

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

Eduardo Nardini Gomes – [engomes@fca.unesp.br](mailto:engomes@fca.unesp.br)

João Francisco Escobedo – [escobedo@fca.unesp.br](mailto:escobedo@fca.unesp.br)

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

Amauri Pereira de Oliveira – [apdolive@usp.br](mailto:apdolive@usp.br)

Jacyra Soares – [jacyra@usp.br](mailto:jacyra@usp.br)

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

**RESUMO.** No trabalho é apresentada a proposta e a validação do modelo de estimativa estatístico de Liu & Jordan para a radiação solar direta na incidência nas partições horária, diária e mensal. A base de dados das radiações direta na incidência e global compreende os anos de 1996 a 2003. A validação dos modelos propostos se deu através dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e “d”, efetuada através de uma base de dados do ano de 2002, independente da base de dados de geração dos modelos. 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 fontes alternativas e renováveis de energia. A radiação solar apresenta grande destaque neste 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 $\mu$ m) 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). Escassas são as informações sobre equações de estimativa da radiação direta na incidência em função da global. A causa principal dessa limitação dos grupos está no custo instrumental e de manutenção do pireliômetro e rastreador solar que é importado e caro. Os grupos 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 existente, das 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 modelos do primeiro tipo são mais simples, pois a radiação ou a variável meteorológica (normalmente a radiação global ou número de horas de brilho solar), é medida de rotina em redes meteorológicas

distribuída nos países que fazem previsão de tempo. Já os modelos paramétricos 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 vem sendo 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, através do modelo de Liu & Jordan.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

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

Na tabela 1 é apresentada a estatística da radiação direta, representada 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 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  $2\text{MJ/m}^2$  entre estes anos. A energia acumulada média foi em torno de  $5,3\text{GJ/m}^2/\text{ano}$ , e no período total a energia disponível foi na ordem 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 a ausência de 89 dias de medidas, período este em que o pireliômetro ainda não tinha sido instalado. A radiação direta na incidência apresentou energia média diária na ordem 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 ( $\text{MJ/m}^2$ )	Média ( $\text{MJ/m}^2$ )	Desvio (%)	Mínimo ( $\text{MJ/m}^2$ )	Máximo ( $\text{MJ/m}^2$ )	Varição ( $\text{MJ/m}^2$ )
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  $\text{MJ/m}^2$ , foram calculadas a partir das integrações horária, diária e mensal das irradiâncias global  $I_g$ , direta na incidência  $I_b$ , e no topo da atmosfera  $I_o$ , em  $\text{W/m}^2$  (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:  $t_n = n\Delta t$ ,  $n =$  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:  $Nm =$  número de dias do mês  $m$ .

As radiações dos anos de 1996 a 2001 e 2003 foram utilizadas para geração das equações de estimativas, e o ano de 2002 para a validação. Ressaltamos que o critério de escolha para a geração 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 de Estimativa Estatísticos

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  $K_b$ .

Estas frações estão representadas pelas relações:  $K_t^x = H_g^x / H_o^x$ ,  $K_b^x = H_b^x / H_{sc}^x$ , onde  $x$  assume as partições (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 obter  $K_b^m$  e  $K_t^m$  utilizaram-se das 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 indicativos 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:

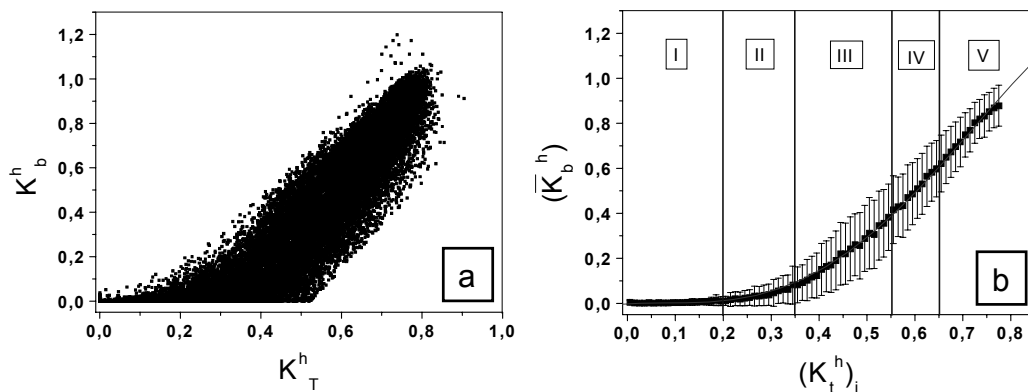
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2}$$

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



**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 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 funções de intervalos discretos centesimais de  $K_T^h$ , da Figura 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 Figura 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 esta 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. Nesta 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 Figura 1(b) mostra que ( $\bar{K}_b^h$ ) não apresenta dependência linear com ( $K_T^h$ )<sub>i</sub>. 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 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 ( $0,35 < (K_T^h)_i \leq 0,55$ ), ( $\bar{K}_b^h$ ) tem 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 ( $\bar{K}_b^h$ ) se elevou de 0,61 a 0,88, onde atinge a transmissividade máxima.

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

Nestas condições de cobertura de céu, a Figura 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 elevado coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é na ordem de 0,998. Diversos autores obtiveram resultados semelhantes seguindo a proposta de Liu & Jordan para a 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 na ordem de 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%).

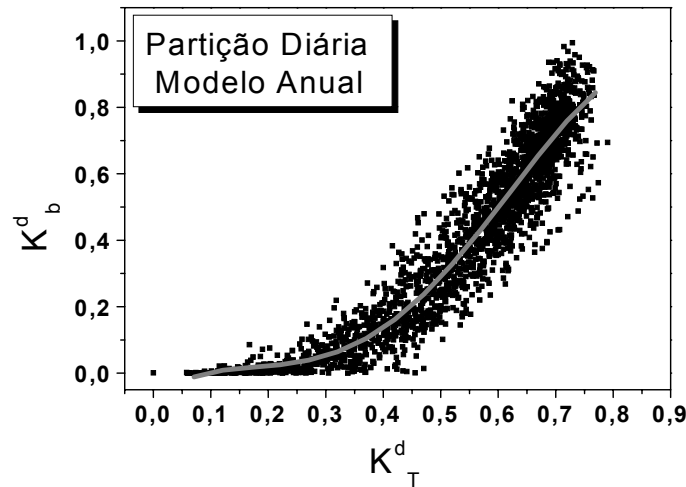
### 3.2 Modelo de Estimativa Diário

A Figura 2 mostra a correlação entre  $K_b^d$  e  $K_T^d$  para 2327 dias e a curva polinomial ajustada através de regressão.

Utilizando a classificação de cobertura de céu empregada na Figura 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 condições IV e V juntas representam cerca de 58,2% das observações, enquanto que as demais condições somadas (I+II+III) representam somente 48,2% das observações. Esses percentuais são muito 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 curva polinomial de quarta ordem ajustada através de 2327 dias.

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

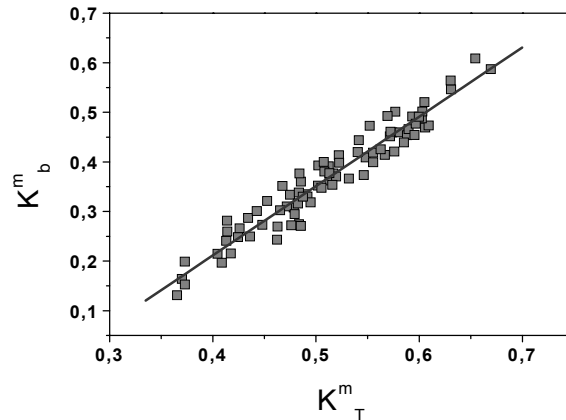
A equação de quarto grau ajustada, através de regressão polinomial com coeficiente de determinação  $R^2=0,9060$ , é dada por:

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

O elevado coeficiente de determinação próximo de 1 (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  $R^2$  de 0,883 na primavera/outono e de 0,953 no inverno. Os indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e “*d*” obtidos mostram que a equação (2) em geral 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 Figura 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

As condições de cobertura de céu I ( $K_T^m \leq 0,2$ ) e II ( $0,2 < K_T^m \leq 0,35$ ) mostraram não ter muita representatividade na partição mensal, já que os valores de  $K_T^m$  variaram entre 0,36532 e 0,66937, com  $\bar{K}_T^m = 0,51395$ , enquanto que os valores de  $K_b^m$  variaram entre 0,13141 e 0,60869, com  $\bar{K}_b^m = 0,37$ .

A equação linear para a estimativa de  $K_b^m$  em função de  $K_T^m$ , ajustada através de regressão linear simples, é dada por:

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

A equação (3) apresenta elevado coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9660$ ), mostrando 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 por exemplo a difusa, obtidas nos trabalhos de Liu & Jordan (1960), Hay (1979) e Iqbal (1979a).

#### 4 CONCLUSÕES

Dos resultados discutidos das equações de estimativas com modelo de Liu & Jordan nas partições horária, diária e mensal pode-se concluir que:

A equação de estimativa horária anual de quarta ordem, ajustada através de regressão polinomial com  $R^2 = 0,99815$ , expressa que as frações  $(\bar{K}_b^h)$  e  $(K_T^h)_i$  estão muito bem 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 que o desempenho do modelo é positivo estatisticamente.

A equação de estimativa diária anual, de quarta ordem e com  $R^2 = 0,9060$ , expressa que  $K_b^d$  e  $K_T^d$  estão muito bem correlacionadas. Os indicativos estatísticos da validação da equação diária: *MBE* = - 4,25%, *RMSE* = 27,60%, e o índice de ajustamento “*d*” igual 0,972 mostram que o desempenho do modelo é positivo estatisticamente.

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

### **Agradecimentos**

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

### **5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALADOS – ARBOLEDAS, L., OLMO, F.J., ALADOS, I., PÉREZ, M. Parametric 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., STEFANOPOULOS, 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.

**ABSTRACT:** *This work describes The Liu & Jordan's model to estimate the hourly, daily and monthly values of the direct radiation. The solar database of global and direct radiation is from 1996 to 2003. The models validation was made with the statistical indicators MBE, RMSE and d using the 2002 solar database, independent of the model's generation data. The following statistical results for the hourly model MBE = -4.25%, RMSE = 27.60%, and the index of agreement d = 0.972; daily model: MBE = -3.42%, RMSE =18.21%, and index of agreement d =0.97; and monthly model: R2=0.9660: MBE=3.21%; RMSE=14.8% and d=0.9149, showing that the hourly, daily and monthly equations has presented good precision and accuracy.*

**Keywords:** direct solar radiation, estimative, hourly, daily and monthly.