombreamento causada pela baixa altitude solar.

Tabela 1. Filtros de controle de qualidade e resultados (Kudish e Evseev, 2008).

Irradiância Solar	Filtro
Global	$I_G < I_o$
Difusa Anel	$0,1 I_G \leq I_{dANEL} < I_G$
Ângulo Zenital	$0 \leq \theta_z \leq 80^\circ$

Por causa da grande quantidade de pontos foi necessário representar a irradiância difusa em valores médios para desenvolvimento do modelo de estimativa. Portanto, a transmissividade atmosférica K_t foi dividida em 100 sub-intervalos de 0,01 de amplitude e para cada sub-intervalo foi calculada uma média da irradiância difusa. Em seguida, os valores médios foram plotados em função de K_t e determinou-se uma regressão polinomial de 4ª ordem.

A avaliação do modelo de estimativa baseou-se nos indicadores estatísticos MBE e RMSE (Stone, 1993) dados pelas Eq. (5) e Eq. (6), respectivamente.

$$MBE = \left(\sum_i^N (y_i - x_i) / N \right) \quad (5)$$

$$RMSE = \left(\sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N \right)^{1/2} \quad (6)$$

onde y_i representa os valores da irradiância difusa anel, x_i os valores da irradiância difusa de referência e N o número de observações. O indicativo MBE representa o desvio simples e um valor positivo indica uma superestimativa, enquanto que um valor negativo indica uma subestimativa. Já o indicativo RMSE representa o desvio padrão e está relacionado à dispersão dos valores em relação à média.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na avaliação do potencial solar de uma região, medidas obtidas experimentalmente permitem maior precisão na determinação dos níveis de irradiação em superfície. No entanto, devido a dificuldades

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

financeiras e operacionais, muitas localidades recorrem a modelos de estimativa baseados em parâmetros mais facilmente medidos. A Figura 2 mostra os valores médios da irradiância difusa I_d na partição de tempo média-5-minutos em função da transmissividade atmosférica K_t , os desvio-padrão por intervalo de K_t e o modelo de estimativa polinomial de 4º grau ajustado às medidas. A partição de tempo média-5-minutos foi escolhida por dois motivos: primeiro, representa a frequência de aquisição das medidas; em segundo, esta partição tem aderência maior em estudos de satélites, os quais utilizam frequência aquisição de dados instantânea.

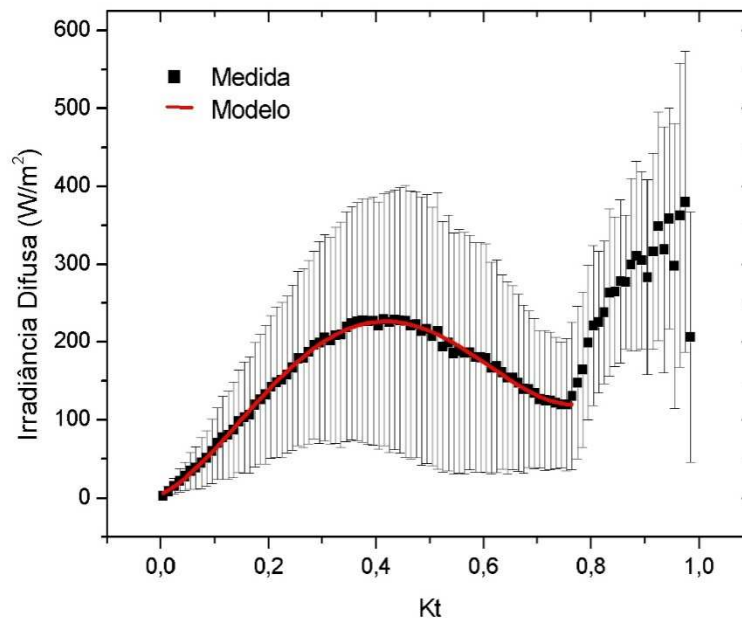


Figura 2. a) Modelo de estimativa de irradiância solar difusa I_d em função da transmissividade atmosférica K_t . b) Distribuição de frequências da transmissividade atmosférica K_t .

A Eq (7) apresenta o modelo de estimativa polinomial de 4º grau da irradiância difusa em função da transmissividade atmosférica. O elevado coeficiente de determinação mostra que 99,6% dos valores médios de I_d são explicados pelo modelo.

$$I_d = 4,88 + 336,38K_T + 3264,40K_T^2 - 9248,11K_T^3 + 6095,61K_T^4 \quad (7)$$

Os valores médios de I_d apresentam crescimento linear no intervalo de K_t de 0 a 0,35. Este intervalo apresenta os menores valores de desvio-padrão em função de alta nebulosidade deste intervalo. Para o intervalo de K_t de 0,35 a 0,65, classificado como cobertura parcialmente nublada, a tendência de crescimento linear desaparece, dando lugar a um formato parabólico com máximo de 220W/m² em $K_t=0,4$. Ocorre, também, neste intervalo, elevação dos valores de desvio-padrão justificada pela complexidade e rapidez dos fenômenos ocorridos na atmosfera, propiciando situações de nebulosidade e de céu aberto concomitantemente. Para valores de K_t de 0,4 a 0,76, observa-se decaimento da irradiância difusa justificado pela diminuição da nebulosidade e aumento das condições de céu aberto, o que favorece aumento da irradiância direta. Em $K_t=0,76$, o valor médio da irradiância difusa atinge um mínimo local de 120 W/m². Os dados referentes a $K_t>0,76$ foram descartados por representarem baixa frequência de ocorrência (Figura 3b), sendo estes valores fruto da reflexão da radiação direta em nuvens adjacentes, principalmente ocorridas em cobertura de céu parcialmente nublada Suehrcke e

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

Mccormick, 1988). No geral, o elevado espalhamento observado dos dados em torno do modelo de estimativa deve-se a partição de tempo média-5-minutos escolhida. Como partições de tempo menores respondem mais rapidamente à dinâmica atmosférica, o aumento da frequência de aquisição dos dados proporciona maior probabilidade de ocorrência de fenômenos atmosféricos complexos, como o caso das reflexões por nuvens adjacentes em coberturas de céu parcialmente nublado, as quais contribuem para o aumento da variabilidade dos valores medidos (Suehrcke e Mccormick, 1988).

A Figura 3 e 4 apresentam, respectivamente, as distribuições de frequências da irradiância difusa e da transmissividade atmosférica K_t .

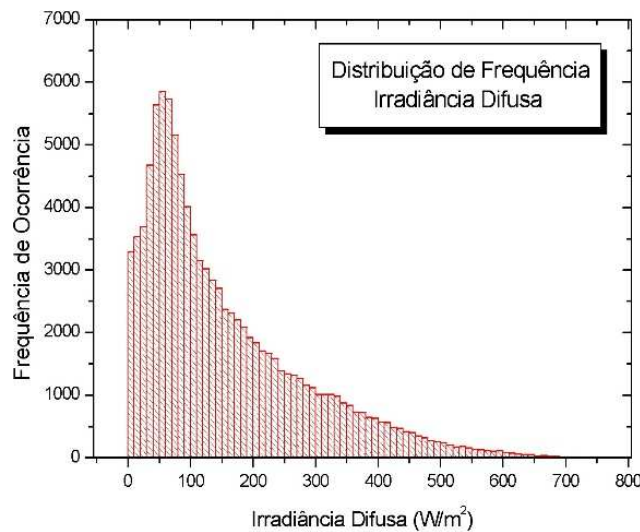


Figura 3. Distribuição de frequências da irradiância difusa.

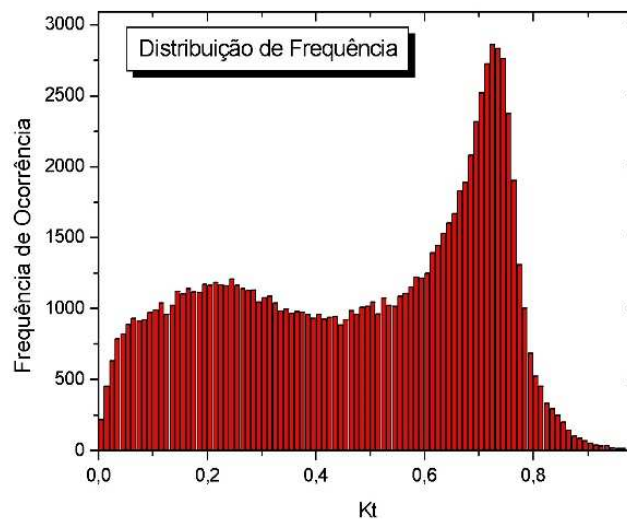


Figura 4. b) Distribuição de frequências da transmissividade atmosférica K_t .

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

A distribuição de frequências de Id mostra um comportamento unimodal, com maior ocorrência entre 0 a 200 W/m² com máximo próximo de 100 W/m². De 200 W/m² em diante ocorre uma diminuição gradativa na distribuição de frequências de Id. Para a distribuição de frequências de Kt, o comportamento bimodal apresenta máximos locais em 0,2 (cobertura de céu nublado) e 0,74 (cobertura de céu aberto). O pico acentuado ocorrido na cobertura de céu aberto mostra uma concentração maior de ocorrências para um pequeno intervalo de Kt, enquanto que a distribuição de Kt para cobertura de céu nublado é mais suave e ocorre em um intervalo de Kt maior, mostrando que a cobertura de céu nublada é mais bem distribuída.

O modelo foi validado com um conjunto independente de dados a partir dos indicadores estatísticos MBE e RMSE. Foram obtidos os seguintes resultados: MBE de 2% de superestimativas e RMSE de 70% de espalhamento. Apesar do modelo apresentar baixo MBE, o elevado valor de RMSE está ligado a natureza da partição escolhida, aumentando-se o espalhamento para partições de tempo menores que apresentam maior complexidade da dinâmica atmosférica (Suehrcke e McCormick, 1988). Em seguida, para uma aplicação mais específica, os dados da validação foram agrupados mensalmente e foram calculados novamente os valores dos indicadores estatísticos MBE e RMSE. As Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, os valores dos indicadores MBE e RMSE mensais aplicados ao modelo de estimativa.

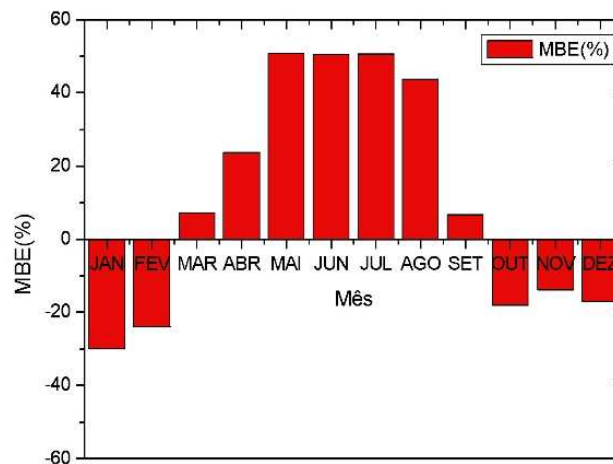


Figura 5. Indicativo estatístico MBE da validação do modelo de estimativa.

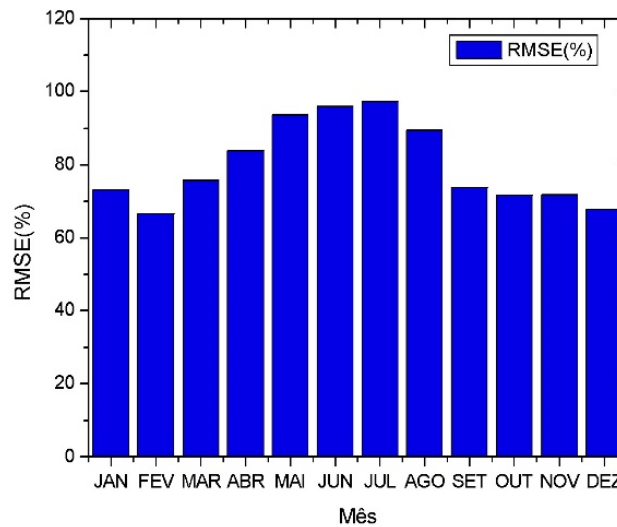


Figura 6. Indicativo estatístico RMSE da validação do modelo de estimativa.

Observa-se, pela validação mensal, que o modelo de estimativa proposto é sensível à variação sazonal, ou seja, a variação sistemática do indicativo MBE mostra claramente a dependência sazonal do modelo de estimativa. Nota-se valores de MBE positivos para os meses do inverno e valores negativos para os meses do verão. O modelo de estimativa da irradiância difusa foi desenvolvido para uma condição média de estafo da atmosfera, contendo todas as possibilidades de cobertura de céu. Ao ser validado com dados mensais do inverno, MBE positivo mostrou que a aplicação do modelo para este período forneceu estimativas maiores que as medidas. De fato, em função da declinação solar do período, a incidência de radiação no inverno é praticamente metade daquela do verão, tornando a medida menor que a estimativa. Já no verão, a incidência de radiação é maior devido ao menor valor médio do ângulo zenital, culminando num valor estimado menor que o valor medido. Quanto ao indicativo RMSE, observou-se elevado espalhamento, principalmente no inverno, devido à complexidade da dinâmica atmosférica ocorrida na partição de tempo média-5-minutos.

CONCLUSÕES

O modelo de estimativa da irradiância solar difusa em função da transmissividade atmosférica proposto apresentou bom ajuste com elevado coeficiente de determinação. A validação para valores médio anuais apresentou superestimativas de 2%, indicando que o modelo é recomendado para estimativas de valores anuais da irradiância solar difusa. No entanto, o modelo falha na estimativa de valores médio mensais, com desvios no intervalo de -30% a 50%. Nesse sentido, recomenda-se estudos posteriores na determinação de modelos mensais da irradiância solar difusa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKIRCI, K. Models for the estimation of diffuse solar radiation for typical cities in Turkey. **Energy**, n. 82, p. 827-838, 2015.

BATTLES, F. J., OLMO, F. J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, v.54, n.2, p.105-14, 1995.



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros



BOUKELIA, T. E. et al. General models for estimation of the monthly mean daily diffuse solar radiation. **Energy Conversion and Management**, n. 81, p. 211-219, 2014.

GONZÁLEZ, J., CALBÓ, J. Influence of the global radiation variability on the hourly diffuse fraction correlations. **Solar Energy**, v.65, n.2, p.119-31, 1999.

HAY, J.E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. **Solar Energy**, v.33, n.4, p.301-307, 1979.

IQBAL, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - I, Monthly average daily horizontal radiation. **Solar Energy**, v.1, p.81-86, 1979.

KHAHRO, S. F. et al. Evaluation of solar energy resources by establishing empirical models for diffuse solar radiation on tilted surface and analysis for optimum tilt angle for a prospective location in southern region of Sindh, Pakistan. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, n. 64, p. 1073-1080, 2015.

KUDISH, A I, EVSEEV, E G. The assessment of four different correction models applied to the diffuse radiation measured with a shadow ring using global and normal beam radiation measurements for Beer Sheva, Israel. **Solar Energy**, v.82, p.144-156, 2008.

LALAS, D. P. et al. Correlations for the estimation of the diffuse radiation component in Greece. **Solar Energy**, v.39, n.5, p.455-8, 1987.

LI, H. et al. Calculating the diffuse solar radiation in regions without solar radiation measurements. **Energy**, n. 44, p. 611-615, 2012.

ORGILL, J. F., HOLLANDS, K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. **Solar Energy**, v.19, n.3, p.357-359, 1977.

SANCHEZ-LORENZO, A. et al. Global and diffuse solar radiation in Spain: building a homogeneous dataset and assessing their trends. **Global and Planetary Change**, n. 100, p. 343-352, 2013.

SKARTVEIT, A., OLSETH, J. A. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. **Solar Energy**, v.38, p.271-4, 1987.

SOLER, A. Dependence on latitude of the relation between the diffuse fraction of solar radiation and the ratio of global to - extraterrestrial radiation for monthly average daily values. **Solar Energy**, v.44, n.5, p.297-302, 1990.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v.51, n.4, p.289-91, 1993.

SUEHRCKE, H., McCORMICK, P. G. The diffuse fraction of instantaneous solar radiation. **Solar Energy**, v.40, n.5, p.423-30, 1988.

VARTIAINEN, E. An anisotropic shadow ring correction method for the horizontal diffuse irradiance measurements. **Renewable Energy**, v.17, p.311-317, 1999.



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros



VIGNOLA, F., McDANIELS, D. K. Diffuse-global correlations: seasonal variations. **Solar Energy**, v.33, n.5, p.397-402, 1984.

ZANGVIL, A., AVIV, O. E. On the effect of latitude and season on the relation between the diffuse fraction of solar radiation and the ratio of global to extraterrestrial radiation. **Solar Energy**, v.39, n.4, p.321-7, 1987.