

ESTIMATIVAS DA RADIAÇÃO DIFUSA HORÁRIA INCIDENTE EM SUPERFÍCIES INCLINADAS COM BASE NA TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA

Adilson Pacheco de Souza^{1*}, João Francisco Escobedo², Alexandre Dal Pai³, Eduardo Nardini Gomes⁴

RESUMO: Foram avaliadas equações estatísticas de estimativas (com base em frações radiométricas) da radiação difusa horária incidente em superfícies inclinadas para o Norte a 12,85, 22,85 e 32,85°, nas condições climáticas e geográficas de Botucatu, SP. A base de dados foi gerada entre abril/1998 a dezembro/2007, com medidas nas três inclinações em diferentes períodos, todavia concomitantes ao plano horizontal. Na validação das equações, foram empregados os indicativos estatísticos MBE (erro absoluto médio), RMSE (raiz quadrada do quadrado médio do erro) e índice de ajustamento (d), para as três inclinações e em diferentes condições de cobertura de céu. O aumento do ângulo de inclinação da superfície propiciou aumento do espalhamento dos valores horários para o coeficiente de transmissividade atmosférica da radiação difusa para superfícies inclinada e horizontal. As estimativas da radiação difusa horária inclinada com base na radiação global horizontal ocorrem por modelos polinomiais quadráticos, que ajustam valores máximos de $K'_{D\beta}$ entre 0,14 e 0,30 para inverno e verão quando K_{TH} varia entre 0,40 e 0,66, indicando que energeticamente, os maiores valores de radiação difusa ocorrem em condições de céu parcialmente nublado e/ou parcialmente aberto. O aumento da transmissividade atmosférica diminui o desempenho das equações anuais e mensais em todas as inclinações.

Palavras-chave: radiação solar, frações radiométricas, indicativos estatísticos.

ESTIMATES OF HOURLY DIFFUSE RADIATION INCIDENT ON TILTED SURFACES BASED ON ATMOSPHERIC TRANSMISSIVITY

ABSTRACT: Evaluated statistical equations estimates (based on radiometric fractions) of the hourly diffuse radiation incident on inclined surfaces for the North to 12.85, 22.85 and 32.85°, the climate and geographical conditions of Botucatu, SP. The database was generated from April/1998 to December/2007, with measures in the three tilted surfaces in different periods, but concomitant to the horizontal plane. In the validation of the equations were used indicative statistics MBE (mean absolute error), RMSE (square root mean square error) and index adjustment (d) for three inclinations and conditions of sky coverage. The increased angle of inclination of the surface led to increased scattering of hourly values for the coefficient of atmospheric transmissivity of diffuse radiation for inclined and horizontal surfaces. Estimates of diffuse radiation on the basis of hourly tilted horizontal global radiation occur for quadratic polynomial models, which adjust $K'_{D\beta}$ maximum values of between 0.14 and 0.30 for winter and summer when K_{TH} varies between 0.40 and 0.66, indicating that energy, the highest values of diffuse radiation occur in partly cloudy sky conditions and / or partially open. The increase in atmospheric transmissivity decreases the performance of annual and monthly equations at all inclinations.

Keywords: solar radiation, radiometric fractions, statistical index.

¹ Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais – Campus de Sinop, Distrito Industrial, Sinop (MT). CEP: 78550-000. *E-mail: adilsonpacheco@ufmt.br. Autor para correspondência.

² Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Departamento de Ciências Ambientais. Fazenda Experimental Lageado, s/n, Caixa Postal 237, Botucatu (SP). CEP: 18610970.

³ Faculdade de Tecnologia de Botucatu. Av. José Ítalo Bacchi, s/n, Jardim Aeroporto, Botucatu (SP). CEP: 18606-855.

⁴ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Rua Nelson Brihi Badur, 430, Centro, Registro (SP). CEP: 11900-000.

Recebido em: 05/07/2012. Aprovado em: 12/09/2012.

INTRODUÇÃO

Os avanços no desenvolvimento tecnológico das áreas de energias renováveis (conversão fototérmica e fotovoltaica, biomassa e biodiesel), agropecuária (aumento da eficiência baseada nas propriedades físicas e fisiológicas das culturas e/ou animais) e construção civil (materiais construtivos, aspectos micrometeorológicos, entre outros), perfazem uma demanda crescente pelo conhecimento da radiação solar (MARTINS & PEREIRA, 2011; PEREIRA et al., 2012).

No Brasil, os monitoramentos de rotina da radiação solar na superfície terrestre estão vinculados às universidades e institutos de pesquisa, sendo normalmente realizados apenas para a radiação global em planos horizontais. Devido aos custos envolvidos na aquisição e manutenção de instrumentos específicos para medidas das componentes de atenuação e/ou espectrais, são poucas as estações especiais de radiometria solar instaladas no território brasileiro (OLIVEIRA et al., 2002; SOUZA et al., 2005; TIBA et al., 2005; DAL PAI & ESCOBEDO, 2006; CODATO et al., 2008; ESCOBEDO et al., 2009; VIANA et al., 2011; FURLAN et al., 2012).

As variações dos níveis de radiação solar incidente decorrem de fatores astronômicos, geográficos e climáticos (concentrações de vapor de água, aerossóis e nuvens presentes na atmosfera). Dentre as características locais, as variações de altitude, inclinação (declividade), orientação (azimute) e sombreamento. Em geral, considera-se que a radiação global incidente em planos horizontais é composta pelas radiações direta e difusa, enquanto que, em planos inclinados, além dessas duas componentes ocorre a contribuição de fluxos energéticos refletidos. As maiores limitações na obtenção de níveis de radiação solar e as suas aplicações em planos inclinados decorrem da dificuldade na obtenção de valores para a componente difusa, visto que, as medidas de rotina exigem a aplicação de correções decorrentes do bloqueio de determinada parcela da própria radiação difusa (OLIVEIRA et al., 2002; DAL PAI & ESCOBEDO, 2006;

PANDEY & KATIYAR, 2009; SOUZA et al., 2012).

Na estimativa da radiação solar são empregados dois tipos de modelos: estatísticos (ou de decomposição) e parametrizados. Os modelos estatísticos são representados por equações matemáticas ajustadas por meio de regressão linear ou polinomial em correlações com as frações radiométricas ou com a razão de insolação (com necessidade da avaliação do desempenho e calibração), enquanto que, os modelos parametrizados dependem e informações detalhadas das condições atmosféricas locais (conforme a componente a ser estimada) ou preconizam a utilização de percentuais fixos de ocorrência de cada componente da radiação solar global (SOUZA et al., 2011). Nesse contexto, recentemente vários trabalhos têm sido desenvolvidos objetivando apresentar e avaliar modelos propostos para estimar a radiação difusa que atinge uma superfície inclinada (KAMALI et al., 2006; NOTTON et al., 2006; LOUTZENHISER et al., 2007; NOORIAN et al., 2008; BOLAND et al., 2008; CHWIEDUK, 2009; RUIZ-ARIAS et al., 2010; SERRANO et al., 2010; BADESCU et al., 2012; RAKOVEC & ZAKŠEK, 2012).

As estimativas da radiação difusa com base na radiação global horizontal (por meio de frações radiométricas e/ou coeficientes de transmissividade atmosférica da radiação solar) são fundamentais, por nortear as estimativas da radiação absorvida por superfícies topográficas com inclinações naturais e/ou forçadas, como as aplicações em estudos hidrológicos e projeto de aquecedores solares e corroboram para a necessidade de modelos simplificados de estimativas da radiação para planos inclinados.

O presente trabalho objetivou obter e avaliar o desempenho de equações estatísticas de estimativa da radiação difusa horária incidente em superfícies inclinadas para o Norte a 12,85; 22,85 e 32,85°, com base nas frações radiométricas da radiação global medida na horizontal, para as condições climáticas de Botucatu, SP.

MATERIAL E MÉTODOS

As medidas instantâneas (irradiâncias) das radiações global, direta e difusa foram coletadas na Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu-SP (latitude: 22,85° S, longitude: 48,43° W e altitude: 786 m), no período de abril de 1998 a dezembro de 2007. Pela classificação de Köppen, o clima de Botucatu é do tipo como Cwa, caracterizado

como temperado úmido, com inverno seco e verão quente (CEPAGRI, 2012).

Dentre os efeitos climáticos que afetam diretamente a incidência da radiação difusa destacam-se as variáveis que expressam o comportamento das concentrações de vapor d'água na atmosfera local. Nesse sentido, a Tabela 1 apresenta a razão de nebulosidade (relação que indica o tempo de cobertura por nuvens) e as precipitações pluviais.

Tabela 1 - Razão de nebulosidade e precipitação pluvial mensal em Botucatu - SP, entre 1999 e 2005

Meses	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Média	Desvio
	Razão de Nebulosidade								
Janeiro	0,64	0,57	0,48	0,67	0,73	0,63	0,7	0,63	0,09
Fevereiro	0,54	0,53	0,52	0,61	0,43	0,45	0,35	0,49	0,09
Março	0,29	0,53	0,51	0,28	0,45	0,37	0,45	0,41	0,1
Abril	0,24	0,18	0,25	0,29	0,52	0,52	0,33	0,33	0,14
Mai	0,25	0,24	0,39	0,44	0,21	0,46	0,31	0,33	0,1
Junho	0,36	0,28	0,64	0,54	0,42	0,55	0,53	0,47	0,12
Julho	0,24	0,29	0,39	0,46	0,29	0,38	0,36	0,34	0,08
Agosto	0,15	0,4	0,25	0,33	0,29	0,17	0,22	0,26	0,09
Setembro	0,34	0,45	0,34	0,46	0,37	0,31	0,49	0,39	0,07
Outubro	0,44	0,36	0,4	0,45	0,44	0,55	0,61	0,46	0,09
Novembro	0,42	0,44	0,48	0,55	0,56	0,45	0,47	0,48	0,05
Dezembro	0,48	0,56	0,68	0,6	0,49	0,51	0,52	0,55	0,07
Precipitação pluviométrica mensal (mm)									
Janeiro	357,9	220,7	315,5	271,3	412	302	428,4	329,7	74,8
Fevereiro	135,5	227,9	278,2	206,7	127,6	161,6	66,6	172	70,9
Março	35,6	162,4	156,6	150	179,8	122,3	113,8	131,5	48,1
Abril	70,3	12,1	24,9	2,8	87,5	107,5	78,7	54,8	41
Mai	44,8	10,3	89,6	103,7	52,9	133,5	120,8	79,4	44,7
Junho	97,5	12,8	56,9	0	23,7	28,8	51,2	38,7	32,8
Julho	16,3	55	39,9	40,7	15,8	104,3	18,7	41,5	31,5
Agosto	0	73,7	53,8	76,4	33,9	0,2	52	41,4	31,6
Setembro	84,4	127,9	87,2	65,1	14,9	7,7	35,1	60,3	43,5
Outubro	35,3	20,3	142,7	52,7	149,1	109	121	90	53
Novembro	34,2	191,9	117,7	178,9	173,5	54,4	63,8	116,3	66,1
Dezembro	119	186,8	221,3	192	183,9	157,9	183,3	177,7	31,9

As avaliações nos três planos inclinados ocorreram em diferentes períodos: entre 09/2001 e 02/2003, 04/1998 e 08/2001, 03/2004 e 12/2007 nas inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente. Estes dados sofreram uma análise de consistência e os valores discrepantes (oriundos de erros de leitura dos sensores ou mau funcionamento do sistema de aquisição de dados) foram removidos das séries.

As irradiâncias foram obtidas de valores médios em cinco minutos (300 leituras), por meio de um sistema de aquisição de dados Microllogger CR23X, operando na frequência de 1Hz e um módulo de memória SM192 com interface SC532 para microcomputadores, operado pelo software PC 208W, ambos da Campbell Scientific, Inc. A radiação global instantânea horizontal (I_{GH}) foi medida por um

piranômetro Eppley-PSP, com fator de calibração de $7,45\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ e linearidade de $\pm 0,5\%$ (0 a 2800 W m^{-2}). Já a radiação global instantânea inclinada ($I_{G\beta}$) foi empregado o piranômetro CM 3 da Kipp e Zonen, que possui sensibilidade de resposta de $\pm 10\text{-}35\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$, tempo de resposta de 18 s, resposta a temperatura de $\pm 1,0\%$ para a faixa de -40°C a 80°C e desvios para o efeito cosseno de $\pm 2\%$ ($0 < z < 80^\circ$).

A radiação direta instantânea na incidência (I_{BN}) foi obtida 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 W/m^2). A sua projeção na superfície horizontal (I_{BH}) foi dada pelo produto entre a medida na incidência e o ângulo zenital: ($H_{BH} = H_{BN} \cos Z_H$).

A projeção da radiação direta é dada pela relação geométrica existente entre a radiação extraterrestre para uma superfície inclinada e a de uma superfície horizontal ou a razão entre os cossenos dos ângulos zenitais inclinados (Z_β) e horizontal (Z_H), ou seja: $R_B = I_{0\beta}/I_{0H}$ ou $R_B = \cos Z_\beta/\cos Z_H$. As radiações extraterrestres horárias integradas para a superfície horizontal (H_{0H}) e nos diferentes ângulos de inclinação ($H_{0\beta}$) foram obtidas pelas seguintes equações (IQBAL, 1983).

A componente refletida horária ($H_{R\beta}$) da radiação global incidente nas superfícies inclinadas pode ter comportamento isotrópico e anisotrópico, contudo, a anisotropia deve ser aplicada somente para dias com céu claro e limpo. Em função da variabilidade das condições de cobertura de céu na região de Botucatu, SP (TERAMOTO & ESCOBEDO, 2012), foi considerado apenas o comportamento isotrópico dado pela equação 01 (IQBAL, 1983; KAMALI et al., 2006; GUEYMARD, 2009), que por sua vez, é dependente do albedo da superfície (ρ - razão entre a radiação refletida e a irradiação incidente, considerado como 23% para o gramado).

$$H_{R\beta} = 0,5 H_{GH} \rho (1 - \cos\beta) \quad (01)$$

As radiações difusas horárias nos planos horizontal e inclinados foram obtidas pelo método da diferença (equações 02 e 03). As avaliações da sazonalidade foram dadas

pela obtenção de valores médios anuais e mensais dos níveis energéticos horários.

$$H_{DH} = H_{GH} - H_{BH} \quad (02)$$

$$H_{D\beta} = H_{G\beta} - H_{B\beta} - H_{R\beta} \quad (03)$$

Como na grande maioria das estações da rede meteorológica brasileira, as medidas das componentes da radiação solar em planos inclinados são escassas, foram avaliadas as correlações para geração dos modelos de estimativa da radiação difusa nos planos inclinados com base nas diferentes frações radiométricas da radiação difusa obtidas pela razão com a radiação global e a radiação no topo da atmosfera. Os valores do coeficiente de transmissividade atmosférica da radiação global na horizontal (K_{TH}) foram obtidos pela razão entre a radiação global e a radiação no topo da atmosfera (H_{0H}), ambas para a horizontal. As frações da radiação difusa na radiação global horizontal (K_{DH}) e inclinada ($K_{D\beta}$) foram dadas pelo quociente entre a radiação difusa (H_{DH} e $H_{D\beta}$) e a radiação global (H_{GH} e $H_{G\beta}$). Os coeficientes de transmissividade atmosférica da radiação difusa horizontal (K'_{DH}) e inclinada ($K'_{D\beta}$) foram obtidos pelas razões entre a radiação difusa (H_{DH} e $H_{D\beta}$) e a radiação no topo da atmosfera (H_{0H} e $H_{0\beta}$) (SOUZA et al., 2011). Como a obtenção de (K_{TH}) depende apenas da medida da radiação global na horizontal (comum nas estações meteorológicas automáticas brasileiras), foram obtidas para essas correlações, equações de estatísticas em agrupamentos de dados anual e mensal, visando minimizar a utilização de outros equipamentos de medidas.

Para tanto, empregou-se a metodologia das curvas médias discretizadas em intervalos centesimais de (K_{TH}) (de 0,01 em 0,01 unidades), possibilitando a avaliação da tendência média de variação de ($K'_{D\beta}$). Em cada um desses subintervalos foi calculada a média de ($K'_{D\beta}$) e do desvio ($\delta K'_{D\beta}$) para as três inclinações estudadas (ESCOBEDO et al., 2009).

Foram propostas equações para os agrupamentos de dados anuais e mensais nas três inclinações estudadas. Na avaliação do desempenho das equações de estimativas diárias nas superfícies inclinadas quanto nas horizontais, empregou-se o erro absoluto

médio (MBE), a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE) e o índice de ajustamento (d) proposto por Willmott (1981). A utilização dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e índice de ajustamento “d”, em conjunto, permitem uma alternativa adequada para validação de modelos estatísticos, com análises simultâneas dos desvios da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação aos valores medidos.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (04)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (05)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (06)$$

em que: P_i - valores estimados; O_i - valores medidos; N - número de observações; $|P_i|$ - valor absoluto da diferença $P_i - \bar{O}_i$; $|O_i|$ - valor absoluto da diferença $O_i - \bar{O}_i$.

As avaliações de desempenho das equações geradas para os dois agrupamentos de dados foram realizadas nos agrupamentos anuais e mensais e nas variações das condições de cobertura de céu. Nesse caso, adotou-se a classificação de cobertura de céu proposta por Escobedo et al. (2009), que segue: i) $(K_T) \leq 0,35$: a radiação direta é praticamente nula, sendo a radiação global igual a radiação difusa; ii) $0,35 \leq (K_T) \leq 0,55$: a radiação global é composta principalmente pela fração difusa (que decresce acima desse intervalo) e em menor escala pela radiação direta (crescente a partir desse intervalo). iii) $0,55 \leq (K_T) \leq 0,65$: é o inverso do segundo intervalo, sendo que a radiação difusa diminui gradativamente nesse intervalo; iv) $(K_T) > 0,65$: a radiação global possui a maior parcela composta pela radiação direta e mínima difusa, portanto, a cobertura do céu é considerada aberta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se uma tendência linear crescente e o incremento do ângulo de inclinação propicia a diminuição dos coeficientes lineares e angulares das regressões geradas para estimativas das frações $K_{D\beta}$ com base em K_{DH} (Figura 1). Quando a fração difusa da radiação global na horizontal se aproximar de 1,0 (condições de céu nublado), são obtidos valores máximos de 0,9962; 0,9598 e 0,9228 para a fração difusa da radiação global nas inclinações de 12,85; 22,85 e 32,85°, respectivamente. Contudo, vale ressaltar que, os valores de K_{DH} não podem ser nulos, visto que mesmo em condições de céu aberto, ocorrem contribuições difusas no total de radiação global incidente, devido aos espalhamentos isotrópicos gerados pela interação com os gases permanentes (atmosfera limpa e livre de poluição) e anisotrópicos formados dos aerossóis e vapor de água.

A radiação difusa apresenta características isotrópicas e anisotrópicas decorrentes do espalhamento atmosférico (espalhamentos Rayleigh e Mie). O espalhamento (difusão) pode ocorrer em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético e ser classificado em função do tamanho das partículas em relação ao comprimento de onda da radiação incidente: seletivo ou isotrópico (espalhamento Rayleigh, quando realizado por partículas com diâmetro inferiores a 10% do tamanho do comprimento de onda incidente) e não seletivo ou anisotrópico (espalhamento Mie, realizado por partículas com tamanho semelhante ao comprimento de onda incidente). Por conseguinte, normalmente a radiação difusa é avaliada pelas sub-componentes circunsolar, brilho horizontal e isotrópica/anisotrópica (CHWIEDUK, 2009; POSADILLO & LUQUE, 2009).

A irradiância difusa originária da região próxima ao disco solar e que acompanha a radiação direta é chamada de circunsolar. O aumento na intensidade da radiação difusa próximo ao horizonte é chamado de brilho horizontal, devido ao aumento da trajetória percorrida pela onda eletromagnética nas proximidades do plano de horizonte e também em decorrência das múltiplas reflexões da atmosfera terrestre. A sub-

componente isotrópica pode ser considerada apresentar-se uniformemente distribuída na como o restante da radiação difusa e tende a porção restante do hemisfério celeste.

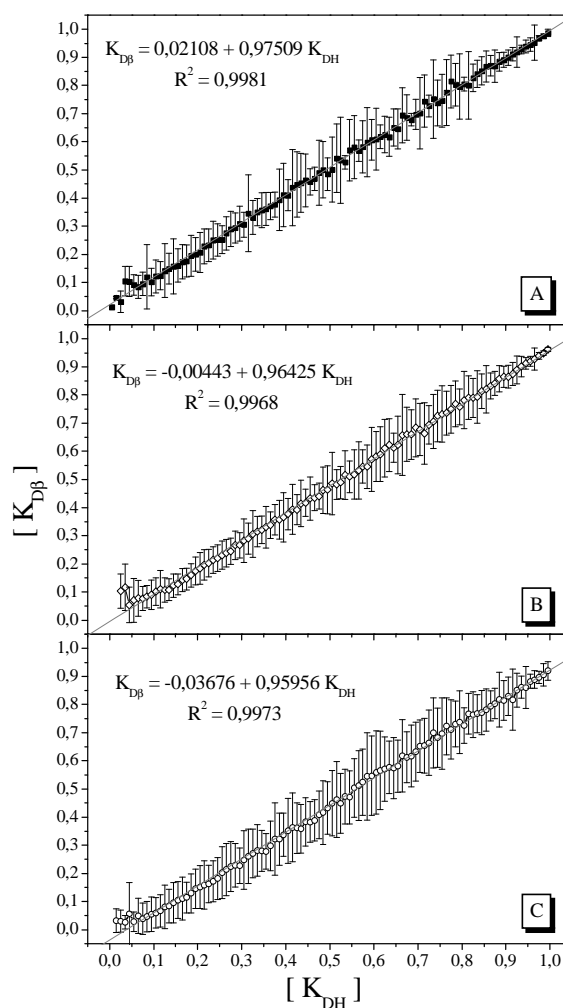


Figura 1 - Correlações entre a fração difusa da radiação global inclinações $[K_{D\beta}]$ e a fração difusa da radiação global na horizontal $[K_{DH}]$ para superfícies inclinadas para o Norte a 12,85 (A), 22,85 (B) e 32,85° (C).

Para Pereira et al. (2002), o processo pode ser observado principalmente em dias de céu nublado e em dias com alto teor de poeira, quando a radiação solar tem mais dificuldade de atingir diretamente a superfície. Nas correlações entre as frações $K_{D\beta}$ e K'_{DH} , foram ajustados polinômios de terceira ordem, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,81 (Figura 2). A aplicação de inclinações em uma superfície permite a alteração das relações geométricas zenitais, de tal maneira, que ocorre um deslocamento da linha zenital local para a direção e na intensidade do ângulo de inclinação submetido, permitindo que, os raios solares que incidem em uma superfície

inclinada apresentem ângulos de incidência diferenciados quando comparado com o incidente na horizontal.

Esse fato permite interferências e/ou contribuições das condições de nebulosidade atuantes momentaneamente em regiões circunvizinhas na transmissividade da radiação que chega a uma superfície inclinada. Esse comportamento pode ser evidenciado pela variação de $K_{D\beta}$ com o aumento de K'_{DH} . Para menores valores de K'_{DH} ocorrem as maiores transmissividades de radiação direta (céu aberto), contudo, para valores de K'_{DH} inferiores a 0,075 ocorre um aumento linear das frações $K_{D\beta}$.

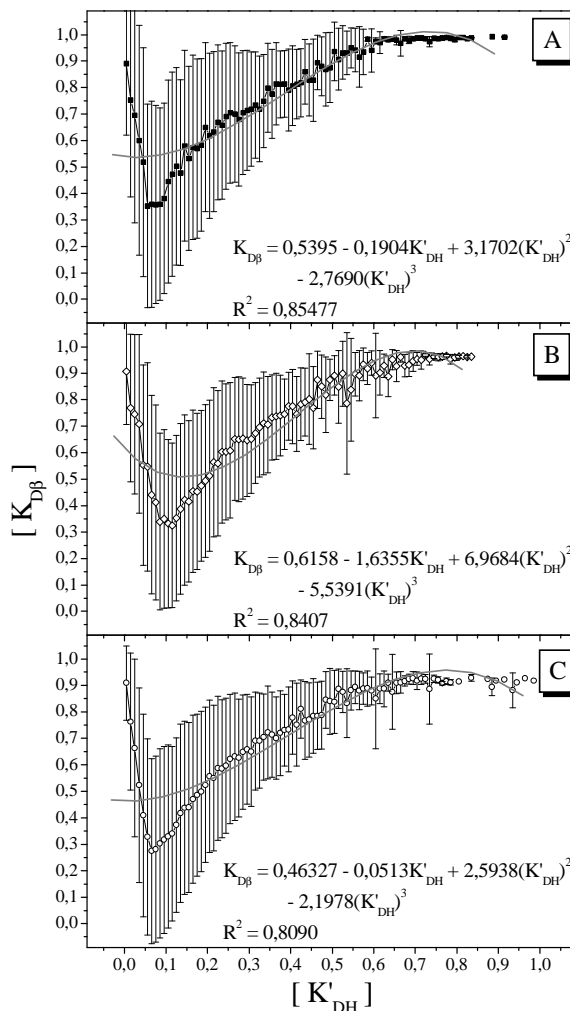


Figura 2 - Correlações entre a fração difusa da radiação global inclinações $[K_{D\beta}]$ e a fração difusa da radiação no topo da atmosfera na horizontal $[K'_{DH}]$ para superfícies inclinadas para o Norte a 12,85 (A), 22,85 (B) e 32,85° (C).

Essa tendência permite que nas inclinações sejam verificados maiores níveis de radiação difusa no solstício de inverno (Hemisfério Sul), pois os raios solares interagem com uma massa ótica maior em função da declinação solar ser positiva ou movimentação solar aparente no Norte. Souza (2005) destaca que esse comportamento é fundamental para a avaliação do desempenho de modelos

estatísticos de estimativa baseados nas relações entre frações radiométricas das componentes da radiação solar para superfícies inclinadas e horizontais. As correlações entre as frações $K'_{D\beta}$ e K'_{DH} apresentaram comportamentos lineares (Figura 3), com valores máximos de $K'_{D\beta}$ (quando K'_{DH} tende a 1,0) iguais a 0,8807; 0,9443 e 0,9013 para 12,85; 22,85 e 32,85°, respectivamente.

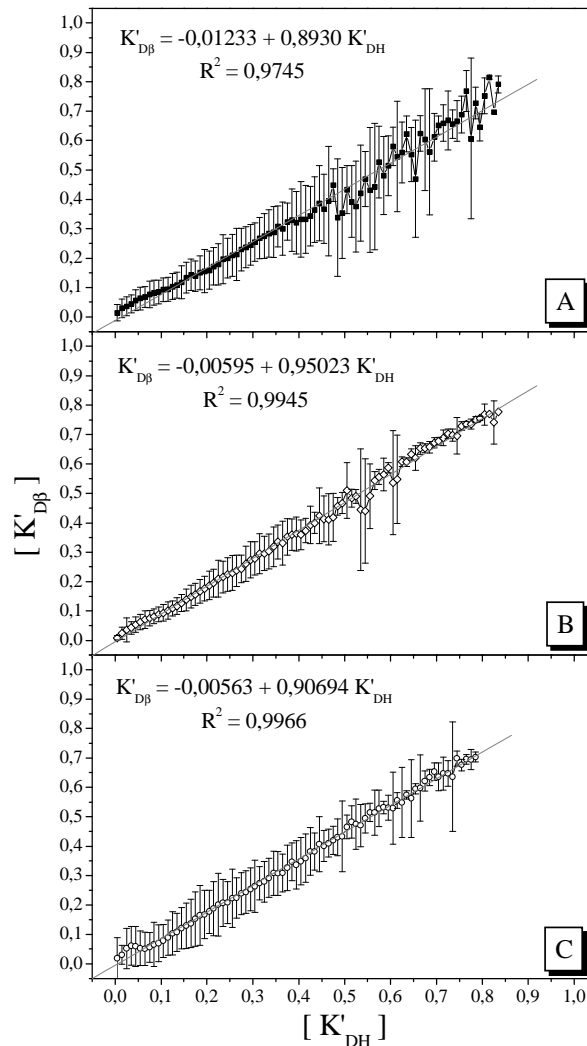


Figura 3 - Correlações entre a fração difusa da radiação no topo da atmosfera nas inclinações $[K'_{D\beta}]$ e a fração difusa da radiação no topo da atmosfera na horizontal $[K'_{DH}]$ para superfícies inclinadas para o Norte a 12,85 (A), 22,85 (B) e 32,85° (C).

Em geral, os modelos de estimativa da radiação difusa são fundamentados e distribuídos nas teorias circunsolar, isotrópica (e/ou pseudo-isotrópico) e anisotrópico (NOTTON et al., 2006; SERRANO et al., 2010). O precursor dos modelos isotrópicos foi apresentado por Liu e Jordan (1960; 1962), que empregaram uma simplificação com a suposição de que a distribuição isotrópica de radiação difusa fosse independente dos ângulos zenital e azimutal e propuseram as correlações entre as frações radiométricas. Na grande maioria dos casos, as equações de regressão (funções polinomiais) eram obtidas para intervalos do coeficiente de transmissividade atmosférica (SCOLAR et al., 2003; RUIZ-ARIAS et al., 2010).

Contudo, nas estimativas da componente difusa da radiação solar apresentadas nas figuras anteriores, existia a necessidade de empregar outros equipamentos para monitoramento, visto que, as frações K_{DH} , K'_{DH} e $K_{D\beta}$ dependem das medidas de radiações difusas na horizontal e global nas inclinações e na horizontal. Por conseguinte, a Figura 4 apresenta as correlações entre a fração difusa da radiação no topo da atmosfera ($K'_{D\beta}$) e o coeficiente de transmissividade da radiação global na horizontal (K_{TH}), com dependência apenas da medida da radiação global na horizontal (comum na maioria das estações meteorológicas automáticas brasileiras).

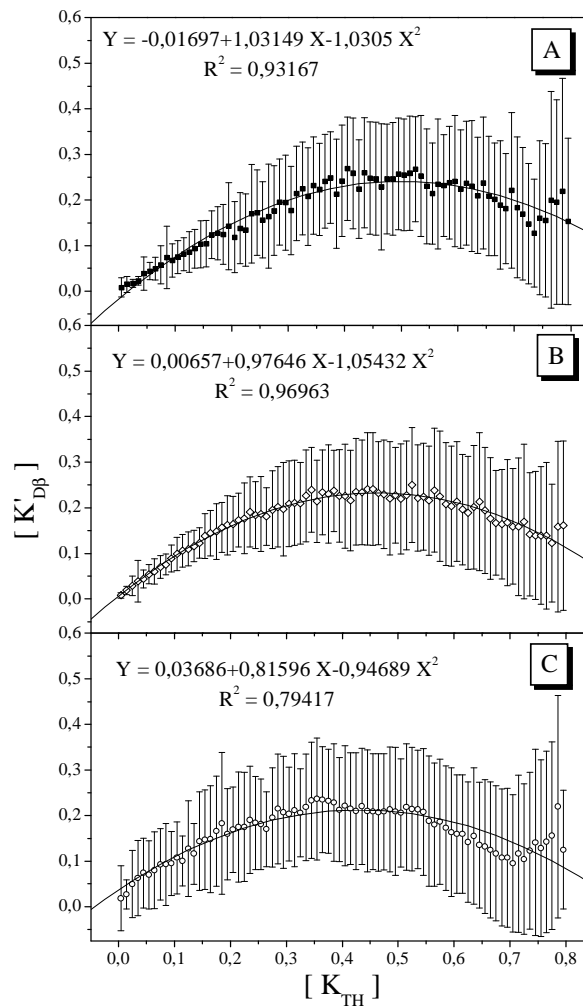


Figura 4 - Correlações entre a fração difusa da radiação no topo da atmosfera nas inclinações $[K'_{D\beta}]$ e o coeficiente de transmissividade atmosférica da radiação global na horizontal $[K'_{TH}]$ para superfícies inclinadas para o Norte a 12,85 (A), 22,85 (B) e 32,85° (C).

Nesse caso, os níveis dos desvios $(\delta K'_{D\beta})$ em condições de céu nublado tendem a aumentar com o incremento do ângulo de inclinação, todavia, as suas menores variações para valores de K'_{TH} inferiores a 0,35 são decorrentes dos efeitos da massa ótica serem minimizados para essa cobertura de céu. Já na faixa intermediária dos valores

de K'_{TH} , a variabilidade não é dependente exclusivamente dos percentuais de transmissividade atmosférica, mas também da massa ótica, que permite gerar os efeitos de sazonalidade nos modelos de estimativa com agrupamentos mensais apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de regressão de modelos polinomiais de estimativa da fração K'_{DB} e K_{TH} para as inclinações de 12,85 (A), 22,85 (B) e 32,85° (C) com face voltada para o Norte, em agrupamentos mensais

Inclinação	Mês	$K_{DB}^{th} = a_0 + a_1(K_{TH}^h) + a_2(K_{TH}^d)^2$			R^2	K_{TH}^h max	K_{DB}^{th} max
		a_0	a_1	a_2			
12,85°	Janeiro	-0,0357	1,4137	-1,5261	0,8386	0,46	0,29
	Fevereiro	-0,0248	1,1734	-1,0920	0,8198	0,54	0,29
	Março	-0,0068	0,8557	-0,9699	0,6466	0,44	0,18
	Abril	0,0047	0,5148	-0,4904	0,5829	0,52	0,14
	Mai	-0,0344	1,0035	-1,0814	0,7663	0,46	0,20
	Junho	-0,0473	0,6776	-0,6065	0,6900	0,56	0,14
	Julho	-0,0434	0,9669	-1,0177	0,6923	0,48	0,19
	Agosto	-0,0182	0,8056	-0,7644	0,7021	0,53	0,19
	Setembro	-0,0196	0,9681	-0,9252	0,8301	0,52	0,23
	Outubro	-0,0100	0,8230	-0,6246	0,8640	0,66	0,26
	Novembro	-0,0287	1,2088	-1,1599	0,8947	0,52	0,29
	Dezembro	-0,0317	1,4510	-1,6616	0,8817	0,44	0,29
22,85°	Janeiro	0,0119	1,3074	-1,4933	0,8480	0,44	0,30
	Fevereiro	0,0030	1,2207	-1,3392	0,8622	0,46	0,28
	Março	-0,0104	1,0871	-1,1765	0,8626	0,46	0,24
	Abril	-0,0009	0,8028	-0,8484	0,8313	0,47	0,19
	Mai	-0,0024	0,8438	-0,9080	0,8042	0,46	0,19
	Junho	-0,0212	0,9854	-1,0327	0,8335	0,48	0,21
	Julho	-0,0016	0,8023	-0,8793	0,8547	0,46	0,18
	Agosto	-0,0028	0,8350	-0,8614	0,8729	0,48	0,20
	Setembro	-0,0001	0,9303	-0,9892	0,8432	0,47	0,22
	Outubro	-0,0063	1,0585	-1,1148	0,8666	0,47	0,24
	Novembro	-0,0018	1,1909	-1,3326	0,8588	0,45	0,26
	Dezembro	0,0102	1,2722	-1,4706	0,8758	0,43	0,29
32,85°	Janeiro	0,0553	1,2033	-1,4684	0,7809	0,41	0,30
	Fevereiro	0,0334	1,1385	-1,3442	0,7879	0,42	0,27
	Março	-0,0094	1,0521	-1,1663	0,8959	0,45	0,23
	Abril	-0,0131	0,8702	-0,8877	0,8483	0,49	0,20
	Mai	-0,0080	0,6985	-0,8451	0,8149	0,41	0,14
	Junho	-0,0084	0,7699	-0,8864	0,8501	0,43	0,16
	Julho	-0,0137	0,8543	-1,0169	0,7854	0,42	0,17
	Agosto	-0,0042	0,7127	-0,8446	0,8224	0,42	0,15
	Setembro	-0,0111	0,9955	-1,2249	0,9345	0,41	0,19
	Outubro	-0,0030	1,2084	-1,4635	0,8065	0,41	0,25
	Novembro	0,0504	1,1291	-1,3995	0,7827	0,40	0,28
	Dezembro	0,1018	0,8347	-1,0523	0,6872	0,40	0,27

As piores correlações ocorrem nos meses com grande variabilidade da razão de nebulosidade (Tabela 1). Segundo Scolar et al. (2003) esse tipo de correlação apresenta bons resultados para condições de céu nublado (isotropia) e tende a subestimar os valores nas condições de céu claro (anisotropia).

Para a partição horária normalmente os coeficientes de determinação (R^2) são inferiores aos de partições temporais maiores (diárias e/ou mensais), pois partições temporais menores respondem com mais sensibilidade e rapidez às mudanças

instantâneas ocorridas na atmosfera, permitindo um melhor detalhamento da distribuição pontual da radiação e como consequência geram uma variabilidade maior e que partições de tempo maior, como é o caso das partições diária e mensal, os efeitos da dinâmica atmosférica são suavizados por meio da integração dos valores instantâneos em intervalos de tempo maior, diminuindo a variabilidade dos valores de K'_{DB} , no entanto, informações pontuais sobre a distribuição da radiação são perdidas no momento da integração (PENTEADO et al., 2011).

Em geral os polinômios obtidos, possibilitam valores máximos de K'_{DB} entre 0,14 e 0,30 para inverno e verão quando K_{TH} varia entre 0,40 e 0,66, ou seja, energeticamente, os maiores valores de radiação difusa ocorrem em condições de céu parcialmente nublado e/ou parcialmente aberto. À medida que aumenta o ângulo de inclinação, ocorre a diminuição dos valores de K_{TH} que indicam os pontos máximos de K'_{DB} para um mesmo mês.

Para 12,85°, os menores valores de R^2 foram verificados no outono e inverno, enquanto que, em 32,85° ocorreram no verão e inverno. As Tabelas 3 e 4 apresentam os indicativos estatísticos de desempenho da aplicação das equações com agrupamentos de dados anuais e mensais, respectivamente. A aplicação das equações mensais possibilitou a melhoria dos resultados em praticamente todos os meses, principalmente com a

diminuição das sub e/ou superestimativas realizadas pelos modelos anuais. Na inclinação de 22,85°, agrupamentos mensais propiciaram piores índices de ajustamentos na primavera quando comparados com agrupamentos anuais.

Em termos percentuais observam-se espalhamentos elevados (até 296,7%) para o mês de setembro, em função da grande concentração de partículas em suspensão oriundas da queima da cana-de-açúcar na região, enquanto que, no verão e outono, as variações são decorrentes principalmente da interação com o vapor d'água. Na inclinação de 32,85°, os modelos anuais apresentaram tendências de subestimativas nos meses da primavera e verão, com desvios variando entre -0,038 e -0,162 MJ m⁻² h⁻¹ ou em termos percentuais, entre -7,85 a -25,96%. Já as equações mensais subestimam apenas no outono (em até -0,021 MJ m⁻² h⁻¹ ou -6,4%).

Tabela 3 - Resultados mensais do desempenho estatístico das estimativas da radiação difusa horária com base nas medidas da radiação global horizontal horária, com equações anuais para as inclinações de 12,85; 22,85 e 32,85° com face para o Norte

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Janeiro	0,5891	0,7158	-0,127	0,364	-17,70	50,88	0,8485
	Fevereiro	0,6225	0,6294	-0,007	0,501	-1,10	79,57	0,6967
	Setembro	0,5425	0,6316	-0,089	1,875	-14,11	296,77	0,1786
	Outubro	0,5931	0,8636	-0,270	0,769	-31,32	89,04	0,6029
	Novembro	0,6128	0,8603	-0,248	0,575	-28,78	66,87	0,7172
	Dezembro	0,6017	0,6940	-0,092	0,399	-13,30	57,47	0,8171
22,85°	Janeiro	0,5801	0,7025	-0,122	0,501	-17,43	71,28	0,6922
	Fevereiro	0,5857	0,7493	-0,164	0,500	-23,21	70,97	0,7180
	Março	0,6219	0,6433	-0,021	0,523	-3,41	83,46	0,6456
	Abril	0,6481	0,6251	0,023	0,623	3,70	100,21	0,5284
	Mai	0,6099	0,4918	0,118	0,351	25,11	74,65	0,7612
	Junho	0,6362	0,7280	-0,092	0,611	-13,37	88,94	0,4903
	Julho	0,6421	0,5248	0,117	0,389	24,10	79,84	0,6923
	Agosto	0,6214	0,6293	-0,008	0,490	-1,27	78,35	0,6412
	Setembro	0,5960	0,5516	0,044	0,213	8,18	39,31	0,9170
	Outubro	0,5697	0,5484	0,021	0,305	4,14	59,26	0,8337
	Novembro	0,5662	0,5074	0,059	0,326	11,86	65,73	0,7864
	Dezembro	0,5312	0,5621	-0,031	0,285	-5,52	51,02	0,8586
32,85°	Janeiro	0,4631	0,6255	-0,162	0,489	-25,96	78,16	0,6825
	Fevereiro	0,5204	0,5983	-0,078	0,416	-13,96	74,58	0,7245
	Março	0,5562	0,5812	-0,025	0,473	-4,46	84,55	0,6720
	Abril	0,5928	0,5681	0,025	0,612	4,35	107,77	0,5182
	Mai	0,5861	0,3459	0,240	0,395	72,38	118,90	0,6034
	Junho	0,6062	0,4376	0,169	0,554	41,64	137,02	0,5093
	Julho	0,5843	0,3638	0,220	0,409	65,40	121,47	0,6489
	Agosto	0,5959	0,3502	0,246	0,424	70,45	121,51	0,6218
	Setembro	0,5648	0,4091	0,156	0,381	38,39	93,88	0,6968
	Outubro	0,5088	0,4430	0,066	0,311	15,94	75,37	0,7953
	Novembro	0,4635	0,5018	-0,038	0,284	-7,85	58,09	0,8400
	Dezembro	0,4645	0,5396	-0,075	0,355	-13,91	65,74	0,7679

Esses resultados estão em conformidade com os verificados na literatura para correlações entre fração difusa inclinada com o coeficiente de transmissividade atmosférica da radiação global horizontal nas partições horárias (PADOVAN & DEL COL, 2010). Para Posadillo e Luque (2009), o aumento da altitude solar e, conseqüentemente, a diminuição do ângulo zenital permite também a diminuição dos valores de RMSE, podendo atingir até 136,5% (ROBLEDO & SOLER, 2002). Recentemente, Badescu et al. (2012)

revisaram 54 modelos de estimativa da radiação difusa e concluíram que na partição horária, ocorrem respostas imediatas à dinâmica atmosférica (responsáveis pelos grandes espalhamentos verificados para correlações com a fração difusa da radiação no topo da atmosfera) e que devem ser avaliados e gerados modelos regionalizados que incorporem outros parâmetros, com a altura solar (ângulo zenital), condições climáticas (aerossóis, tipo e quantidade de nuvens) (GONZÁLEZ & CALBÓ, 1999; RAKOVEC & ZAKŠEK, 2012).

Tabela 4 - Resultados mensais do desempenho estatístico das estimativas da radiação difusa horária $\langle H_{DB}^h \rangle$ com base nas medidas da radiação global horizontal horária, com equações mensais para as inclinações de 12,85; 22,85 e 32,85° com face para o Norte

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Janeiro	0,6920	0,7158	-0,024	0,312	-3,32	43,56	0,9020
	Fevereiro	0,7761	0,6294	0,147 ^a	0,545 ^a	23,31 ^b	86,61 ^b	0,7201
	Setembro	0,5508	0,6316	-0,081	1,681	-12,80	266,07	0,2063
	Outubro	0,7392	0,8636	-0,124	0,688	-14,41	79,67	0,7177
	Novembro	0,7361	0,8603	-0,124	0,502	-14,44	58,31	0,7994
	Dezembro	0,6422	0,6940	-0,052	0,354	-7,46	51,06	0,8725
22,85°	Janeiro	0,7093	0,7025	0,007	0,486	0,97	69,15	0,7484
	Fevereiro	0,6964	0,7493	-0,053	0,465	-7,51	66,02	0,7847
	Março	0,6283	0,6433	-0,015	0,523	-2,38	83,43	0,6554
	Abril	0,5309	0,6251	-0,094 ^a	0,632 ^a	-15,14 ^b	101,68 ^b	0,4687
	Mai	0,5018	0,4918	0,010	0,333	2,14	70,83	0,7351
	Junho	0,5759	0,7280	-0,152 ^a	0,622 ^a	-22,13 ^b	90,46 ^b	0,4760
	Julho	0,4908	0,5248	-0,034	0,377	-6,99	77,43	0,6138
	Agosto	0,5396	0,6293	-0,090 ^a	0,498 ^a	-14,36 ^b	79,68 ^b	0,6089
	Setembro	0,5566	0,5516	0,005	0,214 ^a	0,91	39,46 ^b	0,9115
	Outubro	0,5941	0,5484	0,046 ^a	0,316 ^a	8,88 ^b	61,40 ^b	0,8346
	Novembro	0,6244	0,5074	0,117 ^a	0,345 ^a	23,60 ^b	69,55 ^b	0,7950
	Dezembro	0,6256	0,5621	0,064 ^a	0,290 ^a	11,37 ^b	51,93 ^b	0,8781
32,85°	Janeiro	0,6464	0,6255	0,021	0,451	3,35	72,03	0,7805
	Fevereiro	0,6565	0,5983	0,058	0,408	10,44	73,18	0,7899
	Março	0,5766	0,5812	-0,005	0,468	-0,82	83,72	0,7059
	Abril	0,5602	0,5681	-0,008	0,609	-1,39	107,27	0,5452
	Mai	0,3245	0,3459	-0,021	0,297	-6,44	89,48	0,5875
	Junho	0,4236	0,4376	-0,014	0,530	-3,48	130,94	0,4000
	Julho	0,3968	0,3638	0,033	0,341	9,78	101,03	0,6507
	Agosto	0,3721	0,3502	0,022	0,340	6,27	97,57	0,5897
	Setembro	0,4366	0,4091	0,028	0,338	6,78	83,27	0,7070
	Outubro	0,5316	0,4430	0,089 ^a	0,307	21,48 ^b	74,54	0,8221
	Novembro	0,5824	0,5018	0,081 ^a	0,280	16,49 ^b	57,23	0,8793
	Dezembro	0,5907	0,5396	0,051	0,348	9,48	64,48	0,8121

As equações mensais apresentaram resultados de validações inferiores aos encontrados pela aplicação dos modelos anuais nos meses em termos energéticos (a) e em percentual (b).

O aumento da transmissividade atmosférica (condições de anisotropia) diminui o desempenho das equações anuais (Tabela 5) e mensais (Tabela 6) em todas as

inclinações, em função dos elevados desvios observados pela curva média. Em condições de céu aberto (para $\langle K_{TP}^h \rangle > 0,65$) foram obtidos índices de ajustamentos inferiores a 20% nos meses de outono e primavera, indicando que, mesmo os modelos mensais não permitem boas estimativas em momentos com céu aberto.

Tabela 5 - Resultados mensais do desempenho estatístico das estimativas da radiação difusa horária com base nas medidas da radiação global horizontal horária, com equações anuais para as inclinações de 12,85; 22,85 e 32,85°, em diferentes condições de nebulosidade

Inclinação	Meses	Céu aberto				Céu parcialmente aberto				Céu parcialmente nublado				Céu nublado			
		VM ⁽¹⁾	MBE ⁽¹⁾	RMSE ⁽¹⁾	d	VM	MBE	RMSE	d	VM	MBE	RMSE	d	VM	MBE	RMSE	d
12,85°	Janeiro	0,80	-0,03	0,46	0,4407	0,88	0,91	-0,03	0,7237	1,27	-0,36	0,59	0,6643	0,49	-0,08	0,20	0,9279
	Fevereiro	0,70	0,05	0,71	0,2739	0,80	0,76	0,04	0,5316	1,02	-0,13	0,56	0,5686	0,37	-0,01	0,15	0,9510
	Setembro	0,68	0,10	0,50	0,3772	0,83	0,85	-0,03	0,6966	0,87	-0,09	0,29	0,8399	0,35	-0,24	0,34	0,7785
	Outubro	1,30	-0,54	1,29	0,4028	0,83	1,41	-0,58	0,5125	1,09	-0,28	0,48	0,7611	0,30	0,01	0,16	0,9373
	Novembro	1,40	-0,59	1,08	0,4388	0,82	1,17	-0,35	0,5812	1,09	-0,28	0,41	0,8092	0,40	-0,05	0,15	0,9536
	Dezembro	0,55	0,17	0,51	0,4810	0,86	1,03	-0,17	0,6328	1,07	-0,25	0,48	0,7414	0,44	-0,06	0,20	0,9205
22,85°	Janeiro	0,72	-0,13	0,67	0,3623	0,75	1,00	-0,25	0,5483	0,89	-0,09	0,44	0,6902	0,41	0,03	0,13	0,9558
	Fevereiro	0,87	-0,22	0,77	0,3336	0,75	1,02	-0,27	0,6153	1,08	-0,26	0,49	0,7014	0,40	-0,04	0,13	0,9644
	Março	0,76	-0,04	0,74	0,1745	0,77	0,78	-0,01	0,4754	0,79	-0,04	0,49	0,7197	0,39	0,00	0,14	0,9574
	Abril	0,73	-0,01	0,93	0,1098	0,79	0,78	0,01	0,4213	0,75	0,06	0,45	0,6597	0,35	0,04	0,14	0,9566
	Maio	0,41	0,29	0,46	0,3875	0,79	0,56	0,23	0,5054	0,82	0,00	0,44	0,6201	0,35	0,05	0,12	0,9564
	Junho	1,04	-0,32	1,01	0,3390	0,79	0,90	-0,11	0,2908	0,75	-0,01	0,39	0,6556	0,41	0,03	0,13	0,9558
	Julho	0,58	0,15	0,59	0,2281	0,81	0,59	0,21	0,4566	0,69	0,08	0,33	0,7454	0,31	0,06	0,13	0,9478
	Agosto	0,89	-0,15	0,91	0,1901	0,85	0,79	0,06	0,4370	0,74	0,01	0,31	0,7871	0,33	0,03	0,10	0,9735
	Setembro	0,50	0,29	0,34	0,5251	0,89	0,74	0,15	0,6778	0,87	-0,01	0,28	0,8085	0,41	-0,01	0,09	0,9807
	Outubro	0,53	0,12	0,38	0,5127	0,83	0,74	0,08	0,5485	0,81	0,01	0,40	0,7367	0,41	-0,03	0,13	0,9576
	Novembro	0,45	0,09	0,29	0,5806	0,86	0,74	0,12	0,4235	0,75	0,06	0,45	0,5999	0,33	0,00	0,17	0,9296
	Dezembro	0,53	0,01	0,25	0,7164	0,83	0,86	-0,03	0,4219	0,90	-0,02	0,39	0,6279	0,38	-0,06	0,15	0,9468
32,85°	Janeiro	0,69	-0,27	0,85	0,3949	0,65	0,91	-0,26	0,4921	0,98	-0,29	0,50	0,6162	0,37	-0,05	0,23	0,8620
	Fevereiro	0,50	-0,08	0,58	0,4449	0,69	0,81	-0,12	0,4405	0,87	-0,14	0,45	0,5758	0,42	-0,03	0,16	0,9457
	Março	0,63	-0,01	0,75	0,1701	0,66	0,78	-0,13	0,4315	0,78	-0,04	0,41	0,6947	0,36	0,02	0,12	0,9650
	Abril	0,76	-0,09	1,05	0,1272	0,69	0,59	0,10	0,3311	0,74	0,01	0,50	0,5608	0,35	0,06	0,15	0,9437
	Maio	0,28	0,37	0,49	0,4166	0,71	0,34	0,37	0,4792	0,48	0,20	0,44	0,4798	0,30	0,11	0,20	0,8722
	Junho	0,41	0,23	0,79	0,2519	0,72	0,53	0,19	0,2312	0,57	0,17	0,48	0,5205	0,29	0,13	0,19	0,8971
	Julho	0,20	0,41	0,52	0,3115	0,70	0,39	0,31	0,4248	0,59	0,14	0,42	0,6024	0,28	0,13	0,18	0,8989
	Agosto	0,26	0,38	0,59	0,3507	0,71	0,35	0,36	0,4509	0,53	0,19	0,37	0,6681	0,27	0,11	0,16	0,9202
	Setembro	0,34	0,31	0,56	0,3140	0,72	0,49	0,23	0,4893	0,58	0,13	0,37	0,7214	0,32	0,05	0,13	0,9536
	Outubro	0,37	0,18	0,39	0,5338	0,65	0,61	0,04	0,6811	0,67	0,01	0,38	0,6929	0,32	0,03	0,13	0,9560
	Novembro	0,33	0,07	0,28	0,6266	0,66	0,73	-0,07	0,5566	0,81	-0,12	0,39	0,6640	0,34	-0,03	0,13	0,9553
	Dezembro	0,51	-0,03	0,48	0,3792	0,64	0,75	-0,11	0,4028	0,80	-0,14	0,39	0,6673	0,30	-0,03	0,14	0,9420

(1) VM: Valores horários medidos ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); MBE e RMSE dados em termos energéticos ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

Tabela 6 - Resultados mensais do desempenho estatístico das estimativas da radiação difusa horária com base nas medidas da radiação global horizontal horária, com equações mensais para as inclinações de 12,85; 22,85 e 32,85°, em diferentes condições de nebulosidade

Inclinação	Meses	Céu aberto				Céu parcialmente aberto				Céu parcialmente nublado				Céu nublado			
		VM ⁽¹⁾	MBE ⁽¹⁾	RMSE ⁽¹⁾	d	VM	MBE	RMSE	d	VM	MBE	RMSE	d	VM	MBE	RMSE	d
12,85°	Janeiro	0,80	-0,02	0,44	0,5148	0,98	0,91	0,06	0,7995	1,27	-0,18	0,48	0,7546	0,49	0,02	0,17	0,9586
	Fevereiro	0,70	0,29	0,78	0,3912	1,03	0,76	0,27	0,5867	1,02	0,06	0,56	0,6209	0,37	0,04	0,15	0,9568
	Setembro	0,68	0,14	0,51	0,3832	0,83	0,85	-0,02	0,6904	0,87	-0,11	0,31	0,8188	0,35	-0,23	0,27	0,7896
	Outubro	1,30	-0,16	1,18	0,2021	1,09	1,41	-0,32	0,5093	1,09	-0,18	0,42	0,8104	0,30	0,01	0,17	0,9287
	Novembro	1,40	-0,38	0,98	0,4030	1,01	1,17	-0,16	0,6463	1,09	-0,13	0,31	0,8944	0,40	0,00	0,13	0,9723
	Dezembro	0,55	-0,09	0,48	0,4771	0,84	1,03	-0,19	0,6936	1,07	-0,12	0,39	0,8451	0,44	0,03	0,18	0,9494
22,85°	Janeiro	0,72	-0,07	0,66	0,3858	0,91	1,00	-0,09	0,6056	0,89	0,13	0,44	0,7486	0,41	0,05	0,13	0,9678
	Fevereiro	0,87	-0,13	0,75	0,3082	0,89	1,02	-0,13	0,6823	1,08	-0,09	0,42	0,7875	0,40	0,03	0,11	0,9762
	Março	0,76	-0,05	0,74	0,1792	0,78	0,78	0,01	0,4836	0,79	-0,01	0,49	0,7301	0,39	0,00	0,14	0,9600
	Abril	0,73	-0,13	0,94	0,1649	0,65	0,78	-0,13	0,3274	0,75	-0,09	0,46	0,5742	0,35	-0,05	0,16	0,9270
	Maio	0,41	0,17	0,39	0,3450	0,66	0,56	0,09	0,4662	0,82	-0,14	0,47	0,5468	0,35	-0,02	0,13	0,9430
	Junho	1,04	-0,36	1,03	0,3626	0,74	0,90	-0,17	0,3379	0,75	-0,07	0,40	0,6183	0,41	-0,04	0,14	0,9460
	Julho	0,58	-0,04	0,57	0,1218	0,62	0,59	0,03	0,3730	0,69	-0,09	0,35	0,6466	0,31	-0,03	0,13	0,9317
	Agosto	0,89	-0,21	0,92	0,2426	0,75	0,79	-0,04	0,3915	0,74	-0,10	0,34	0,7265	0,33	-0,04	0,12	0,9542
	Setembro	0,50	0,26	0,31	0,5371	0,85	0,74	0,10	0,6817	0,87	-0,07	0,29	0,7842	0,41	-0,05	0,11	0,9689
	Outubro	0,53	0,18	0,41	0,5171	0,88	0,74	0,14	0,5649	0,81	0,05	0,41	0,7479	0,41	-0,03	0,13	0,9612
	Novembro	0,45	0,10	0,29	0,5889	0,95	0,74	0,21	0,4665	0,75	0,19	0,48	0,6258	0,33	0,05	0,17	0,9352
	Dezembro	0,53	0,02	0,25	0,7486	0,96	0,86	0,10	0,5178	0,90	0,18	0,42	0,6876	0,38	0,04	0,14	0,9646
32,85°	Janeiro	0,69	-0,15	0,79	0,5124	0,88	0,91	-0,03	0,5319	0,98	-0,01	0,40	0,7412	0,37	0,10	0,27	0,8653
	Fevereiro	0,50	0,01	0,57	0,5307	0,86	0,81	0,05	0,5549	0,87	0,07	0,44	0,6530	0,42	0,07	0,17	0,9543
	Março	0,63	0,04	0,75	0,2002	0,71	0,78	-0,07	0,4647	0,78	0,01	0,41	0,7227	0,36	-0,01	0,11	0,9742
	Abril	0,76	-0,02	0,94	0,3947	0,71	0,59	0,12	0,3380	0,74	-0,03	0,50	0,5498	0,35	-0,04	0,14	0,9465
	Maio	0,28	0,02	0,32	0,2785	0,40	0,34	0,05	0,4334	0,48	-0,05	0,39	0,4019	0,30	-0,07	0,20	0,8286
	Junho	0,41	0,01	0,76	0,3646	0,51	0,53	-0,02	0,1256	0,57	-0,02	0,46	0,3920	0,29	-0,02	0,14	0,9202
	Julho	0,20	0,15	0,35	0,2786	0,48	0,39	0,09	0,3253	0,59	-0,03	0,41	0,4877	0,28	-0,01	0,12	0,9367
	Agosto	0,26	0,10	0,47	0,2137	0,45	0,35	0,10	0,3680	0,53	-0,04	0,34	0,5611	0,27	-0,03	0,15	0,9071
	Setembro	0,34	0,05	0,48	0,1585	0,56	0,49	0,07	0,4085	0,58	0,04	0,35	0,6957	0,32	-0,01	0,12	0,9562
	Outubro	0,37	0,12	0,36	0,5633	0,72	0,61	0,11	0,7083	0,67	0,11	0,39	0,7162	0,32	0,05	0,13	0,9599
	Novembro	0,33	0,10	0,29	0,6503	0,79	0,73	0,06	0,6566	0,81	0,08	0,37	0,7504	0,34	0,07	0,14	0,9584
	Dezembro	0,51	0,06	0,48	0,4483	0,78	0,75	0,02	0,4883	0,80	0,02	0,36	0,7541	0,30	0,08	0,18	0,9331

(2) VM: Valores horários medidos ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); MBE e RMSE dados em termos energéticos ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

Em função dos menores níveis energéticos e desvios, em condições de céu nublado (para $\langle K_{\text{TP}}^h \rangle < 0,35$) os ajustamentos foram superiores a 0,79, com RMSE variando entre 0,11 e 0,27 MJ m⁻² h⁻¹ e MBE de -0,23 a 0,10 MJ m⁻² h⁻¹. González e Calbó (1999) verificaram para correlações semelhantes para inclinações igual a latitude local, valores de RMSE variando entre 0,110 e 0,134 MJ m⁻² h⁻¹. Já Ruiz-Arias et al. (2010) encontraram espalhamentos variando entre 13,93 e 26,15% para sete regiões climáticas nos Estados Unidos. Estatisticamente, observou-se que os modelos polinomiais apresentaram desempenhos ruins com o aumento da transmissividade atmosférica, perfazendo assim, a necessidade da avaliação de outros modelos de estimativa da radiação difusa nas diferentes coberturas de céu.

CONCLUSÕES

As estimativas da radiação difusa horária para superfícies inclinadas com base na radiação global horária horizontal apresentam comportamento quadrático independentemente do agrupamento de dados, porém, não propiciam boas estimativas com o aumento da transmissividade atmosférica.

As equações originadas por agrupamentos mensais possibilitam melhores resultados nos meses com grande variação da cobertura de céu com a diminuição das sub e/ou superestimativas realizadas pelos modelos anuais.

REFERÊNCIAS

BADESCU, V.; GUEYMARD, C. A.; CHEVAL, S.; OPREA, C.; BACIU, M.; DUMITRESCU, A.; IACOBESCU, F.; MILOS, I.; RADA, C. Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 16, n. 3, p. 1636-1656, 2012.

BOLAND, J.; RIDLEY, B.; BROWN, B. Models of diffuse solar radiation. **Renewable Energy**, Oxford, v. 33, n. 4, p. 575-584, 2008.

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em:

<<http://www.cpa.unicamp.br>>. Acesso em: 04 jun. 2012.

CHWIEDUK, D. A. Recommendation on modeling of solar energy incident on a building envelope. **Renewable Energy**, Oxford, v. 34, n. 3, p. 736-741, 2009.

CODATO, G.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.; ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; DAL PAI, A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, v. 93, n. 1, p. 57-73, 2008.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Série temporal diária média horária e anual média mensal diária da irradiação solar difusa anisotrópica. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 1, p. 1-15, 2006.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, London, v. 86, n. 2, p. 299-309, 2009.

FURLAN, C.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.; CODATO, G.; ESCOBEDO, J. F. The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse radiation. **Applied Energy**, London, v. 92, n. 1, p. 240-254, 2012.

GONZÁLEZ, J. A.; CALBÓ, J. Influence of the global radiation variability on the hourly diffuse fraction correlations. **Solar Energy**, Kidlington, v. 65, n. 02, p. 119-131, 1999.

GUEYMARD, C. A. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications. **Solar Energy**, Kidlington, v. 83, n. 3, p. 432-444, 2009.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canadá: Academic Press, 1983. 390 p.

KAMALI, G. A.; MORADI, I.; KHALILI, A. 2006. Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran). **Theoretical and Applied**

- Climatology**, Vienna, v. 84, n. 4, p. 235-241, 2006.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. **Trans ASHRAE**, Atlanta, v. 67, n. 3, p. 526-541, 1962.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, Kidlington, v. 03, n. 4, p. 01-19, 1960.
- LOUTZENHISER, P. G.; MANZ, H.; FELSMANN, C.; STRACHAN, P. A.; FRANK, T.; MAXWELL, G. M. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. **Solar Energy**, Kidlington, v. 81, n. 2, p. 254-267, 2007.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, Surrey, v.39, n.7, p.4378-4390, 2011.
- NOORIAN, A. M.; MORADI, I.; KAMALI, G. A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. **Renewable Energy**, Oxford, v. 33, n. 6, p. 1406-412, 2008.
- NOTTON, G.; POGGI, P.; CRISTOFARI, C. Predicting hourly solar irradiances on inclined surfaces based on the horizontal measurements: performances of the association of well-known mathematical models. **Energy conversion and Management**, Oxford, v. 47, n. 13-14, p. 1816-1829, 2006.
- OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J., SOARES, J. Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. **Applied Energy**, London, v. 71, n. 1, p. 59-73, 2002.
- PADOVAN, A.; DEL COL, D. Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. **Solar Energy**, Kidlington, v. 84, n. 12, p. 2068-2084, 2010.
- PANDEY, C. K.; KATIYAR, A. K. A note on diffuse solar radiation on a tilted surface. **Energy**, Oxford, v. 34, n. 11, p. 1764-1769, 2009.
- PENTEADO, M. S. X.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A. Utilização do método numérico interpolador de lagrange para correção de bases de dados de radiometria solar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 26, n. 1, p. 118-126, 2011.
- PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. The renewable energy market in Brazil: current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v.16, n.6, p.3786-3802, 2012.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- POSADILLO, R.; LUQUE, R. L. Hourly distributions of the diffuse fraction of global solar 142 irradiation in Córdoba (Spain). **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 50, n. 2, p. 223-231, 2009.
- RAKOVEC, J.; ZAKŠEK, K. On the proper analytical expression for the sky-view factor and the diffuse irradiation of a slope for an isotropic sky. **Renewable Energy**, Oxford, v. 37, p. n. 01, 440-444, 2012.
- ROBLEDO, L.; SOLER, A. A simple clear skies model for the luminous efficacy of diffuse solar radiation on inclined surfaces. **Renewable Energy**, Oxford, v. 26, n. 2, p. 169-176, 2002.
- RUIZ-ARIAS, J. A.; ALSAMAMRA, H.; TOVAR-PESCADOR, J.; POZO-VÁZQUEZ, D. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 51, n. 05, p. 881-893, 2010.
- SCOLAR, J.; MARTINS, D.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 249-258, 2003.
- SERRANO, D.; MARÍN, M. J.; UTRILLAS, M. P.; TENA, F.; MARTÍNEZ-LOZANO, J. A. Measurement and modelling of global erythemal irradiance on inclined planes. **Journal of Mediterranean Meteorology and Climatology**, Barcelona, v. 7, n. 1, p. 57-66, 2010.
- SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A.; GOMES, E. N. Annual evolution of global,

direct and diffuse radiation and fractions in tilted surfaces. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 2, p. 247-260, 2012.

SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A.; GOMES, E. N. Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 277-288, 2011.

SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R. M.; MOURA, M. A. L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, Oxford, v. 30, n. 8, p. 1203-1220, 2005.

TERAMOTO, E. T.; ESCOBEDO, J. F. Evolução diurna e anual da frequência das coberturas de céu em Botucatu/SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 1, p. 37-52, 2012.

TIBA, C.; AGUIAR, R.; FRAIDENRAICH, N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. **Renewable Energy**, Oxford, v. 30, n. 6, p. 957-966, 2005.

VIANA, T. S.; RUTHER, R.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. **Solar Energy**, Kidlington, v. 85, n. 3, p. 486-495, 2011.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Norwich, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.