

ESTIMATIVAS DIÁRIAS DAS IRRADIAÇÕES DIRETAS E DIFUSAS EM SUPERFÍCIES INCLINADAS COM BASE NO ÍNDICE DE CLARIDADE

Adilson Pacheco de Souza¹; João Francisco Escobedo²; Alexandre Dal Pai³;
Douglas Rodrigues⁴; Eduardo Nardini Gomes⁵

¹ Engenheiro Agrícola, Doutorando em Irrigação e Drenagem, UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Depto de Recursos Naturais, Fazenda Experimental Lageado, Rua José Barbosa de Barros, nº 1780, CEP: 18610-307, Botucatu-SP, pacheco@fca.unesp.br. ² Físico, Prof. Doutor, Depto de Recursos Naturais, UNESP/FCA, Botucatu-SP. ³ Físico, Prof. Doutor, Depto de Informática, FATEC, Botucatu-SP. ⁴ Tecnólogo em Informática, Depto de Informática, FATEC, Botucatu-SP. ⁵ Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, Depto de Recursos Naturais, UNESP/FCA, Botucatu-SP.

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

RESUMO: Este trabalho apresenta equações de estimativa e validações das irradiações direta $\langle \overline{H_{B\beta}^d} \rangle$ e difusa $\langle \overline{H_{D\beta}^d} \rangle$, na partição diária, para superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, em função do índice de claridade $\langle K_{TH}^d \rangle$, na cidade de Botucatu-SP. As medidas nos diferentes ângulos de inclinação ocorreram em períodos separados, sendo: de 04/1998 a 08/2001, na inclinação de 22,85°; entre 09/2001 e 02/2003 na inclinação de 12,85° e de 01/2004 a 12/2007 em 32,85°. Concomitantemente foram realizadas medidas de rotina em superfícies horizontais. Foram coletados valores médios de 5 minutos das irradiâncias global e direta, enquanto a irradiância difusa foi obtida pela diferença. As estimativas de $\langle \overline{H_{B\beta}^d} \rangle$ e $\langle \overline{H_{D\beta}^d} \rangle$ foram dadas por correlações com os índices radiométricos $\langle K_{b\beta}^{rd} \rangle$ e $\langle K_{D\beta}^{rd} \rangle$ em função de $\langle K_{TH}^d \rangle$. Na estimativa da irradiação direta inclinada as equações apresentaram ótimos desempenhos, com desvios variando entre -0,44 e 0,52 MJ m⁻² dia⁻¹, espalhamentos inferiores a 1,81 MJ m⁻² dia⁻¹ e ajustamentos superiores a 97%. Já na estimativa da irradiação difusa inclinada, os espalhamentos atingiram até 3,89 m⁻² dia⁻¹ e os ajustamentos foram em torno de 61,2%.

PALAVRAS-CHAVE: Irradiação solar, índices radiométricos, indicativos estatísticos.

DAILY ESTIMATES OF THE DIRECT AND DIFFUSE BEAMS IRRADIATIONS IN INCLINED SURFACES ON THE CLEARNESS INDEX BASIS

ABSTRACT: This work presents equations of estimate and the validations for the beams $\langle \overline{H_{B\beta}^d} \rangle$ and diffuse $\langle \overline{H_{D\beta}^d} \rangle$ irradiances, in the daily partition, for inclined surfaces to 12.85°, 22.85° and 32.85°, in function of the clearness index $\langle K_{TH}^d \rangle$, in Botucatu-SP. The measurements in the different angles of inclination occurred in separate periods, being: of 04/1998 to 08/2001, in the inclination of 22.85°; between 09/2001 and 02/2003 in the inclination of 12.85° and of 01/2004 to 12/2007 in 32.85°. Concomitantly were carried out measures of routine in horizontal surfaces. They were collected medium values of 5 minutes of the irradiances global and beam, while to irradiances diffuse was obtained by the difference. The estimates of $\langle \overline{H_{B\beta}^d} \rangle$ and $\langle \overline{H_{D\beta}^d} \rangle$ were facts by correlation with the radiometrics index $\langle K_{b\beta}^{rd} \rangle$ and $\langle K_{D\beta}^{rd} \rangle$ in function of the $\langle K_{TH}^d \rangle$. In the estimate of the beam irradiation tilted, the equations presented great performances, with detours varying between -0.44 and 0.52 MJ m⁻² day⁻¹, RMSE lower to 1.81 MJ m⁻² day⁻¹ and adjustments over 97%. Already in the estimate

of the diffuse irradiation tilted, the RMSE reached to $3.9 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and the adjustments were around 61.2%.

KEYWORDS: Solar irradiation, radiometric index, statistical indicative.

INTRODUÇÃO: A maioria das estações meteorológicas espalhadas no mundo mede de forma rotineira apenas a radiação solar global, enquanto que medidas das radiações diretas e difusas são escassas devido ao elevado custo dos métodos de medidas e instrumentos envolvidos. Por causa da falta de observações de rotina da radiação solar incidente em superfícies inclinadas, vários modelos teóricos de estimativa foram desenvolvidos, utilizando medidas da radiação global e da componente direta das radiações obtidas no plano horizontal. Esses modelos utilizam individualmente os valores das componentes direta, difusa e refletida pela superfície do solo na radiação total incidente sobre uma superfície inclinada. Nessa circunstância, para estimar a radiação total em planos inclinados, as componentes diretas e difusas da radiação solar também devem ser estimadas. Todavia, correlações com o índice de claridade $\langle K_{TH}^d \rangle$ são as formas mais simples de se obter essas estimativas (LIU & JORDAN, 1960). Esse índice representa a quantidade de irradiação efetiva que chega à superfície terrestre em relação à quantidade existente no topo da atmosfera, evidenciando assim, os efeitos de atenuação sofrida pela radiação ao atravessar a atmosfera. Em Botucatu-SP, alguns trabalhos também utilizaram essa metodologia de estimativa das irradiações diretas e difusas em superfícies horizontais (OLIVEIRA & ESCOBEDO, 2001; OLIVEIRA et al., 2002; DAL PAI, 2005; GOMES et al., 2006; ESCOBEDO et al., 2007). Contudo, em superfícies inclinadas, a geração de equações simplificadas de estimativa das componentes direta e difusa se fazem necessárias para o planejamento e otimização na produção agrícola regional, baseada principalmente, nos monocultivos de cana-de-açúcar e eucalipto. Este trabalho objetivou apresentar equações para estimativa de valores diários da irradiação direta e difusa em superfícies inclinadas a $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$, para a cidade de Botucatu-SP.

MATERIAL E MÉTODOS: Os dados das irradiâncias solar global, direta e difusa foram coletados na Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu-SP (latitude $22^\circ 51'$ Sul, longitude $48^\circ 26'$ Oeste, altitude 786m), no período de abril de 1998 a dezembro de 2007. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Botucatu é classificado como Cwa, caracterizado como temperado úmido, com inverno seco e verão quente. Os valores das irradiâncias difusas horizontais foram obtidos pela diferença entre global e direta, enquanto que, nas inclinações foram obtidos pela diferença entre global, direta e refletida. As leituras foram feitas a cada segundo e as médias armazenadas a cada 5 minutos, em um sistema de aquisição de dados Microllogger CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., modelo CR23X, operando na frequência de 1Hz. As irradiâncias globais no plano horizontal foram medidas com auxílio de piranômetros EPPLEY-PSP, com fator de calibração de $7,45 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ e linearidade de $\pm 0,5 \%$ (0 a $2800 \text{ W}/\text{m}^2$). Para a irradiância global inclinada, os piranômetros foram posicionados paralelamente sobre planos inclinados de $12,45^\circ$ (L- 10°), $22,45^\circ$ (L) e $32,45^\circ$ (L+ 10°) com a face voltada para o Norte. As irradiâncias diretas na incidência $\langle I_{BN} \rangle$ foram obtidas por um pireliômetro EPPLEY-NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 EPPLEY, com fator de calibração de $7,59 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ e linearidade de $\pm 0,5 \%$ (0 a $1400 \text{ W}/\text{m}^2$). No entanto, como as medidas nas três inclinações não foram realizadas concomitantemente, a distribuição das medidas em cada inclinação foi: para $12,45^\circ$ as medidas ocorreram entre 09/2001 e 02/2003; para $22,85^\circ$ entre 04/1998 e 08/2001 e na inclinação de $32,85^\circ$ entre 01/2004 e 12/2007. As correlações foram geradas com dados de 1999 e 2000 para $22,85^\circ$, de 2002 para $12,85^\circ$ e de 2004 e 2005 para $32,85^\circ$. Os demais dados foram empregados nas

validações. A projeção da irradiância direta na horizontal foi dada pelo produto entre $\langle I_{BN} \rangle$ e o cosseno do ângulo zenital. Todos os valores de irradiâncias global, direta e difusa foram integrados entre o nascer e o pôr-do-sol, permitindo a obtenção das respectivas componentes da irradiação. Assim, a projeção da irradiação direta nos planos inclinados, ocorreu pelo produto entre a irradiação direta na horizontal e o fator geométrico $\langle R_B \rangle$ (IQBAL, 1983). As estimativas da irradiação direta inclinada $\langle \bar{H}_{B\beta}^d \rangle$ e difusa inclinada $\langle \bar{H}_{D\beta}^d \rangle$ por meio dos índices radiométricos $\langle K_{b\beta}^d \rangle$ e $\langle K_{D\beta}^d \rangle$ que expressam a razão entre a irradiação direta inclinada e a irradiação no topo da atmosfera para planos inclinados e entre a irradiação difusa e a irradiação no topo da atmosfera para planos inclinados. Os índices de claridade $\langle K_{TH}^d \rangle$ expressam a razão entre a irradiação global na horizontal e a irradiação no topo da atmosfera no plano horizontal. As irradiações diárias no topo da atmosfera para as superfícies horizontal e inclinadas foram dadas pelas equações 01 e 02, respectivamente.

$$H_{0H}^d = \left(\frac{24}{\pi} \right) H_{SC} E_0 \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s) \right] \quad (1)$$

$$H_{0\beta}^d = \left(\frac{24}{\pi} \right) I_{SC} E_0 \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s' (\sin \delta \sin(\phi - \beta)) + (\cos \delta \cos(\phi - \beta) \sin \omega_s') \right] \quad (2)$$

em que: H_{SC} é a constante solar, com valor igual a $4921 \text{ KJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; E_0 é o fator de correção da excentricidade da Terra; ϕ é a latitude do local; δ é a declinação solar, dada em graus, e ω_s é o ângulo horário solar diário. IQBAL (1983) apresentou as possibilidades de obtenção desses parâmetros em diversas partições de tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Figura 01 mostra a correlação entre $(K_{b\beta}^d)$, que expressa a relação entre a irradiação direta e a irradiação no topo da atmosfera para as superfícies inclinadas, com os índices de claridade (K_{TH}^d) .

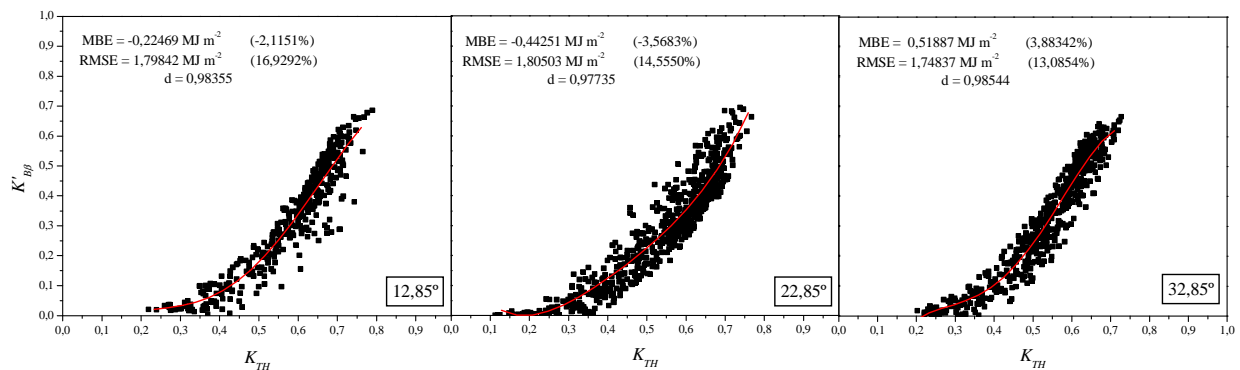


Figura 01. Correlações entre $(K_{b\beta}^d)$ de superfícies inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,8° (c) com (K_{TH}^d) em superfícies horizontais.

Foram ajustadas equações de quarto grau através de regressão polinomial dos agrupamentos anuais das partições diárias para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, dadas pelas equações 03, 04 e 05, respectivamente.

$$K'_{b\beta}{}^d = -0,20293 + 2,66318(K_{TH}^d) - 11,77585(K_{TH}^d)^2 + 22,07032(K_{TH}^d)^3 - 12,23303(K_{TH}^d)^4 \quad (03)$$

$$K'_{b\beta}{}^d = 0,22207 - 2,82839(K_{TH}^d) + 11,48682(K_{TH}^d)^2 - 16,36156(K_{TH}^d)^3 + 9,45413(K_{TH}^d)^4 \quad (04)$$

$$K'_{b\beta}{}^d = -0,72687 + 8,00744(K_{TH}^d) - 32,10447(K_{TH}^d)^2 + 56,21064(K_{TH}^d)^3 - 32,55354(K_{TH}^d)^4 \quad (05)$$

Na maioria dos estudos que apresentam estimativas da irradiação direta na incidência ou projetadas em superfícies horizontais correlacionadas com o índice de claridade, foram encontrados coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,89, que resultam em coeficientes de correlação em torno de 0,94 (GOMES, 2006). As equações supracitadas apresentaram coeficientes de correlação que corroboram com essas expectativas, com valores de 0,9481; 0,9393 e 0,9663. Observa-se que não existe uma linearidade entre $\langle K'_{b\beta}{}^d \rangle$ e $\langle K_{TH}^d \rangle$, pois para um mesmo valor de $\langle K_{TH}^d \rangle$ são observados vários valores de $\langle K'_{b\beta}{}^d \rangle$ resultantes do grande espalhamento da correlação. Existe uma concentração de pontos da correlação para valores de $\langle K_{TH}^d \rangle$ variáveis entre 0,50 e 0,70, que podem indicar um maior número de dias com céu aberto em Botucatu-SP ao longo do ano. Também, pode ser notado, que quando os valores de $\langle K_{TH}^d \rangle$ estão abaixo de 0,30, ou seja, dias com céu nublado, os níveis de irradiação direta tendem a zero. Ambas as equações possibilitaram boas estimativas dos valores de $\langle H_{b\beta}^d \rangle$, com tendências a subestimar em torno de -2,15% e -3,57% (-0,23 e -0,44 MJ m⁻²) para as inclinações de 12,85° e 22,85°. Já para a inclinação de 32,85° foram verificadas superestimativas de 0,52 MJ m⁻² (3,88%). Os espalhamentos verificados foram da ordem de 16,93%; 14,56% e 13,09%, ou de 1,80; 1,81 e 1,75 MJ m⁻², com ajustamentos de 0,9836; 0,9774 e 0,9854, para as mesmas inclinações.

A Figura 02 apresenta as correlações entre $\langle K'_{D\beta}{}^d \rangle$ e $\langle K_{TH}^d \rangle$ dadas pelas curvas médias dos intervalos centesimais de $\langle K_{TH}^d \rangle$. Inicialmente a correlação entre $\langle K'_{D\beta}{}^d \rangle$ e $\langle K_{TH}^d \rangle$ apresentou grandes espalhamentos que dificultaram a geração de equações de estimativas, sendo necessária a aplicação da curva média. Nesse caso, os valores de $\langle K_{TH}^d \rangle$ foram discretizados em intervalos centesimais (de 0,01 em 0,01 unidades), possibilitando a avaliação da tendência média de variação de $\langle K'_{D\beta}{}^d \rangle$. Em cada um desses subintervalos foi calculada a média de $\langle \bar{K}_{D\beta}{}^d \rangle$ e do desvio $\langle \delta \bar{K}'_{D\beta}{}^d \rangle$ para as três inclinações. Essa metodologia foi adotada seguindo os trabalhos de GOMES (2006) e ESCOBEDO et al. (2007).

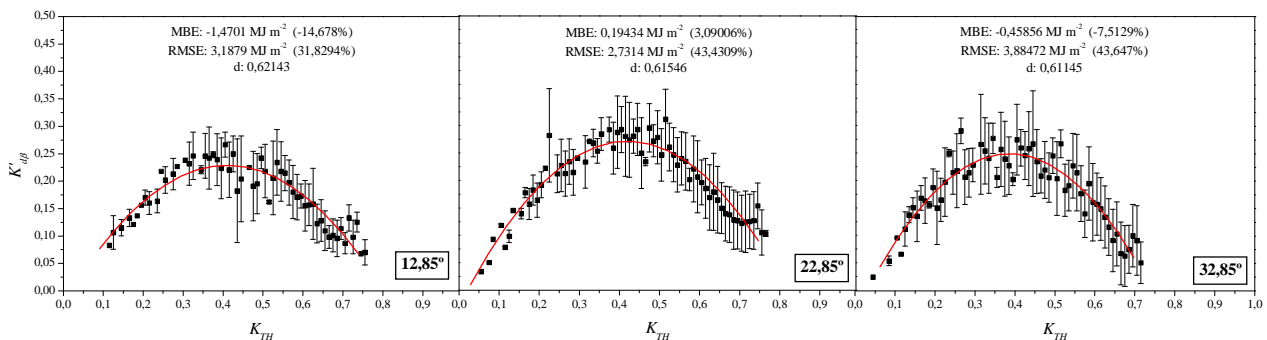


Figura 02. Correlações entre $\langle \bar{K}_{D\beta}{}^d \rangle$ e $\langle K_{TH}^d \rangle$ pela curva média, para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°.

Foram ajustados polinômios de 2º grau (equações 06, 07 e 08), com coeficientes de determinação iguais a 0,84025; 0,89071 e 0,87502, para estimativas dos níveis diários de $\langle H_{DB}^d \rangle$ nas inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente.

$$\overline{K}_{DB}^d = -0,02254 + 1,22689(K_{TH}^d) - 1,49656(K_{TH}^d)^2 \quad (06)$$

$$\overline{K}_{DB}^d = -0,02922 + 1,43189(K_{TH}^d) - 1,70392(K_{TH}^d)^2 \quad (07)$$

$$\overline{K}_{DB}^d = -0,04254 + 1,51652(K_{TH}^d) - 1,96006(K_{TH}^d)^2 \quad (08)$$

Essas curvas médias apresentam um crescimento dos valores de $\langle \overline{K}_{DB}^d \rangle$ até pontos máximos de 0,2666; 0,3115 e 0,2917, que correspondem a regiões de nebulosidade moderada, em que $\langle K_{TH}^d \rangle$ varia entre 0,35 a 0,45, e decaem para valores em torno de 0,07; 0,10 e 0,05 para condições de pouca nebulosidade, com $\langle K_{TH}^d \rangle$ próximo a 0,75). Pelas equações supracitadas, os pontos máximos são verificados também em condições de nebulosidade moderada, com valores de $\langle K_{TH}^d \rangle$ iguais a 0,41; 0,42 e 0,39, propiciando valores de $\langle \overline{K}_{DB}^d \rangle$ em torno de 0,2289; 0,2632 e 0,2508 para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente. Essas equações com agrupamentos anuais apresentaram desempenhos sofríveis nas estimativas, visto que os ajustamentos são em torno de 62% apenas e os espalhamentos acima de 30%. Todavia, esses baixos desempenhos são inerentes à própria componente difusa, em agrupamentos anuais, pois apresenta grande variação com a cobertura de céu ao longo do ano (OLIVEIRA et al., 2002; DAL PAI, 2005).

CONCLUSÕES: As equações propostas para estimativa da irradiação direta em superfícies inclinadas apresentaram ótimos desempenhos, com desvios variando entre -0,44 e 052 MJ m⁻² dia⁻¹, espalhamentos inferiores a 1,81 MJ m⁻² dia⁻¹ e ajustamentos superiores a 97%. Para a estimativa da irradiação difusa, as equações ajustadas apresentaram bons coeficientes de determinação, com espalhamentos de até 3,89 m⁻² dia⁻¹ e ajustamentos em torno de 61,2%.

REFERÊNCIAS:

- DAL PAI, A. **Anisotropia da irradiação solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa**. 2005. 87f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Estimativa das radiações global, direta e difusa em função do índice de claridade (Kt) e razão de insolação (n/N). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1, 2007, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABENS, 2007. I CD-ROM.
- GOMES, E. N.; ESCOBEDO, J. F.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Evolução diurna e anual da radiação direta na incidência. **Avances em Energias Renovables y Medio Ambiente**, v. 10, p. 121-129, 2006.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canadá: Academic Press, 1983.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 03, n. 04, p.455-458, 1987.
- OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J., SOARES, J. Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo. **Applied Energy**, v. 71, p. 59-73, 2002.
- OLIVEIRA, L. S.; ESCOBEDO, J. F. Coeficiente de atenuação da radiação solar direta para Botucatu/SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 16, n. 01, p. 87-92, 2001.