

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DIRETA NA INCIDÊNCIA HORÁRIA, DIÁRIA E MENSAL EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE (KT)

Eduardo Nardini Gomes – engomes@fca.unesp.br

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Departamento de Recursos Naturais/Ciência Ambiental – FCA/UNESP/Botucatu/SP/Brasil

Amauri Pereira de Oliveira – apdolive@usp.br

Jacyra Soares – jacyra@usp.br

Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP/São Paulo/SP/Brasil

1.1 Radiação Solar

RESUMO. O trabalho apresenta o modelo de estimativa estatístico de Liu & Jordan para a radiação solar direta na incidência horária, diária e mensal. A base de dados das radiações direta na incidência e global compreende os anos de 1996 a 2003. Utilizou-se os indicativos estatísticos MBE, RMSE e “d” para a validação do modelo. Os seguintes resultados estatísticos foram obtidos na estimativa horária: MBE = -4,25%, RMSE = 27,60%, e o índice de ajustamento $d = 0,972$; diária: MBE = -3,42%, RMSE = 18,21%, e $d = 0,97$; e mensal: MBE = 3,21%; RMSE = 14,8% e $d = 0,9149$, mostrando que as equações horária, diária e mensal podem ser utilizadas na estimativa da radiação direta com boa precisão.

Palavras-chave: radiação solar direta, estimativa horária, diária e mensal.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil encontra-se em pleno desenvolvimento científico e tecnológico na busca por fontes alternativas e renováveis de energia. A radiação solar apresenta grande destaque nesse contexto, principalmente na conversão da radiação solar térmica, fotovoltaica, biomassa e biodiesel entre outras. A radiação solar direta na incidência é uma fração da radiação solar global (0,285 a 4,0 μm) e possui aplicações físicas, biológicas e agrônomicas.

O monitoramento das radiações nas Universidades é restrito à global, difusa, PAR e ondas longas (Cavalcanti, 1991; Souza et al., 2005; Tiba et al., 2005; Soares, et al., 2004; Oliveira et al., 2002a e Oliveira et al., 2002b). Informações na literatura sobre equações de estimativa da radiação direta na incidência em função da global são escassas. A causa principal dessa limitação está no custo instrumental e de manutenção do pireliômetro e rastreador solar que são importados e caros. Os grupos de pesquisa na área de radiação solar do IAG (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP de São Paulo) e da Faculdade de Engenharia Agrícola (Universidade Estadual de Cascavel do Paraná) monitoram a radiação direta na incidência, porém ainda estão na fase de formação do banco de dados.

Com esse propósito, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP/Brasil, monitora simultaneamente as radiações direta na incidência e global desde 1996. A base de dados relacionada a essas duas radiações não é suficientemente longa para a geração de séries normais (acima de 30 anos), no entanto, é suficiente em função do número de horas e dias para obtenção de equações de estimativa horária, diária e mensal.

Os modelos de estimativa são uma alternativa de grande importância, pois podem ser utilizados em projetos de simulação da radiação solar em outros locais de características climáticas similares.

Os modelos de estimativa podem ser de 2 tipos: estatísticos e paramétricos. Os primeiros são mais simples, pois a radiação ou a variável meteorológica (normalmente a radiação global ou número de horas de brilho solar), é medida rotineiramente em redes meteorológicas distribuídas nos

países que fazem previsão de tempo. Os modelos paramétricos, entretanto, necessitam de informações a respeito de diversos parâmetros atmosféricos de menor disponibilidade na rede solarimétrica mundial, como é o caso da concentração de ozônio, aerossóis, gases, etc.

Um dos modelos estatísticos mais conhecidos é o que segue a metodologia inicialmente proposta por Liu & Jordan (1960), e que é ostensivamente empregado nas estimativas da radiação direta na horizontal e difusa (Orgill & Hollands, 1977; Painter, 1981; Iqbal, 1983; Dehne, 1984; Stanhill, 1985; Skartveit & Olseth, 1987; Sirén, 1987; Soler, 1990; Battles et al., 1995; Jacovides et al., 1996; González & Calbó, 1999; Oliveira et al., 2002a). A vantagem da proposta de Liu & Jordan é eliminar a dependência da localidade. O modelo de Liu e Jordan (1960) também pode relacionar a fração da radiação direta na incidência (K_b) com o índice de claridade (K_t), conforme mostram os trabalhos de Bartoli et al., (1982); Vignólia & McDaniels, (1986); Jeter & Balaras, (1990); Lam & Li, (1996); Battles et al., (2000); Lopez et al., (2000); Olmo et al., (1996). Assim, objetivou-se no trabalho a proposição de equações de estimativa horária, diária e mensal para a radiação direta na incidência, por meio do modelo de Liu & Jordan.

2 MATERIAL E MÉTODO

A descrição da instrumentação e base de dados das radiações solares direta na incidência e global do período de 1996 a 2003 encontra-se no trabalho “**Modelo de Linke para a estimativa da radiação direta na incidência**”, apresentada neste mesmo evento.

A Tab. 1 apresenta os resultados estatísticos da radiação direta, representados pelo número de dias, energia acumulada, energia média diária com desvios percentuais, valores mínimos, máximos e intervalo de variação de cada ano e do período total de 8 anos. A análise estatística entre os anos mostrou que o ano de 2003 foi o mais energético, e o ano de 1998 o menos energético, com um diferencial energético de 2MJ/m^2 entre esses anos. A energia acumulada média variou em torno de $5,3\text{GJ/m}^2/\text{ano}$, e no período total a energia disponível variou em torno de $42,9\text{GJ/m}^2/\text{ano}$. O ano de 1996 apresentou a menor energia acumulada entre os anos, e isto se deve à ausência de 89 dias de medição, período este em que o pireliômetro ainda não tinha sido instalado. A radiação direta na incidência apresentou energia média diária de $16,13\text{MJ/m}^2/\text{dia}$.

Tabela 1: Estatística da radiação direta diária no do período de 1996 a 2003.

ano	Dias	Acumulado (MJ/m ²)	Média (MJ/m ²)	Desvio (%)	Mínimo (MJ/m ²)	Máximo (MJ/m ²)	Variação (MJ/m ²)
1996	276	4343,3	15,74	62,33	0,00	36,02	36,02
1997	355	5714,0	16,10	64,29	0,00	35,17	35,17
1998	354	5345,6	15,10	67,06	0,00	34,76	34,76
1999	344	5802,6	16,87	60,55	0,00	34,85	34,85
2000	351	5526,5	15,75	62,61	0,00	33,12	33,12
2001	325	5036,6	15,50	63,87	0,00	35,74	35,73
2002	334	5646,7	16,91	58,49	0,03	35,58	35,55
2003	322	5505,1	17,10	61,57	0,00	37,39	37,39
Total	2661	42920,5	16,13	62,64	0,00	37,39	37,39

2.1 Cálculo da Radiação horária, diária e mensal.

As radiações em MJ/m^2 foram calculadas a partir das integrações horária, diária e mensal das irradiancias global I_g , direta na incidência I_b , e no topo da atmosfera I_o , em W/m^2 (médias de 5 minutos), determinando-se as radiações horárias: H_g^h , H_b^h e H_o^h ; diárias: H_g^d , H_b^d e H_o^d ; e

mensais: H_g^m , H_b^m e H_o^m , onde o símbolo H representa energia integrada no intervalo de tempo horário h , diário d e mensal m , e os símbolos g , b , e o representam as radiações global, direta na incidência e no topo da atmosfera. Como exemplo, as integrações horária, diária e mensal para a radiação direta na incidência estão representadas por:

Horária: $H_b^h = \int_{t_n}^{t_{n+1h}} I_b(t)dt$, onde: $t_n = n\Delta t$, $n = \text{inteiro}$.

Diária: $H_b^d = \int_{t_{ns}}^{t_{ps}} I_b(t)dt$, onde: t_{ns} é a hora do nascer do sol, t_{ps} é a hora do pôr-do-sol.

Mensal: $H_b^m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{Nm} H_b^{di}$, onde: $Nm = \text{número de dias do mês } m$.

As radiações dos anos de 1996 a 2001 e 2003 foram utilizadas para obtenção das equações de estimativa e o ano de 2002 para a validação. O critério de escolha para a obtenção dos modelos e da validação foi sorteio realizado antes de qualquer análise prévia dos dados. Posteriormente, foram eliminados os dias em que ocorreram paralisações devido a problemas elétricos de pelo menos um dos radiômetros, que mediam as radiações direta e global. A irradiância no topo da atmosfera (I_o) foi calculada instantaneamente conforme Iqbal (1983).

2.2 Descrição dos Modelos Estatísticos de Estimativa

O modelo de Liu & Jordan estabelece correlações entre o índice de claridade K_t (transmissividade atmosférica da radiação global) com a fração direta na incidência K_b .

Essas frações estão representadas pelas relações: $K_t^x = H_g^x / H_o^x$, $K_b^x = H_b^x / H_{sc}^x$, onde x é a partição (horária h e diária d), H_g^x é a radiação global, H_o^x é a radiação no topo da atmosfera, H_b^x é a radiação direta na incidência e H_{sc}^x é a constante solar integrada no topo da atmosfera. Na partição mensal, para se obter K_b^m e K_t^m utilizaram-se médias mensais de K_b^d e K_t^d . As equações de estimativa foram ajustadas por regressão polinomial entre as correlações K_b^x e K_t^x , nas partições horária h , diária d e por regressão linear na partição mensal m .

2.3 Indicativos Estatísticos

Os indicadores estatísticos MBE (Mean Bias Error), $RMSE$ (Root Mean Square Error), e “ d ” de Willmott utilizados na avaliação da performance das equações de estimativa horária, diária e mensal foram:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2}$$

Onde: P_i representa os valores estimados, O_i os valores medidos, N o número de observações, $|P'_i|$ o valor absoluto da diferença $P_i - \overline{O_i}$, onde $\overline{O_i}$ representa a média de O_i , e $|O'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \overline{O_i}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelo de Estimativa Horário

A Fig.1(a) mostra as correlações entre K_b^h e K_T^h horários de 7 anos (27150 horas) e a Fig.1(b), a correlação média da fração ($\bar{K}_b^h$) em função de intervalos discretos de K_T^h . A fração K_b^h cresce no sentido em que K_T^h aumenta, e a variação de K_b^h para um valor fixo de K_T^h é elevada, resultando em um alto espalhamento da correlação. Segundo Olmo et al., (1996) esse elevado espalhamento de K_b^h , principalmente na partição horária, deve-se às demais variáveis além de K_T^h , que são dependentes das condições locais e não foram contabilizadas na estimativa. Jeter & Balaras (1990) indicam que a massa ótica é um parâmetro dominante que afeta a relação $K_b^h \times K_T^h$. Lopez et al., (2000), para melhorar a correlação, propuseram modelos do tipo $K_b^h \times K_T^h$ utilizando o $\cos(z)$ como um parâmetro adicional.

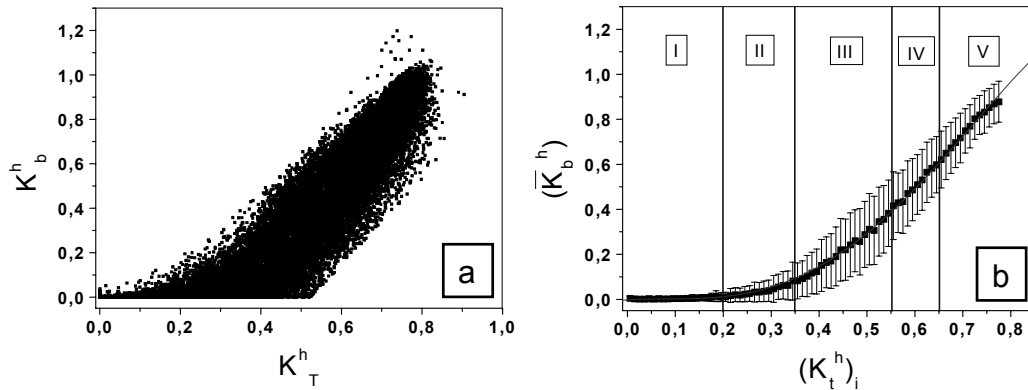


Figura 1 - (a) Correlações entre valores de K_b^h e K_T^h ; (b) Curva média ($\bar{K}_b^h$) função de intervalos discretos de $(K_T^h)_i$.

Outros autores (Garrison, 1985; Skartveit & Olseth, 1987; Reindl et al., 1990; Camps & Soler, 1992; Lopez et al., 2000) apontam para a dependência da relação $K_b^h \times K_T^h$ com a elevação solar e vapor de água na atmosfera.

Com o objetivo de buscar uma tendência média de variação de K_b^h por K_T^h , determinaram-se os valores médios de K_b^h em função de intervalos discretos centesimais de K_T^h , da Fig. 1(a). O intervalo total de K_T^h foi sub-dividido em 100 sub-intervalos, onde $(K_T^h)_i$ representa o sub-intervalo i (de 0,01 em 0,01 unidades) de K_T^h . Para cada sub-intervalo $(K_T^h)_i$ calcularam-se a média ($\bar{K}_b^h$) e o desvio ($\delta\bar{K}_b^h$) de K_b^h , resultando na Fig. 1(b). Tal metodologia foi adotada seguindo os trabalhos de Orgill & Hollands (1977), Bartoli et al., (1982) e Erbs et al., (1982).

A fração ($\bar{K}_b^h$), quando $(K_T^h)_i$ assume valores superiores a 0,775, não apresenta uma dependência lógica, e por essa razão, tais valores foram eliminados da correlação. Acima do intervalo de $(K_T^h)_i = 0,775$, a fração ($\bar{K}_b^h$) diminui devido a multireflexões causadas por nuvens adjacentes, principalmente na condição de céu parcialmente nublado. Nessa condição, a fração

direta ($\bar{K}_b^h$) diminui enquanto a fração difusa ($\bar{K}_d^h$) aumenta, como mostrado em vários trabalhos com a radiação difusa (Liu & Jordan, 1960; e Suehrcke & McCormick 1988).

A Fig. 1(b) mostra que ($\bar{K}_b^h$) não apresenta dependência linear com (K_T^h)_i. No intervalo I, cobertura de céu extremamente nublado ($(K_T^h)_i \leq 0,2$), a fração média ($\bar{K}_b^h$) é praticamente igual a zero. No intervalo II, cobertura de céu nebuloso ($0,2 < (K_T^h)_i \leq 0,35$), ocorre ligeira elevação nos valores de ($\bar{K}_b^h$) de 0,01 a 0,08. No intervalo III, cobertura de céu parcialmente nublado com dominância difusa ($0,35 < (K_T^h)_i \leq 0,55$), ($\bar{K}_b^h$) há um aumento de 0,08 a 0,39. Em IV, cobertura de céu parcialmente nublado com dominância de céu aberto ($0,55 < (K_T^h)_i \leq 0,65$), a fração ($\bar{K}_b^h$) se eleva de 0,40 a aproximadamente 0,61. No intervalo, cobertura de céu aberto ou sem nuvens ($(K_T^h)_i > 0,65$), a fração ($\bar{K}_b^h$) aumentou de 0,61 a 0,88, onde atingiu a transmissividade máxima.

O maior desvio da média (64,3%) ocorre no intervalo III e nos intervalos IV e V de 27,7% e 13,5%, respectivamente. Os desvios nos intervalos I e II são inferiores aos dos demais intervalos.

Nessas condições de cobertura de céu, a Fig. 1 (b) gerou uma equação polinomial de quarto grau, ajustada por meio de regressão, com $R^2=0,99815$, expressa por:

$$(K_b^h) = -0,00155 + 0,12676 (K_T)_i - 1,58239 (K_T)_i^2 + 7,25785 (K_T)_i^3 - 4,48318 (K_T)_i^4 \quad (1)$$

O coeficiente de determinação ($R^2=0,998$) mostra que a variação da fração ($\bar{K}_b^h$) encontra-se bem correlacionada com a fração (K_T^h)_i. Diversos autores obtiveram resultados semelhantes seguindo a proposta de Liu & Jordan para a radiação direta na incidência: Em Marrocos, Rerhrhaye et al., (1995), obtiveram R^2 entre 0,90 e 0,91; na Espanha, Olmo et al., (1996) encontraram valores de R^2 entre 0,89 e 0,62; em Hong Kong, Lam & Li (1996) encontraram R^2 entre 0,912 na estação fria, e 0,988 no modelo anual e na Espanha, Lopez et al., (2000) obtiveram R^2 entre 0,89 e 0,948.

Na validação, o indicativo *MBE* mostra que a equação (1) em geral subestima as medidas em 4,25%, o *RMSE* mostra que o espalhamento é de 27,60%, e que o índice de ajustamento “*d*” é 0,972 (na escala de 0 a 1). Os resultados são próximos aos obtidos pelos autores Lam & Li (1996) (*MBE* entre -0,36% e 6,13%; *RMSE* entre 7,76% e 20,7%); Olmo et al., (1996) (*MBE* entre -1,4% e 13,2%; *RMSE* entre 27,2% e 26,6%); Batlles et al., (2000) (*MBE* entre 0 e -9%; e *RMSE* entre 20 e 22%) e Lopez et al., (2000) (*MBE* entre -0,8% e -23,9%; *RMSE* entre 16,9 e 31%).

3.2 Modelo de Estimativa Diária

A Fig. 2 mostra a correlação entre K_b^d e K_T^d para 2327 dias e a curva polinomial ajustada por meio de regressão.

Utilizando a classificação de cobertura de céu empregada na Fig. 1, obtiveram-se 127 dias extremamente nebulosos ($K_T^d \leq 0,20$); 250 dias nebulosos tendendo a parcialmente nublados ($0,20 < K_T^d \leq 0,35$); 596 dias parcialmente nublados com dominância de céu difuso ($0,35 < K_T^d \leq 0,55$); 602 dias parcialmente nublados com dominância de céu aberto ($0,55 < K_T^d \leq 0,65$); e 752 dias com cobertura de céu sem nuvens ($K_T^d > 0,65$).

A fração média de K_T^d sobre 2327 dias é igual a 0,54, indicando uma condição de cobertura de céu no intervalo III. A soma das frações IV e V juntas representam cerca de 58,2% das observações e as demais condições somadas (I+II+III) representam somente 48,2% das observações. Esses percentuais são importantes em termos de aplicabilidade da energia solar, pois indicam que a

localidade em questão apresenta elevada transmissividade e, conseqüente, disponibilidade de radiação direta em mais de 58% dos dias.

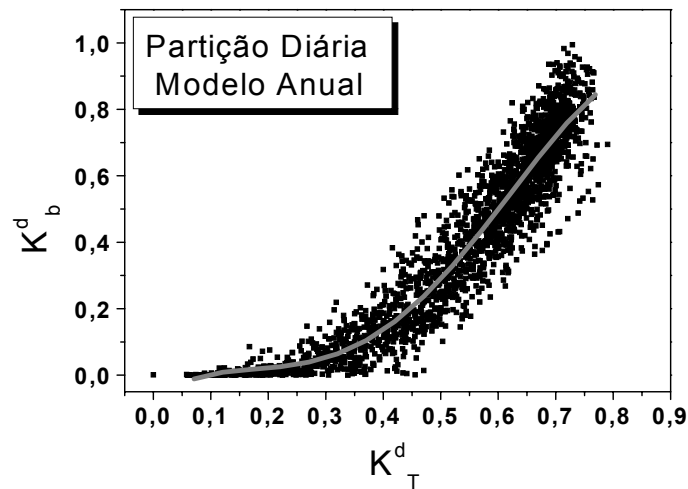


Figura 2 - Correlação entre K_b^d e K_T^d e a curva polinomial de quarta ordem.

A transmissividade média da radiação direta dentro de cada uma das 5 condições é: intervalo I, $\bar{K}_b^d=0,0075$, em II $\bar{K}_b^d=0,0497$, em III $\bar{K}_b^d=0,23207$, em IV $\bar{K}_b^d=0,51119$ e no intervalo V $\bar{K}_b^d=0,70706$. No intervalo IV, o valor médio da transmitância da radiação direta ultrapassou 51%, e no intervalo V, 70%. A $\bar{K}_b^d$ somente se torna representativa a partir do intervalo III, pois abaixo, a transmitância da radiação direta é inferior a 5%.

A equação de quarto grau ajustada por meio de regressão polinomial com coeficiente de determinação $R^2=0,9060$, é dada por:

$$K_b^d = -0,0803 + 1,44835(K_T^d) - 8,07268(K_T^d)^2 + 19,31456(K_T^d)^3 - 12,00769(K_T^d)^4 \quad (2)$$

O elevado coeficiente de determinação próximo a 0,91 mostra que as variações de K_b^d estão bem correlacionadas com as variações de K_T^d . Em Marrocos, Rerhrhaye et al., (1995) obtiveram $R^2=0,883$ na primavera/outono e 0,953 no inverno.

Os indicadores estatísticos *MBE*, *RMSE* e “*d*” obtidos mostram que a equação (2) subestima as medidas em 3,42%, causa espalhamento de 18,21%, e apresenta um índice de ajustamento “*d*” igual a 0,97.

3.3 Modelo de Estimativa Mensal

A Fig. 3 mostra a correlação entre K_b^m e K_T^m , e a reta ajustada por meio de regressão linear simples para 83 pontos experimentais. Diferentemente das partições horária e diária, há dependência linear entre as variáveis K_b^m e K_T^m .

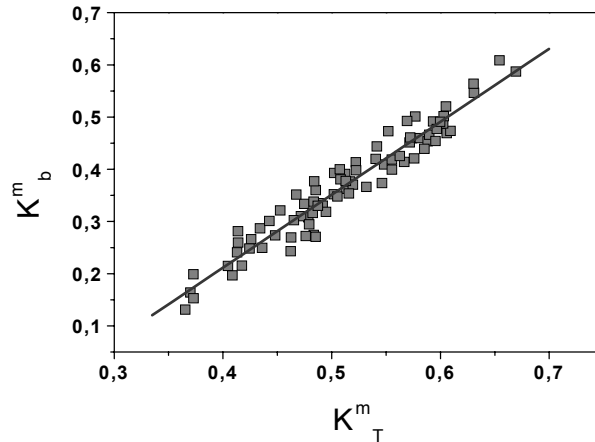


Figura 3 - Correlação entre K_b^m e K_T^m , e a reta ajustada por meio de regressão linear

A condição de cobertura de céu I ($K_T^m \leq 0,2$) e II ($0,2 < K_T^m \leq 0,35$) mostra não ter representatividade na partição mensal, já que K_T^m varia entre 0,36532 e 0,66937, com $\overline{K_T^m} = 0,51395$. A fração K_b^m varia entre 0,13141 e 0,60869, com $\overline{K_b^m} = 0,37$.

A equação linear para a estimativa de K_b^m em função de K_T^m , ajustada por meio de regressão linear simples foi:

$$K_b^m = -0,34786 + 1,39829K_T^m \quad (3)$$

A equação (3) apresenta elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9660$) e mostra a qualidade do ajuste, indicando que 96,6% da variação de K_b^m é explicada por K_T^m .

Os indicativos estatísticos mostram que a equação (3) superestima em 3,21% (MBE), causa espalhamento de 14,80% ($RMSE$) e ajustamento “ d ” igual a 0,9149. O resultado pode ser considerado bom quando comparado aos indicativos estatísticos da validação de equações de estimativa mensal de outras radiações, como a difusa, obtida nos trabalhos de Liu & Jordan (1960), Hay (1979) e Iqbal (1979a).

4 CONCLUSÕES

Do resultado discutido com as equações de estimativa horária, diária e mensal pode-se concluir que:

A equação de estimativa horária anual de quarta ordem ajustada por meio de regressão polinomial com $R^2 = 0,99815$, expressa que as frações $(\overline{K_b^h})$ e $(K_T^h)_i$ estão altamente correlacionadas. Os indicativos estatísticos obtidos na validação da equação de estimativa horária: $MBE = -4,25\%$, $RMSE = 27,60\%$, e o índice de ajustamento “ d ” igual 0,972 mostram bom desempenho do modelo. A equação de estimativa diária anual, de quarta ordem e com $R^2 = 0,9060$, expressa que K_b^d e K_T^d possuem alto índice de correlação. Os indicativos estatísticos da validação da equação diária: $MBE = -4,25\%$, $RMSE = 27,60\%$, e o índice de ajustamento “ d ” igual 0,972 mostram bom desempenho do modelo.

Na partição mensal, diferentemente da horária e diária, houve dependência linear entre as variáveis K_b^m e K_T^m . A fração K_b^m pode ser estimada em função de K_T^m com elevado coeficiente de determinação $R^2 = 0,9660$. A validação da equação K_b^m mensal, mostra por meio dos indicativos

estatísticos que ocorre superestimativa de 3,21% (*MBE*), espalhamento de 14,80% (*RMSE*) e elevado ajustamento ($"d" = 0,9149$) entre a fração medida e a estimada.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à FAPESP e CNPq, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ALADOS – ARBOLEDAS, L., OLMO, F.J., ALADOS, I., PÉREZ, M. Parametrics models to estimate photosynthetically active radiation in Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.101, p.187-201, 2000.
- ALADOS, I., OLMO, F. J., FOYO-MORENO, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.102, p.39-50, 2000.
- BARTOLI, B., CUOMO, V., AMATO, U. Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata. *Solar Energy*, v.28, p.307-11, 1982.
- 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.
- BATTLES, F.J., RUBIO, M.A., TOVAR, J., OLMO, F.J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance. *Energy*, v.25, p. 675-88, 2000.
- CAMPS, J. SOLER, M.R. Estimation of diffuse solar irradiance on a horizontal surface for cloudless day- a new approach. *Solar Energy*, v.49, p. 53-63, 1992.
- CAVALCANTI, E.S.C. Analysis of experimental solar radiation for Rio de Janeiro, Brazil. *Solar Energy*, v.47, p.231-235, 1991.
- DEHNE, K. Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula. *Instruments and observing methods*, Report n. 15, World Meteorological Organization, p. 263-7, 1984.
- ERBS, D.G., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, v.28, p.293-302, 1982.
- GARRISON, J.D. A study of the division of global solar irradiance into direct and diffuse irradiance at thirty three U.S. sites. *Solar Energy*, v.35, p.341-55, 1985.
- 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, 1979a.
- IQBAL, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - II, Monthly average hourly horizontal radiation. *Solar Energy*, v.22, p.87-90, 1979b.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press, 1983. 390p.
- JACOVIDES, C. P., HADJIOANNOU, L., PASHIARDIS, S., STEFANO, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. *Solar Energy*, v.56, n.6, p.565-72, 1996.
- JETER, S. M., BALARAS, C. A. Development of improved solar radiation models for predicting beam transmittance. *Solar Energy*, v.44, p.149-56, 1990.
- LAM, J.C., LI, D.H.W. Correlations between global solar radiation and its direct and diffuse components. *Building and Environment*, v.31, p.527-35, 1996.
- LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.3, n.4, p.1-19, 1960.

- LOPEZ, G., RUBIO, M.A., BATLLES, F.J. Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain, *Renewable Energy*, v.21, p. 171-86, 2000.
- 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*, v.71, p.59-73, 2002a.
- OLIVEIRA, A.P., MACHADO, A.J., ESCOBEDO, J.F., SOARES, J. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, v.71, p.231-250, 2002b.
- OLMO, F.J., BATLLES, F.J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Performance of global to direct/diffuse decomposition models before and after the eruption of mt. Pinatubo. June 1991. *Solar Energy*, v.57, p.433-43, 1996.
- 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.
- PAINTER, H. E. The shade ring correction for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, v.26, p.361-3, 1981.
- REINDL, D. T., BECKMAN, W. A., DUFFIE, J. A. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, v.45, n.1, p.1-7, 1990.
- RERHRHAYE, A., ZENAF, M., FLECHON, J. Estimation of the beam from seasonal correlations. *Renewable Energy*, v.6, p.779-785, 1995.
- SIRÉN, K. E. The shadow band correction for diffuse irradiation based on a two-component sky radiance model. *Solar Energy*, v.39, n.5, p.433-8, 1987.
- SKARTVEIT, A., OLSETH, J. A. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar Energy*, v.38, p.271-4, 1987.
- SOARES, J., OLIVEIRA, A.P., BOZNAR, M.Z., MLAKAR, P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy*, v.79, p.201-204, 2004.
- 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.
- SOUZA, J.L., NICÁCIO, R.M., MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*, v.30, p.1203-1220, 2005.
- STANHILL, G. Observations of shade-ring correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.111, p.1125-30, 1985.
- 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 frequency distribution of instantaneous insolation values. *Solar Energy*, v.40, p.413-22, 1988.
- 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*, v.30, p.957-966, 2005.
- VIGNÓLIA, F. , McDANIELS, D. K. Beam-global correlations in the pacific northwest. *Solar Energy*, v.36, p.409-18, 1986.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physical Geography*. v.2, p.184-94, 1981.

ESTIMATIVE OF HOURLY, DAILY AND MONTHLY BEAM RADIATION AS A FUNCTION OF THE CLEARNESS INDEX

ABSTRACT: *This work describes the Liu & Jordan's model to estimate hourly, daily and monthly values of beam radiation. The solar database of global and beam radiation is from 1996 to 2003.*

The validation of the models was held by means of MBE, RMSE and d statistical indicators using the 2002 solar database regardless the data used for model acquisition. The statistical results were as it follows: for the hourly model MBE = -4.25%, RMSE = 27.60%, and the index of agreement d = 0.972; for the daily model: MBE = -3.42%, RMSE = 18.21%, and index of agreement d = 0.97; and for the monthly model: R²=0.9660: MBE=3.21%; RMSE=14.8% and d=0.9149. The results show that the hourly, daily and monthly equations presented good precision and accuracy.

Keywords: beam solar radiation, estimative, hourly, daily and monthly radiations.