

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ANISOTROPIA DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA MEDIDA PELO
MÉTODO DE SOMBREAMENTO MELO-ESCOBEDO: FATORES DE
CORREÇÃO ANISOTRÓPICOS E MODELOS DE ESTIMATIVA**

ALEXANDRE DAL PAI

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Fevereiro – 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ANISOTROPIA DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA MEDIDA PELO
MÉTODO DE SOMBREAMENTO MELO-ESCOBEDO: FATORES DE
CORREÇÃO ANISOTRÓPICOS E MODELOS DE ESTIMATIVA**

ALEXANDRE DAL PAI

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Escobedo

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Fevereiro – 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Dal Pai, Alexandre, 1974-
D149a Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo
método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção
anisotrópicos e modelos de estimativa / Alexandre Dal Pai.
-- Botucatu, [s.n.], 2005.
xii, 74 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) -- Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrônomicas.

Orientador: João Francisco Escobedo.

Inclui bibliografia.

1. Radiação solar. 2. Métodos estatísticos. 3. Anisotropia. I. Escobedo, João Francisco. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

CDD 551.5271

Oferecimento

Ofereço este trabalho de tese de doutorado aos meus queridos pais Vitalino e Francisca que nestes anos todos sempre acreditaram em meu potencial, mostrando-me os verdadeiros valores da vida.

Agradecimentos

Expresso meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas que, de uma forma ou de outra, tiveram uma contribuição significativa na realização deste trabalho:

Ao professor João Francisco Escobedo, pela oportunidade oferecida e pelos valiosos conselhos prestados em minha formação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Recursos Naturais.

Aos professores do curso de pós-graduação de Energia na Agricultura.

Às funcionárias da seção de pós-graduação Marilena, Marlene, Jaqueline e Kátia que, com paciência, prestaram valorosas informações no decorrer do curso.

Às funcionárias da Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas.

Aos colegas Antônio, Bandit, Eduardo, Flávio, Hildeu e Valéria.

Aos meus irmãos Emílio e Enzo pelo harmonioso convívio e pelas valorosas observações da vida humana.

Aos meus amigos Pedrão e Branco pelo companherismo e por elevarem meu moral através das vitórias obtidas nas calorosas partidas de futebol disputadas nas horas vagas de relaxamento e descontração.

À FAPESP pelo apoio financeiro dado ao Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu-SP.

E principalmente à Aline, que, com sabedoria, paciência e carinho, soube compreender todos os momentos que passamos juntos.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	1
SUMMARY.....	4
1 INTRODUÇÃO.....	7
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	10
2.1 Radiação Solar	10
2.2 Métodos do Anel de Sombreamento na medida da irradiância solar difusa.....	14
2.3 Modelos de Estimativa da radiação solar difusa	19
3 METODOLOGIA.....	21
3.1 Base de Dados e Instrumentação	21
3.2 Controle de Qualidade dos Dados	25
3.3 Indicativos Estatísticos	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1 Fatores de Correção Anisotrópicos	28
4.1.1 Modelo de Correção Anisotrópico e Validação	28
4.1.2 Comparação entre os Anéis de Sombreamento ME ₁ , ME ₂ e Drummond	34
4.1.3 Cálculo das Irradiações Horária, Diária e Mensal	36
4.1.4 Evolução Diária e Anual das Irradiações Difusa Isotrópica, Anisotrópica e de Referência	40
4.1.5 Desempenho do modelo anisotrópico – Correção do banco de dados	45
4.2 Modelos de Estimativa da Irradiação Solar Difusa	47
4.2.1 Modelagem	47
4.2.2 Desempenho dos Modelos de Estimativa	57
4.2.3 Modelo Anisotrópico da Irradiação Solar Difusa	59
5 CONCLUSÃO.....	66
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Correções anisotrópicas em função de intervalos discretos de K_T29
2 Indicativos estatísticos MBE(%) e RMSE(%) obtidos da comparação entre as irradiâncias difusa de referência e corrigida anisotropicamente nas três coberturas de céu.....	32
3 Coeficiente angular, coeficiente de determinação R^2 e indicativos estatísticos MBE e RMSE da comparação entre a irradiação difusa referência e as irradiações difusa horária, diária e mensal corrigidas anisotropicamente.....	40
4 Média anual das irradiações global A_{GM} , direta na horizontal A_{DH} e difusas referência A_{DF1} , isotrópica A_{DF2} e anisotrópica A_{DF3} medidas no período de 6 anos	46
5 Coeficientes do modelo Isotrópico proposto a partir de regressões entre os diagramas $K_{DF} \times K_T$ e modelos da literatura para partições horária, diária e mensal..	53
6 Indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t obtidos da comparação entre as irradiações difusa horária, diária e média mensal estimada e medida para Botucatu-SP.....	58
7 Coeficientes do modelo Anisotrópico proposto a partir de regressões entre os diagramas $K_{DF} \times K_T$ para partições horária, diária e mensal.....	61
8 Indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t obtidos da comparação entre as irradiações difusa horária, diária e média mensal de referência e medida para Botucatu-SP.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Espectro da radiação solar	12
2 Distribuição da radiação solar na superfície terrestre	13
3 Espalhamento da radiação difusa. a) Isotropia (Espalhamento Rayleigh). b) Anisotropia (Espalhamento Mie)	13
4 Esquema do anel de sombreamento: a) Drummond. b) Robinson e Stoch	16
5 Esquema do anel de sombreamento de Melo-Escobedo (ME)	17
6 Vista do Laboratório de Radiometria Solar da UNESP/Botucatu/SP.....	22
7 Aparelhos usados no monitoramento solar. a) Piranômetro com anel de sombreamento ME para irradiância difusa. b) Pireliômetro para irradiância direta na incidência. c) Piranômetro para irradiância global	23
8 Fator de correção isotrópico para os anéis de sombreamento de Melo-Escobedo e Drummond para latitude de Botucatu ($\phi = 22,85^{\circ}\text{S}$).....	24
9 Correções anisotrópicas em função de intervalos discretos de K_T . a) Nublado. B) Parcialmente nublado. c) Aberto	30
10 Correlação entre as irradiâncias difusa referência e anel de sombreamento corrigida anisotropicamente. a) Nublado. b) Parcialmente nublado. c) Aberto	33
11 Irradiâncias difusa de referência e medida pelos anéis de sombreamento: a) ME ₁ ; b) ME ₂ ; c) Drummond	35
12 Fluxograma operacional no gerenciamento da medida das irradiância difusa na partição média 5 minutos e integração horária, diária e mensal	37
13 Irradiação difusa de referência e corrigida anisotropicamente nas partições: (a) horária; (b) diária; (c) mensal	39
14 (a). Série temporal diária média horária das irradiações difusa de referência, isotrópica e anisotrópica. b) Desvio percentual (MBE %) entre as irradiações difusa isotrópica e anisotrópica em relação a irradiação difusa de referência	42
15 (a). Série temporal anual média mensal diária das irradiações difusa referência,	

isotrópica e anisotrópica. (b) Indicativo estatístico MBE(%) entre a irradiação difusa

Figura	Página
referência e as difusas corrigidas isotrópica e anisotropicamente.....	44
16 Irradiações médias mensais: global, direta na horizontal e difusa anisotrópica	46
17 Correlação entre a fração difusa K_{DF}^h e o índice de claridade K_T^h . Partição horária.....	48
18 Correlação entre a fração difusa K_{DF}^d e o índice de claridade K_T^d . Partição diária	48
19 Correlação entre a fração difusa K_{DF}^m e o índice de claridade K_T^m . Partição mensal.....	49
20 Modelos de estimativa de K_{DF}^h em função de K_T^h para partição horária.....	54
21 Modelos de estimativa de K_{DF}^d em função de K_T^d para partição diária.....	54
22 Modelos de estimativa de K_{DF}^m em função de K_T^m para partição mensal.....	55
23 Modelos de estimativa Isotrópico K_{DFiso}^h e Anisotrópico K_{DFani}^h em função de K_T^h para Botucatu (partição horária).....	62
.....	
24 Modelos de estimativa Isotrópico K_{DFiso}^d e Anisotrópico K_{DFani}^d em função de K_T^d para Botucatu (partição diária).	62
25 Modelos de estimativa Isotrópico K_{DFiso}^m e Anisotrópico K_{DFani}^m em função de K_T^m para Botucatu (partição média mensal).....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	Declinação solar (graus).
ϕ	Latitude local (graus).
ω	Ângulo horário (radianos).
θ_Z	Ângulo zenital.
R	Raio do anel de sombreamento (m).
b	Largura do anel de sombreamento (m).
FC	Fator de correção isotrópico
F_p	Fração de perda da radiação devido ao anel de sombreamento
I_{CS}	Constante solar (1367 W/m ²).
I_o	Irradiância extraterrestre (W/m ²).
I_G	Irradiância global (W/m ²).
I_{DN}	Irradiância direta na incidência (W/m ²).
I_{DH}	Irradiância direta na horizontal (W/m ²).
I_{DF}	Irradiância difusa (W/m ²).
I_{DFref}	Irradiância difusa referência (W/m ²).
$I_{DFisoME}$	Irradiância difusa corrigida isotropicamente medida pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo (W/m ²).
I_{DFani}	Irradiância difusa corrigida anisotropicamente (W/m ²).

R_G	Irradiação global (W/m^2).
R_{DH}	Irradiação direta na horizontal (W/m^2).
R_{DF}	Irradiação difusa (W/m^2).
H_G	Irradiação global horária (MJ/m^2).
H_{DN}	Irradiação direta na incidência horária (MJ/m^2).
H_{DH}	Irradiação direta na horizontal horária (MJ/m^2).
H_{DF}	Irradiação difusa horária (MJ/m^2).
H_{DFref}	Irradiação difusa de referência horária (MJ/m^2).
H_{DFani}	Irradiação difusa anisotrópica horária (MJ/m^2).
D_G	Irradiação global diária (MJ/m^2).
D_{DN}	Irradiação direta na incidência diária (MJ/m^2).
D_{DH}	Irradiação direta na horizontal diária (MJ/m^2).
D_{DF}	Irradiação difusa diária (MJ/m^2).
D_{DFref}	Irradiação difusa de referência diária (MJ/m^2).
D_{DFani}	Irradiação difusa anisotrópica diária (MJ/m^2).
M_{DFref}	Irradiação difusa de referência média mensal (MJ/m^2).
M_{DFani}	Irradiação difusa anisotrópica média mensal (MJ/m^2).
A_{GM}	Irradiação global medida média anual (MJ/m^2).
A_{G1}	Irradiação global média anual estimada através da soma da irradiação direta na horizontal e difusa de referência (MJ/m^2).

A_{G2}	Irradiação global média anual estimada através da soma da irradiação direta na horizontal e difusa isotrópica (MJ/m ²).
A_{G3}	Irradiação global média anual estimada através da soma da irradiação direta na horizontal e difusa anisotrópica (MJ/m ²).
A_{DH}	Irradiação direta na horizontal média anual (MJ/m ²).
A_{DF1}	Irradiação difusa referência média anual (MJ/m ²).
A_{DF2}	Irradiação difusa isotrópica média anual (MJ/m ²).
A_{DF3}	Irradiação difusa anisotrópica média anual (MJ/m ²).
K_T	Índice de claridade (razão entre as radiações global e extraterrestre).
K_T^i	Índice de claridade instantâneo (razão entre as irradiâncias global e extraterrestre).
K_T^h	Índice de claridade horário (razão entre as irradiações global e extraterrestre horárias).
K_T^d	Índice de claridade diário (razão entre as irradiações global e extraterrestre diárias).
K_T^m	Índice de claridade médio mensal (razão entre as irradiações global e extraterrestre médias mensais).
K_{DF}	Fração difusa (razão entre as radiações difusa e global).
K_{DF}^i	Fração difusa instantânea (razão entre as irradiâncias difusa e global).
K_{DF}^h	Fração difusa horária (razão entre as irradiações difusa e global horárias).
K_{DF}^d	Fração difusa diária (razão entre as irradiações difusa e global diárias).

K_{DF}^m	Fração difusa média mensal (razão entre as irradiações difusa e global médias mensais).
K_{DFiso}^h	Fração difusa horária (razão entre as irradiações difusa isotrópica e global horárias).
K_{DFiso}^d	Fração difusa diária (razão entre as irradiações difusa isotrópica e global diárias).
K_{DFiso}^m	Fração difusa média mensal (razão entre as irradiações difusa isotrópica e global médias mensais).
K_{DFani}^h	Fração difusa horária (razão entre as irradiações difusa anisotrópica e global horárias).
K_{DFani}^d	Fração difusa diária (razão entre as irradiações difusa anisotrópica e global diárias).
K_{DFani}^m	Fração difusa média mensal (razão entre as irradiações difusa anisotrópica e global médias mensais).
MBE	Desvio da média (Mean Bias Error) (MJ/m ²).
MBE(%)	Desvio da média (Mean Bias Error) (%).
RMSE	Raiz quadrada do desvio quadrático médio (Root Mean Square Error).
RMSE(%)	Raiz quadrada do desvio quadrático médio (Root Mean Square Error) (%).
t	teste t (teste estatístico)
t_e	valor do teste t estimado a partir dos dados de radiação
t_c	valor do teste t crítico (tabelado) para N graus de liberdade
α	Nível de significância.

RESUMO

No presente trabalho é apresentado um modelo de correção anisotrópico para radiação difusa medida com anel de sombreamento Melo-Escobedo (ME) em função do índice de claridade K_T (razão da radiação global pela extraterrestre). São propostos ainda dois modelos estatísticos da fração difusa isotrópica (K_{DFiso}) e anisotrópica (K_{DFani}) em função do índice de claridade K_T na estimativa das irradiações horária, diária e mensal. A base de dados das radiações global, direta na incidência e difusa medida pelo anel de sombreamento ME utilizada compreende o período de 1996 a 2002 monitorada pelo Laboratório de Radiometria Solar da UNESP/Botucatu/SP.

O modelo de correção anisotrópico, obtido a partir das irradiâncias difusa medida pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo (raio 40cm e largura 10cm) e

medida pelo método da diferença (referência), considerou três intervalos discretos de K_T por meio de três equações: $I_{DFani} = 0,973I_{DFisoME}$ ($0 < K_T < 0,30$ – nublado); $I_{DFani} = 1,045I_{DFisoME}$ ($0,30 < K_T < 0,65$ – parcialmente nublado); e $I_{DFani} = 1,125I_{DFisoME}$ ($0,65 < K_T < 1$ – aberto). O modelo anisotrópico foi validado comparando-se a irradiância difusa anisotrópica estimada com a irradiância difusa de referência numa base de dados independente, mostrando bons resultados conforme os indicativos estatísticos $MBE(\%) = 0,25\%$, $0,51\%$ e $-0,38\%$ e $RMSE(\%) = 5,78\%$, $9,83\%$ e $12,93\%$ para as coberturas de céu nublado, parcialmente nublado e aberto, respectivamente. O modelo anisotrópico mostrou ser dependente das dimensões do anel de sombreamento, e para uma mesma relação raio-largura, o anel de sombreamento com menor raio (20cm) e largura (5cm) necessitou de correção numérica 5% inferior em relação ao de maior raio (40cm) e largura (10cm).

O modelo de correção anisotrópico foi aplicado na medida da irradiância difusa gerenciada por um sistema operacional automatizado na frequência média 5 minutos da Estação de Radiometria Solar. No algoritmo, calculou-se as irradiações difusa horária, diária e mensal anisotrópica e comparou-se com as irradiações difusa de referência nas três partições. O resultado mostrou que a correção anisotrópica é precisa nas três partições, com: $MBE(\%)$ de $-0,37\%$ para partição horária, $-0,29\%$ para diária e $-0,24\%$ para mensal e $RMSE(\%)$ de $10,67\%$ para partição horária, $7,17\%$ para diária e $4,95\%$ para mensal. A partir da base de dados das irradiações difusa anisotrópica e de referência, foram analisados os desvios da série temporal diária média horária e anual média mensal diária entre as duas irradiações, encontrando-se os indicativos estatísticos $MBE(\%) = 3\%$ para série diária e $MBE(\%) = 2,92\%$ para série anual.

O modelo de estimativa para radiação difusa isotrópica e anisotrópica nas partições horária, diária e mensal, respectivamente, foram:

Modelo Isotrópico	Modelo Anisotrópico
$K_{Diso} = 1,025 + 0,237K_T - 2,861K_T^2 - 0,327K_T^3 + 2,184K_T^4$	$K_{Dani} = 1,004 - 0,074K_T - 0,394K_T^2 - 4,886K_T^3 + 4,733K_T^4$
$K_{Diso} = 1,033 - 0,261K_T + 2,011K_T^2 - 11,252K_T^3 + 9,082K_T^4$	$K_{Dani} = 1,005 - 0,360K_T + 3,634K_T^2 - 14,581K_T^3 + 10,998K_T^4$
$K_{Diso} = 1,336 - 1,740K_T$	$K_{Dani} = 1,381 - 1,783K_T$

A estimativa do modelo isotrópico foi comparada com a estimativa dos modelos clássicos citados na literatura tomando como padrão medidas da irradiação difusa isotrópica e obteve-se bons resultados conforme os indicativos estatísticos $MBE(\%) = -4,330\%$, $0,824\%$ e $-0,884\%$ e $RMSE(\%) = 38,620\%$, $20,460\%$ e $7,771\%$ para as partições horária, diária e mensal, respectivamente. Os modelos isotrópico e anisotrópico foram validados comparando-se as irradiações difusa isotrópica e anisotrópica estimadas com a irradiação difusa de referência. O resultado mostrou que a inclusão da correção anisotrópica melhora a performance do ângulo de sombreamento ME como mostra o valor de MBE nas três partições: horária, MBE(%) foi reduzido de $-7,206\%$ para $-1,736\%$; diária MBE(%) de $-4,694\%$ para $0,884\%$ e mensal MBE(%) de $-6,582\%$ para $-1,181\%$.

ANISOTROPY OF THE DIFFUSE SOLAR IRRADIANCE MEASURED BY THE MELO-ESCOBEDO SHADOWRING: ANISOTROPIC CORRECTION FACTORS AND ESTIMATE MODELS. Botucatu, 2004. 74p.

Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ALEXANDRE DAL PAI

Adviser: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

SUMMARY

The present work presents an anisotropic correction model as a function of the clearness index K_T (global/extraterrestrial radiation) for the diffuse radiation measurements with the Melo-Escobedo (ME) shadowring. Two statistical estimate models for the isotropic (K_{DFiso}) and anisotropic (K_{DFani}) diffuse fraction as a function of clearness index K_T are also 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 anisotropic correction model, obtained from the comparison between the diffuse irradiance measured by the Melo-Escobedo shadowring (radius of 40cm and width of 10cm) and the diffuse irradiance measured by the difference method (reference), considered three discrete K_T intervals, with three equations: ($0 < K_T < 0,30$ - cloudy); ($0,30$

$< K_T < 0,65$ - partially cloudy); and $(0,65 < K_T < 1$ - clear). The anisotropic correction model was validated through the comparison of the anisotropic diffuse irradiance and the reference diffuse irradiance with an independent database, showing good results according to the statistical indicators MBE (%) = 0,25%, 0,51% and -0,38% and RMSE (%) = 5,78%, 9,83% and 12,93% for cloudy, partially cloudy and clear skies, respectively. The anisotropic correction model showed to be dependent of the shadowing dimensions, and for a same radius-width relationship, the smaller radius (20cm) and width (5cm) shadowing needed smaller numeric correction than the larger ray (40cm) and width (10cm) one.

The anisotropic correction model was applied in the diffuse irradiance measurements obtained with a 5 minutes frequency automated operating system. The algorithm calculated hourly, daily and monthly anisotropic diffuse irradiances and compared to the ones from the reference diffuse irradiances. The MBE and RMSE statistical indicators showed better results with the use of the anisotropic correction in the three partitions, with: MBE (%) -0,37% for hourly, -0,29% for daily and -0,24% for monthly partitions and RMSE (%) 10,67% for hourly, 7,17% for daily and 4,95% for monthly partitions. With the anisotropic and reference diffuse irradiances database, the deviations of the daily mean hourly and annual mean monthly time series among the two irradiances was analyzed, with MBE (%) = 3% for daily series and MBE (%) = 2,92% for the annual series.

The isotropic and anisotropic diffuse irradiation estimate models for the hourly, daily and monthly partitions were, respectively:

Isotropic Model	Anisotropic Model
$K_{Diso} = 1,025 + 0,237K_T - 2,861K_T^2 - 0,327K_T^3 + 2,184K_T^4$	$K_{Dani} = 1,004 - 0,074K_T - 0,394K_T^2 - 4,886K_T^3 + 4,733K_T^4$
$K_{Diso} = 1,033 - 0,261K_T + 2,011K_T^2 - 11,252K_T^3 + 9,082K_T^4$	$K_{Dani} = 1,005 - 0,360K_T + 3,634K_T^2 - 14,581K_T^3 + 10,998K_T^4$
$K_{Diso} = 1,336 - 1,740K_T$	$K_{Dani} = 1,381 - 1,783K_T$

The isotropic model was compared to classic models mentioned in the literature, with good results according to the statistical indicators MBE (%) = -4,330%, 0,824% and -0,884% and RMSE (%) = 38,620%, 20,460% and 7,771% for hourly, daily and monthly partitions, respectively. The isotropic and anisotropic models were validated by comparing the isotropic and anisotropic diffuse irradiances to the reference diffuse irradiation. The result showed that the inclusion of the anisotropic correction improved the performance of the shadowing 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 solar radiation, measuring methods, correction factors, estimating models

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é fonte inesgotável de energia para diversos processos de conversão energética, e o seu conhecimento contribui para estudos nas áreas de engenharia, meteorologia, biologia, arquitetura, agronomia, florestal etc. Essa forma de energia é melhor aproveitada por meio do conhecimento dos níveis quantitativos da irradiação incidente numa determinada localidade e, nesse sentido, o monitoramento contínuo é importante no levantamento do potencial solar de uma região.

As bases de dados de radiação solar de várias estações meteorológicas espalhadas no mundo freqüentemente são compostas por medidas da radiação global, sendo que poucas medem a radiação difusa e são raras as estações que monitoram a radiação direta devido ao elevado investimento despendido nos aparelhos de medição. Uma solução para a formação de uma base de dados dessas três radiações então é medir duas dessas componentes, freqüentemente as radiações global e difusa, e estimar a

radiação direta por meio da relação $I_G = I_{DH} + I_{DF}$ (radiação global é a soma das radiações direta projetada na horizontal e difusa). Uma alternativa viável de medida da radiação difusa, com custos relativamente baixos, fácil manutenção e operação, é o método do anel de sombreamento.

As duas montagens mais conhecidas para o método do anel de sombreamento, com princípios operacionais diferentes, são: anel de Drummond (sensor fixo e anel com movimento de translação paralelo ao eixo-polar) e anel de Robinson e Stoch (sensor fixo e anel com movimento de rotação em torno de seu centro). Uma proposta recente vem atraindo diversos setores das áreas de conversão energética no sentido da facilidade de montagem, manutenção e operação, que é o método do anel de sombreamento de Melo-Escobedo (ME). Nesse método de medida da radiação difusa, o anel de sombreamento é mantido fixo e inclinado na latitude local, e o sensor (piranômetro), posicionado no plano horizontal, translada paralelamente ao plano do horizonte local para compensar a variação da declinação solar. No entanto, pelo fato deste método ser recente, estudos devem ser realizados para melhorar a eficácia desse método de medida, a fim de torná-lo viável no monitoramento de rotina da radiação solar difusa em estações meteorológicas.

Para o anel de sombreamento ME, nenhum estudo foi realizado sobre o efeito da anisotropia da irradiância difusa, que é complexo nos métodos de sombreamento. Nesse sentido, neste trabalho é proposto os seguintes objetivos: 1) Quantificar o efeito da anisotropia na medida da irradiância difusa pelo anel de sombreamento ME e propor correções numéricas anisotrópicas em função de intervalos discretos da transmissividade atmosférica K_T ; 2) Validar os modelos de correção

anisotrópica na mesma frequência de aquisição das medidas; 3) Comparar os fatores de correção anisotrópicos para diferentes configurações de geometria e princípio operacional do anel de sombreamento. 4) Avaliar o desempenho da correção anisotrópica 5 minutos nos valores calculados das irradiações difusa horária, diária e mensal; 5) Avaliar o desempenho da correção anisotrópica 5 minutos nas séries temporais diária média horária e anual média mensal diária; 6) Propor dois modelos de estimativa da irradiação difusa: um modelo baseado na isotropia e um modelo baseado na anisotropia da radiação por meio da aplicação das correções anisotrópicas 5 minutos nas partições de tempo horária, diária e mensal e compará-los à modelos citados da literatura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Radiação Solar

A radiação solar é de fundamental importância como fonte primária de energia para inúmeros processos atmosféricos e terrestres, tais como circulação de massas de ar e correntes oceânicas, processos fotossintéticos, conversão de biomassa, iluminação passiva e ativa, etc.

O sol é uma esfera gasosa, com temperatura de 6000K na superfície da fotosfera, 1×10^6 K na corona e 1×10^7 K em seu interior. Sua elevada temperatura interior promove a conversão de hidrogênio em hélio, resultando na emissão de grande quantidade de energia. O sol emite cerca de 62×10^3 kW/m² e apenas $0,5 \times 10^{-7}$ % dessa energia atinge a o topo da atmosfera terrestre, correspondendo a um total de $1,6 \times 10^{24}$ kW (Coulson, 1973).

A radiação solar ao incidir no topo da atmosfera recebe o nome de radiação solar extraterrestre e corresponde a constante solar $I_{CS}=1367 \text{ W/m}^2$ multiplicada pelo cosseno do ângulo zenital θ_z . Ao entrar na atmosfera, a intensidade da radiação é modificada por três processos físicos: reflexão; absorção por gases atmosféricos; e espalhamento (difusão) causado por moléculas de gases, vapor d'água, poeira, e outras partículas de aerossóis e, ao atingir a superfície terrestre, recebe o nome de radiação solar global. A Figura 1 mostra o espectro da radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar, juntamente com as bandas de absorção por água, ozônio e dióxido de carbônico. A radiação solar global é composta por duas componentes: radiação solar direta, que é a parcela transmitida diretamente sem interação com a atmosfera, atingindo a superfície num ângulo de incidência normal a sua transmissão; e radiação solar difusa, proveniente do espalhamento da radiação por gases e partículas suspensas na atmosfera e das multi-reflexões ocorridas na atmosfera (Figura 2).

O espalhamento da radiação é classificado em função do tamanho das partículas em relação ao comprimento de onda da radiação incidente: espalhamento Rayleigh, para partículas da ordem de 10% do tamanho do comprimento de onda incidente e espalhamento Mie, para partículas da ordem do comprimento de onda (Figura 3). O espalhamento Rayleigh é causado principalmente pela interação com os gases oxigênio e nitrogênio e ocorre para situações de atmosfera limpa e livre de poluição. Esse espalhamento é conhecido como espalhamento isotrópico, pois a radiação é espalhada uniformemente tanto no sentido atmosfera-solo como no sentido atmosfera-espaco. O espalhamento Mie é causado por aerossóis e vapor d'água, ocorrendo portanto para situações de atmosferas poluídas e túrbidas. O espalhamento causado por partículas maiores deixa de ser uniforme, havendo um maior fluxo radiativo no sentido atmosfera-solo do que atmosfera-espaco. Esse efeito recebe o

nome de anisotropia da radiação, e é mais marcante na região em torno da aureola solar, causando o surgimento da radiação circunsolar, computada na forma de radiação difusa.

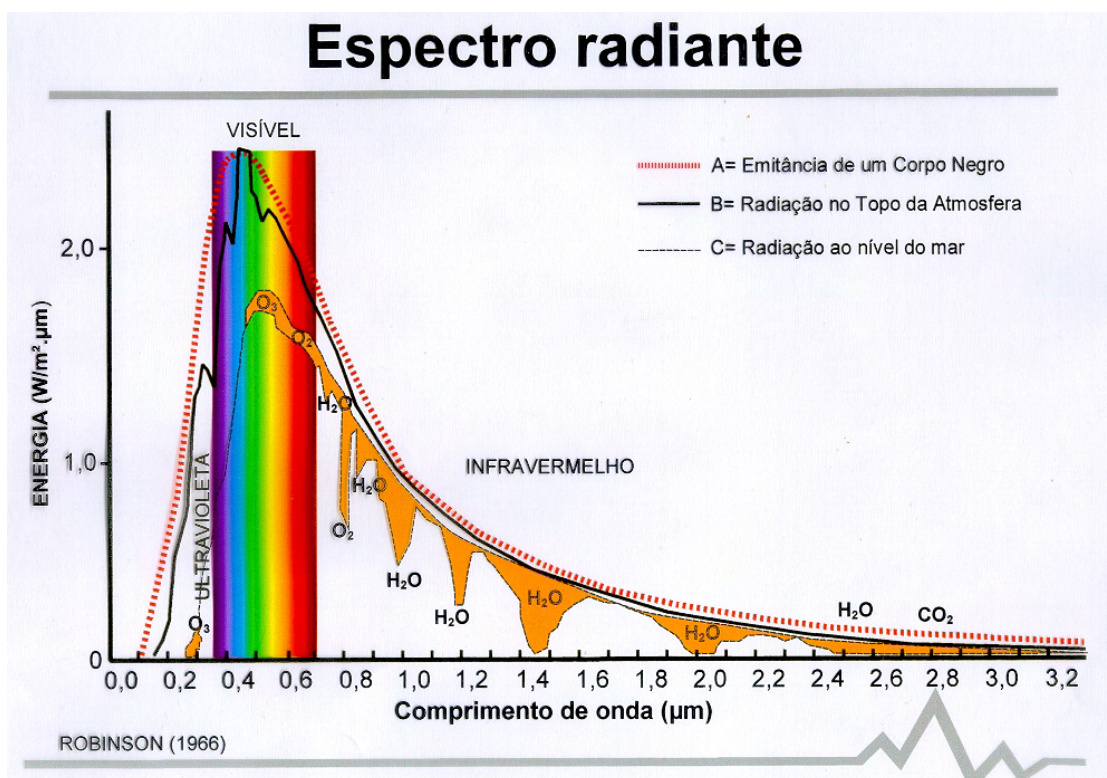


Figura 1. Espectro da radiação solar.

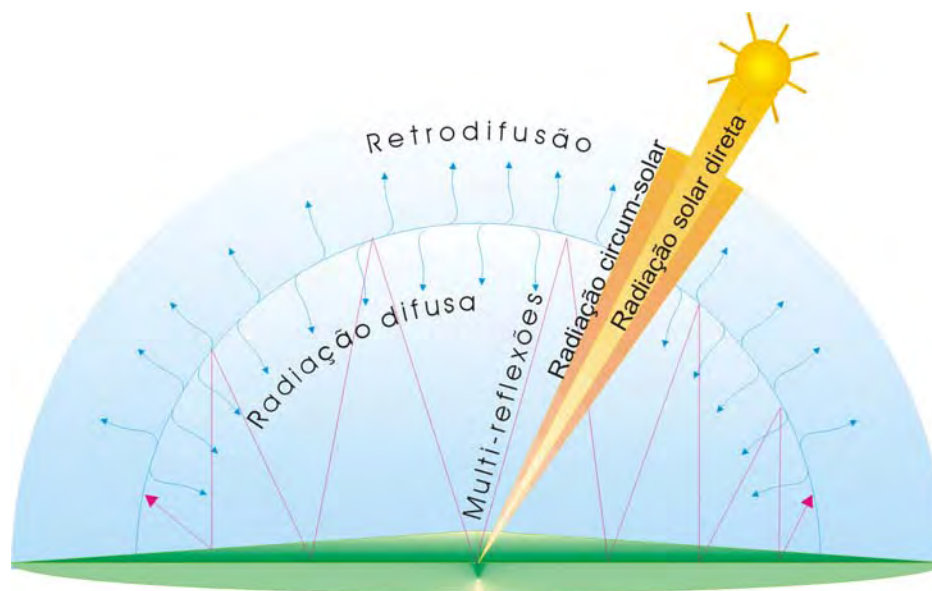


Figura 2. Distribuição da radiação solar na superfície terrestre.

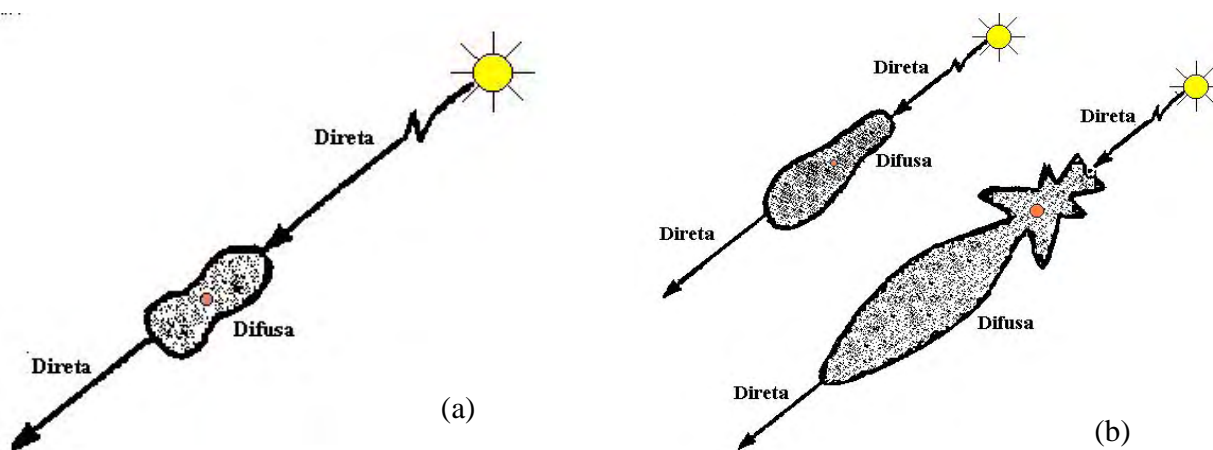


Figura 3. Espalhamento da radiação difusa. a) Isotropia (Espalhamento Rayleigh). b) Anisotropia (Espalhamento Mie). (Iqbal, 1983)

2.2 Método do anel de sombreamento na medida da irradiância solar difusa

O conhecimento da radiação solar direta é imprescindível para avaliação do rendimento de conversão de energia radiante nos processos térmicos e fotovoltaicos em sistemas coletores-concentradores solares. O alto custo dos equipamentos de medida tem levado os pesquisadores a procurar meios mais práticos e baratos para obter informações dessa componente solar. Uma alternativa que tem obtido sucesso é o método por diferença, no qual as radiações global e difusa são monitoradas, e a radiação direta é calculada por diferença na superfície horizontal conforme a equação (1).

$$I_{DH} = I_{DN} * \cos \theta_Z = I_G - I_{DF} \quad (1)$$

onde I_{DH} é a irradiância direta na horizontal em W/m^2 calculada por meio da irradiância direta na incidência normal I_{DN} pelo cosseno do ângulo zenital θ_Z ; I_G é a irradiância global em W/m^2 e I_{DF} é a irradiância difusa em W/m^2 . A irradiação direta horária H_{DH} e diária D_{DH} em MJ/m^2 pode ser obtida usando a equação (1) a partir das integrações das curvas de irradiância I_G e I_{DF} em intervalos de tempo horário e diário.

Segundo Iqbal (1983), a irradiância global é facilmente monitorada na superfície horizontal por meio de um piranômetro, enquanto que a irradiância difusa utiliza dois métodos: disco de sombreamento e anel de sombreamento. No método do disco de sombreamento, o piranômetro posicionado no plano horizontal é sombreado por um disco móvel que bloqueia a radiação direta, permitindo somente a incidência da radiação difusa. O método do disco envolve mecanismo de rastreamento solar similar aos usados nos

pireliômetros, o que encarece o custo do sistema e inviabiliza a instalação de tais sistemas em laboratórios de rotina (Painter, 1981).

No método do anel de sombreamento, o anel, com seu eixo principal alinhado na direção norte-sul e inclinado com ângulo igual a latitude local, obstrui a irradiância direta sobre o piranômetro posicionado na área sombreada pelo anel, permitindo apenas a incidência da irradiância difusa. O anel de sombreamento não necessita de rastreamento solar, exigindo apenas correções mecânicas diárias.

Diferentes montagens encontram-se citadas na literatura e as mais conhecidas são as de Drummond (1956) (Figura 4a) e Robinson e Stoch (1964) (Figura 4b). Na montagem de Drummond, o piranômetro mantém-se fixo e o anel de sombreamento translada paralelamente ao eixo polar para compensar as variações da declinação solar. Na montagem de Robinson e Stoch, o piranômetro mantém-se fixo no centro do anel, o qual é rotacionado em torno de seu centro para compensar as variações da declinação solar. Das duas montagens, a de Drummond é atualmente a mais utilizada e comercializada.

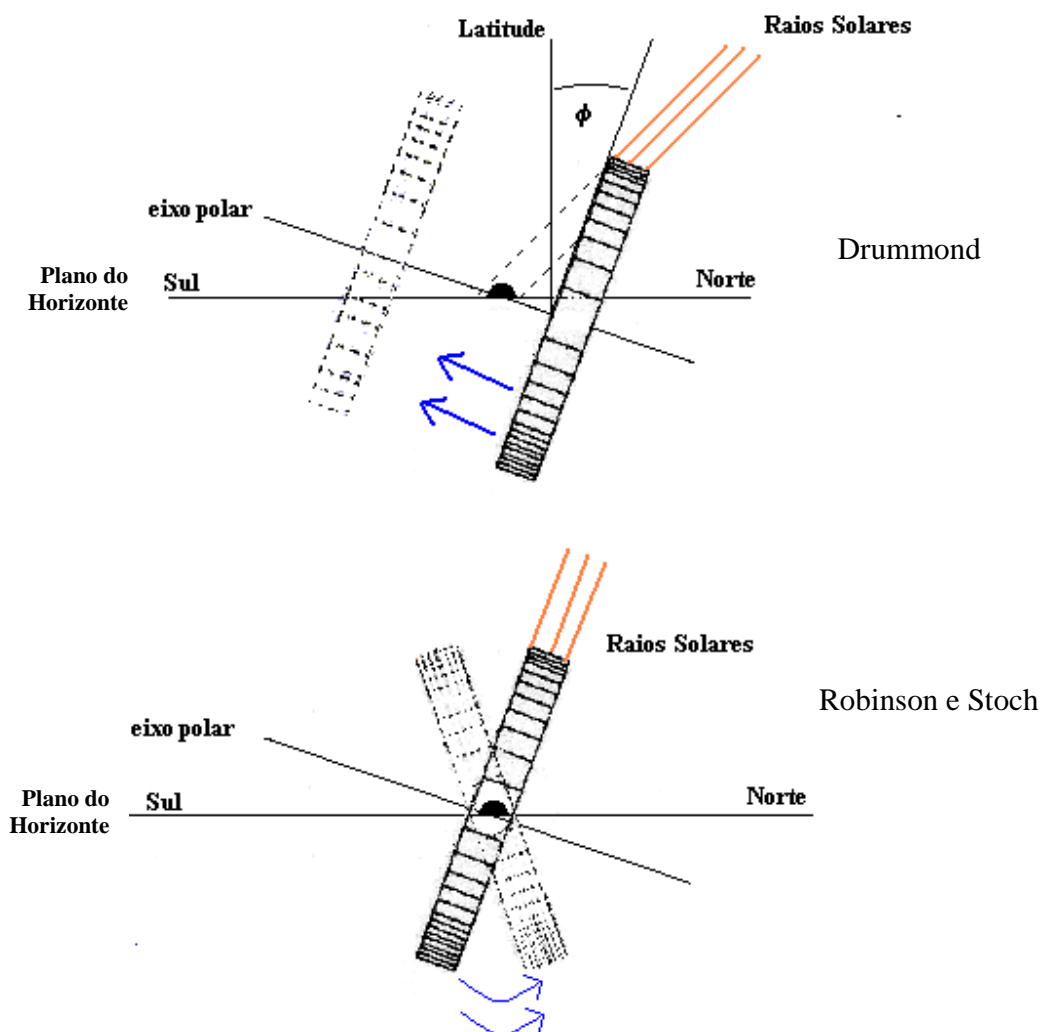


Figura 4 – Esquema do anel de sombreamento: a) Drummond. b) Robinson e Stoch.

Uma montagem alternativa de baixo custo e fácil operação e manutenção foi proposta por Melo e Escobedo (1994) – montagem ME – cujo princípio operacional é inverso à montagem de Drummond. Nesse sistema, o anel de sombreamento é mantido fixo e inclinado com ângulo igual a latitude local, e para compensar a declinação solar, o piranômetro translada paralelamente ao plano do horizonte local numa base móvel para permanecer abaixo da sombra produzida pelo anel (Figura 5).

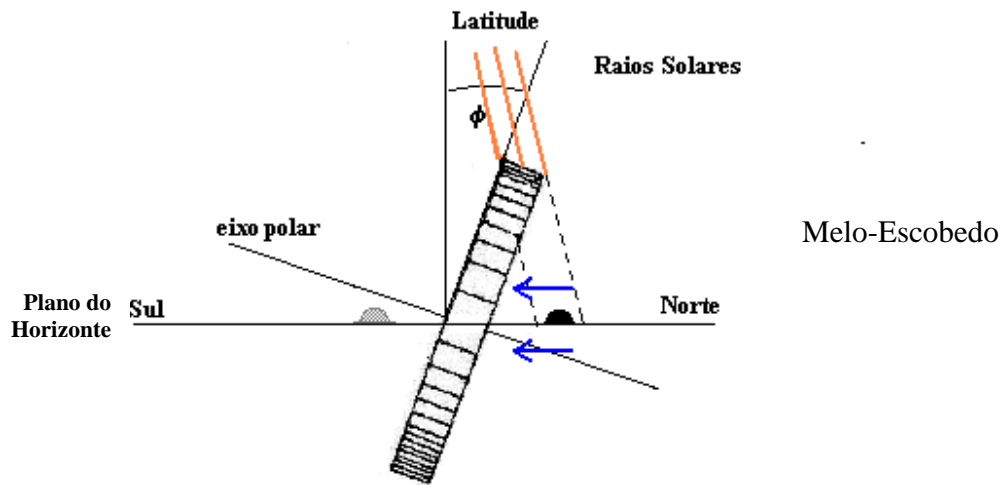


Figura 5 – Esquema do anel de sombreamento de Melo-Escobedo (ME).

O método do anel de sombreamento tem como desvantagem o uso de fatores de correção (FC) para compensar a parcela (F_p) da irradiância difusa barrada pelo anel de sombreamento (Drummond, 1956; Kasten et al, 1983; Dehne, 1984; Stanhill, 1985) dada pela equação (2). Para os anéis de Drummond e Robinson, as frações de perda (F_p) são baseadas na isotropia da radiação, e levam em consideração apenas o uso de fatores geométricos (raio e largura do anel) e geográficos (latitude e declinação solar), dadas pelas equações (3) e (4). Para a montagem ME, Oliveira et al (2002a) desenvolveu analiticamente a fração de perda para o anel (equação (5)) em função de parâmetros geométricos e geográficos.

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

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) [\cos(\delta)]^3 \cdot \int_0^{w_s} \cos(\theta_z) dw \quad (3)$$

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cdot \cos(\delta) \cdot \int_0^{w_s} \cos(\theta_z) dw \quad (4)$$

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cdot \cos(\delta) \cdot \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \cdot \int_0^{w_s} \cos(\theta_z) dw \quad (5)$$

onde 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.

Diversos pesquisadores têm mostrado que a aplicação da correção isotrópica (equações (3), (4) e (5)) não contempla efeitos atmosféricos (turbidez, nebulosidade, poluição, vapor d'água) que são responsáveis pela anisotropia na radiação difusa. Nesse sentido, Kasten et al. (1983) e Pollard e Langevine (1988) introduziram correções baseadas em parâmetros anisotrópicos como índice de claridade K_T (razão entre a radiação global e a radiação extraterrestre), ângulo zenital e turbidez atmosférica associados à correção isotrópica para melhorar a precisão da medida da irradiância difusa pelo anel de sombreamento de Drummond. Dehne (1984) observou que as correções anisotrópicas apresentaram dependência espacial, enquanto que Painter (1981) e Stanhill (1985) verificaram que as correções anisotrópicas apresentaram dependência sazonal, causadas principalmente pelos diferentes tamanhos e níveis de concentração de aerossóis na atmosfera. Sirén (1987) relacionou a correção anisotrópica com a razão largura-raio do anel de sombreamento e verificou que

quanto menor for a razão, menor será a correção anisotrópica. LeBaron et al (1990) propôs modelos de correção anisotrópica da irradiância difusa para anel de sombreamento por meio da combinação de três parâmetros anisotrópicos (ângulo zenital, índice de claridade e brilho solar) e um parâmetro isotrópico (geométrico e geográfico), destacando o índice de claridade como o parâmetro mais significativo na representação das condições anisotrópicas do céu. Nesse direção, Iqbal (1983) recomenda correções anisotrópicas diferenciadas para o anel em função do índice de claridade K_T da ordem de: 3% para $0 < K_T < 0,30$, 5% $0,30 < K_T < 0,65$ e 7% para $0,65 < K_T < 1$. Battles et al (1995) usaram os mesmos parâmetros de LeBaron e desenvolveram dois métodos numéricos de correção por meio de regressão linear múltipla: o primeiro método utiliza todos os parâmetros numa única equação, enquanto que o segundo utiliza os parâmetros geométrico, ângulo zenital e brilho solar agrupados em função de quatro intervalos do índice de claridade, num total de quatro equações de correção numérica.

2.3 Modelos de estimativa da radiação solar difusa

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, sensoriamento remoto e superfícies inclinadas, que utilizam esta informação como parâmetro de entrada em modelos de balanço energético ou para otimização energética em análises termais e de conforto térmico.

A maioria das estações meteorológicas espalhadas no mundo medem de forma rotineira apenas a radiação solar global, enquanto que medidas das radiações direta e difusa são escassas devido ao elevado custo dos métodos de medidas e 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 primeiro trabalho que relacionou a radiação difusa com a radiação global foi proposto por Liu e Jordan (1960), correlacionando a fração difusa K_{DF} (razão entre a radiação difusa e a radiação global) em função do índice de claridade K_T (razão da radiação global pela radiação extraterrestre). 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 (Orgill e Hollands, 1977; Skartveit e Olseth, 1987; González e Calbó, 1999) e mensal (Iqbal, 1979; Hay, 1979; Lalas et al., 1987).

A fração difusa K_{DF} depende da altitude, latitude, declinação solar, turbidez atmosférica, vapor d'água e da distribuição de nuvens. No entanto, a concentração dessas variáveis apresenta dependência temporal e espacial, causando a grande variabilidade nos valores da radiação difusa. Nesse sentido, os vários modelos de estimativa encontrados na literatura apresentam divergências em função da atmosfera local, além das técnicas de medida, instrumentos etc (Vignola e McDaniels, 1984; Zangvil e Aviv, 1987; Soler, 1990).

A maioria dos modelos de estimativa da radiação solar difusa propostos na literatura foram elaborados levando-se em consideração o comportamento isotrópico da radiação. Entretanto, a situação de isotropia não contempla com precisão as mudanças rápidas ocorridas na atmosfera, o que limita a aplicação dos modelos estatísticos na estimativa da radiação solar difusa. Para se obter um melhor desempenho das equações de estimativa da radiação solar difusa, recomenda-se a inclusão do efeito da anisotropia na fase de modelagem estatística (LeBaron et al., 1990; Battles et al, 1995).

3 METODOLOGIA

3.1 Base de Dados e Instrumentação

A Figura 6 mostra o Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu (latitude $22,85^{\circ}$ S, longitude $48,45^{\circ}$ O, altitude 786 m), situado na Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP/Botucatu, responsável pelo monitoramento ininterrupto, desde 1996, das irradiâncias global, direta na incidência e difusa pelos métodos da diferença, disco e anel de sombreamento. Atualmente, o Laboratório mede, além das irradiâncias já citadas, as irradiâncias global e difusa em superfície inclinada, refletida, irradiâncias espectrais ultra-violeta, fotossinteticamente ativa, infra-vermelho de ondas curto e longo e saldo de ondas curto e longo. Para o estudo foram utilizadas as irradiâncias global, direta na incidência e difusa pelos métodos da diferença e anel de sombreamento.



Figura 6. Vista do Laboratório de Radiometria Solar da UNESP/Botucatu/SP.

A irradiância global I_G é medida por um piranômetro Eppley- PSP ($K = 8,13 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$); a irradiância direta na incidência I_{DN} por um pireliômetro Eppley-NIP ($K = 7,73 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$) acoplado a um sistema de rastreamento solar ST-3; e a irradiância difusa I_{DF} através de 3 anéis de sombreamento do tipo: ME₁ nas dimensões 0,40m de raio e 0,10m de largura com piranômetro Eppley-PSP ($K = 8,17 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$); ME₂ nas dimensões 0,20m de raio e 0,05m de largura com piranômetro Kipp-Zonen ($K = 11,99 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$); Drummond nas dimensões 0,20m de raio e 0,05m de largura com piranômetro Kipp-Zonen ($K=9,93 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$). A Organização Mundial de Meteorologia (1965) definiu três classes de piranômetros, com base na sua precisão e sistema completo de desempenho. Todos os piranômetros desenvolvidos necessitam de uma calibração com relação a uma radiação primária padronizada, não podendo ser, portanto, classificados como piranômetros padrão. Os

piranômetros da Eppley e da Kipp-Zonen utilizados no estudo são classificados como piranômetros de 1ª classe, apresentando as seguintes características: sensibilidade ($\pm 0,1$ W/m²); estabilidade ($\pm 1\%$ de mudança por ano); temperatura ($\pm 1\%$ /°C); seletividade ($\pm 1\%$); linearidade ($\pm 1\%$); constante de tempo (25s); resposta ao cosseno ($\pm 3\%$); e resposta ao azimute ($\pm 3\%$).

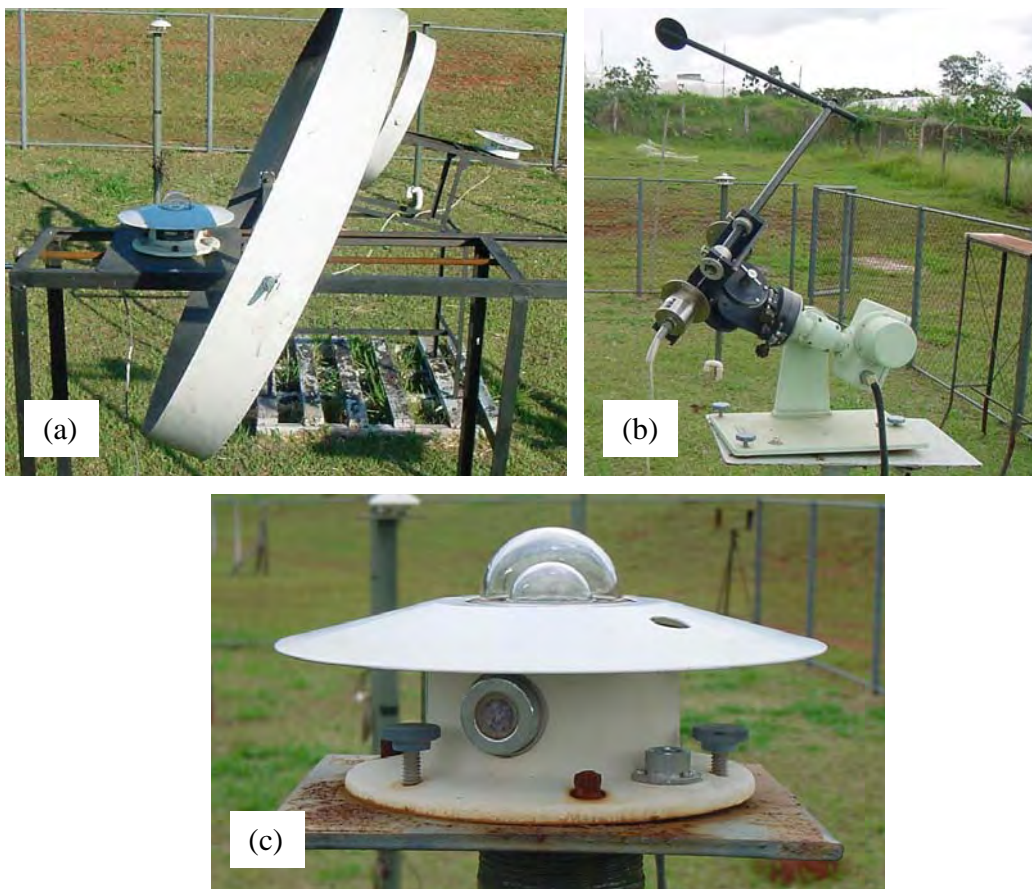


Figura 7. Aparelhos usados no monitoramento solar. a) Piranômetro com anel de sombreamento ME para irradiância difusa. b) Pireliômetro para irradiância direta na incidência. c) Piranômetro para irradiância global.

A Figura 7 mostra os aparelhos de medidas das irradiâncias global (piranômetro), direta na incidência (pireliômetro acoplado ao sistema rastreador solar) e difusa (piranômetro com anel de sombreamento ME). As irradiâncias difusa medidas pelos anéis de sombreamento ME foram corrigidas a partir da aplicação do fator isotrópico diário através das equações (2) e (5) e a irradiância difusa pelo anel de Drummond através das equações (2) e (3) (Figura 8) no intervalo de tempo média de 5 minutos. A irradiância difusa de referência I_{DFref} foi calculada pelo método da diferença por meio da equação (1) entre as irradiâncias global e direta projetada na horizontal.

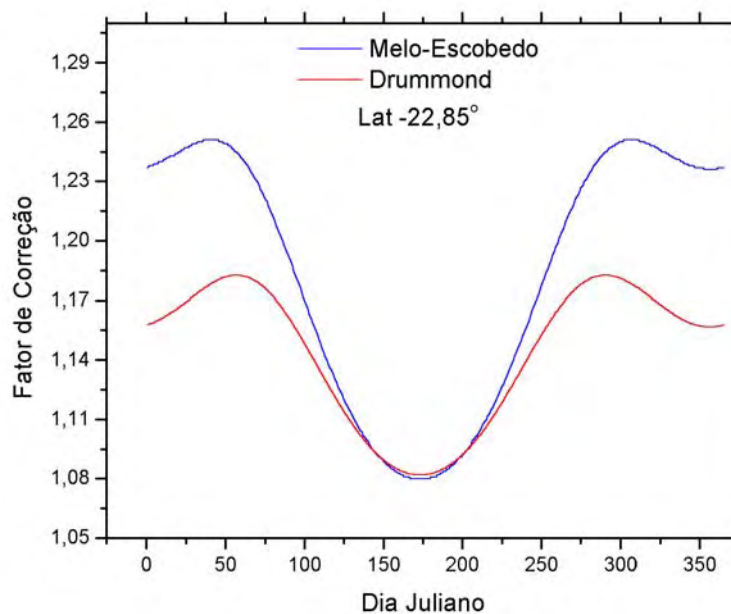


Figura 8. Fator de correção isotrópico para os anéis de sombreamento de Melo-Escobedo e Drummond para latitude de Botucatu ($\phi = 22,85^{\circ}\text{S}$).

Os fatores de correção isotrópicos das montagens de Melo-Escobedo e Drummond apresentados na Figura 8 mostram diferenças quantitativas significativas para os

meses da estação do verão, período em que há maior diferença da distância sensor-anel entre as duas montagens (equações (2), (3) e (5)).

A irradiância direta projetada na horizontal I_{DH} foi calculada por meio da multiplicação da irradiância direta na incidência I_{DN} pelo cosseno do ângulo zenital θ_Z e a irradiância extraterrestre I_o no topo da atmosfera por meio da multiplicação da constante solar $I_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$ pelo cosseno do ângulo zenital θ_Z .

A aquisição e o armazenamento dos dados foram realizados por um sistema de aquisição de dados automático digital Datalogger Campbell Scientific Inc, modelo 21X, programado para operar numa frequência de 1 Hz, realizando leituras a cada segundo e armazenando médias aritméticas no final de 300 leituras ou intervalo de 5 minutos.

O estudo dos fatores de correção anisotrópicos foi realizado com uma base de dados de 5 anos (1996 a 2000) e validação com 2 anos (2001 a 2002). A comparação entre os anéis de sombreamento ME_1 , ME_2 e Drummond foi realizada com dados de 2 anos (2000 a 2001), período em que foram medidas estas três irradiâncias difusa simultaneamente. Para uma aplicação do modelo de correção foi usado um banco de dados de 7 anos, de 1996 a 2002. Na elaboração dos modelos de estimativa isotrópico e anisotrópico foi utilizada uma base de dados de 5 anos (1996 a 2000) e validação com 2 anos (2001 e 2002).

3.2 Controle de qualidade dos dados

Os dados de irradiâncias solares foram submetidos a um controle de qualidade no sentido de se eliminar os valores espúrios e garantir a confiabilidade das medidas. As condições impostas aplicadas consistiram nas seguintes operações:

- 1) $0 \leq I_G \leq I_o$
- 2) $0 \leq I_{DH} \leq I_o$
- 3) $0 \leq I_{DF} \leq 0,80 I_o$
- 4) $0 \leq I_{DF} \leq 1,25 I_G$ (limite estabelecido pelo fator de correção isotrópico máximo de 25% aplicado na irradiância difusa medida por anel de sombreamento para a estação do verão - Equação (2) e (5) e Figura 8)

3.3 Indicativos Estatísticos

A validação dos modelos de estimativa isotrópico e anisotrópico, dos modelos de correção anisotrópica na partição média 5 minutos e o seu desempenho num aplicativo de recuperação do banco de dados nas partições horária, diária e média mensal foram realizados através dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t (Stone, 1993).

$$MBE = \left(\sum_i^N (y_i - x_i) / N \right) \quad (6a)$$

$$MBE(\%) = 100 \frac{\left(\sum_i^N (y_i - x_i) / N \right)}{\bar{X}} \quad (6b)$$

$$RMSE = \left(\sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N \right)^{1/2} \quad (7a)$$

$$RMSE(\%) = 100 \frac{\left(\sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N \right)^{1/2}}{\bar{X}} \quad (7b)$$

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

onde y_i são os valores estimados, x_i os valores medidos, N o número de observações e \bar{X} é o valor médio medido.

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 um valor negativo subestimação. 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. A desvantagem é que bastam alguns poucos valores discrepantes para que ocorra um aumento significativo em sua magnitude. O teste t de Student indica 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 um grande número de observações N , a distribuição t de Student assume o comportamento de uma distribuição normal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Fatores de Correção Anisotrópico

4.1.1 Modelo de Correção Anisotrópico e Validação

Na geração do modelo de correção anisotrópico, a base de dados de irradiância difusa medida pelo anel ME₁ foi separada e agrupada em função do índice de claridade K_T , segundo os critérios de classificação de Liu e Jordan (1960): nublado ($0 < K_T < 0,30$), parcialmente nublado ($0,30 < K_T < 0,65$) e aberto ($0,65 < K_T < 1$) e relacionadas com a irradiância difusa de referência dentro dos mesmos intervalos de K_T . A Figura 9 (a), (b) e (c) mostra a correlação entre as irradiâncias difusa dos métodos *diferença* e *anel de sombreamento* em condições de cobertura de céu nublado, parcialmente nublado e aberto. As

equações são apresentadas no Quadro 1, com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 .

Quadro 1. Correções anisotrópicas em função de intervalos discretos de K_T .

Cobertura de céu	Equação de Correção Anisotrópica	R^2
Nublado	$I_{DFani} = 0,973I_{DFisoME}$	0,994
Parcialmente Nublado	$I_{DFani} = 1,045I_{DFisoME}$	0,989
Aberto	$I_{DFani} = 1,125I_{DFisoME}$	0,984

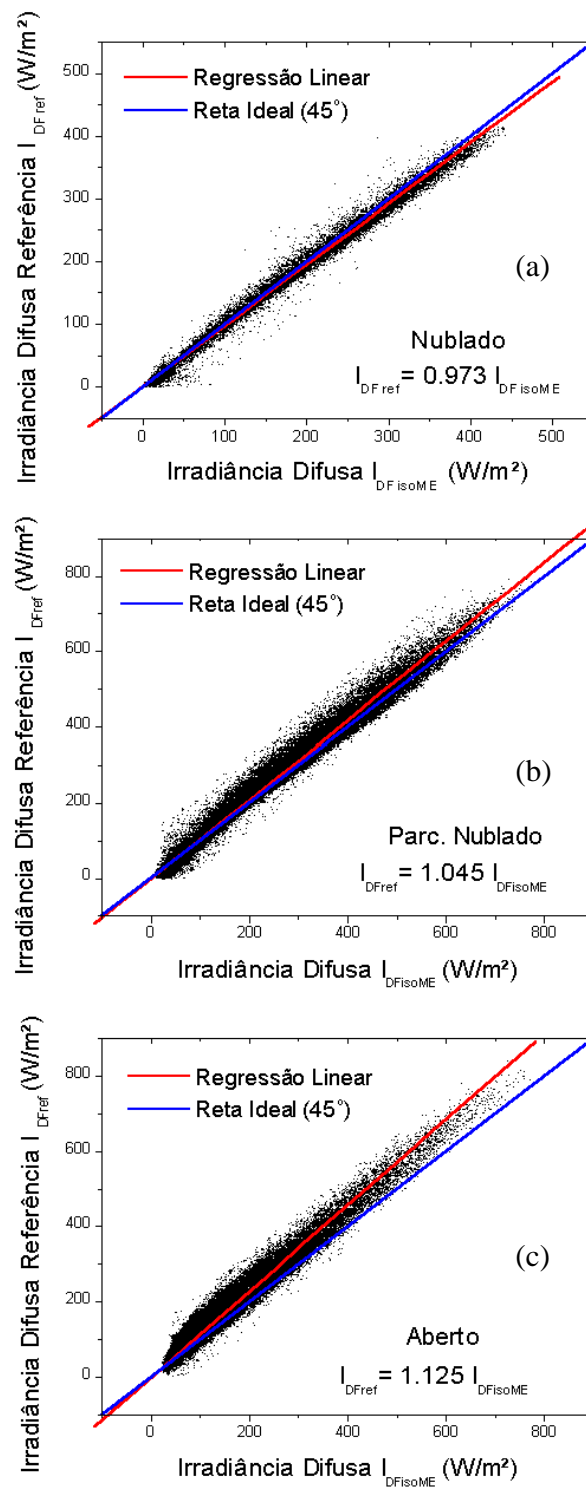


Figura 9. Correções anisotrópicas em função de intervalos discretos de K_T . a) Nublado. b) Parcialmente nublado. c) Aberto.

As retas de regressão lineares para as três coberturas em relação à reta ideal (45°) mostram o efeito diferenciado da anisotropia em cada cobertura. Para cobertura nublada, onde a distribuição de nuvens é homogênea, tem-se a condição baixa de anisotropia, o coeficiente angular da reta foi menor do que 1, e é justificável porque compensa a correção isotrópica desnecessária feita por meio das equações (2) e (5) nesta cobertura. Assim, para corrigir a irradiância difusa do anel de sombreamento ME_1 é necessário a multiplicação pelo fator de 0,973. Para cobertura parcialmente nublada, as condições de anisotropia são dinâmicas, podendo variar a cada instante conforme a distribuição de nuvens na atmosfera, e a irradiância difusa do anel de sombreamento subestimou a difusa referência em 4,5%, exigindo, portanto, uma correção numérica de 1,045.

Na cobertura sem nuvens, em condição permanente e elevada de anisotropia, o método do anel subestimou o método de referência em 12,5%, com correção numérica de 1,125. O percentual de 12,5% representa um valor médio sobre 7 anos e dentro deste tempo, a correção variou anualmente entre 7% a 19%, mostrando assim que o efeito da anisotropia depende do clima local e apresenta variação temporal. O local de medida está localizado em uma região rural, praticamente livre da poluição urbana. No entanto, sofre o efeito das queimadas de cana-de-açúcar que são frequentes no período de inverno, cuja atmosfera recebe grande quantidade de material particulado que provoca o aumento da radiação circunsolar e conseqüentemente aumenta o efeito da anisotropia da irradiância difusa.

A validação do modelo na correção anisotrópica foi efetuada corrigindo a irradiância difusa nas três coberturas independentemente, por meio da multiplicação dos fatores 0,973 na cobertura nublada ($0 < K_T < 0,30$), 1,045 na parcialmente

nublada ($0,30 < K_T < 0,65$) e 1,125 na aberta ($0,65 < K_T < 1$) e comparando com a irradiância difusa de referência. A Figura 10 (a), (b), (c) mostra a correlação entre a irradiâncias difusas de referência e corrigida anisotropicamente para as três coberturas de céu. Os coeficientes angulares das retas de regressão de 0,996 para cobertura nublada (Figura 10a), 0,999 para parcialmente nublado (Figura 10b) e 0,986 para aberto (Figura 10c) mostram boa correlação entre a irradiância difusa anisotrópica e a difusa de referência. O Quadro 2 apresenta os indicativos estatísticos MBE(%) e RMSE(%) obtidos da comparação entre as irradiâncias difusa referência e anel de sombreamento com correção anisotrópica para as três coberturas de céu.

Quadro 2. Indicativos estatísticos MBE(%) e RMSE(%) obtidos da comparação entre as irradiâncias difusa de referência e corrigida anisotropicamente nas três coberturas de céu.

Cobertura de Céu	MBE (%)	RMSE (%)
Nublado	0,25	5,78
Parcialmente Nublado	0,51	9,83
Aberto	-0,38	12,93

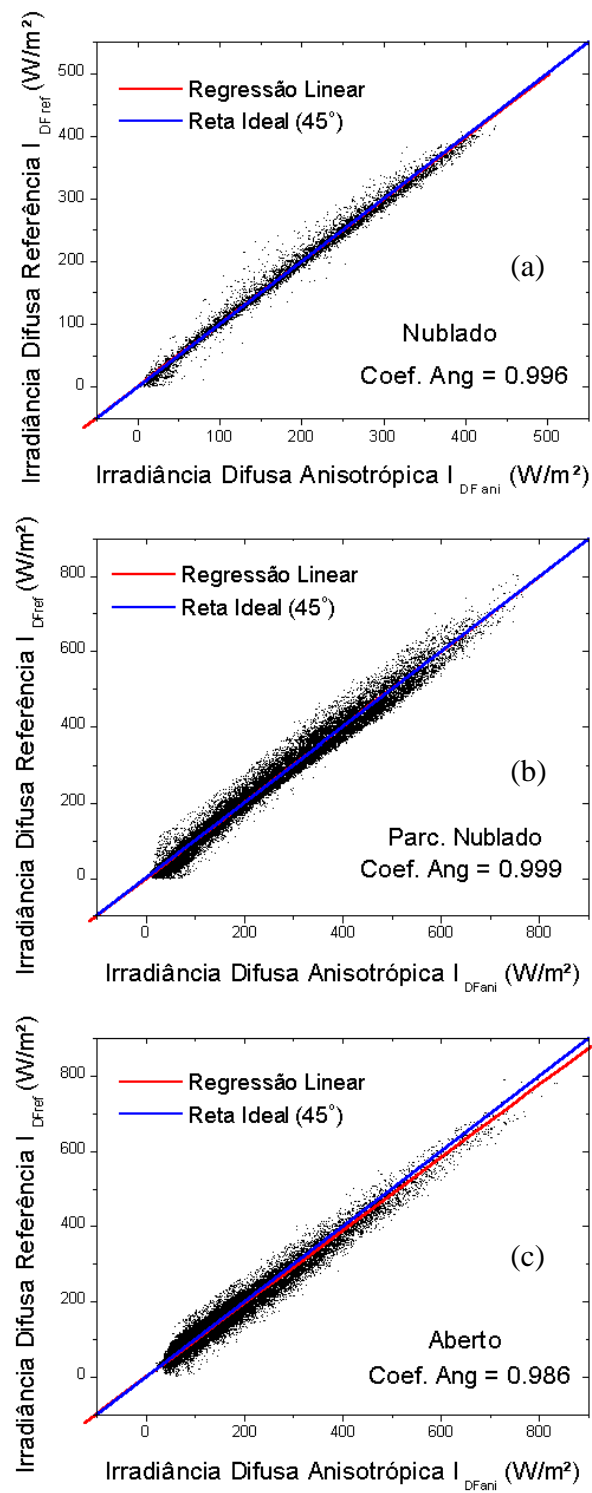


Figura 10. Correlação entre as irradiâncias difusa referência e anel de sombreamento corrigida anisotropicamente. a) Nublado. b) Parcialmente nublado. c) Aberto.

O indicativo estatístico MBE(%) mostra que a correção anisotrópica foi eficiente, superestimando em apenas 0,25% a irradiância difusa medida na cobertura de céu nublada e 0,50% na parcialmente nublada e subestimando em 0,38% na aberta. O indicativo RMSE(%) mostra um aumento do espalhamento em função do crescimento de K_T (aumento da anisotropia), com 5,78% para nublada, 9,83% para parcialmente nublada e 12,93% para aberta.

4.1.2 Comparação entre os Anéis de Sombreamento ME₁ , ME₂ e Drummond

Com o objetivo de verificar se o efeito da anisotropia era similar para os anéis ME₁, ME₂ e Drummond, calculou-se e comparou-se os fatores de correção anisotrópicos para a irradiância difusa medida pelos 3 anéis. Os fatores de correção anisotrópicos para os anéis ME₁, ME₂ e Drummond para os anos de 2000 e 2001 em que os três arcos estiveram medindo a irradiância difusa simultaneamente foram de 18,8%, 13,1% e 10,5% respectivamente (Figura 11).

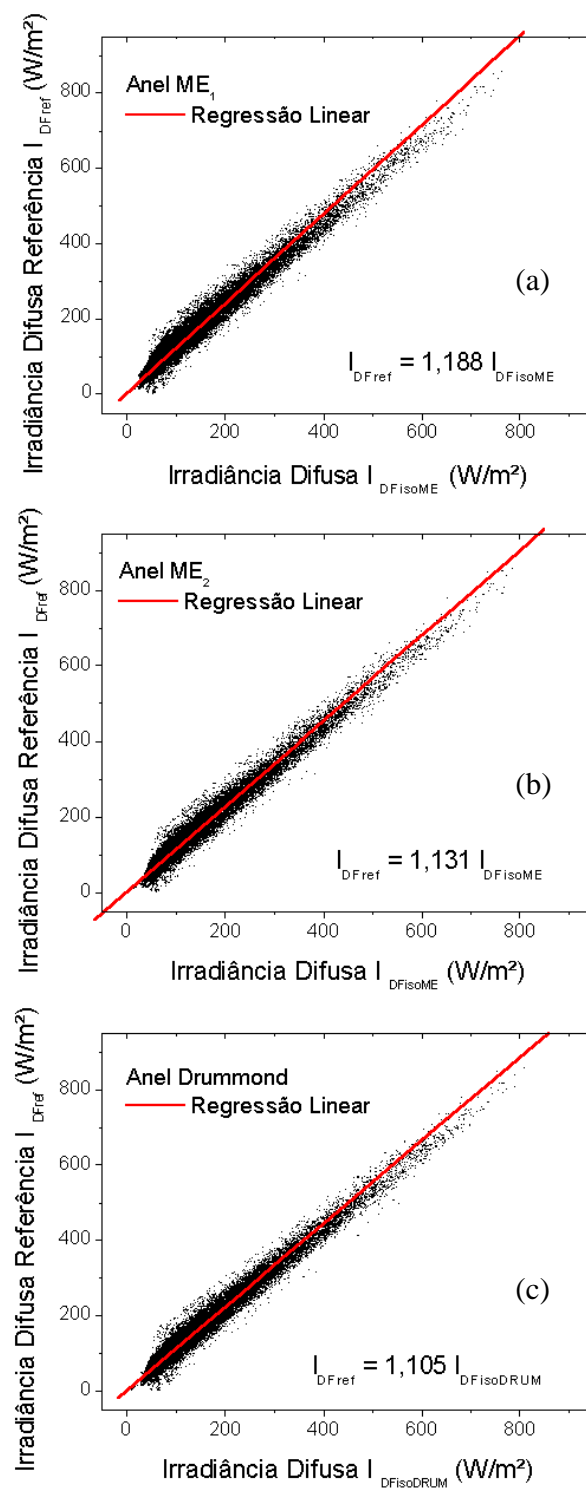


Figura 11. Irradiâncias difusa de referência e medida pelos anéis de sombreamento: a) ME_1 ; b) ME_2 ; c) Drummond

A comparação entre os fatores de correção entre os dois arcos ME mostra que a vantagem operacional de se ter uma largura maior, e que representa uma maior tolerância no ajuste do arco diariamente, não representa uma vantagem na qualidade da medida, mesmo considerando que a relação raio/largura é a mesma para os dois arcos. O arco de menor largura exige correção diária, contrário ao arco de maior largura, que tem tolerância para 2 dias. Quanto maior for a sombra produzida pelo anel devido à sua largura, mais radiação circunsolar é interceptada pelo arco, representando maior obstrução do efeito da anisotropia e portanto resultando num fator de correção anisotrópico maior.

Os resultados obtidos para os arcos ME₂ e Drummond são justificados pela diferença entre as duas montagens, cuja distância entre o sensor e o arco são diferentes, a menos dos dias 24/05 e 17/07 (Figura 8), onde os dois fatores de correção isotrópicos são iguais. O princípio operacional do arco ME possibilita uma distância sensor-anel maior que o arco de Drummond, resultando numa maior largura de sombra, que como já discutido no parágrafo anterior, representa um fator de correção anisotrópico maior.

4.1.3 Cálculo das irradiações horária, diária e mensal

A Figura 12 mostra um algoritmo operacional usado no gerenciamento das irradiâncias global, direta na incidência e difusa medida com anel de sombreamento ME.

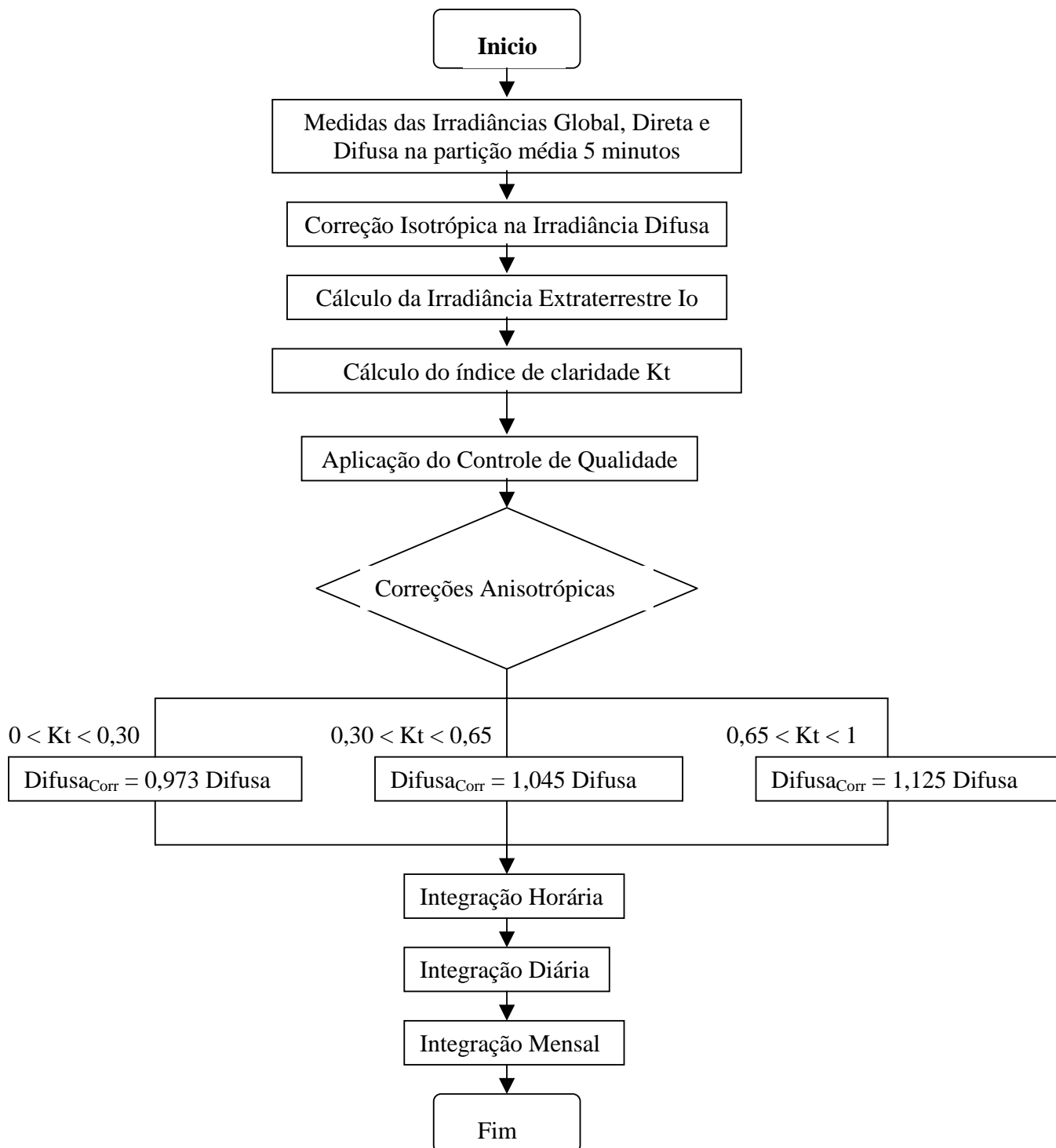


Figura 12. Fluxograma operacional no gerenciamento da medida das irradiância solares na partição média 5 minutos e integração horária, diária e mensal.

O fluxograma divide-se em quatro etapas aplicadas sequencialmente: monitoramento, tratamento dos dados por meio do controle de qualidade, correção anisotrópica da irradiância difusa e integração horária, diária e mensal dos dados de radiação solar. A etapa de monitoramento consiste na medida das irradiâncias global, direta na incidência e difusa na forma bruta em milivolts, aplicação dos fatores de calibração dos instrumentos de medidas para transformação da unidade em densidade de fluxo W/m^2 , aplicação dos fatores de correção isotrópicos na irradiância difusa devido ao anel de sombreamento, cálculo da irradiância extraterrestre I_0 e do índice de claridade K_T . Na etapa do controle de qualidade, os dados são submetidos a várias checagens para se eliminar os dados espúrios, consequência do desalinhamento dos sensores, do baixo nível energético do início e fim dos dias, de fios desligados ou cortados acidentalmente etc. A etapa seguinte consiste na aplicação do modelo de correção anisotrópico na irradiância difusa isotrópica a partir do índice de claridade K_T , onde são aplicadas correções diferenciadas para cada cobertura de céu. A última etapa consiste na integração das irradiâncias solares nas partições horária, diária e mensal, geração de gráficos das irradiâncias solares a partir dos dados e arquivamento das informações em bases de dados digital nas partições média 5 minutos, horária, diária e mensal.

Com os valores das integrações calculadas, as irradiações difusa horária H_{DFani} , diária D_{DFani} e mensal M_{DFani} anisotrópicas (Figura 13 (a), (b), (c)) foram comparadas com as irradiações difusa horária H_{DFref} , diária D_{DFref} e mensal M_{DFref} de referência.

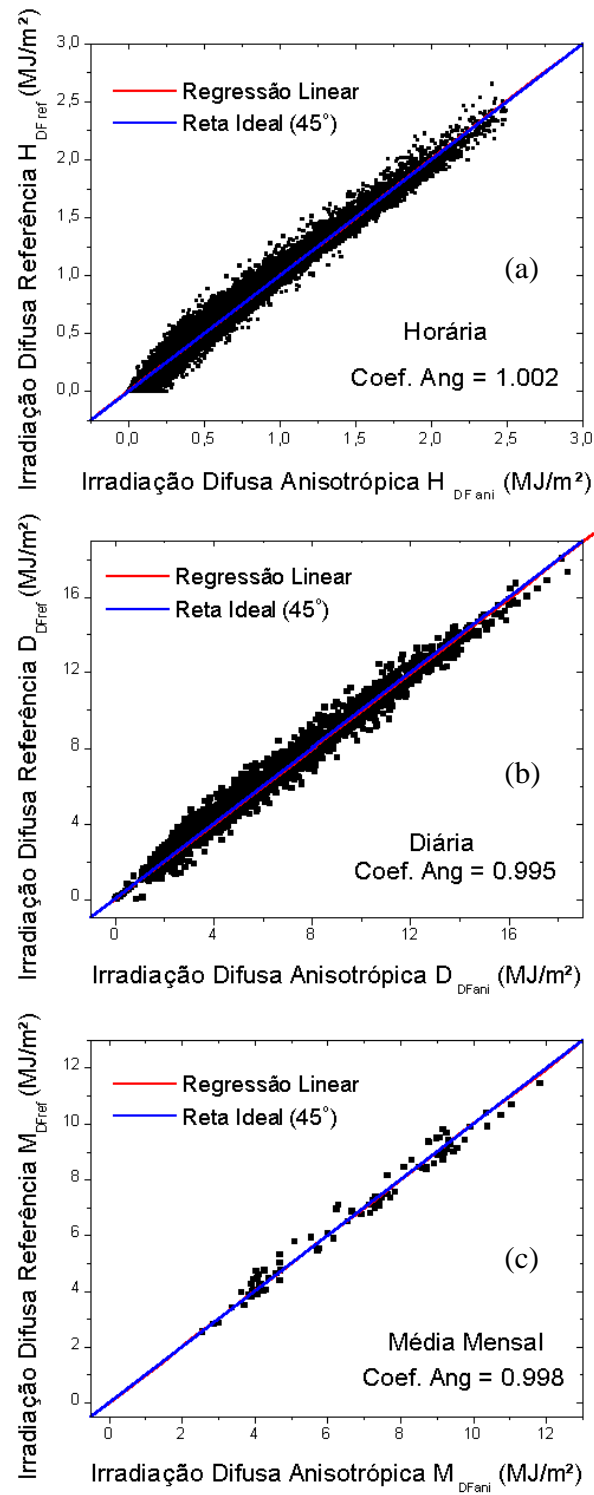


Figura 13. Irradiação difusa de referência e corrigida anisotropicamente nas partições: (a) horária; (b) diária; (c) mensal.

O coeficiente angular, o coeficiente de determinação R^2 e os indicadores estatísticos MBE e RMSE entre as irradiações difusas horária, diária e mensal corrigidas anisotropicamente em relação à irradiação difusa referência são apresentados no Quadro 3. Os resultados mostraram que a aplicação dos fatores anisotrópicos foram eficientes na correção da irradiação difusa, com subestimativas (MBE) inferiores a 0,5% para as 3 partições.

Quadro 3. Coeficiente angular, coeficiente de determinação R^2 e indicadores estatísticos MBE e RMSE da comparação entre a irradiação difusa referência e as irradiações difusa horária, diária e mensal corrigidas anisotropicamente.

Partição	Correção Anisotrópica						
	C.A	MBE		RMSE		R^2	N
		MJ/m ²	%	MJ/m ²	%		
Horária	1,002	-0,0021	-0,37	0,0607	10,64	0,992	27525
Diária	0,995	-0,0193	-0,29	0,4817	7,17	0,990	2396
Mensal	0,998	-0,0161	-0,24	0,3331	4,95	0,990	83

4.1.4 Série Temporal Diária Média Horária e Anual Média Mensal Diária das Irradiações Difusa Isotrópica, Anisotrópica e de Referência

A série temporal diária média horária das irradiações difusa isotrópica, anisotrópica e de referência são apresentadas na Figura 14(a). No início e final do dia, os valores das irradiações difusa são muito pequenos e praticamente iguais, havendo uma

diferenciação quantitativa somente nos horários em torno da culminação solar. No horário compreendido entre 9 e 15 horas, a irradiação difusa referência apresentou os maiores valores, seguidos da irradiação difusa anisotrópica e isotrópica respectivamente.

A Figura 14 (b) mostra o valor de MBE, consequência da comparação entre as irradiações difusa isotrópica e anisotrópica em relação à irradiação difusa de referência. O valor de MBE, no início e fim do dia, foi negativo, indicando que as irradiações difusa isotrópica e anisotrópica foram maiores que a irradiação difusa referência. Neste período, o valor elevado da massa ótica aumenta o espalhamento da radiação, elevando o valor da irradiância difusa medida em relação a difusa de referência. No entanto, em relação aos níveis energéticos, os valores das irradiâncias difusa nesses horários é baixo, podendo resultar num desvio percentual elevado. No período entre 9 e 15 horas, período de maior nível energético, os fatores anisotrópicos aplicados reduziram significativamente os valores de MBE. A redução promovida pela correção anisotrópica no horário do meio dia foi de 9% para 3%, representando uma eficiência de 67%.

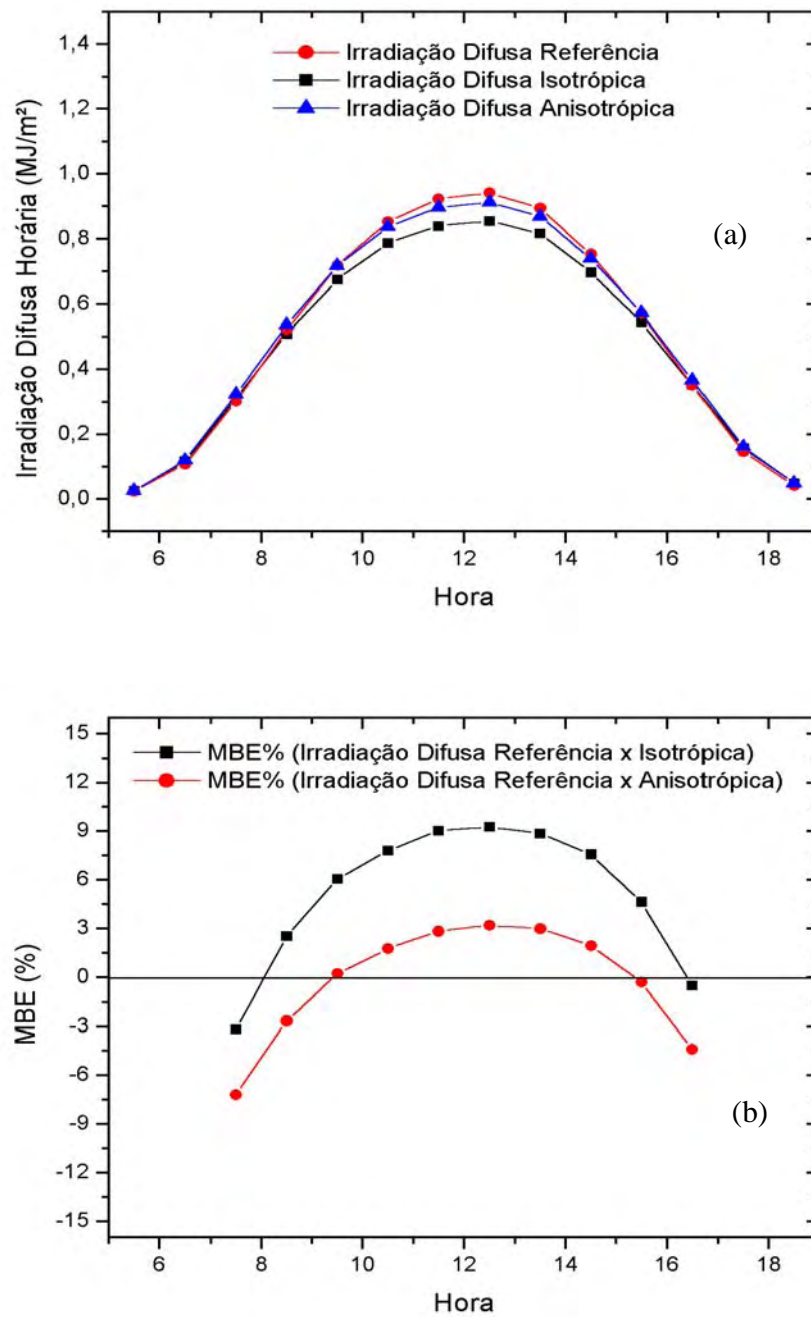


Figura 14 (a). Série temporal diária média horária das irradiações difusa de referência, isotrópica e anisotrópica. b) Desvio percentual (MBE %) entre as irradiações difusa isotrópica e anisotrópica em relação a irradiação difusa de referência.

A série temporal anual das médias mensais diárias das irradiações difusas isotrópica, anisotrópica e referência é apresentada na Figura 15(a). O desempenho do modelo é analisado por meio da comparação de proximidade entre a irradiação difusa corrigida isotrópica e anisotropicamente em relação a irradiação difusa de referência. Nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março, período de alta nebulosidade, a correção anisotrópica obteve aproveitamento próximo de 100%, ou seja, a irradiação difusa com correção anisotrópica praticamente coincidiu com a difusa de referência. Nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, período de baixa nebulosidade, a correção foi menos eficiente e reduziu o efeito da anisotropia na ordem de 50% em relação a correção isotrópica. A evolução do indicativo estatístico MBE percentual (Figura 15(b)) entre as irradiações difusas com correções isotrópica e anisotrópica mostra a dependência sazonal dos desvios, com maiores valores para períodos de baixa nebulosidade (outono-inverno) e menores para alta nebulosidade (primavera-verão). O desvio relativo médio anual MBE com correção isotrópica foi de 6,29% e anisotrópica de 2,92%.

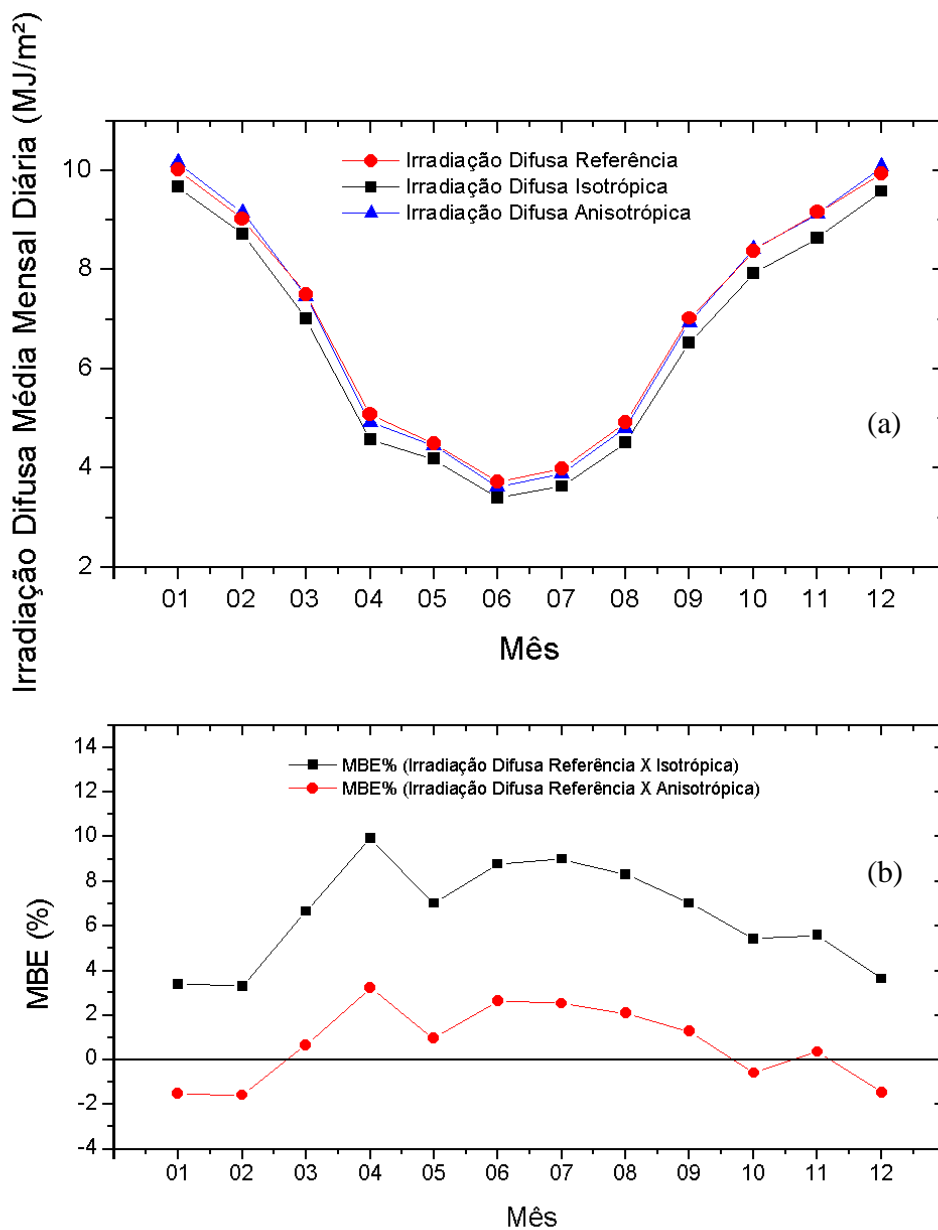


Figura 15 (a). Série temporal anual média mensal diária das irradiações difusa referência, isotrópica e anisotrópica. (b) Indicativo estatístico MBE(%) entre a irradiação difusa referência e as difusas corrigidas isotrópica e anisotropicamente.

4.1.5 Desempenho do modelo anisotrópico – Correção do banco de dados

A série temporal anual média mensal diária das irradiações global, direta na horizontal e difusas referência, corrigidas isotrópica e anisotropicamente podem ser observadas na Figura 16. No Quadro 4 são apresentados os valores médio anuais das irradiações em MJ/m², juntamente com os valores dos desvios médios provenientes da comparação entre a irradiação global média anual medida (A_{GM}) em relação às irradiações globais (A_{G1}), (A_{G2}) e (A_{G3}) calculadas pela equação (1) a partir da soma da irradiação direta na horizontal (A_{DH}) com as irradiações difusa: referência (A_{DF1}), isotrópica (A_{DF2}) medida pelo anel ME e corrigida pelas equação (2) e (5), e anisotrópica (A_{DF3}) corrigida pelo modelo de correção anisotrópico.

No período de 6 anos, a média anual da irradiação global medida (A_{GM}) foi 18,340 MJ/m², e os desvios relativos foram obtidos por meio de $\Delta = 100 * (A_{GM} - A_{Gn}) / A_{GM}$. Os resultados entre o A_{GM} e os A_{G1} , A_{G2} e A_{G3} foram melhores, na seqüência, para as irradiações difusa referência, anisotrópico e isotrópico. O desvio $\Delta (A_{G1})$ de 0,59% indica que a irradiação global A_{G1} não difere significativamente da global medida A_{GM} e deve ser atribuído a resolução dos radiômetros solares. O desvio $\Delta (A_{G2})$ de 2,80% é devido a soma dos erros instrumentais mais os efeitos intrínsecos da anisotropia da radiação difusa, que não estão incluídos na correção isotrópica efetuada pela equação (2) e (5). O $\Delta (A_{G3})$ de 0,68% mostra que, além dos erros instrumentais, existe outros efeitos que contribuem para a

anisotropia além dos efeitos da cobertura, cujo valor pode ser quantificado por meio da diferença entre $\Delta (A_{G1})$ e $\Delta (A_{G3})$ como sendo de 2,12%.

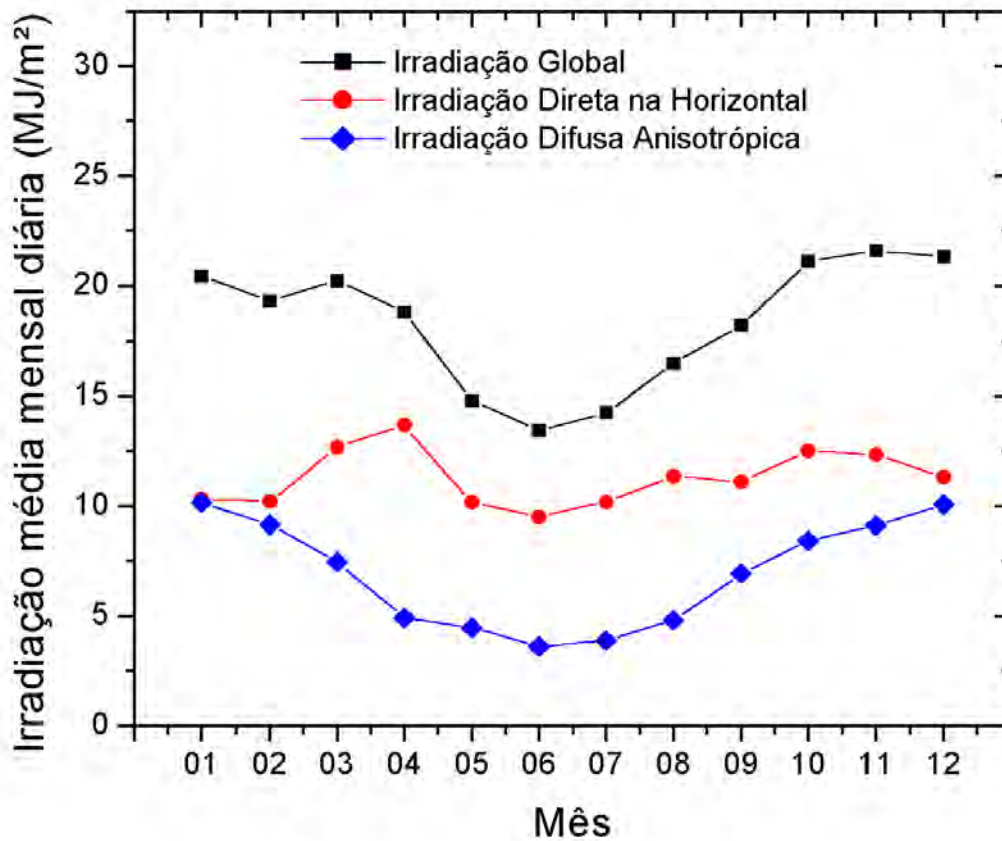


Figura 16. Irradiações médias mensais: global, direta na horizontal e difusa anisotrópica.

Quadro 4. Média anual das irradiações global A_{GM} , direta na horizontal A_{DH} e difusas referência A_{DF1} , isotrópica A_{DF2} e anisotrópica A_{DF3} medidas no período de 6 anos.

n	A_{DH} (MJ/m²)	A_{DFn} (MJ/m²)	A_{Gn} (MJ/m²)	A_{GM} (MJ/m²)	$\Delta (A_{Gn})$ (%)
1	11,295	6,937	18,232	18,340	0,59
2	11,295	6,531	17,826	18,340	2,80
3	11,295	6,921	18,216	18,340	0,68

4.2 Modelos de Estimativa da Irradiação Solar Difusa

4.2.1 Modelagem

A aplicação das condições impostas pelo controle de qualidade limitou a quantidade de dados de K_{DF} e K_T , efetuando uma redução percentual diferenciada para cada partição na fase de modelagem. Para partição horária, a redução foi de 22518 para 20808 pontos (redução de 7,6%), visto que a maioria dos valores eliminados apresentou níveis de energia próximos de zero por estarem próximos aos horários de nascer e pôr-do-sol e, portanto, com variabilidade elevada devido ao valor elevado da massa ótica (Suehrcke e MacCormick, 1989). Para partição diária a redução foi de 1767 para 1743 (1,4%); e para mensal, de 58 para 57 (1,7%).

Nesse sentido, os valores experimentais da fração difusa K_{DF} e do índice de claridade K_T obtidos no Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu foram correlacionados na forma gráfica do tipo $K_{DF} \times K_T$. As Figuras 17, 18 e 19 mostram 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.

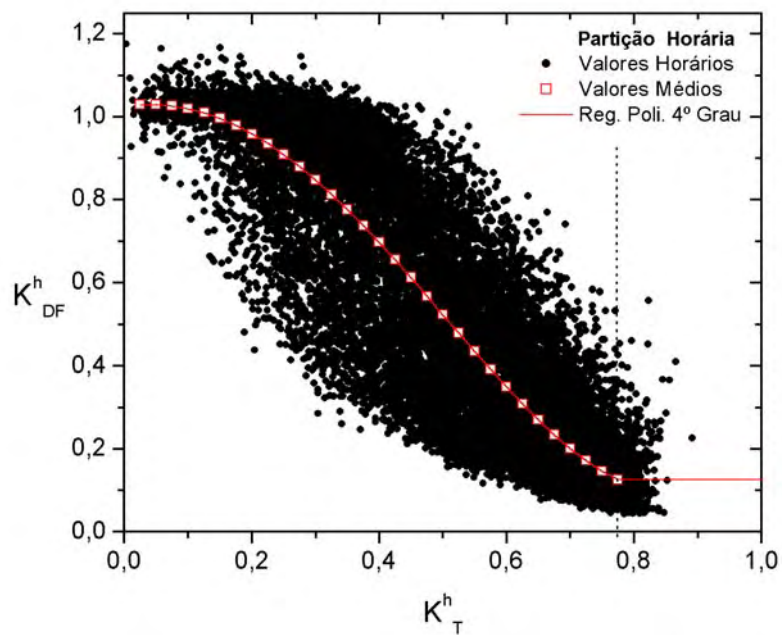


Figura 17. Correlação entre a fração difusa K_{DF}^h e o índice de claridade K_T^h . Partição horária.

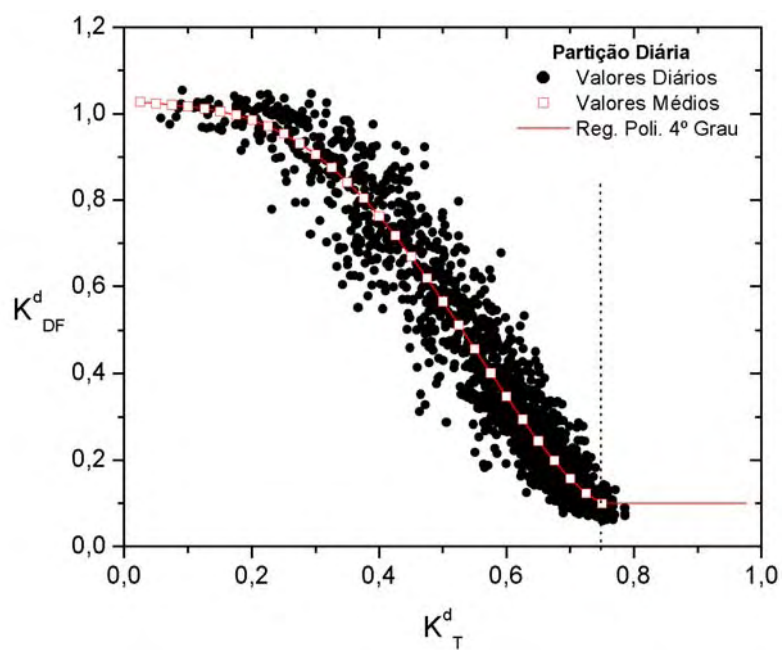


Figura 18. Correlação entre a fração difusa K_{DF}^d e o índice de claridade K_T^d . Partição diária.

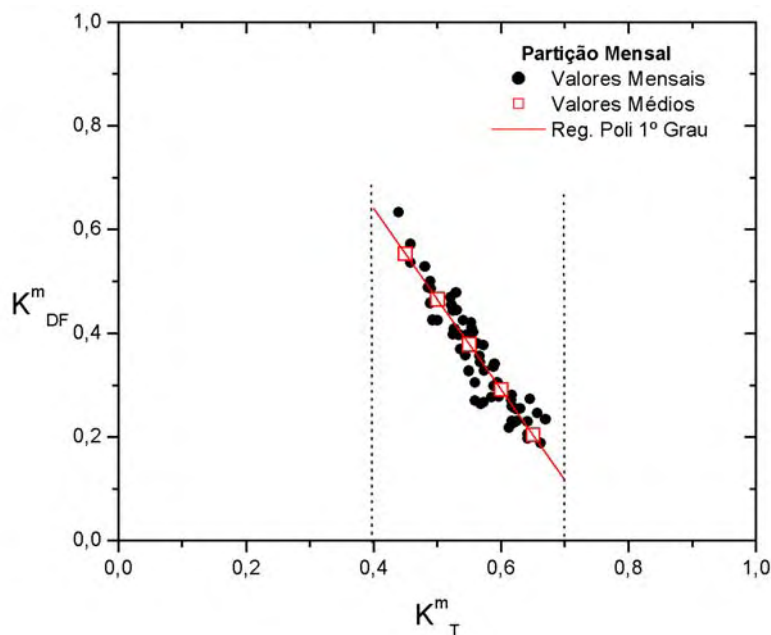


Figura 19. Correlação entre a fração difusa K_{DF}^m e o índice de claridade K_T^m . Partição mensal.

Nas partições horária e diária (Figuras 17 e 18), alguns valores de K_{DF} foram maiores que 1 para o intervalo de $K_T < 0,35$ (cobertura de céu nublado), indicando uma situação em que a radiação difusa é maior que a global, violando assim a equação $R_G = R_{DF} + R_{DH}$. Neste intervalo de K_T , a radiação direta é nula, pois é barrada pela cobertura de nuvens, o que resulta numa radiação difusa máxima permitida igual a radiação global. Os valores de K_{DF} maiores que 1 obtidos são explicados pela aplicação de fatores de correção isotrópicos inerentes ao método de medida da radiação difusa, os quais apresentam correções que variam de um mínimo de 8% no inverno a um máximo de 25% no verão para a latitude de Botucatu (Oliveira et al, 2002a) (Figura 8). Como a região de Botucatu é caracterizada por duas estações bem definidas (inverno seco com baixa nebulosidade e verão úmido com alta nebulosidade), a maior probabilidade de ocorrência de condições de céu

nublado é no verão, o que explica um aumento da radiação difusa de no máximo até 25% devido à aplicação dos fatores de correção isotrópicos, justificando assim a ocorrência de alguns valores de K_{DF} maiores que 1.

As Figuras 17, 18 e 19 mostraram que, para valores de K_T intermediários, os níveis de espalhamento da fração difusa K_{DF} em função de K_T decresceram à medida que se aumentou a partição de tempo: a partição horária com maior espalhamento; diária com espalhamento moderado e mensal com o menor espalhamento 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 por meio 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 MacCormick, 1989).

No intervalo de K_T entre 0,8 e 1 da Figura 17 (partição horária), alguns valores de K_{DF} mostraram uma tendência de crescimento incompatível com a equação $R_G = R_{DF} + R_{DH}$. 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, que é causada pelas 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 MacCormick, 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 nas Figuras 17, 18 e 19. 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 específico valor de K_T . As linhas verticais pontilhadas representam os limites dos dados 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:

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

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. O Quadro 5 mostra os valores dos coeficientes A_n do modelo de estimativa proposto

para as partições de tempo horária, diária e mensal juntamente com seus respectivos intervalos de validade, e coeficientes de algumas equações de estimativa obtidos para outras localidades e condições atmosféricas, como as equações de estimativa de De Miguel et al. (2001), Hawlader (1984) e Oliveira et al. (2002b) para partição horária; Newland (1989), De Miguel et al. (2001) e Oliveira et al. (2002b) para partição diária; e Lalas et al. (1987), Iqbal (1979) e Oliveira et al. (2002b) para partição mensal. O modelo de estimativa proposto para Botucatu recebeu o nome de modelo Isotrópico devido à correção isotrópica aplicada no ato da medida da irradiância difusa.

Quadro 5. Coeficientes do modelo Isotrópico proposto a partir de regressões entre os diagramas $K_{DF} \times K_T$ e modelos da literatura para partições horária, diária e mensal.

Modelos	Valores Horários (Diagrama $K_{DF}^h \times K_T^h$)					
	Intervalo	A_0^h	A_1^h	A_2^h	A_3^h	A_4^h
1) Isotrópico	$0 \leq Kt < 0,75$	1,025	0,237	-2,861	-0,327	2,184
	$0,75 \leq Kt < 1$	0,126	--	--	--	--
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 et al.	$0 \leq Kt < 0,21$	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	--	--	--	--
3) Oliveira et al.	$0 \leq Kt < 0,17$	1,00	--	--	--	--
	$0,17 \leq Kt < 0,75$	0,97	0,80	-3,00	-3,10	5,20
	$0,75 \leq Kt < 1$	0,18	--	--	--	--
Valores Diários (Diagrama $K_{DF}^d \times K_T^d$)						
	Intervalo	A_0^d	A_1^d	A_2^d	A_3^d	A_4^d
1) Isotrópico	$0 \leq Kt < 0,73$	1,033	-0,261	2,011	-11,252	9,082
	$0,73 \leq Kt < 1$	0,103	--	--	--	--
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 et al.	$0 \leq Kt < 0,13$	0,952	--	--	--	--
	$0,13 \leq Kt < 0,80$	0,868	1,335	-5,782	3,721	--
	$0,80 \leq Kt < 1$	0,141	--	--	--	--
3) Oliveira et al.	$0 \leq Kt < 0,17$	1,00	--	--	--	--
	$0,17 \leq Kt < 0,70$	1,00	0,27	-2,50	-2,60	4,30
	$0,70 \leq Kt < 1$	0,15	--	--	--	--
Valores Mensais (Diagrama $K_{DF}^m \times K_T^m$)						
	Intervalo	A_0^m	A_1^m	A_2^m	A_3^m	A_4^m
1) Isotrópico	$0,30 \leq Kt < 0,70$	1,336	-1,740	--	--	--
Literatura						
1) Lalas et al.	$0,30 \leq Kt < 0,70$	1,27	-1,45	--	--	--
2) Iqbal	$0,30 \leq Kt < 0,70$	0,958	-0,982	--	--	--
3) Oliveira et al.	$0,35 \leq Kt < 0,61$	1,20	-1,70	--	--	--

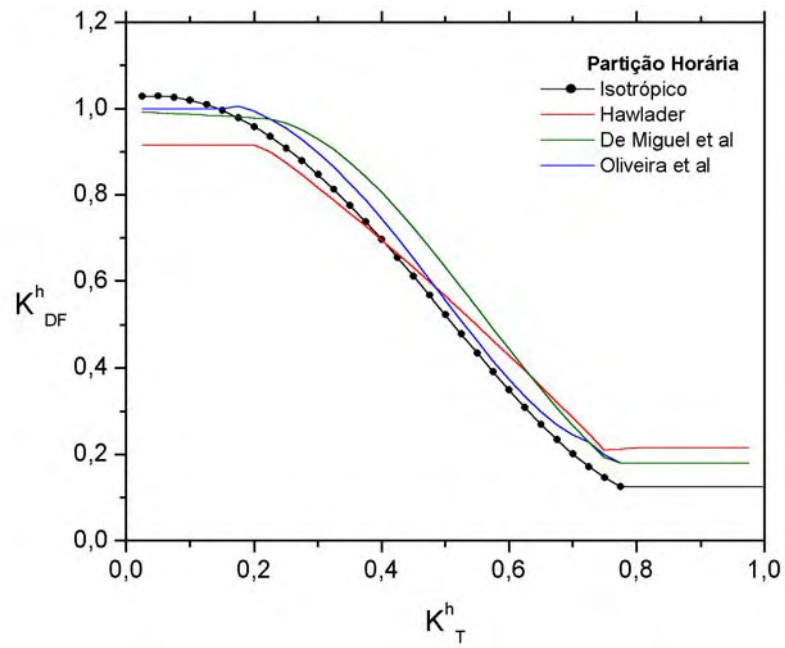


Figura 20. Modelos de estimativa de K_{DF}^h em função de K_T^h para partição horária.

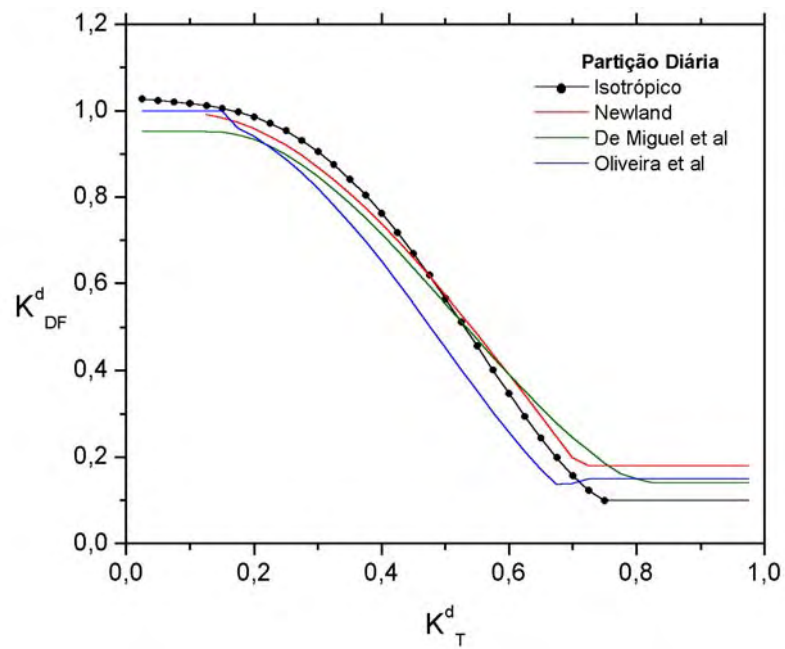


Figura 21. Modelos de estimativa de K_{DF}^d em função de K_T^d para partição diária.

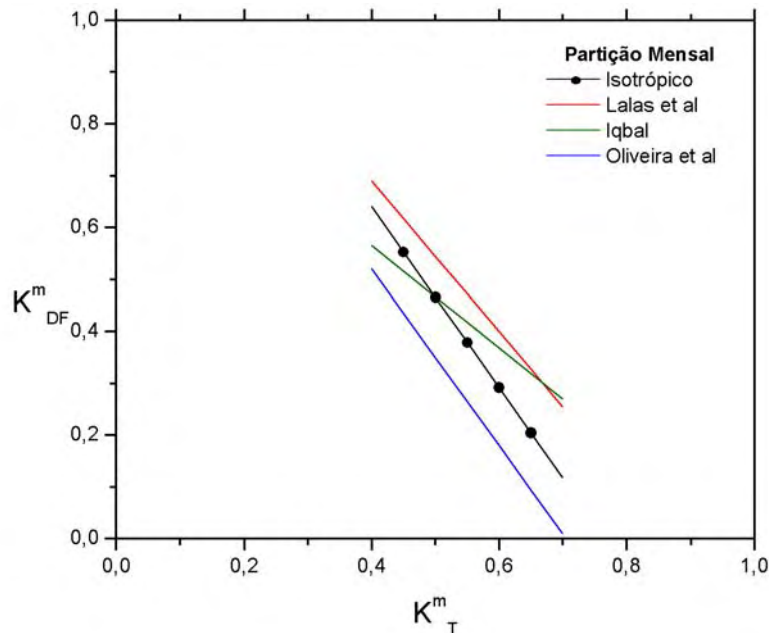


Figura 22. Modelos de estimativa de K_{DF}^m em função de K_T^m para partição mensal.

As Figuras 20, 21 e 22 mostram 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 Isotrópico K_{DFiso} com base nos dados de Botucatu a partir dos coeficientes apresentados no Quadro 5. 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.

Para partição horária (Figura 20), o modelo de estimativa Isotrópico foi comparado com os modelos de De Miguel et al. (2001) (Mediterrâneo Norte), de Hawlader

(1984) (Cingapura) e de Oliveira et al (2002b) (São Paulo). O modelo de De Miguel et al, elaborado para latitudes acima de 40° , apresentou os maiores valores para K_{DF} no intervalo $0,2 < K_T < 0,8$ devido aos efeitos mais significativos da massa ótica e do albedo da superfície. O modelo de Hawlader, elaborado para uma localidade equatorial e litorânea, apresentou a curva mais achatada, com os menores valores de K_{DF} para $K_T < 0,2$ e os maiores valores de K_{DF} para $K_T > 0,8$ provavelmente devido às diferentes concentrações e tipo de nuvens. Os modelos Isotrópico e Oliveira et al foram elaborados praticamente para mesma latitude (Botucatu e São Paulo respectivamente), e os níveis diferenciados de K_{DF} entre esses dois modelos se devem às diferentes condições climáticas dessas duas localidades, com São Paulo apresentando atmosfera mais poluída e turbida em relação a Botucatu.

Para partição diária (Figura 21), o modelo de estimativa Isotrópico foi comparado com os modelos de De Miguel et al. (2001) (Mediterrâneo Norte), de Newland (1989) (Macau – China) e de Oliveira et al (2002b) (São Paulo), apresentando os maiores valores de K_{DF} para $K_T < 0,3$ e os menores valores de K_{DF} para $K_T > 0,7$. Na cobertura nublada, a aplicação dos fatores de correção isotrópicos, devido ao método de medida do anel de sombreamento ME, pode causar um aumento nos valores da fração difusa, enquanto que na cobertura de céu aberto, a diferença quantitativa entre os modelos de estimativa provavelmente está ligada a atividade industrial da região, onde a grande concentração de partículas em suspensão e a emissão de poluentes pode influenciar a distribuição da global em direta/difusa, aumentando o espalhamento da radiação, resultando em K_{DF} mais elevados, conforme os valores de K_{DF} dos modelos De Miguel et al, Oliveira et al e Newland em relação ao modelo Isotrópico.

Para partição mensal (Figura 22), o modelo de estimativa Isotrópico foi comparado com os modelos de Lalas et al. (1987) (Grécia), de Iqbal (1979) (Canadá) e de Oliveira et al (2002b) (São Paulo). Os modelos de Iqbal e Lalas et al, elaborados para altas latitudes, apresentaram valores de K_{DF} mais elevados devido a massa ótica e ao albedo da superfície. Os modelos Isotrópico e Oliveira et al apresentaram coeficientes angulares muito próximos, mostrando que a variação da fração difusa K_{DF} em função do índice de claridade K_T é similar para os dois modelos. Os modelos apresentaram valores diferenciados de K_{DF} devido às diferentes condições atmosféricas das localidades em que foram elaborados.

4.2.2 Desempenho dos Modelos de Estimativa

Para verificar o desempenho dos modelos nas estimativas horária, diária e mensal da radiação difusa foram utilizados os indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t (Stone, 1993) por meio das comparações entre as irradiações difusa medida e estimada pelos modelos. No teste t, para que um 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 este intervalo, ou seja, situados na região crítica, indicam que o parâmetro utilizado na modelagem não é estatisticamente significativo.

Para efetuar a validação, os valores estimados pelos modelos foram comparados com os valores medidos da irradiação difusa isotrópica. O Quadro 6 mostra o resultado da validação dos modelos de estimativa por meio dos indicativos MBE, RMSE e teste t.

Quadro 6. Indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t obtidos da comparação entre as irradiações difusa horária, diária e média mensal estimada e medida para Botucatu-SP.

Modelos	Valores Horários						
	Tamanho da Amostra (hora)	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	t _e	t _c
Isotrópico	7321	-0,023	-4,330	0,211	38,620	9,62	1,645
Hawladar	7321	0,054	9,969	0,235	42,900	20,44	1,645
De Miguel et al	7321	0,078	14,193	0,219	40,021	32,44	1,645
Oliveira et al	7321	0,025	4,677	0,219	39,940	10,08	1,645
Valores Diários							
	Tamanho da Amostra (dia)	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	t _e	t _c
Isotrópico	670	0,052	0,824	1,285	20,460	1,05	1,645
Newland	670	0,591	9,417	1,513	24,087	10,96	1,645
De Miguel et al.	670	0,712	11,338	1,710	27,219	11,83	1,645
Oliveira et al	670	0,694	11,049	1,640	26,110	12,06	1,645
Valores Médio Mensais							
	Tamanho da Amostra (mês)	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	t _e	t _c
Isotrópico	24	-0,055	-0,884	0,487	7,771	0,55	1,711
Lalas et al.	24	1,542	24,611	1,594	25,445	18,26	1,711
Iqbal	24	0,667	10,649	0,897	14,322	5,33	1,711
Oliveira et al	24	-1,967	-31,403	2,092	33,401	13,24	1,711

Para partição horária, todos os modelos de estimativa apresentaram valores de t_e estimado maiores que o t_c 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 pesquisar outros parâmetros, além do índice de claridade K_T , para explicar as variações horárias da radiação difusa. Para partição diária, o modelo Isotrópico foi o único modelo estatisticamente significativo, com t_e estimado de 1,05, menor que o t_c crítico

de 1,635. Os demais modelos diários apresentaram valores de t_e maiores que o t_c , não sendo recomendados na estimativa diária da irradiação difusa para Botucatu, pois foram elaborados para diferentes condições atmosféricas. Para partição mensal, o modelo Isotrópico apresentou valor de t_e de 0,55, menor que o valor de t_c de 1,711 e portanto estatisticamente significativo na estimativa da irradiação difusa média mensal. Todos os demais modelos apresentaram valores de t_e na região crítica e portanto, não devem ser usados na estimativa mensal da irradiação difusa para Botucatu, visto que foram elaborados para condições geográficas (altitude e latitude) e atmosféricas diferentes (concentração de aerossóis, vapor d'água, poluição etc).

O modelo de Oliveira et al., elaborado para a cidade de São Paulo, apesar de apresentar latitude similar de Botucatu e distância de 240 km, não é recomendado na estimativa da irradiação difusa para Botucatu segundo os resultados obtidos pelo teste t. Os modelos de estimativa foram elaborados para situações atmosféricas diferentes: São Paulo apresenta forte atividade industrial e grande concentração de poluentes na atmosfera enquanto que Botucatu, cidade semi-rural, apresenta fraca atividade industrial e conseqüentemente atmosfera mais limpa. Estas diferenças causam mudanças nos perfis de espalhamento da radiação, com níveis de irradiação difusa diferenciados em cada localidade, justificando os resultados obtidos no Quadro 6.

4.2.3 Modelo Anisotrópico da Irradiação Solar Difusa

Os modelos de estimativa da irradiação difusa validados no item anterior foram baseados na isotropia da radiação, levando-se 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. Este efeito deve-se ao espalhamento da radiação causado pelos diferentes tamanhos das partículas encontrados na atmosfera (aerossóis, vapor d'água, etc) e conseqüentemente geram o efeito da anisotropia da radiação. Nesse sentido, este item objetiva melhorar a precisão dos modelos de estimativa, propondo um modelo de estimativa K_{DFani} que contemple os efeitos da anisotropia da radiação e comparar seu desempenho com o modelo de estimativa isotrópico K_{DFiso} proposto no item anterior por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t.

O efeito da anisotropia depende do índice de claridade K_T , aumentando à medida que se eleva os níveis de transmissividade atmosférica, ou seja, o efeito cresce à medida que a cobertura de céu muda de nublada para aberta. Para se corrigir o efeito que a anisotropia causa sobre os valores da irradiância difusa devido ao uso do método de medida do anel de sombreamento, aplicou-se os fatores de correção anisotrópicos para cobertura de céu nublada, parcialmente nublada e aberto propostos no item 4.1.1 e posteriormente estes dados foram integrados nas partições horária, diária e média mensal. Para cobertura de céu nublado usou-se um fator de correção anisotrópico de 0,973; cobertura parcialmente nublada de 1,045 e aberto de 1,125.

O Quadro 7 mostra os valores dos coeficientes A_n do modelo de estimativa Anisotrópico para as partições de tempo horária, diária e mensal juntamente com seus respectivos intervalos de validade. As figuras 23, 24 e 25 mostram os modelos de estimativa Isotrópico e Anisotrópico 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 com base nos dados de Botucatu a partir dos coeficientes apresentados na Quadro 5 (modelo Isotrópico) e Quadro 7 (modelo Anisotrópico).

Quadro 7. Coeficientes do modelo Anisotrópico proposto a partir de regressões entre os diagramas $K_{DF} \times K_T$ para partições horária, diária e mensal.

Modelo	Valores Horários (Diagrama $K_{DF}^h \times K_T^h$)					
	Intervalo	A^h_0	A^h_1	A^h_2	A^h_3	A^h_4
Anisotrópico	$0 \leq Kt < 0,75$	1,004	-0,074	-0,394	-4,886	4,733
	$0,75 \leq Kt < 1$	0,143	--	--	--	--
Valores Diários (Diagrama $K_{DF}^d \times K_T^d$)						
	Intervalo	A^d_0	A^d_1	A^d_2	A^d_3	A^d_4
Anisotrópico	$0 \leq Kt < 0,73$	1,005	-0,360	3,634	-14,581	10,998
	$0,73 \leq Kt < 1$	0,121	--	--	--	--
Valores Mensais (Diagrama $K_{DF}^m \times K_T^m$)						
	Intervalo	A^m_0	A^m_1	A^m_2	A^m_3	A^m_4
Anisotrópico	$0,30 \leq Kt < 0,70$	1,381	-1,783	--	--	--

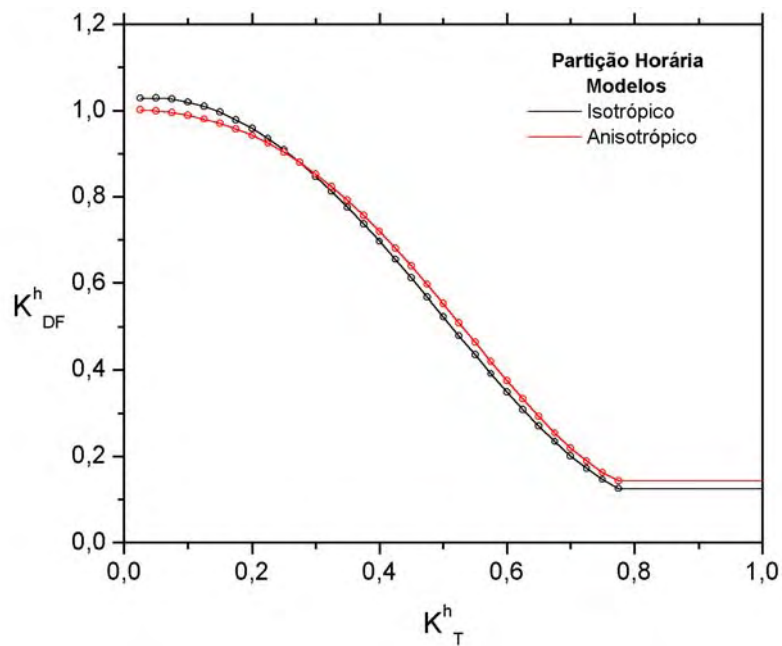


Figura 23. Modelos de estimativa Isotrópico K_{DFiso}^h e Anisotrópico K_{DFani}^h em função de K_T^h para Botucatu (partição horária).

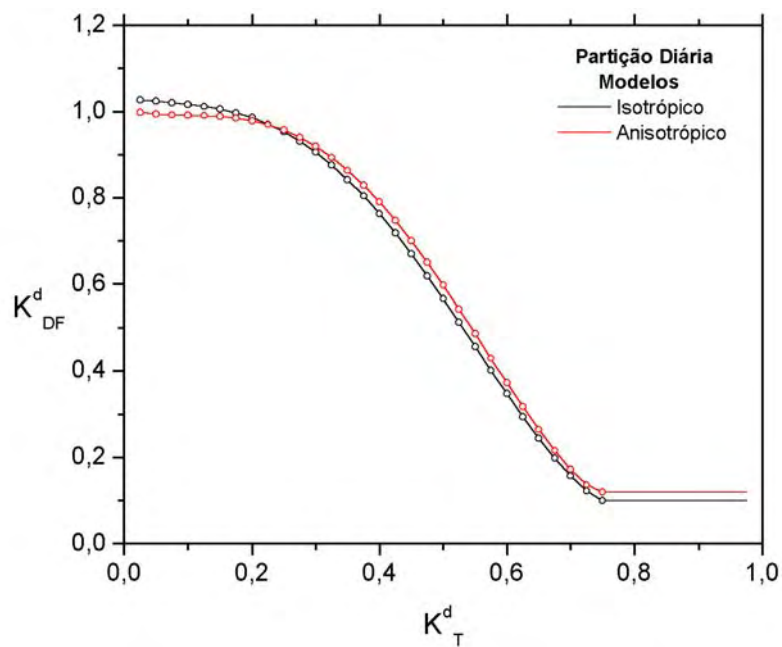


Figura 24. Modelos de estimativa Isotrópico K_{DFiso}^d e Anisotrópico K_{DFani}^d em função de K_T^d para Botucatu (partição diária).

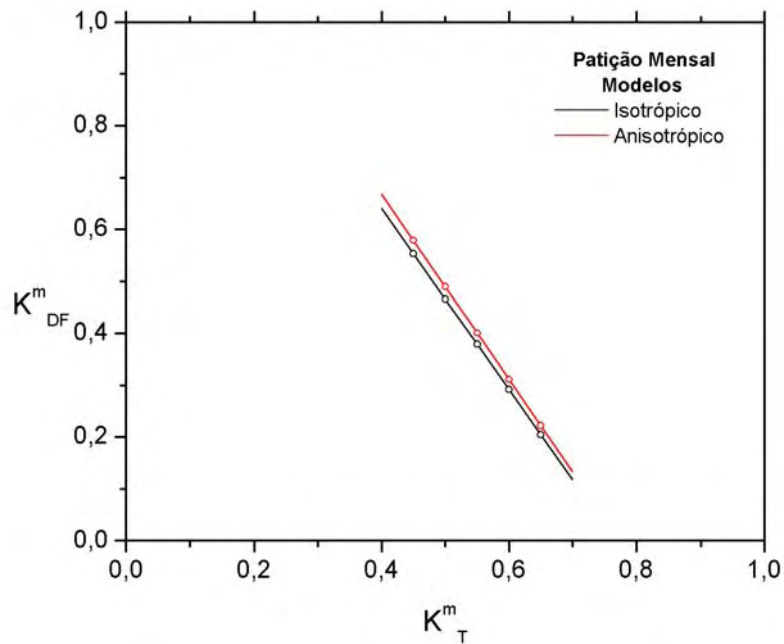


Figura 25. Modelos de estimativa Isotrópico K_{DFiso}^m e Anisotrópico K_{DFani}^m em função de K_T^m para Botucatu (partição média mensal).

Os gráficos 23, 24 e 25 mostram que as curvas médias dos modelos isotrópico e anisotrópico apresentaram o mesmo formato, porém com níveis quantitativos diferentes. Para as partições horária (Figura 23) e diária (Figura 24), o modelo anisotrópico apresentou valores de K_{DF} menores que o modelo isotrópico no intervalo $0 < K_T < 0,27$, causado pela aplicação da correção anisotrópica para cobertura de céu nublado ($F_{cAni} = 0,973$) que reduz o valor da fração difusa e conseqüentemente minimiza a ocorrência de valores de K_{DF} maiores que 1. No intervalo de $0,27 < K_T < 0,75$, a cobertura de céu muda gradativamente de nublado para aberto, o que aumenta o efeito da anisotropia e causa o aumento dos valores de K_{DF} para o modelo anisotrópico, conforme verificado pela elevação de sua curva de estimativa em relação ao modelo isotrópico. Para partição mensal (Figura 25),

em todo o intervalo de validade ($0,30 < K_T < 0,70$), o modelo anisotrópico apresentou valores de K_{DF} maiores que o modelo isotrópico.

Para efetuar a validação, os valores estimados pelos modelos isotrópico e anisotrópico foram comparados com os valores da irradiação difusa referência (método de medida obtida da diferença entre as irradiâncias global e direta na horizontal). O método da diferença é considerado o método mais preciso de medida da irradiância difusa por causa da não necessidade da aplicação de fatores de correção. O Quadro 8 mostra o resultado da validação dos modelos de estimativa por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t.

Quadro 8. Indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t obtidos da comparação entre as irradiações difusa horária, diária e média mensal de referência e medida para Botucatu-SP.

Modelos	Valores Horários						
	Tamanho da Amostra (hora)	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	t _e	t _c
Isotrópico	7321	-0,040	-7,206	0,230	41,650	14,986	1,645
Anisotrópico	7321	-0,010	-1,736	0,220	39,819	3,722	1,645
	Valores Diários						
	Tamanho da Amostra (dia)	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	t _e	t _c
Isotrópico	670	-0,312	-4,694	1,434	21,583	5,755	1,645
Anisotrópico	670	0,059	0,884	1,400	21,074	1,084	1,645
	Valores Médio Mensais						
	Tamanho da Amostra (mês)	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	t _e	t _c
Isotrópico	24	-0,437	-6,582	0,716	10,766	3,705	1,711
Anisotrópico	24	-0,079	-1,181	0,571	8,591	0,665	1,711

Em relação ao indicativo estatístico MBE, o modelo isotrópico subestimou o valor da irradiação difusa em todas as partições, mostrando que a aplicação dos fatores de correção isotrópicos não são suficientes na correção da irradiância difusa. O modelo anisotrópico subestimou os valores da irradiação difusa nas partições horária e mensal e superestimou na partição diária. Em relação ao modelo isotrópico, o modelo anisotrópico apresentou os valores de MBE mais próximos de zero, o que indica que o uso dos fatores anisotrópicos melhora a precisão das estimativas. Quanto ao indicativo RMSE, o nível de espalhamento verificado pela aplicação dos modelos isotrópico e anisotrópico foram próximos, não representando diferenças significativas. Para o teste t, a validação dos modelos isotrópico e anisotrópico na partição horária apresentou valores de t_e de 14,986 e 3,722 respectivamente, maiores que o t_c de 1,645 estabelecido ao nível de 5% de significância. Este resultado mostra que o parâmetro K_T utilizado na modelagem horária não é suficiente para estimar com precisão a irradiação difusa horária. A dinâmica atmosférica, característica desta partição, provavelmente é responsável pelo grande espalhamento verificado para os valores de K_{DF} , sendo recomendado o estudo de outros parâmetros (altura solar, tipo e quantidade de nuvens, etc) na tentativa de se melhorar a precisão das estimativas. Para as partições diária e mensal, o modelo isotrópico apresentou valores de t_e maiores que o t_c , ou seja, a aplicação dos fatores de correção isotrópicos na fase de modelagem e o índice de claridade K_T não foram parâmetros suficientes na estimativa diária e mensal da irradiação difusa. Para as partições diária e mensal, o modelo anisotrópico apresentou valor de t_e menor que o t_c , mostrando que a inclusão do efeito da anisotropia na formulação do modelo estatístico melhora significativamente a precisão das estimativas diária e mensal da irradiação difusa.

5 CONCLUSÃO

O fator de correção numérico anisotrópico proposto para anel de sombreamento Melo-Escobedo em função da cobertura de céu (índice de claridade K_T) é eficiente na correção da irradiância difusa isotrópica, aproximando a irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento em menos de 1% da irradiância difusa referência. O fator de correção anisotrópico do anel de sombreamento Melo-Escobedo sobre todas as coberturas de céu ($0 < K_T < 1$) depende da geometria do anel: dimensões diferentes (proporção 2:1 no raio e na largura, porém com a mesma razão largura-raio) proporcionam correções anisotrópicas diferentes, com melhor precisão para o anel de menor dimensão. Os fatores de correção anisotrópicos são diferentes para os anéis de Drummond e Melo-Escobedo de mesma dimensões. O fator de correção anisotrópico de Drummond para todas as cobertura de céu é

inferior, na média, em 2,5% em relação ao fator de correção anisotrópico do anel de Melo-Escobedo.

O algoritmo operacional desenvolvido para o gerenciamento da medida da irradiância difusa na frequência de 5 minutos com correção anisotrópica permite as integrações das partições horária, diária e mensal, com precisão inferior a 0,5% em relação a irradiação difusa obtida pelo método da diferença. Para partição horária, o desvio foi de 0,37%; diária 0,29% e mensal 0,24%.

A aplicação do fator de correção anisotrópico na base de dados da radiação difusa isotrópica permitiu, através das séries temporais diária média horária e anual média mensal diária, quantificar a eficiência do uso do modelo que, a longo prazo, aproximou consideravelmente os valores das irradiações difusa anisotrópica a irradiação difusa de referência. A aplicação do fator de correção anisotrópico na base de dados de radiação difusa isotrópica permitiu estimar a radiação global por meio da soma entre a radiação direta e as difusas referência, isotrópica e anisotrópica. A estimativa da irradiação global através da irradiação difusa anisotrópica está no mesmo nível de precisão (0,1%) da estimativa da irradiação global usando a difusa referência.

O modelo de estimativa estatístico isotrópico da fração difusa K_{DF} em função de K_T nas partições horária, diária e mensal apresentaram características polinomiais semelhantes a modelos da literatura de diversas regiões do mundo. Para partição horária e diária obteve-se equação polinomial do 4º grau e para mensal, do 1º grau. O modelo estatístico

local foi validado nas três partições com bons resultados quanto aos indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t. O modelo Isotrópico apresentou melhores estimativas da radiação difusa em comparação com os modelos clássicos da literatura segundo os indicativos estatísticos MBE, RMSE e teste t. 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 medida da difusa 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.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

COULSON, K. L. *Solar and terrestrial radiation, methods and measurements*. Academic Press, New York, 1973.

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.

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.

DRUMMOND, A. J. On the measurements of sky radiation. Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie, v.7, p.413-36, 1956.

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.

HAWLADER, M. N. A. Diffuse, global and extraterrestrial solar radiation for Singapore. International Journal of Ambient Energy, v.5, p.31-8, 1984.

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, 1979.

IQBAL, M. Estimation of the monthly average of the diffuse component of total insolation on a horizontal surface. Solar Energy, v.20, p.101-105, 1978.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.

JACOVIDES, C. P., HADJIOANNOU, L., PASHIARDIS, S., STEFANOY, 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.

KASTEN, F., DEHNE, K., BRETTSCHEIDER, W. Improvement of measurement of diffuse solar radiation. *Solar radiation data, série F*, n.2, p.221-5, D. Redel, Dordrecht, 1983.

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.

LEBARON, B. A., MICHALSKY, J. J., PEREZ, R. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, v.44, n.5, p.249-56, 1990.

LIU, B. Y. H. e 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.

MELO, J. M. D. Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta. Botucatu-SP, 1993, 130p. Tese (Doutorado em

Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas,
Universidade Estadual Paulista.

MELO, J. M. D., ESCOBEDO, J. F. Medida da radiação solar difusa. In: ENERGÍAS
LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR,
Vigo, Espanha. Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY, v. 1, 1994.

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. A new shadow-ring device for
measuring diffuse solar radiation at surface. Journal of Atmospheric and Oceanic
Technology, Boston, v. 19, p. 698-708, 2002a.

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.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA. Measurement of radiation and
sunshine. In: Guide to meteorological instruments and observing practices. Gênova, 2ª
edição, 1965. 279p.

- 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.
- POLLARD, D. G. e LANGEVINE, L. P. An anisotropic correction for diffuse irradiance measurements in Guyana. In: *Proceeding of the 1988 Annual Meeting*, M. J. Coleman (Ed.), p. 238-43, ASES Cambridge, 1988.
- ROBINSON, H., STOCH, L. Sky radiation and measurements and corrections. *Journal of Applied Meteorology*, v.3, p.179-81, 1964.
- 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.
- 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.

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 diffuse fraction of instantaneous solar radiation. *Solar Energy*, v.40, n.5, p.423-30, 1988.

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.

VIGNOLA, F., McDANIELS, D. K. Diffuse-global correlations: seasonal variations. *Solar Energy*, v.33, n.5, p.397-402, 1984.

ZANGVIL, A., AVIV, O. E. 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.321-7, 1987.