

## ESTIMATIVA DAS RADIAÇÕES GLOBAL, DIRETA E DIFUSA EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE ( $K_T$ ) E RAZÃO DE INSOLAÇÃO ( $n/N$ )

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

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

Carlos Roberto Furlan Júnior – [CRFurlan@fca.unesp.br](mailto:CRFurlan@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

### 1.1 Radiação Solar

Resumo. O trabalho apresenta equações de estimativa e a validação para as radiações global, direta na horizontal e difusa em função da razão de insolação ( $n/N$ ) e índice de claridade ( $K_T$ ) utilizando os modelos de Angstrom e Liu-Jordan, respectivamente. No modelo de Angstrom, as radiações global ( $R_g$ ), direta na horizontal ( $R_{DH}$ ) e difusa ( $R_d$ ) foram relacionadas ao número de horas de brilho solar ( $n/N$ ) e no modelo de Liu-Jordan, os índices radiométricos  $K_{dh} = R_{DH}/R_g$  e  $K_d = R_d/R_g$  foram relacionados ao índice de claridade  $K_T = R_g/R_o$ . Na modelagem realizada através de regressão polinomial, utilizou-se dados de um período de 8 anos (1996 a 2003). As equações de estimativa horária, diária e mensal foram obtidas com alto coeficiente de determinação  $R^2$ . A validação realizada com os dados dos anos 2004 e 2005 por meio dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e “d” de Willmott é apresentada e comparada à literatura.

**Palavras-chave:** radiação solar global, difusa e direta, modelos de estimativa de Liu & Jordan e Angstrom

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se atualmente em pleno desenvolvimento tecnológico na área de fontes renováveis de energia como: conversão de energia solar, térmica, fotovoltaica e biomassa. Um programa com aproveitamento da energia solar deve sempre ser iniciado com o estudo da série de radiação solar para a região de interesse. Para locais em que a radiação solar não é monitorada, a solução é a utilização do processo de estimativa através de modelos ou correlações empíricas.

As correlações mais importantes utilizadas com radiação solar são: a de Angstrom a qual relaciona a fração da radiação global que atinge a superfície terrestre  $K_T$  (razão entre radiação global e a do topo da atmosfera) com a razão de insolação (número de horas de brilho e fotoperíodo) e utiliza a medida do número de horas de brilho solar para estimar a radiação global; a de Liu e Jordan relaciona a razão das radiações difusa e global ou a direta na horizontal e a global por meio dos índices radiométricos  $K_d$  e  $K_{dh}$  em função de  $K_T$  e utiliza a medida da radiação global para estimar as radiações difusa ou a direta na horizontal.

A Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu monitora desde 1955 a radiação solar na superfície horizontal: global, difusa (métodos do anel de sombreamento, disco e diferença), direta na incidência. O objetivo é desenvolver equações de estimativa as quais apresentam grande importância nos projetos de conversão solar.

Assim esse trabalho teve como objetivo elaborar as equações de estimativa de Angstrom para as radiações global, difusa e direta em função da razão de insolação  $n/N$  nas partições diária e mensal, e as de Liu e Jordan para frações da radiação difusa  $K_d$  e direta  $K_{dh}$  em função do índice de claridade  $K_T$  nas partições horária, diária e mensal.

## 2. METODOLOGIA

A base de dados da radiação solar, direta na incidência e global, compreende os anos de 1996 a 2005. As radiações dos anos de 1996 a 2003 foram utilizadas para obtenção das equações de estimativa e os anos de 2004 e 2005 para a validação.

A irradiância global ( $I_G$ ) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSP, a radiação direta na incidência ( $I_b$ ) por um pireliômetro Eppley NIP acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. A irradiância difusa ( $I_d$ ) foi obtida pelo método indireto, ou seja, por meio da diferença entre a irradiância  $I_G$  e a irradiância direta na horizontal  $I_{dh}$ , calculada na mesma frequência pela equação:  $I_d = I_G - I_b \cos Z$ , onde  $z$  é o ângulo zenital.

As características operacionais referentes ao fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta estão apresentadas na Tab. 1:

**Tabela 1.** Características operacionais dos detectores da radiação direta e global.

Radiação	Direta	Global
Sensor – Marca	Pireliômetro - Eppley	Piranômetro - Eppley
Fator de Calibração	$7,59 \mu V/Wm^{-2}$	$7,45 \mu V/Wm^{-2}$
Range Espectral	295-2800nm	295-2800nm
Tempo de resposta	1s	1s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (0 a $1400 W/m^2$ )	$\pm 0,5\%$ (de 0 a $2800 W/m^2$ )
Cosseno	--	$\pm 1\%$ ( $0 < Z < 70^\circ$ ) $\pm 3\%$ ( $70^\circ \leq Z < 80^\circ$ )
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de $-20^\circ C$ a $40^\circ C$	$\pm 1\%$ de $-20^\circ C$ a $40^\circ C$

Utilizou-se um Datalogger da Campbell CR23X para aquisição dos dados, operando na frequência de 1 Hz, armazenando as médias instantâneas de 5 minutos (médias de 300 leituras instantâneas) das duas radiações. Os dados passaram por um controle de qualidade para eliminação de valores espúrios e posteriormente foram processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das radiações horária, diária e mensal.

O número de horas de brilho solar ( $n$ ) foi medido por um heliógrafo e a razão de insolação ( $r$ ) calculada pela relação  $n/N$ , onde  $N$  é o fotoperíodo.

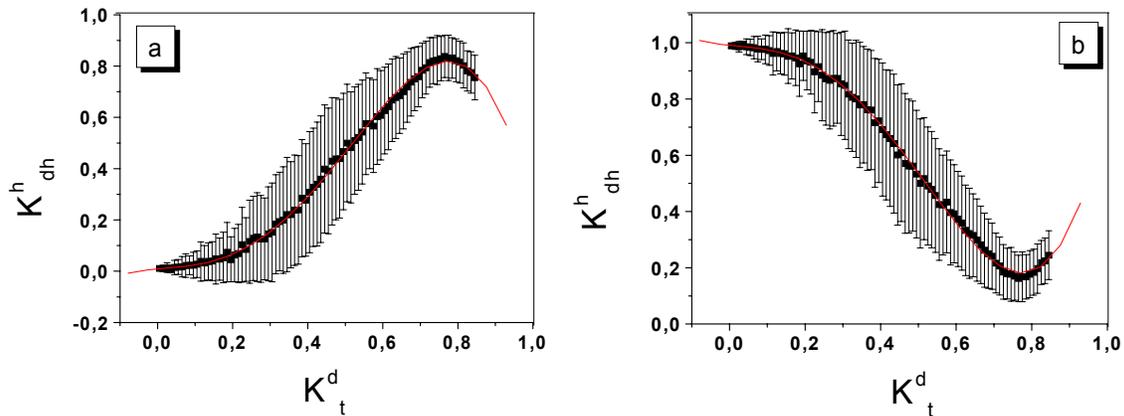
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Equações de Estimativa Horária

A Fig. 1 mostra as correlações horárias: (a) fração da radiação direta  $K_{dh}^h$  e índice de claridade  $K_T^h$ ; (b) fração da difusa  $K_d^h$  e índice de claridade  $K_T^h$ . As correlações das frações  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  em função de  $K_T^h$ , mostram que a dependência não é linear e que para cada intervalo de variação de  $K_T^h$ , há um largo intervalo de variação de  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$ . A causa principal dessa variação foi a variação da massa ótica. As irradiâncias  $I_{dh}$  e  $I_d$  diminuem a medida em que a massa ótica aumenta.

Análises com regressão linear mostram por meio de baixos coeficientes de determinação que as variações das frações horárias  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  estão fracamente correlacionadas às variações das frações do índice de claridade horário  $K_T^h$ , entre 0 e 1.

As variações das frações  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$ , são minimizadas em cada intervalo centesimal  $K_T^h$  quando transformadas em frações médias  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$ , possibilitando o ajuste de uma função simples. Essa técnica foi utilizada por diversos pesquisadores para as frações difusa  $K_d^h$  e direta  $K_{dh}^h$ , relacionadas aos intervalos centesimais de  $K_T^h$  (Bartoli et al., 1982 entre outros).



**Figura 1** - Correlações horárias: (a) fração da direta  $K_{dh}^h$  e índice de claridade  $K_T^h$ ; (b) fração da difusa  $K_d^h$  e índice de claridade  $K_T^h$ .

Como a soma das frações  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  é igual a 1, as equações para  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  em função de  $K_T^h$  são simétricas e complementares: a evolução da fração  $K_{dh}^h$  é crescente enquanto que, a da fração  $K_d^h$  é decrescente. As evoluções das frações médias  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  em função de  $K_T^h$ , são similares às correlações encontradas por De Miguel et al (2001); Erbs(1982), Reindl(1990), Hawlader(1984); Oliveira(2002) e Orgill & Hollands (1971), Louche et al., (1991) e Lam e Li (1996).

A Tab. 2 apresenta as equações de estimativa para as frações médias  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  em função de  $K_T^h$ , com os coeficientes de determinação  $R^2$ .

**Tabela 2.** Equações de Estimativa das frações médias  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  em função de  $K_T^h$ ,

$K_{dh}^h = 0,00915 + 0,13136Kt - 0,46097Kt^2 + 7,50806kt^3 - 6,95862kt^4$	$R^2 = 0,99936$	(1)
$K_d^h = 0,99085 - 0,13136kt + 0,46097kt^2 - 7,50806kt^3 + 6,95862kt^4$	$R^2 = 0,99936$	(2)

A Tab. 3 apresenta os resultados da validação das equações (1) e (2) por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott.

**Tabela 3.** Indicativos Estatísticos da Validação das equações de estimativa horária.

Frações	MBE%	RMSE%	“d” de Willmott
$K_{dh}^h$	7,30	33,25	0,96165
$K_d^h$	-4,58	20,87	0,96165

As equações polinomiais de 4ª ordem apresentam coeficientes de determinação em torno de 0,9994. O resultado foi considerado bom comparado ao resultado dos pesquisadores citados no parágrafo anterior e mostra que as frações médias  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  estão bem correlacionadas ao índice de claridade  $K_T^h$ .

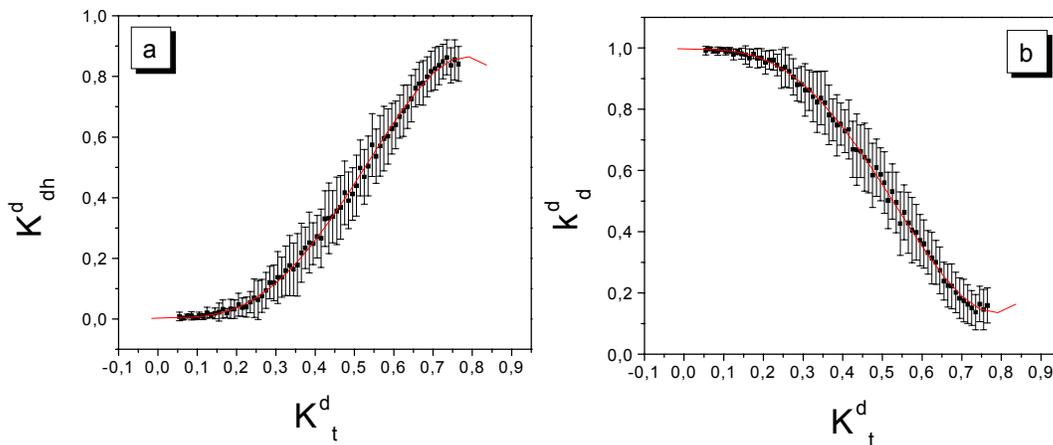
O indicativo estatístico MBE inferior a 7,3% mostra que o erro médio da estimativa para as frações  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  não é elevado, e o sinal indica que  $K_d^h$  subestima, enquanto que  $K_{dh}^h$  superestima a medidas. A equação que estima a fração  $K_d^h$  apresentou o melhor desempenho. O indicativo RMSE elevado mostra que o espalhamento entre a radiação medida e a estimada é relativamente alto, com melhores resultados para as frações, na seguinte ordem:  $K_d^h$  e  $K_{dh}^h$ . Os coeficientes “d” de Willmott superiores a 0,9616 são elevados e mostram bom nível de ajustamento da radiação estimada em relação à medida para as duas frações  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$ .

### 3.2- Equações de Estimativa Diária.

A Fig. 2 mostra as correlações diárias: (a) fração da direta  $K_{dh}^d$  e índice de claridade  $K_T^d$  e (b) fração da difusa  $K_d^d$  e índice de claridade  $K_T^d$ . Nas duas correlações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função de  $K_T^d$ , para cada intervalo de  $K_T^d$ , há um largo intervalo de variação de  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$ . A exemplo das correlações horárias, optamos por minimizar as variações das frações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  por meio de frações médias  $K_{dh}^h$  e  $K_d^h$  em cada intervalo centesimal de  $K_T^d$ .

As correlações das frações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função de  $K_T^d$  são similares às correlações das frações horárias. As equações polinomiais de 4ª ordem são similares às equações horárias, porém, com coeficientes de determinação mais altos. Os níveis de espalhamento das frações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função de  $K_T^d$ , na Fig. 2, decresceram em relação aos níveis das relações horárias da Fig. 1.

Partições de tempo menores respondem com mais sensibilidade e rapidez às mudanças da atmosfera, permitindo melhor detalhamento da distribuição pontual das radiações e, conseqüentemente, produzindo uma variabilidade maior. Para partição de tempo maior, os efeitos da dinâmica da atmosfera são suavizados por meio da integração dos valores instantâneos em intervalos de tempo maior, diminuindo a variabilidade dos valores das frações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$ . No entanto, as informações pontuais sobre a distribuição das radiações são perdidas no momento da integração (Suehrcke & McCormick, 1989).



**Figura 2** - Correlações diárias: (a) fração da direta  $K_{dh}^d$  e índice de claridade  $K_T^d$ ; (b) fração da difusa  $K_d^d$  e índice de claridade  $K_T^d$ .

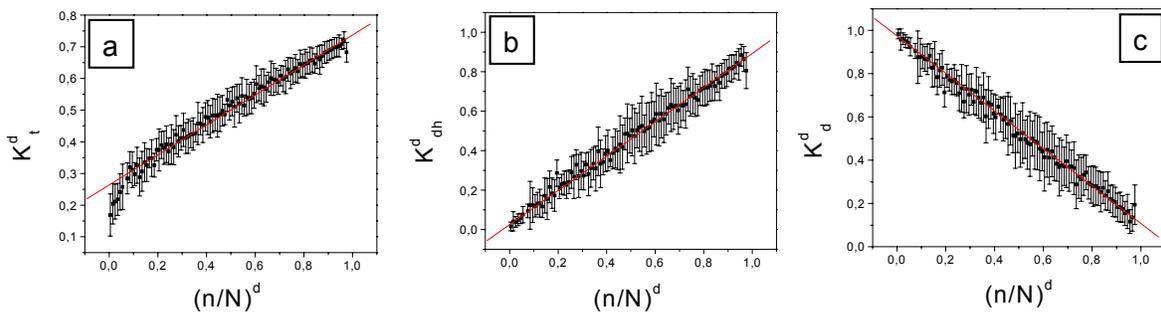
A Tab. 4 apresenta as equações de estimativa para as frações médias  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função de  $K_T^d$  com o respectivo coeficiente de determinação.

**Tabela 4.** Equações de estimativa diária das frações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função de  $K_T^d$ .

$K_{dh}^d = 0,00328 + 0,04941Kt - 0,97609Kt^2 + 9,42619Kt^3 - 8,25615Kt^4$	$R^2 = 0,99859$	<b>(3)</b>
$K_d^d = 0,99672 - 0,04941Kt + 0,97609Kt^2 - 9,42619Kt^3 + 8,25615Kt^4$	$R^2 = 0,99859$	<b>(4)</b>

Os coeficientes de determinação da ordem de 0,9986 mostram que as frações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  estão bem correlacionadas ao índice de claridade  $K_T^d$ . Os resultados dos ajustes são melhores ou similares aos citadas na literatura para a fração  $K_d^d$  (Erbs et al., 1982; Oliveira et. al., 2002; Newland,1989; Jacovides et al., 1996)

A Fig. 3 mostra as correlações do índice de claridade  $K_T^d$ , da fração da direta  $K_{dh}^d$  e da fração da difusa  $K_d^d$  em função da razão de insolação  $(n/N)^d$ .



**Figura 3** - Correlações diárias: (a) índice de claridade  $K_T^d$  e razão de insolação  $(n/N)^d$ ; (b) fração da difusa  $K_d^d$  e razão de insolação  $(n/N)^d$ ; (c) fração da direta  $K_{dh}^d$  e razão de insolação  $(n/N)^d$ .

A correlação das frações  $K_T^d$ ,  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função da razão de insolação  $(n/N)^d$  é linear, e o coeficiente de determinação acima de 0,98 mostra que as frações estão bem correlacionadas com a razão de insolação  $(n/N)^d$ . A correlação mostra que a função linear tende a superestimar e subestimar a relação experimental nas coberturas de céu nublado e aberta. Para as correlações  $K_T^d \times (n/N)^d$  e  $K_{dh}^d \times (n/N)^d$ , a função superestima a medida para baixa razão de insolação e superestima a medida na alta razão de insolação. A estimativa da correlação  $K_d^d \times (n/N)^d$  subestima e superestima a medida, na alta e baixa razão de insolação, respectivamente.

A Tab. 5 apresenta as equações de estimativa para as frações médias  $K_T^d$ ,  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função da razão de insolação  $(n/N)^d$  com os respectivos coeficientes de determinação. A estimativa das frações  $K_T^d$ ,  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  a partir da medida do número de horas de brilho solar constitui a técnica mais simples e econômica de se estimar as três radiações global, direta e difusa. O processo utiliza apenas a medida de brilho solar por meio de um heliógrafo, muito comum nos postos meteorológicos.

**Tabela 5.** Equações de Estimativa das frações médias  $K_T^d$ ,  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função de  $(n/N)^d$ .

$K_T^d = 0,26354 + 0,47357(n/N)^d$	$R^2 = 0,98375$	<b>(5)</b>
$K_{dh}^d = 0,02474 + 0,868(n/N)^d$	$R^2 = 0,99479$	<b>(6)</b>
$K_d^d = 0,97526 - 0,868(n/N)^d$	$R^2 = 0,99479$	<b>(7)</b>

As equações para  $K_T^d$ ,  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em função da razão de insolação  $n/N$  são lineares (simples) com elevado coeficiente de determinação. As frações  $K_T^d$  e  $K_{dh}^d$  são crescentes e  $K_d^d$  é decrescente, em relação à razão de insolação  $(n/N)^d$ . O coeficiente de determinação das equações de estimativa para  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  em torno de 0,995 é ligeiramente mais elevado que o da equação para  $K_T^d = 0,98$ . Não há diferença estatística significativa entre os coeficientes, de tal forma que as três equações podem ser utilizadas com precisão, pois as frações estão altamente correlacionadas à razão de insolação. A correlação entre  $K_T^d$  e  $(n/N)^d$  mostra que a transmissividade atmosférica mínima e máxima para a radiação global local é da ordem de 22% e 73%, respectivamente; a relação  $K_d^d$  e  $(n/N)^d$  indica que a máxima e mínima fração da radiação difusa da global são de 99% e 13%, respectivamente. A relação  $K_{dh}^d$  e  $(n/N)^d$  mostra que a fração da radiação direta na radiação global possui mínimo e máximo de 1% e 87%, respectivamente..

A Tab. 6 apresenta os resultados da validação das equações (3) e (4) do modelo de Liu-Jordan e as equações (5), (6) e (7) do modelo de Angstrom por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e  $d$  de Willmott.

**Tabela 6.** Indicativos Estatísticos da Validação das equações de estimativa diária.

Frações	MBE.%	RMSE.%	d	Equação
$K_{dh}^d \times K_t^d$	-0,19	16,72	0,97581	(3)
$K_d^d \times K_t^d$	-0,90	18,16	0,97576	(4)
$K_t^d \times (n/N)^d$	2,30	14,48	0,94378	(5)
$K_{dh}^d \times (n/N)^d$	7,04	30,21	0,95528	(6)
$K_d^d \times (n/N)^d$	-2,68	11,52	0,95528	(7)

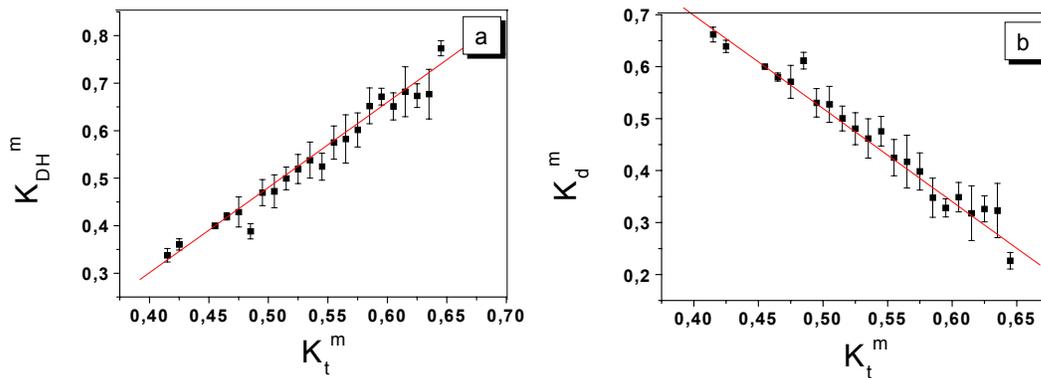
O indicativo estatístico MBE, obtido na validação das equações (3) e (4) do modelo de Liu-Jordan mostra que as equações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  subestimam as medidas; o indicativo RMSE abaixo dos 20,0% mostra que a dispersão entre a radiação medida e a estimada é inferior a 25,0%, citados na literatura por De Miguel (2001), et al na Espanha; Erbs (1982); Lam e Li, Reindl (1990); Newland (1989) Orgill e Hollands.,1977, Hawlader (1984) e Oliveira et. al., (2002). O índice de ajustamento “d” de Willmott, superior a 0,9758 expressa a boa concordância entre a fração estimada e a medida para as duas equações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$ . Na análise geral do indicativos estatísticos, a equação  $K_{dh}^d$  apresentou o melhor desempenho, pois apresentou os indicativos estatísticos MBE e RMSE menores que os da equação  $K_d^d$ .

O indicativo estatístico MBE da validação das equações (5) a (7) do modelo de Angstrom mostra que as equações das frações  $K_T^d$  e  $K_d^d$  superestimam as medidas com erros inferiores a 3,0%. A equação  $K_{dh}^d$  subestima a medida com erro da ordem de 7,0%. O indicativo RMSE foi melhor para as frações na seqüência  $K_T^d$ ,  $K_d^d$  e  $K_{dh}^d$ . O espalhamento das frações  $K_T^d$  e  $K_d^d$  em função da razão de insolação de 14,5% e 11,5% respectivamente foi considerado muito bom, porque são inferiores aos RMSE das validações das frações  $K_T^d$  e  $K_d^d$  citados na literatura O índice de ajustamento “d” de Willmott, superior a 0,94, expressa boa concordância entre a estimativa e a medida, para as equações  $K_T^d$ ,  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$ , com melhor resultado para as frações  $K_{dh}^d$  e  $K_d^d$  mais alto que 0,95.

### 3.3 Equações de Estimativa Mensal.

A Fig. 4 mostra a correlação mensal diária: (a) fração da direta  $K_{dh}^m$  e índice de claridade  $K_T^m$ , (b) fração da difusa  $K_d^m$  e índice de claridade  $K_T^m$ . Diferentemente das duas correlações anteriores, horária e diária, as frações mensais diárias  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$  foram obtidas em todo intervalo de variação de  $K_T^m$  sem necessidade do uso da técnica da média dos intervalos centesimais.

A correlação das frações mensais diárias  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$  é linear crescente e decrescente, respectivamente em função do índice de claridade mensal  $K_T^m$ . A função linear  $K_{dh}^m$  superestima, enquanto que a  $K_d^m$  subestima a medida. A correlação mensal diária é similar à encontrada por Jacovides, et al (1996), Page (1961), Newland (1989) e outros para a fração difusa.



**Figura 4** - Correlação mensal diária: (a) fração da direta  $K_{dh}^m$  e índice de claridade mensal  $K_T^m$ ; (b) fração da difusa  $K_d^m$  e índice de claridade mensal  $K_T^m$ .

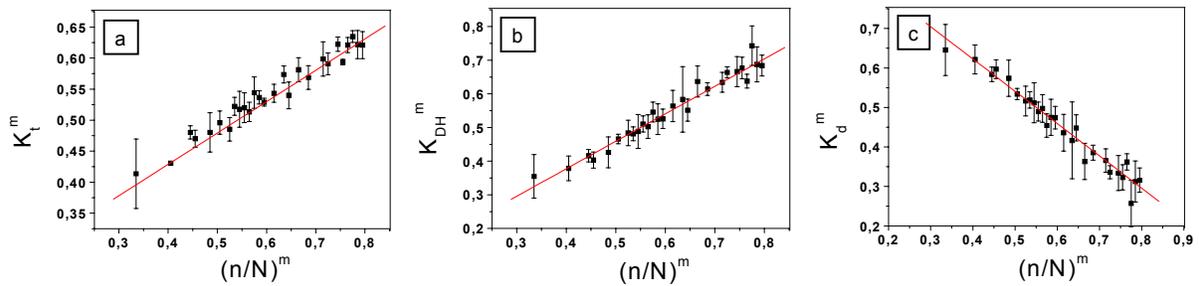
A Tab. 7 apresenta as equações de estimativa para as frações médias  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$  em função de  $K_T^m$ , com seus respectivos coeficientes de determinação  $R^2$ . Para a fração a  $K_d^m$ , apesar da similaridade da equação com as citadas na literatura, os coeficientes linear e angular divergem, sendo consideravelmente mais elevados que os de outros países como Canadá; China e Ilha de Cypros, descritos nos trabalhos de Page (1961); Newland(1989) e Jacovides(1996).

**Tabela 7.** Equações de Estimativa das frações mensais  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$  em função de  $K_T^m$

$K_d^m = 1,41558 - 1,79223K_t^m$	$R^2 = 0,97668$	(8)
$K_{dh}^m = -0,41558 + 1,79223K_T^m$	$R^2 = 0,97668$	(9)

O resultado da equação local se aproxima das equações de Lalas, et al., (1987) nas Ilhas Gregas e Oliveira, et al.,(2002) em São Paulo.

A Fig. 5 mostra as correlações  $K_T^m$ ,  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$  em função da razão de insolação  $(n/N)^m$ .



**Figura 5** - Correlação mensal diária: (a)  $K_T^m$  em função da razão de insolação  $(n/N)^m$ ; (b)  $K_{dh}^m$  em função da razão de insolação  $(n/N)^m$ ; (c)  $K_d^m$  em função da razão de insolação  $(n/N)^m$ .

A correlação das frações mensais diárias  $K_T^m$  e  $K_{dh}^m$  é linear crescente e  $K_d^m$  é decrescente em função da razão de insolação mensal  $(n/N)^m$ . A Tab. 8 apresenta as equações de estimativa para as frações médias  $K_T^m$ ,  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$  em função da razão de insolação  $(n/N)^m$  com os respectivos coeficientes de determinação  $R^2$ .

**Tabela 8.** Equações de Estimativa das frações mensais  $K_T^m$ ,  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$  em função de  $(n/N)^m$ .

$K_T^m = 0,22663 + 0,50529(n/N)^m$	$R^2 = 0,98670$
$K_d^m = 0,9496 - 0,8171(n/N)^m$	$R^2 = 0,96896$
$K_{dh}^m = 0,0504 + 0,8171(n/N)^m$	$R^2 = 0,96896$

A equação de Angstrom  $K_T^m \times (n/N)^m$  com coeficientes linear  $\alpha = 0,23$  e angular  $\beta = 0,51$  é superior aos coeficientes de alguns locais, e inferior ao de outros, como mostram os trabalhos de Newland (1989), Iqbal (1979), Jain et al. (1988) entre outros.

A Tab. 9 apresenta os resultados da validação das equações (8) e (9) do modelo de Liu-Jordan e as equações (10), (11) e (12) os do modelo de Angstrom por meio dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott.

**Tabela 9.** Indicativos Estatísticos da Validação das equações de estimativa mensal

Equações	MBE.%	RMSE.%	“d” de Willmott	Equação
$K_{dh}^m \times K_T^m$	12,51	16,25	0,89253	(8)
$K_d^m \times K_T^m$	-5,12	6,64	0,89253	(9)
$K_T^m \times (n/N)^m$	2,01	4,60	0,94841	(10)
$K_{dh}^m \times (n/N)^m$	12,47	16,17	0,87872	(11)
$K_d^m \times (n/N)^m$	-5,10	6,61	0,87872	(12)

O indicativo estatístico MBE, obtido na validação das equações (8) e (9) do modelo de Liu-Jordan mostra que ocorre superestimativa de  $K_{dh}^m$  e subestimativa de  $K_d^m$  em relação à medida experimental, com erro inferior a 12,5% na fração estimada, e melhor resultado para a equação  $K_d^m$  com erro de 5,0% aproximadamente. O indicativo RMSE abaixo de 17,0% mostra que a dispersão entre a fração medida e a estimada não é elevada comparada aos RMSE da validação de outras equações de estimativa para outros locais. O índice de ajustamento “d” de Willmott, superior a

0,89253, expressa a boa concordância entre a fração estimada e a medida para as duas equações  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$ .

O indicativo estatístico MBE, da validação das equações (10) a (12) do modelo de Angstrom, mostra que as equações das frações  $K_T^m$  e  $K_{dh}^m$  superestimam com erro de estimativa inferior a 12,0%, e  $K_d^m$  subestima as medidas com erro de estimativa da ordem de 5,0%. O indicativo RMSE foi melhor para as frações, na sequência  $K_T^m$ ,  $K_d^m$  e  $K_{dh}^m$ , respectivamente. O índice de ajustamento “d” de Willmott superior a 0,88 expressa a boa concordância entre a fração estimada e a medida para as equações  $K_T^m$ ,  $K_{dh}^m$  e  $K_d^m$ , com melhor resultado para a fração  $K_T^m$  maior que 0,94.

#### **4. CONCLUSÕES**

A base de dados das radiações global, direta na horizontal e difusa obtida ao longo do período de 10 anos em Botucatu/SP/Brasil, deram origem às equações de estimativa horária, diária e mensal para as frações  $K_{dh}$  e  $K_d$  em função de  $K_T$ , e equações de estimativa diária e mensal para as frações  $K_T$ ,  $K_{dh}$  e  $K_d$  em função da razão de insolação n/N. Todas as equações apresentaram elevado coeficiente de determinação. Em geral, os resultados da validação por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott mostraram que as equações estimam com precisão e exatidão a fração medida.

#### **REFERÊNCIAS**

- 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.
- DE MIGUEL, A., BILBAO, J., AGUIAR, R., KAMBEZIDIS, H., NEGRO, E. Diffuse solar irradiation model evaluation in north Mediterranean belt area. *Solar Energy*, v.70, n.2, p.143-53, 2001.
- 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.
- HAWLADER, M. N. A. Diffuse, global and extraterrestrial solar radiation for Singapore. *International Journal of Ambient Energy*, v.5, p.31-8, 1984.
- 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.
- 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.
- JAIN, S., JAIN, P. C. A comparison of the Angstrom-type correlations and the estimation of monthly average daily global irradiation. *Solar Energy*, v.40, n.2, p.93-8, 1988.
- LALAS, D. P., PETRAKIS, M., PAPADOPOULOS, C. Correlations for the estimation of the diffuse radiation component in Greece. *Solar Energy*, v.39, n.5, p.455-8, 1987.
- 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.
- NEWLAND, F. J. A study of solar radiation models for the coastal region of south China. *Solar Energy*, v.43, n.4, p.227-35, 1989.
- 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, 2002b.
- 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.
- REINDL, D. T., BECKMAN, W. A., DUFFIE, J. A. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, v.45, n.1, p.1-7, 1990.

- SUEHRCKE, H., McCORMICK, P. G. The distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over the day. *Solar Energy*, v.42, n.4, p.303-9, 1989.
- LAM, J.C., LI, D.H.W. Correlations between global solar radiation and its direct and diffuse components. *Build. and Environ.*, v.31, p.527-35, 1996.
- LOUCHE, A., NOTTON, G., POGGI, P., SIMONNOT, G. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. *Sol. Energy*, v.46, p.261-66, 1991.
- PAGE, J.K. The estimation of monthly average values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. *Proc. U.N. Conf. on New Sources of Energy*, v.4, p.378-390, 1961.

**Agradecimento:** À FAPESP, e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## **ESTIMATIVE OF GLOBAL, DIRECT AND DIFFUSE RADIATIONS AS A FUNCTION OF THE CLEARNESS INDEX AND THE INSOLATION RATIO**

**ABSTRACT:** *This paper presents equations to estimate global, horizontal direct and diffuse radiations as a function of the insolation ratio ( $n/N$ ) and clearness index ( $Kt$ ) by means of Angstrom's and Liu-Jordan's models. In the Angstrom's model, the global ( $R_g$ ), direct ( $R_{DH}$ ) and diffuse ( $R_d$ ) radiations on a horizontal surface were related with the insolation ratio ( $n/N$ ) in the Angstrom's model and in the Liu-Jordan's model, the radiometric fractions  $K_{DH}=R_{DH}/R_g$  and  $K_d=R_d/R_g$  were related with the clearness index  $Kt=R_g/R_o$  in the Liu-Jordan's model. An eight-year database (1996 to 2003) was used for modeling using polynomial regression. The hourly, daily and monthly estimative equations were obtained with high determination coefficients ( $R^2$ ). The validation was performed using a two-year database (2004 to 2005). The MBE, RMSE and "d" of Willmott statistical indicators are presented and compared with the literature.*

**Keywords:** Angstrom's model, Li & Jordan's model, solar radiation, insolation.