

ESTIMATIVA DOS VALORES INSTANTÂNEOS MÉDIOS ANUAIS E MENSAIS DA IRRADIANCIA SOLAR DIFUSA EM FUNÇÃO DA TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA PARA BOTUCATU-SP

ALEXANDRE DAL PAI¹ ; FABIO HENRIQUE P. CORREA² ; ADILSON PACHECO DE SOUZA³ ; JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO⁴

¹ Físico, Prof Dr Depto. de Informática, FATEC–BTU, Botucatu-SP, :adalpai@fatecbt.edu.br

² Tecnólogo em Informática, Mestrando, Depto. de Recursos Naturais, FCA-UNESP Botucatu, ³ Engenheiro Agrícola, Doutorando, Depto. de Recursos Naturais, FCA-UNESP Botucatu, ⁴ Físico, Prof Dr Depto. de Recursos Naturais, FCA-UNESP Botucatu

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 22 a 25 de Setembro de 2009 - GranDarrel Minas Hotel, Eventos e Convenções - Belo Horizonte, MG

RESUMO: O objetivo do trabalho é propor equações de estimativa dos valores instantâneos médios anuais e mensais da irradiância solar difusa em função da transmissividade atmosférica. A equação anual é recomendada para aplicações anuais, com MBE=0,83% e RMSE=6,22%. Para aplicações que necessitem de maior precisão, recomendam-se as equações mensais que caracterizam melhor a massa ótica, com MBEs entre -14,76% a 16,77% e RMSEs inferiores a 25%.

PALAVRAS-CHAVE: MODELO DE ESTIMATIVA, IRRADIÂNCIA DIFUSA, COBERTURA DE CÉU

ANNUAL AND MONTHLY MEAN DIFFUSE SOLAR IRRADIANCE ESTIMATED VALUES AS A FUNCTION OF THE CLEARNESS INDEX FOR BOTUCATU-SP

ABSTRACT: The objective of this paper is to develop annual and monthly mean diffuse solar irradiance estimated equations as a function of the clearness index. The annual statistical indicators are MBE=0,83% e RMSE=6,22%. The monthly statistical indicators were -14.76% to 16.77% for MBE and less than 25% for RMSE.

KEYWORDS: ESTIMATE MODEL, DIFFUSE IRRADIANCE, CLEARNESS INDEX

INTRODUÇÃO: É conhecido que as estações meteorológicas automáticas trouxeram um enorme avanço na captação e no armazenamento de dados, trazendo rapidez e confiabilidade nas medidas. A facilidade de se dispor de equações neste sistema permite que correções e funções possam ser programadas e aplicadas instantaneamente, tão logo sejam feitas as leituras, contribuindo para a automação na operação dos dados. Assim, segundo SUEHRCKE e MCCORMICK (1989), as medidas instantâneas oferecem, como vantagem, a identificação de fatores que influenciam a radiação, como a massa ótica e a presença de nuvens. Além de modificarem o montante da radiação global, esses fatores contribuem para a grande variabilidade dos valores instantâneos, com impacto significativo nos estudos da eficiência de sistemas de conversão de energia solar. A parcela da irradiância solar global espalhada pela atmosfera que atinge a superfície terrestre é conhecida como irradiância solar difusa e é composta pelos espalhamentos Rayleigh (partículas pequenas da ordem de 10% do comprimento de onda da irradiância incidente - gases) e Mie (partículas da ordem do comprimento de onda da irradiância incidente - aerossóis) (IQBAL, 1983). A presença de nuvens, além de dificultar a passagem de irradiância solar, promove 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). Portanto, o objetivo do trabalho é propor equações de estimativa dos valores instantâneos médios anuais e mensais da irradiância solar difusa em função da transmissividade atmosférica.

MATERIAIS E MÉTODOS: Os dados de irradiância solar global e difusa foram fornecidos pelo Laboratório de Radiometria Solar do Departamento de Recursos Naturais – Setor Ambientais – da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP/Botucatu. As coordenadas geográficas do local de medida são: 22,85° S de latitude, 48,45° O de longitude e 786 m de altitude. O período utilizado para o estudo compreende os anos de 1996 a 2006, num total de 11 anos de medidas no formato W/m². Os anos de 2000, 2001, 2003 e 2004 foram utilizados na modelagem enquanto que os anos de 2002 e 2005 foram utilizados na validação. A irradiância solar global I_G foi monitorada por um piranômetro da marca Eppley modelo PSP e irradiância difusa I_d por um piranômetro da marca Eppley modelo PSP posicionado sob a sombra projetada por um anel de dimensões 0,40 m de raio e 0,10 m de largura disposto segundo a montagem Melo-Escobedo. A irradiância difusa, no ato da medida, foi corrigida com os fatores de correção geométricos desenvolvidos por OLIVEIRA ET AL (2002) para a montagem Melo-Escobedo. Os sensores usados são de primeira classe e foram calibrados a cada 2 anos. O gerenciamento dos sensores e a aquisição das medidas foram efetuados por um datalogger da marca Campbell Sci modelo 23X, efetuando leituras a cada 5 segundos e armazenando médias aritméticas dessas medidas a cada 5 minutos. O co-seno do ângulo zenital, a irradiância extraterrestre I_o e a transmissividade atmosférica K_t foram calculados, respectivamente, por meio das Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3):

$$\cos \theta_z = \sin \phi * \sin \delta + \cos \phi * \cos \delta * \cos \omega \quad \text{Eq. 1}$$

$$I_o = 1367 * \cos \theta_z \quad \text{Eq. 2}$$

$$K_t = \frac{I_G}{I_o} \quad \text{Eq. 3}$$

Segundo a classificação climática de KOPPEN, o clima de Botucatu é classificado como Cwa (temperado quente) apresentando verão úmido e inverso seco. A validação dos modelos de estimativa foi realizada através dos indicativos estatísticos MBE e RMSE (STONE, 1993).

$$MBE(\%) = 100 \frac{\left(\sum_i^N (y_i - x_i) / N \right)}{\bar{X}} \quad \text{Eq.4}$$

$$RMSE(\%) = 100 \frac{\left(\sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N \right)^{1/2}}{\bar{X}} \quad \text{Eq. 5}$$

onde y_i são os valores estimados, x_i os valores medidos, \bar{X} a média dos valores medidos e N o número de observações. O desvio das médias MBE (Mean Bias Error) é um parâmetro que indica o desempenho de um modelo a longo prazo, enquanto que a raiz quadrada do desvio quadrático médio RMSE (Root Mean Square Error) fornece informação quanto ao desempenho do modelo à curto prazo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A partição de tempo de 5 minutos apresenta um grande

volume de dados e, portanto, foi necessária a utilização de valores médios para as correlações. Nesse sentido, a transmissividade atmosférica K_t foi dividida em um intervalo centesimal e para cada intervalo foi calculado o valor médio da irradiância difusa juntamente com seu desvio-padrão. A figura 1 mostra a curva média da irradiância difusa em função da transmissividade atmosférica para quatro anos de medidas, enquanto que a Eq. (4) apresenta o ajuste polinomial de 4º grau. Os valores de transmissividade atmosférica maiores que 0,75 foram descartados, pois representam situações físicas improváveis, fruto da reflexão da irradiância direta por nuvens adjacentes que aumentam a irradiância difusa (SUEHRCKE e MCCORMICK, 1989).

$$I_d = 1,08 + 516,12K_t + 1619,94K_t^2 - 5273,63K_t^3 + 3262,82K_t^4 \quad R^2=0,9995 \quad \text{Eq. 6}$$

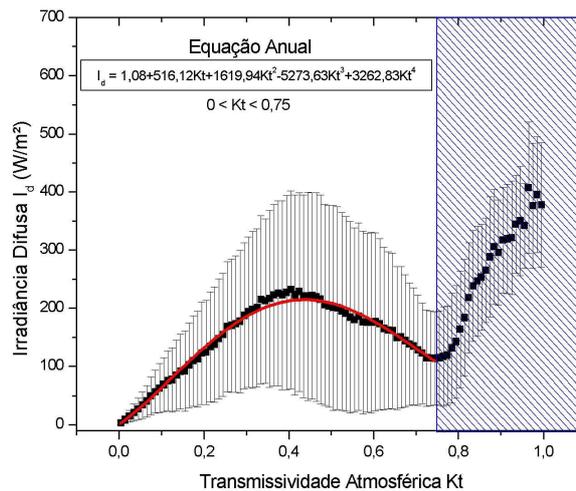


Figura 1. Irradiância difusa média em função da transmissividade atmosférica.

A validação para uma aplicação anual mostrou-se satisfatória, com indicativos estatísticos baixos da ordem de $MBE=0,83\%$ e $RMSE=6,22\%$. No entanto, o desvio-padrão mostra uma grande variabilidade dos valores da irradiância difusa para um determinado valor de transmissividade atmosférica. Nesse sentido, a equação anual foi utilizada para uma aplicação mensal, e os resultados dos indicativos estatísticos MBE e $RMSE$ são mostrados na figura 2.

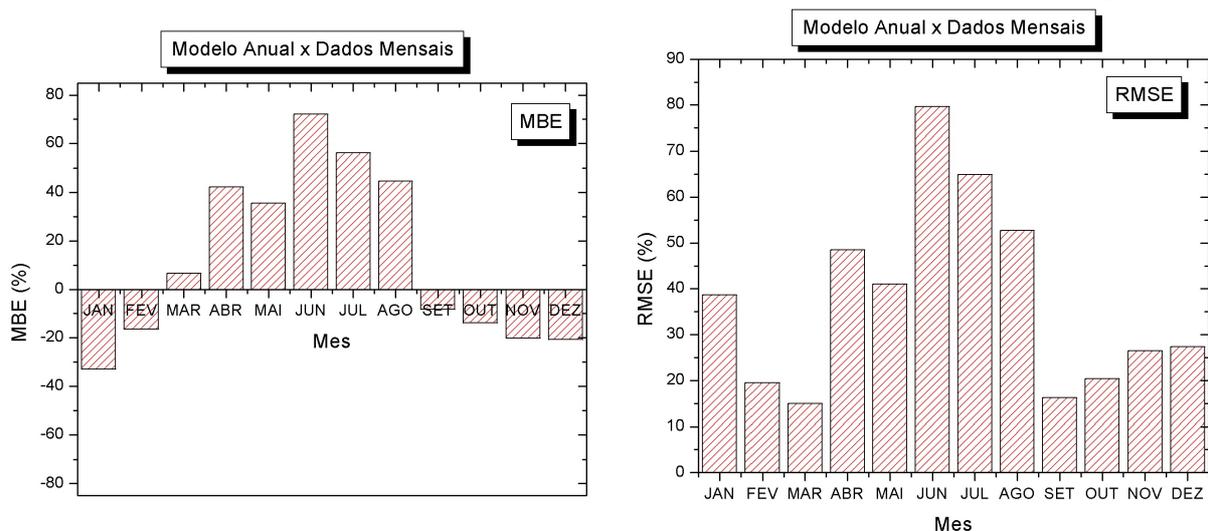


Figura 2. Indicativos estatísticos MBE e $RMSE$ resultantes da aplicação da equação anual para uma base de dados mensal.

Tanto valores de MBE quanto de RMSE mostram forte tendência de sazonalidade pela aplicação da equação anual para valores mensais. O MBE mostra tendências de superestimativas para o inverno ($MBE_{MAX}=72,20\%$ - junho) e subestimativas para o verão ($MBE_{MIN}=-32,85\%$ - janeiro). O RMSE mostra maiores espalhamento para épocas dos solstícios (picos em torno de 80%) e menores para equinócios. Segundo VARTIAINEN (1999), os meses apresentam massa ótica e concentração atmosférica variáveis, influenciando o fenômeno de espalhamento da radiação solar pela atmosfera. A figura 3 mostra o valor médio mensal da massa ótica para os 12 meses do ano.

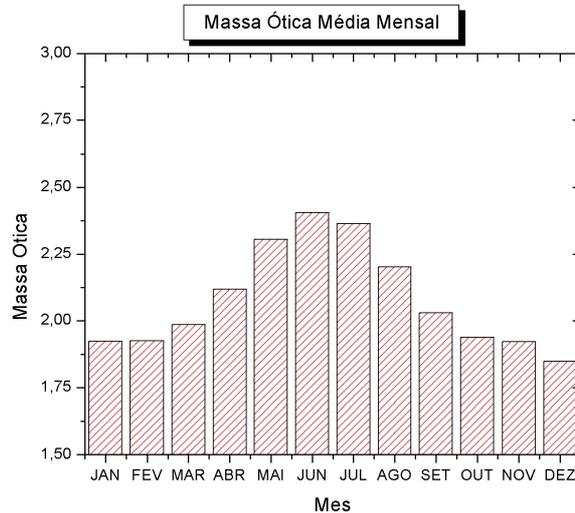


Figura 3. Massa ótica média mensal.

A massa ótica está relacionada à densidade do meio e ao caminho ótico percorrido pelos raios solares. Pela Figura 3 observa-se que a massa ótica é maior para os meses do inverno, o que representa uma maior probabilidade de espalhamento da radiação pela atmosfera, enquanto que para os meses do verão ocorre o inverso. O modelo anual não é sensível às mudanças da massa ótica, o que justifica a grande variação do desvio-padrão da figura 1 e a elevada amplitude de variação dos valores de MBE e RMSE da figura 2. Nesse sentido, na tentativa de caracterizar melhor a massa ótica para cada mês, foram propostas 12 equações mensais para estimativa da irradiância difusa em função da transmissividade atmosférica, apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes mensais da equação de estimativa dos valores médios da irradiância difusa em função da transmissividade atmosférica Kt

Mês	Coeficientes da equação $I_d = A_0 + A_1 Kt + A_2 Kt^2 + A_3 Kt^3 + A_4 Kt^4$					R^2
	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	
JAN	17,74	75,86	5301,44	-12322,43	7290,30	0,971
FEV	8,30	282,99	3504,94	-8547,14	4870,20	0,976
MAR	11,77	77,63	4711,51	-11516,81	7175,74	0,973
ABR	14,62	72,24	3616,70	-9591,15	6432,39	0,959
MAI	6,60	254,07	2195,04	-6491,62	4392,06	0,948
JUN	3,65	356,62	1194,59	-4658,06	3502,65	0,936
JUL	12,85	41,13	2761,78	-6930,74	4456,10	0,960
AGO	2,06	442,96	812,25	-3583,70	2565,93	0,956
SET	9,12	288,67	2137,08	-5782,40	3618,66	0,960
OUT	9,47	354,78	2755,60	-7486,74	4664,26	0,964
NOV	12,95	70,16	5057,70	-11678,75	6860,33	0,982
DEZ	18,94	-116,94	6631,59	-14725,90	8628,88	0,986

A validação das equações mensais foi realizada com uma base de dados mensal, e o resultado dos indicadores estatísticos MBE e RMSE são apresentados na figura 4.

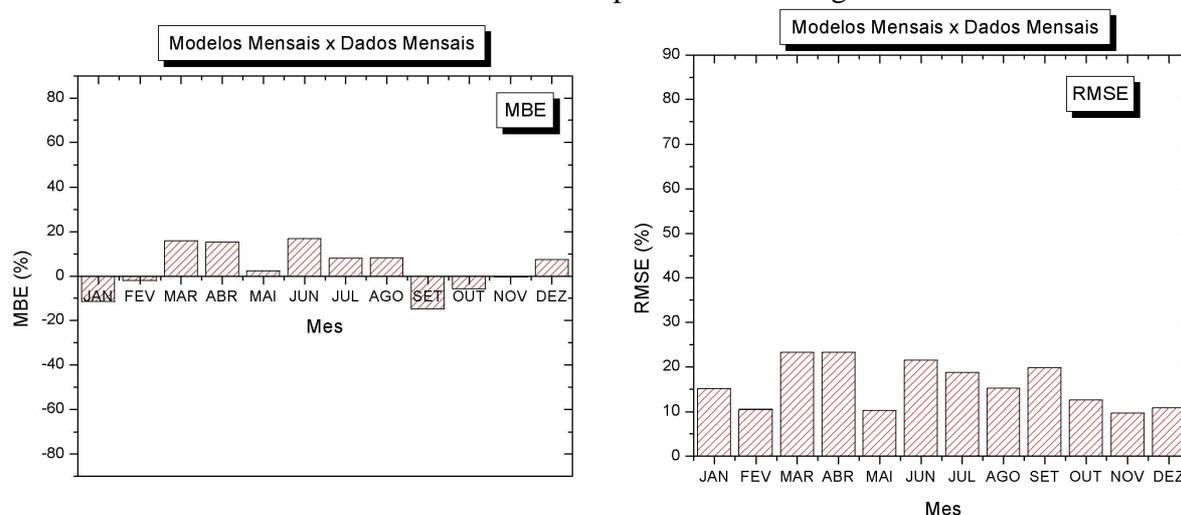


Figura 4. Indicativos estatísticos MBE e RMSE resultantes da aplicação das equações mensais para uma base de dados mensal.

A validação mostra que a aplicação das equações mensais para uma base de dados mensal reduziu os valores dos indicadores estatísticos MBE e RMSE. Para MBE, os valores máximo e mínimo foram de 16,77% (setembro) e -14,76% (junho) respectivamente, o que comprova que a introdução dos efeitos da massa ótica por meio das equações mensais explica melhor o espalhamento da radiação. Para RMSE, a redução dos valores indica um menor espalhamento dos dados experimentais em torno das equações mensais propostas.

CONCLUSÃO: A equação anual apresentou resultados adequados para aplicações que requerem partição de tempo anual, porém mostrou deficiências para partições mensais. As equações mensais permitiram melhor caracterização da atmosfera (massa ótica), produzindo resultados satisfatórios para aplicações mensais. No entanto, para aperfeiçoamento das estimativas, mais estudos de modelagem estatística devem ser conduzidos em função de outros constituintes atmosféricos que tem impacto no espalhamento da radiação.

REFERÊNCIAS:

- 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.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.
- OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J. **A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface.** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Boston, v. 19, p. 698-708, 2002.
- 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 distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over the day.** *Solar Energy*, v.42, n.4, p.303-9, 1989.
- VARTIAINEN, E. **An anisotropic shadow ring correction method for horizontal diffuse irradiance measurements.** *Renewable Energy*, vol. 17, pp. 311-317, 1999.