

MODELO DE ESTIMATIVA ANISOTRÓPICA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA HORÁRIA, DIÁRIA E MENSAL

Alexandre Dal Pai – adalpai@fatecbt.edu.br

Faculdade de Tecnologia de Botucatu – FATEC/Botucatu

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Recursos Naturais - UNESP

1.1 Radiação solar

Resumo. Muitos modelos de estimativa da radiação solar difusa foram desenvolvidos para situações de isotropia da radiação. Porém essas situações não contemplam com rapidez as mudanças atmosféricas, limitando sua aplicação. O objetivo deste trabalho é propor um modelo de estimativa da radiação solar difusa nas partições de tempo horária, diária e mensal que inclua os efeitos anisotrópicos na radiação na fase de modelagem estatística. As medidas das irradiâncias solares foram efetuadas no Laboratório de Radiometria Solar da UNESP – Botucatu/SP/Brasil (latitude 22,85° Sul, longitude 48,45° Oeste, altitude 785m) no período de 1996 a 2000 para modelagem e de 2001 a 2002 para a validação, realizada por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t. A irradiância global I_G foi medida por um piranômetro Eppley-PSP, a irradiância direta na incidência I_D por um pireliômetro Eppley-NIP acoplado a um rastreador solar modelo ST-3 e a irradiância difusa I_d por um piranômetro Eppley-PSP sob anel de sombreamento ME (0,40m raio e 0,10m largura). Foram aplicadas as correções isotrópicas e anisotrópicas na irradiância difusa. Para cobertura de céu nublado aplicou-se a correção anisotrópica de 0,973; parcialmente nublado de 1,045 e aberto de 1,125. O modelo anisotrópico da irradiação difusa foi obtido por meio da comparação entre a irradiação difusa corrigida isotrópica e anisotropicamente com a irradiação difusa de referência (irradiância difusa I_d é a diferença entre as irradiâncias global I_G e direta projetada na horizontal I_{DH}). Na validação do modelo de estimativa anisotrópico, em média, para as três partições, a difusa estimada pelos modelo anisotrópico comparada com a difusa referência mostrou que a estimativa anisotrópica é consideravelmente mais precisa do que a estimativa isotrópica, fornecendo um diferencial aproximado de 1,5% em relação a difusa de referência contra 6% da estimativa isotrópica em relação a difusa de referência.

Palavras-chave: Radiação Difusa, Modelagem, Anisotropia

1. INTRODUÇÃO

A quantificação do potencial solar de uma região é importante para muitas áreas do conhecimento científico, com aplicações em climatologia, agronomia, iluminação passiva, conversão energética, estimativas por satélites e superfícies inclinadas, as quais utilizam esta informação como parâmetro de entrada em modelos de balanço energético ou para otimização energética em análises térmicas e de conforto térmico.

A maioria das estações meteorológicas no mundo mede, de rotina, apenas a radiação solar global, enquanto que medidas das radiações direta e difusa são menos frequentes devido ao elevado custo dos instrumentos envolvidos. Nesse sentido, para localidades que medem somente a radiação global, recomenda-se o uso de equações estatísticas para estimativa das radiações direta e difusa (Jain e Jain, 1988; Jacovides et al., 1996). O trabalho pioneiro de estimativa da radiação difusa a

partir da radiação global foi proposto por Liu e Jordan (1960), correlacionando a fração difusa K_{DF} (razão da radiação difusa I_d pela radiação global I_G) em função do índice de claridade K_T (razão da radiação global I_G pela radiação extraterrestre I_o). Embora sua correlação fora desenvolvida originalmente para valores diários, vários pesquisadores utilizaram este procedimento para estimar a radiação difusa em outras partições de tempo, como é o caso das partições média-5-minutos (Suehrcke e McCormick, 1988), horária (Skartveit e Olseth, 1987; González e Calbó, 1999; De Miguel et al, 2001) e mensal (Iqbal, 1979; Lalas et al., 1987).

Há vários modelos de estimativa encontrados na literatura que relacionam a fração difusa K_{DF} com parâmetros como altitude, latitude, altura solar, turbidez atmosférica, vapor d'água, temperatura, umidade relativa e distribuição de nuvens. No entanto, a concentração desses parâmetros apresenta dependência temporal e espacial, causando a grande variabilidade nos valores da radiação difusa e mostrando as divergências entre os diferentes modelos de estimativa em função da atmosfera local, além das técnicas de medida, instrumentos etc (Zangvil e Aviv, 1987; Soler, 1990).

Muitos modelos de estimativa da fração difusa foram elaborados a partir da radiação difusa medida pelo método do anel de sombreamento. O método do anel de sombreamento é uma montagem de baixo custo, fácil operação e manutenção, porém necessita de correções isotrópicas devido a radiação difusa barrada pelo anel de sombreamento (Drumond, 1956; Melo e Escobedo, 1994). Entretanto, a correção isotrópica não contempla a radiação circunsolar proveniente da anisotropia da radiação, causada por fatores como: poluição da atmosfera com presença de material particulado, presença de vapor d'água e variações da cobertura de céu que provocam mudanças rápidas na atmosfera. Esses fatores induzem, nos modelos isotrópicos, erros em suas estimativas. Portanto, a inclusão dos efeitos citados num segundo modelo denominado anisotrópico é de fundamental importância, como mostram as correções anisotrópicas propostas por LeBaron et al. (1990) e Battles et al (1995), que melhoram as estimativas da radiação difusa medida pelo anel de sombreamento.

O objetivo do trabalho é propor um modelo de estimativa da irradiação solar difusa nas partições de tempo horária, diária e mensal e compará-los a modelos citados na literatura. A radiação difusa foi previamente corrigida com correções isotrópica e anisotrópica na partição média-5-minutos e posteriormente integrada nas partições diária, horária e mensal.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de irradiâncias global, direta e difusa usados no estudo foram monitorados no Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu – Departamento de Recursos Naturais/FCA/UNESP (latitude 22,85° S, longitude 48,45° O, altitude 786 m) – no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2002. A fase de modelagem utilizou 5 anos dos dados (1996 a 2000), enquanto que a fase de validação utilizou os outros 2 anos restantes (2001 e 2002).

A irradiância global I_G foi medida por um piranômetro Eppley modelo PSP. A irradiância direta I_D foi medida na incidência por um pireliômetro Eppley modelo NIP acoplado a um sistema de rastreamento solar modelo ST-3 e sua projeção na horizontal (irradiância direta na horizontal I_{DH}) foi calculada pela Eq.(1):

$$I_{DH} = I_D * \cos \theta_z \quad (1)$$

onde $\cos \theta_z$ é o cosseno do ângulo zenital. A irradiância difusa I_d foi medida por um piranômetro Eppley modelo PSP posicionado no centro de um anel de sombreamento do tipo ME (Melo e Escobedo, 1994) nas dimensões 0,40 m de raio e 0,10 m de largura. O anel de sombreamento é mantido fixo e inclinado com ângulo igual a latitude local. Nesse sistema, o piranômetro translada

horizontalmente numa base móvel para compensar as variações da declinação solar ao longo do ano e assim permanecer abaixo da sombra produzida pelo anel. A irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento foi corrigida pelo fator isotrópico diário desenvolvido por Oliveira et al. (2002) através das Eq.(2) e Eq.(3) no intervalo de tempo média-5-minutos.

$$FC = \frac{1}{1 - F_p} \quad (2)$$

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \cdot \int_0^{\omega_s} \cos(\theta_z) d\omega \quad (3)$$

onde FC é o fator de correção isotrópico diário, Fp é a fração de perda de irradiância devido ao anel de sombreamento, b é a largura do anel, R o raio, δ a declinação solar, ϕ a latitude do local, ω o ângulo horário e θ_z o ângulo zenital. A irradiância difusa de referência I_{dREF} foi calculada pelo método da diferença por meio da Eq.(4) entre as irradiâncias global I_G e direta projetada na horizontal I_{DH} . O método da diferença é considerado mais preciso pelo fato de não necessitar a aplicação de fatores de correção.

$$I_{dREF} = I_G - I_{DH} \quad (4)$$

A irradiância extraterrestre I_o foi obtida pela multiplicação da constante solar ($I_{CS} = 1367W / m^2$) pelo cosseno do ângulo zenital (Eq.(5)).

$$I_o = I_{CS} * \cos \theta_z \quad (5)$$

A aquisição e o armazenamento dos dados foram efetuados por um Datalogger Campbell Scientific Inc modelo 21X operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias aritméticas no final de 300 leituras (intervalo de 5 minutos).

Os dados de irradiâncias solares foram submetidos a um controle de qualidade para eliminação de valores críticos no sentido de garantir a confiabilidade das medidas. Os valores medidos que não se enquadraram nas condições impostas abaixo foram descartados da confecção e da validação do modelo.

- $0 \leq I_G \leq I_o$
- $0 \leq I_{DH} \leq I_o$
- $0 \leq I_d \leq 0,80 I_o$
- $0 \leq I_d \leq 1,25 I_G$ (limite estabelecido pela aplicação do fator de correção isotrópico máximo de 25% para a estação do verão – Eq.(2) e Eq.(3)).

Os valores das irradiâncias foram integrados nas partições horária e diária. A partição mensal foi obtida através da média das irradiações diárias no mês.

O índice de claridade K_T (razão entre as irradiâncias global I_G e extraterrestre I_o) e a fração difusa K_{DF} (razão entre as irradiâncias difusa I_d e global I_G) foram calculadas pelas Eq.(6) e Eq.(7) nas partições de tempo horária, diária e mensal e representadas por K_T^h , K_T^d , K_T^m e K_{DF}^h , K_{DF}^d , K_{DF}^m respectivamente.

$$K_T = \frac{I_G}{I_0} \quad (6)$$

$$K_{DF} = \frac{I_d}{I_G} \quad (7)$$

A validação dos modelos de estimativa nas partições horária, diária e mensal foi realizada por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t (Stone, 1993).

$$MBE = \frac{\left(\sum_i^N (y_i - x_i) \right)}{N} ; RMSE = \frac{\left(\sum_i^N (y_i - x_i)^2 \right)^{1/2}}{N} ; t = \left(\frac{(N-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right)^{1/2} \quad (8)$$

onde y_i são os valores estimados, x_i os valores medidos e N o número de observações.

O desvio das médias MBE (Mean Bias Error) é um indicativo que provê informação no desempenho de um modelo a longo prazo. Um valor positivo indica uma superestimação, enquanto que para um valor negativo ocorre o inverso. Uma desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo. A raiz quadrada do desvio quadrático médio RMSE (Root Mean Square Error) fornece informação quanto ao desempenho do modelo à curto prazo. Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. Como desvantagem, apresenta um aumento significativo em sua magnitude para poucos valores discrepantes. O teste t de Student permite a comparação entre os valores calculados e medidos, além de indicar se um modelo é estatisticamente significativo ou não num determinado intervalo de confiança. Quanto menor o valor de t, melhor é o desempenho do modelo. Para que o modelo seja considerado estatisticamente significativo, o valor de t calculado deve se situar dentro do intervalo de confiança $(1 - \alpha)$ estabelecido para N graus de liberdade, ou seja, o valor de t deve estar entre $-t_c$ e t_c (t crítico). Valores de t localizados fora deste intervalo (região crítica) indicam que o parâmetro utilizado na modelagem não é estatisticamente significativo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Modelo anisotrópico de estimativa da irradiação solar difusa

Muitos modelos de estimativa da irradiação difusa encontrados na literatura são baseados na isotropia da radiação, os quais levam em consideração apenas o espalhamento uniforme da radiação ao colidir com o material particulado existente em suspensão na atmosfera. No entanto, devido à dinâmica atmosférica, este espalhamento não é uniforme e apresenta maior fluxo direcional no sentido atmosfera-terra. Segundo Suehrcke e McCormick (1988), o espalhamento não uniforme da radiação deve-se aos diferentes tamanhos de partículas encontrados na atmosfera (aerossóis, vapor d'água etc), gerando, assim, o efeito da anisotropia da radiação.

A anisotropia apresenta dependência do índice de claridade K_T . O índice de claridade K_T define o tipo de cobertura do céu, com céu nublado para $0 < K_T < 0,30$, céu parcialmente nublado para $0,30 < K_T < 0,65$ e céu aberto para $0,65 < K_T < 1$ (Liu e Jordan, 1960). Segundo Batlles et al (1995), os níveis de anisotropia em cada cobertura de céu são diferentes, aumentando à medida que o céu se torna claro. Nesse sentido, foram aplicadas correções numéricas anisotrópicas na irradiância difusa medida com anel de sombreamento propostas por Dal Pai e Escobedo (2007).

Para cobertura de céu nublado foi aplicado um fator de correção de 0,973; céu parcialmente nublado de 1,045 e céu aberto de 1,125.

A aplicação do controle de qualidade limitou a quantidade de dados de K_{DF} e K_T , com redução percentual diferenciada para cada partição na fase de modelagem. Para partição horária, redução de 22518 para 20808 observações (7,6%), visto que muitos dos valores de K_{DF} horários eliminados apresentaram grande variabilidade devido à elevada massa ótica dos horários do nascer e pôr-do-sol (Suehrcke e McCormick, 1988). Para partição diária, redução de 1767 para 1743 observações (1,4%); e para mensal, de 58 para 57 (1,7%).

Os valores experimentais da fração difusa K_{DF} e do índice de claridade K_T foram correlacionados na forma gráfica do tipo $K_{DF} \times K_T$. A Fig. 1 mostra as correlações de $K_{DF}^h \times K_T^h$, $K_{DF}^d \times K_T^d$ e $K_{DF}^m \times K_T^m$ para as partições horária, diária e mensal respectivamente.

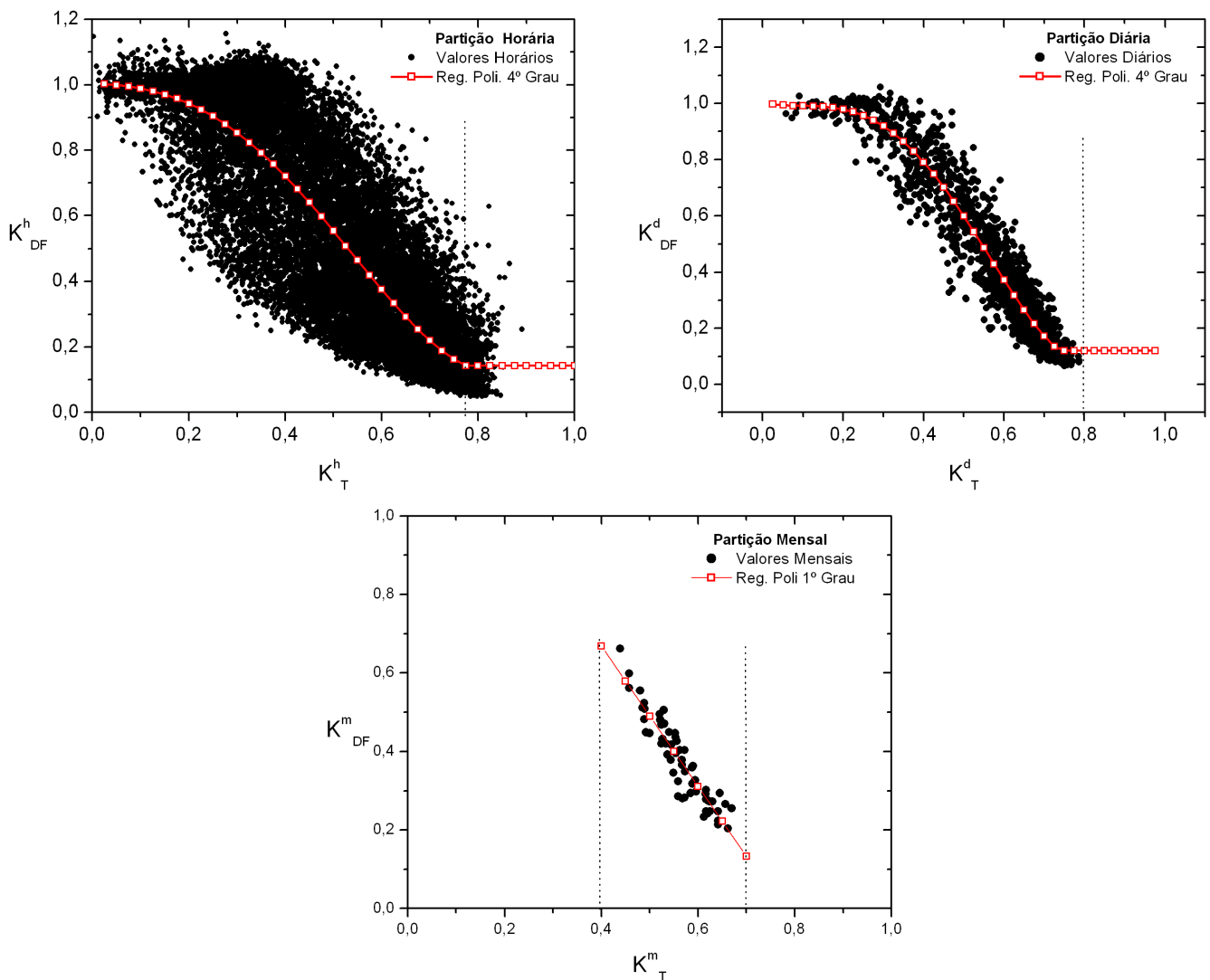


Figura 1. Correlação entre a fração difusa K_{DF} e o índice de claridade K_T . Partição horária, diária e mensal.

Alguns valores de K_{DF} foram maiores que 1 na cobertura nublada para as partições horária e diária, indicando uma radiação difusa maior que a global. Isto representa uma situação física improvável, visto que nesta cobertura, a radiação direta é praticamente nula, pois é barrada pelas nuvens e a radiação difusa é, no máximo, igual à radiação global. Esses valores ocorreram pela aplicação das correções isotrópicas inerentes ao método de medida da radiação difusa, variando de um mínimo de 8% para o inverno e um máximo de 25% para o verão (Oliveira et al, 2002). A

região de Botucatu é caracterizada por duas estações bem definidas (inverno seco com baixa nebulosidade e verão úmido com alta nebulosidade), com maior probabilidade de ocorrência de condições de céu nublado no verão, o que explica um aumento da radiação difusa em até 25% devido à aplicação dos fatores de correção isotrópicos.

A Fig.1 mostrou que, para valores de K_T intermediários, os níveis de dispersão da fração difusa K_{DF} decresceram no sentido do aumento da partição de tempo: a partição horária com maior dispersão; diária com dispersão moderada e mensal com o menor dispersão de K_{DF} . Partições de tempo menor 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. Para partições de tempo maior, como é o caso das partições diária e mensal, os efeitos da dinâmica atmosférica são suavizados através da integração dos valores instantâneos em intervalos de tempo maior, diminuindo a variabilidade dos valores de K_{DF} . No entanto, informações pontuais sobre a distribuição da radiação são perdidas no momento da integração (Suehrcke e McCormick, 1989).

No intervalo $0,8 < K_T < 1$ (partição horária), alguns valores de K_{DF} mostraram uma tendência de crescimento incompatível com a equação $I_g = I_d + I_{DH}$. Valores de K_T maiores que 0,8 indicam uma transmissividade atmosférica elevada (maior que 80%), representando uma situação física improvável, pois simula uma situação de ausência de atmosfera. Neste caso, o aumento da radiação global deve-se ao aumento da radiação difusa causada por reflexões da radiação direta ao incidir em nuvens da cobertura de céu parcialmente nublada, resultando no aumento dos valores de K_{DF} , principalmente para partições de tempo menor (Suehrcke e McCormick, 1988). Portanto, valores de K_{DF} situados neste intervalo serão desconsiderados na modelagem das equações de estimativa e na validação.

Devido à grande quantidade de pontos foi necessário representar a fração K_{DF} em função de valores médios. Dividiu-se o intervalo de K_T em subintervalos de 0,025 para as partições horária e diária e em subintervalos de 0,04 para a mensal e efetuou-se uma média de K_{DF} para cada subintervalo, representada por quadrados abertos na Fig.1. Este procedimento fornece um bom indicativo do comportamento médio da fração K_{DF} , porém informações sobre sua distribuição e variabilidade temporal são perdidas para um determinado valor de K_T . As linhas verticais pontilhadas representam os limites de aplicação dos modelos que serão utilizados na elaboração das equações de estimativa de K_{DF} .

As equações de estimativa da fração difusa K_{DF} para as partições horária, diária e mensal foram propostas em função do índice de claridade K_T a partir da expressão:

$$K_{DF} = \sum_{n=0}^N A_n (K_T)^n \tag{9}$$

onde A_n representa os coeficientes das equações de estimativa e N o grau do polinômio. Para as partições horária e diária foram propostas equações de estimativa de 4º grau e para mensal foi proposta uma equação de 1º grau, similar a equações de estimativa encontradas na literatura.

A Tab. 1 mostra os valores dos coeficientes A_n para as partições de tempo horária, diária e mensal do modelo anisotrópico de estimativa da radiação difusa e de alguns modelos da literatura, juntamente com seus respectivos intervalos de validade.

Tabela 1. Coeficientes dos modelos propostos a partir de regressões entre os diagramas K_T - K_{DF} e modelos da literatura para partições horária, diária e mensal.

Modelos	Valores Horários (Diagrama $K_T^h \times K_{DF}^h$)					
	Intervalo	A_0^h	A_1^h	A_2^h	A_3^h	A_4^h
1) Anisotrópico	$0 \leq Kt < 0,75$	1,004	-0,074	-0,394	-4,886	4,733
	$0,75 \leq Kt < 1$	0,143	--	--	--	--
Literatura						
1) Hawlader	$0 \leq Kt < 0,225$	0,915	--	--	--	--
	$0,225 \leq Kt < 0,775$	1,135	-0,942	-0,388	--	--
	$0,775 \leq Kt < 1$	0,215	--	--	--	--
2) De Miguel	$0 \leq Kt < 0,21$	0,995	-0,081	--	--	--
	$0,21 \leq Kt < 0,76$	0,724	2,738	-8,32	4,937	--
	$0,76 \leq Kt < 1$	0,180	--	--	--	--
Valores Diários (Diagrama $K_T^d \times K_{DF}^d$)						
	Intervalo	A_0^d	A_1^d	A_2^d	A_3^d	A_4^d
1) Anisotrópico	$0 \leq Kt < 0,73$	1,005	-0,360	3,634	-14,581	10,998
	$0,73 \leq Kt < 1$	0,121	--	--	--	--
Literatura						
1) Newland	$0,10 \leq Kt < 0,71$	0,971	0,561	-3,353	1,034	0,514
	$0,71 \leq Kt < 1$	0,18	--	--	--	--
2) De Miguel	$0 \leq Kt < 0,13$	0,952	--	--	--	--
	$0,13 \leq Kt < 0,80$	0,868	1,335	-5,782	3,721	--
	$0,80 \leq Kt < 1$	0,141	--	--	--	--
Valores Mensais (Diagrama $K_T^m \times K_{DF}^m$)						
	Intervalo	A_0^m	A_1^m	A_2^m	A_3^m	A_4^m
1) Anisotrópico	$0,30 \leq Kt < 0,70$	1,381	-1,783	--	--	--
Literatura						
1) Lalas	$0,30 \leq Kt < 0,70$	1,27	-1,45	--	--	--
2) Iqbal	$0,30 \leq Kt < 0,70$	0,958	-0,982	--	--	--

A Fig.2 mostra os modelos de estimativa da fração difusa K_{DF} em função do índice de claridade K_T para as partições horária, diária e mensal respectivamente. Os círculos representam os valores médios da fração difusa K_{DF} e a linha contínua o modelo de estimativa Anisotrópico com base nos dados de Botucatu a partir dos coeficientes apresentados na Tab.1. As demais linhas representam modelos de estimativa obtidos da literatura. Os modelos apresentaram semelhanças quanto ao formato das curvas, porém com níveis quantitativos médios diferenciados de K_{DF} para intervalos iguais de K_T , mostrando que os modelos de estimativa apresentaram dependência espacial e temporal.

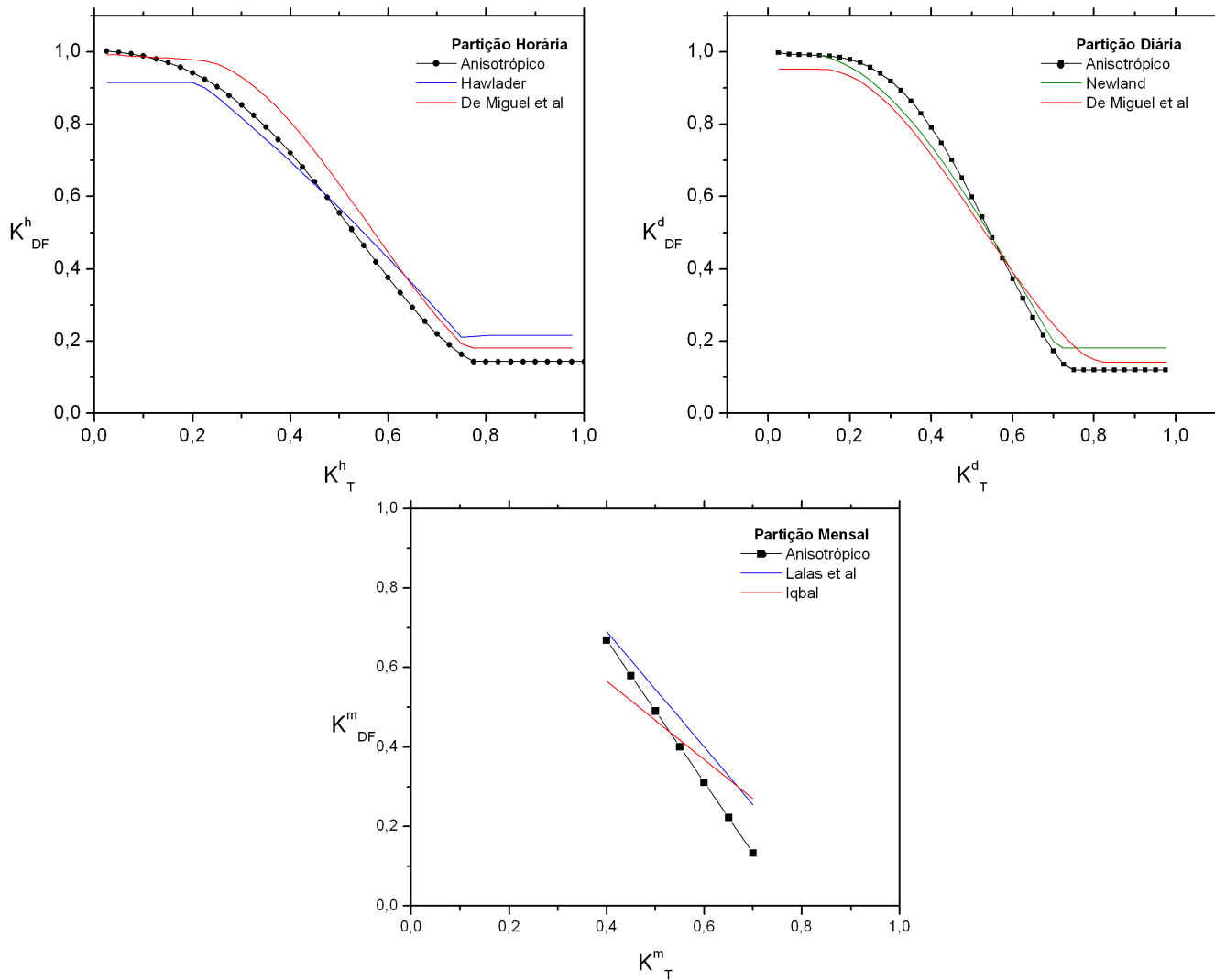


Figura 2. Modelos de estimativa de K_{DF} nas partições de tempo horária, diária e mensal.

3.2 Desempenho dos modelos de estimativa

Para se efetuar a validação, os valores estimados pelos modelos foram comparados com os valores medidos da irradiação difusa anisotrópica. A Tab.2 mostra o resultado da validação dos modelos de estimativa através dos indicativos MBE, RMSE e teste t.

Para partição horária, apesar do modelo de estimativa Anisotrópico apresentar o menor valor para o teste t, todos modelos de estimativa apresentaram valores para t calculado maiores que o t crítico, indicando que o parâmetro K_T utilizado na estimativa de K_{DF} não é estatisticamente significativo, ou seja, mais estudos devem ser realizados no sentido de se procurar outros parâmetros, além do índice de claridade K_T , para explicar as variações horárias da radiação difusa. Para partição diária, o modelo Anisotrópico foi o único modelo estatisticamente significativo, com t calculado de 1,084, menor que o t crítico de 1,635. Os demais modelos diários não são indicados na estimativa da radiação difusa para Botucatu, pois apresentaram valores de t calculado maiores que o t crítico de 1,645, indicando que foram elaborados para diferentes condições atmosféricas. Para partição mensal, o modelo Anisotrópico possui t calculado no valor de 0,665, menor que o t crítico de 1,711 e portanto estatisticamente significativo na estimativa da irradiação difusa média mensal. Todos os demais modelos apresentaram valores de t na região crítica e, portanto, não devem ser usados na estimativa mensal da irradiação difusa para Botucatu. Em geral, os modelos de estimativa da literatura não foram adequados para estimativa da radiação difusa em Botucatu visto que foram elaborados para localidades com condições atmosféricas diferentes e não levaram em consideração o aspecto anisotrópico da radiação.

Tabela 2. Comparação entre as irradiações difusa horária, diária e média mensal estimada e medida para Botucatu-SP.

Modelos	Valores Horários				
	Tamanho da Amostra (h)	MBE (MJ/m ²)	RMSE (MJ/m ²)	t _s	t _c
Anisotrópico	7321	-0,010	0,220	3,722	1,645
Hawlader	7321	0,054	0,235	20,44	1,645
De Miguel et al	7321	0,078	0,219	32,44	1,645
Valores Diários					
	Tamanho da Amostra (dia)	MBE (MJ/m ²)	RMSE (MJ/m ²)	t _s	t _c
Anisotrópico	670	0,059	1,400	1,084	1,645
Newland	670	0,591	1,513	10,96	1,645
De Miguel	670	0,712	1,710	11,83	1,645
Valores Médio Mensais					
	Tamanho da Amostra (mensal)	MBE (MJ/m ²)	RMSE (MJ/m ²)	t _s	t _c
Anisotrópico	24	-0,079	0,571	0,665	1,711
Lalas	24	1,542	1,594	18,26	1,711
Iqbal	24	0,667	0,897	5,33	1,711

4. CONCLUSÃO

O modelo de estimativa estatístico anisotrópico da fração difusa K_{DF} em função de K_T nas partições horária, diária e mensal proposto nesse trabalho apresentou a mesma tendência polinomial dos modelos clássicos nas partições horária, diária e mensal. Na validação do modelo de estimativa anisotrópico, em média, para as três partições, as difusas estimadas pelos modelos isotrópico e anisotrópico comparadas com a difusa de referência mostraram que a estimativa anisotrópica é consideravelmente mais precisa do que a estimativa isotrópica, fornecendo um diferencial aproximado de 1,5% em relação a difusa referência contra 6% da estimativa isotrópica.

5. REFERÊNCIAS

- Battles, F. J., Olmo, F. J., Alados-Arboledas, L. 1995. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, v.54, n.2, p.105-114.
- Dal Pai, A., Escobedo, J. F. 2007. Modelo numérico de correção anisotrópica para a irradiância solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento Melo-Escobedo. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, Fortaleza. Submetido.
- De Miguel, A., Bilbao, J., Aguiar, R., Kambezidis, H., Negro, E. 2001. Diffuse solar irradiation model evaluation in north Mediterranean belt area. *Solar Energy*, v.70, n.2, p.143-153.
- Drummond, A. J. 1956. On the measurements of sky radiation. *Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie*, v.7, pp.413-436.
- González, J., Calbó, J. 1999. Influence of the global radiation variability on the hourly diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, v.65, n.2, p.119-131.
- Hawlader, M. N. A. 1984. Diffuse, global and extraterrestrial solar radiation for Singapore. *International Journal of Ambient Energy*, v.5, p.31-38.

- Iqbal, M. 1979. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - I, Monthly average daily horizontal radiation. *Solar Energy*, v.1, p.81-86.
- Jacovides, C. P., Hadjioannou, L., Pashiardis, S., Stefanou, L. 1996. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. *Solar Energy*, v.56, n.6, p.565-572.
- Jain, S., Jain, P. C. 1998. A comparison of the Angstrom-type correlations and the estimation of monthly average daily global irradiation. *Solar Energy*, v.40, n.2, p.93-98.
- Lalas, D. P., Petrakis, M., Papadopoulos, C. 1987. Correlations for the estimation of the diffuse radiation component in Greece. *Solar Energy*, v.39, n.5, p.455-458.
- Lebaron, B. A., Michalsky, J. J., Perez, R. 1990. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, v.44, n.5, p.249-256.
- Liu, B. Y. H. E Jordan, R. C. 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.3, n.4, p.1-19.
- Melo, J. M. D., Escobedo, J. F. 1994. Medida da radiação solar difusa. In: ENERGIAS LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, Vigo, Espanha. Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY, v. 1.
- Newland, F. J. 1989. A study of solar radiation models for the coastal region of south China. *Solar Energy*, v.43, n.4, p.227-235.
- Oliveira, A. P., Escobedo, J. F., Machado, A. J. 2002. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Boston, v. 19, p. 698-708.
- Skartveit, A., Olseth, J. A. 1987. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar Energy*, v.38, p.271-274.
- Soler, A. 1990. 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.
- Stone, R. J. 1993. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, v.51, n.4, p.289-291.
- Suehrcke, H., McCormick, P. G. 1988. The diffuse fraction of instantaneous solar radiation. *Solar Energy*, v.40, n.5, p.423-430.
- Suehrcke, H., McCormick, P. G. 1989. The distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over the day. *Solar Energy*, v.42, n.4, p.303-309.
- Zangvil, A., Aviv, O. E. 1987. On the effect of latitude and season on the relation between the diffuse fraction of solar radiation and the ratio of global to extraterrestrial radiation. *Solar Energy*, v.39, n.4, p.321-327.

ANISOTROPIC ESTIMATE MODEL TO PREDICT HOURLY, DAILY AND MONTHLY DIFFUSE IRRADIATION

Abstract. A statistical estimate model for the anisotropic diffuse fraction as a function of clearness index K_T is proposed to estimate the hourly, daily and monthly diffuse irradiances. The global, diffuse measured by the shadowring ME and the direct radiations measurements were provided by the Laboratory of Solar Radiometry of UNESP/Botucatu/SP in the period from 1996 to 2002. The diffuse irradiance was measured by the Melo-Escobedo shadowring (radius of 40cm and width of 10cm). The anisotropic model was compared to classic models mentioned in the literature, with good results according to the statistical indicators MBE and RMSE for hourly, daily and monthly partitions, respectively. The results showed that the inclusion of the anisotropic correction improved the performance of the shadowring ME according to the MBE values for the three partitions: hourly, MBE (%) it was reduced from -7,206% to -1,736%; daily MBE (%) from -4,694% to 0,884% and monthly MBE (%) from -6,582% to -1,181%.

Keywords. Diffuse radiation, Estimate models, Anisotropy