

FATORES DE CORREÇÃO NUMÉRICOS EM FUNÇÃO DA MASSA ÓTICA PARA A IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA MEDIDA PELO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO

A. Dal Pai¹, J. F. Escobedo², E. Dal Pai³

¹Departamento de Engenharia de Bioprocessos. Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA/UNESP. R. José Barbosa de Barros, 1780. CEP 18610-307. Botucatu/SP/Brasil. Tel+55143880-7162. E-mail: adalpai@fca.unesp.br

^{2,3}Departamento de Engenharia Rural /FCA/UNESP. Botucatu/SP/Brasil.

Recibido 14/08/14, aceptado 24/09/14

Resumo: O objetivo do trabalho foi propor fatores de correção numéricos da radiação para a irradiância solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento MEO em função de intervalos discretos da massa ótica. A base de dados de irradiâncias global, difusa e direta de 1996 a 2005 foi cedida pelo Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu-UNESP. Quatro quintos (4/5) dos dados foram utilizados na modelagem e o restante (1/5) para fins de validação. As coberturas de céu foram determinadas a partir da transmissividade atmosférica K_t (nublado $0 < K_t < 0,35$; parcialmente nublado difuso $0,35 < K_t < 0,55$; parcialmente nublado direto $0,55 < K_t < 0,65$; e aberto $0,65 < K_t < 1$). A validação foi realizada a partir dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e coeficiente angular da correlação entre as irradiâncias difusa anel e de referência. O modelo de correção baseado nas condições totais de cobertura de céu apresentaram os melhores resultados, com subestimativa da ordem de 2% e espalhamento de 10%. Sugere-se o uso da transmissividade atmosférica K_t em conjunto com a massa ótica para melhor caracterização dos efeitos complexos da atmosfera.

Palavras-chave: radiação solar difusa, anisotropia, massa ótica.

INTRODUÇÃO

A radiação solar é uma forma de energia renovável, limpa e barata e constitui a principal fonte de energia para processos físicos, biológicos e químicos, tais como fotossíntese vegetal, evapotranspiração, crescimento de culturas, dentre outras. Na área de conversão energética, guarda destaque em projetos de conforto térmico, de aquecimento de água, de painéis fotovoltaicos e de biomassa. Seu conhecimento permite que países emergentes e em desenvolvimento adotem políticas públicas para melhor aproveitamento dessa forma de energia, visto que a mesma tem impacto em setores estratégicos como economia e meio ambiente.

A radiação solar total que incide em uma superfície terrestre compreende parte do ultravioleta do espectro, com comprimentos de onda entre $0,3\mu\text{m}$ e $0,4\mu\text{m}$; espectro visível, com comprimentos entre $0,4\mu\text{m}$ e $0,7\mu\text{m}$; e parte do infravermelho próximo ao espectro visível, entre $0,7\mu\text{m}$ e $5,0\mu\text{m}$ e é denominada radiação solar global. Ela é composta por duas parcelas: a radiação solar direta e a radiação solar difusa. A radiação solar direta é a parcela da radiação global que não apresenta interação com a atmosfera e, portanto não é atenuada pelos processos de absorção, reflexão e espalhamento. Já a parcela da radiação solar global espalhada pela atmosfera é conhecida como radiação solar difusa e é fruto dos espalhamentos Rayleigh (partículas pequenas da ordem de 10% do comprimento de onda da radiação incidente - gases) e Mie (partículas da ordem do comprimento de onda da radiação incidente - aerossóis) (IQBAL, 1983). Condições de elevada nebulosidade, além de dificultarem a passagem de radiação solar, promovem um espalhamento mais uniforme (Rayleigh), característico da transmissividade atmosférica baixa. Já para uma atmosfera sem nuvens e de transmissividade atmosférica elevada, há maior probabilidade da presença de aerossóis, ocorrendo um espalhamento mais direcional (Mie) (BATTLES, 1995; VARTIAINEN, 1999).

Além de espalhar a radiação solar, a atmosfera, por meio de seus constituintes, também pode absorver quantidades consideráveis da radiação solar, influenciando diretamente o balanço de energia na atmosfera. Devido a absorção seletiva por estes constituintes, certos comprimentos de onda são severamente mais afetados do que outros e isto conduz a diferenciação entre a composição espectral da radiação difusa e da radiação solar direta. Oliveira et al. (2002a) constataram que a absorção da radiação solar pelos poluentes da atmosfera urbana da região metropolitana de São Paulo causou a atenuação dos valores horários e diários da radiação global na ordem de 10 a 12%.

Uma forma de analisar a atenuação da radiação solar causada pela atmosfera é relacioná-la com a massa ótica. A massa ótica é uma medida do comprimento do trajeto percorrido pelos raios solares ao atravessar a atmosfera, ao nível do mar, expresso como um múltiplo do comprimento do percurso percorrido pelos raios para uma incidência zenital. Logo, o aumento do ângulo zenital é acompanhado do aumento da massa ótica, elevando a probabilidade de espalhamento da radiação pela atmosfera, provocando mudanças na fração difusa e na fração direta em relação à radiação global.

¹Prof. Doutor (FCA/UNESP)

²Prof. Livre Docente (FCA/UNESP)

³Prof. Doutor (FCA/UNESP)

A melhor forma de se obter informações sobre a radiação solar é por meio de medidas locais. No entanto, em algumas situações, o custo elevado dos equipamentos inviabiliza a medição. A radiação solar mais comumente medida mundialmente, por questões financeiras e práticas, é a radiação global por meio de um piranômetro, enquanto que o monitoramento das radiações direta e difusa é mais escasso. A medição da radiação direta necessita de um pireliômetro acoplado a um sistema de rastreamento solar que, além de encarecer o processo de medida, requer treinamento e capacitação de recursos humanos. Dessa forma, por questões financeiras, muitas estações meteorológicas medem a radiação global e a radiação difusa e calculam a radiação direta por diferença. Para radiação difusa existem três métodos de medida: método da diferença, método do disco e método do anel. Os métodos da diferença e do disco, apesar de apresentarem maior precisão na tomada da medida, demandam grande investimento financeiro devido aos sistema de rastreamento solar, inviabilizando sua implementação de rotina. Já o método do anel é uma solução alternativa de baixo custo e operacionalização simples e consiste na medida da radiação difusa por meio de um piranômetro posicionado à sombra de um anel de dimensões conhecidas. Na literatura podem ser encontrados três montagens distintas para o método do anel de sombreamento: montagem Drummond (Drummond, 1956), Robinson (Robinson e Stoch, 1964) e MEO (MeloeEscobedo, 1994; Oliveira et al, 2002b). Na montagem Drummond, o sensor é fixo e o anel é transladado paralelamente ao eixo polar para compensar as variações da declinação solar. Na montagem Robinson, o sensor também é fixo no centro do anel e, para compensar as variações na declinação solar, o anel é rotacionado em torno do eixo polar. Na montagem MEO, o anel é fixo e o sensor é transladado paralelamente ao plano de horizonte local em uma base móvel para compensar as variações da declinação solar. A Figura 1 mostra as três montagens para o método do anel de sombreamento.

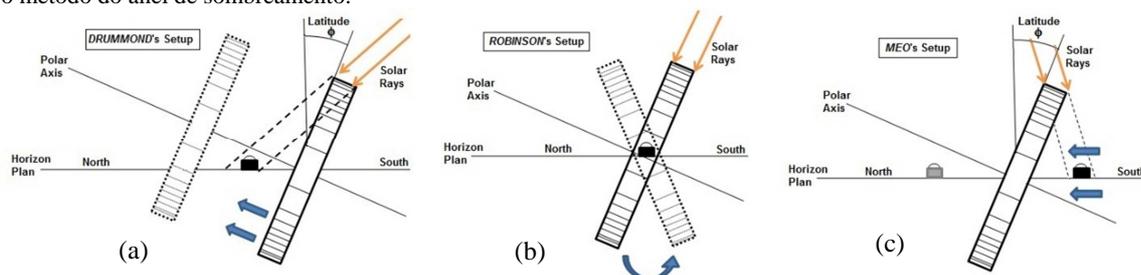


Figura 1. Montagens para o método do anel de sombreamento de medida da radiação solar difusa: a) Montagem Drummond; b) Montagem Robinson; c) Montagem MEO.

Uma desvantagem do método do anel de sombreamento é o uso de fatores de correção para compensar a irradiância difusa bloqueada pelo anel. Dois tipos de correção são sugeridos na literatura, uma geométrica, a qual se baseia na isotropia da radiação e depende dos aspectos construtivos do anel (raio e largura) e de fatores geoespaciais (latitude e declinação solar) (Drummond, 1956; Dehne, 1984; Ineichen *et al*, 1984; Stanhill, 1985), e outra numérica, que depende de efeitos atmosféricos como turbidez, nebulosidade, aerossóis, vapor de água dentre outros, os quais são responsáveis pela anisotropia da radiação. Diversos trabalhos na literatura especializada propõem correções adicionais que levam em consideração os efeitos anisotrópicos da radiação (Painter, 1981; Vartiainen, 1999). Essas correções adicionais apresentam dependência temporal (Stanhill, 1985) e espacial (Dehne, 1984) devido aos diferentes tamanhos e concentrações de material particulado na atmosfera, sendo a transmissividade atmosférica K_t (razão entre as irradiâncias global e extraterrestre) o parâmetro mais representativo das condições anisotrópicas do céu (Lebaron *et al*, 1990; Battles, 1995).

O objetivo do trabalho foi quantificar as correções numéricas em função da massa óptica para a irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento MEO para condições totais de cobertura de céu e para condições específicas de cobertura de céu (nublado, parcialmente nublado, parcialmente aberto e aberto).

MATERIAL E MÉTODOS

Local e Instrumentação

O presente estudo é baseado em medições registradas pelo Laboratório de Radiometria Solar durante os anos de 1996 a 2005. Foram utilizados quatro quintos (4/5) dos dados para desenvolvimento do modelo de correção, enquanto o restante (1/5) foi utilizado para fins de validação. O Laboratório de Radiometria Solar está localizado no Campus de Botucatu da Universidade Estadual Paulista (22°54'S, 48°27'W, 716 m). Botucatu é uma cidade semi-rural cercada por cana-de-açúcar e plantações de eucalipto com 127,328 habitantes, poucas indústrias e economia baseada em serviços.

A irradiância solar global I_G foi medida por um piranômetro Eppley - PSP ($K = 7,45 \mu V/Wm^2$); a irradiância solar direta I_b por um pireliômetro Eppley NIP ($K = 7,59 \mu V/Wm^2$) equipado com um dispositivo de rastreamento solar ST-3; e a irradiância solar difusa I_d por um piranômetro Eppley-PSP ($K = 7,47 \mu V/Wm^2$) sob o anel de sombreamento MEO (raio de 0,40 m e largura de 0,10 m). Tab. 1 mostra as características operacionais dos dispositivos de medição.

Os valores das irradiâncias solares foram monitorados por um sistema de aquisição de dados automático modelo Datalogger 23X da empresa Campbell Scientific Inc com frequência de varredura de 0,2 Hz. Foram calculados os valores médios a cada 5 minutos e armazenados no formato W/m^2 .

	Irradiância		
	Global	Direta	Difusa
Sensor-marca	Eppley Precision Spectral Pyranometer	Eppley Normal Incidence Pyrheliometer	Eppley Precision Spectral Pyranometer
Sensibilidade	7,45 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	7,59 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	7,47 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Intervalo Espectral	295 – 2800 nm	295 – 2800 nm	295 – 2800 nm
Tempo de resposta	1 s	1 s	1 s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (0 até 2800 W/m^2)	$\pm 0,5\%$ (de 0 até 1400 W/m^2)	$\pm 0,5\%$ (0 até 2800 W/m^2)
Efeito Cosseno	$\pm 1\%$ ($0^\circ < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$)	–	$\pm 1\%$ ($0^\circ < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$)
Dependência Temperatura	$\pm 1\%$ (de -20°C até $+40^\circ\text{C}$)	$\pm 1\%$ (de -20°C até $+40^\circ\text{C}$)	$\pm 1\%$ (de -20°C até $+40^\circ\text{C}$)

Tabela 1: Características operacionais dos aparelhos de medidas das irradiâncias solares global, direta e difusa.

Controle de Qualidade e Indicativos Estatísticos

Os dados de irradiância difusa medidos pelo anel de sombreamento MEO foram corrigidos usando os fatores de correção geométricos propostos por Oliveira *et al.* (2002b) (Eq.(1) e Eq.(2)).

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

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

onde b é a largura do anel, R o raio do anel, δ a declinação solar, ϕ a latitude, ω o ângulo horário e Θ_z o ângulo zenital. A irradiância difusa verdadeira, denominada irradiância difusa de referência foi calculada pela diferença entre as irradiâncias global e direta projetada na horizontal dada pela Eq. 3.

$$I_{dREF} = I_G - I_B \cos \theta_z \quad (3)$$

A filtragem dos dados foi baseada nos critérios adotados por Kudish e Evseev (2008). 9,1% dos dados foram removidos devido a desalinhamento, fios danificados, falta de eletricidade e reflexões internas ocorridas no anel de sombreamento causada pela baixa altitude solar.

A transmissividade atmosférica K_T (razão entre as irradiâncias solares global e extraterrestre) foi calculada pela Eq. 4. Os critérios de classificação de céu baseados na transmissividade atmosférica K_T (ESCOBEDO ET AL, 2009) estão apresentados na Tab 2.

$$K_T = \frac{I_G}{I_o} \quad (4)$$

Intervalo de K_T	Cobertura de céu
$0 < K_T < 1$	Condições Totais
$0 \leq K_T < 0,35$	Nublado
$0,35 \leq K_T < 0,55$	Parcialmente nublado
$0,55 \leq K_T < 0,65$	Parcialmente aberto
$0,65 \leq K_T < 1$	Aberto

Tabela 2. Intervalos da Transmissividade Atmosférica K_T e classificação de cobertura de céu (Escobedo et al, 2009)

A massa ótica foi calculada pela Eq 5.

$$m_a = \frac{p/p_o}{\cos \theta_z + 0.50572(96.07995 - \theta_z)^{-1.6364}} \quad (5)$$

onde p/p_o é a correção devida a altitude e θ_z é o ângulo zenital. Para cálculo dos fatores de correção numéricos, uma rotina computacional foi desenvolvida para calcular os fatores de correção numéricos por classes específicas da massa ótica. A Fig 2 mostra a distribuição de frequências da massa ótica para classes de 0,05 de amplitude.

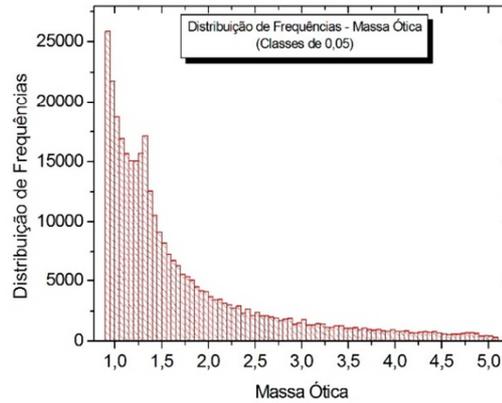


Figura 2. Distribuição de frequências da massa ótica em classes de 0,05.

A avaliação do modelo de correção baseou-se nos indicadores estatísticos MBE e RMSE (STONE, 1993) dados pelas Eq. (6) e Eq. (7), respectivamente.

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

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

onde y_i representa os valores da irradiância difusa anel, x_i os valores da irradiância difusa de referência e N o número de observações. O indicativo MBE representa o desvio simples e um valor positivo indica uma superestimativa, enquanto que um valor negativo indica uma subestimativa. Já o indicativo RMSE representa o desvio padrão e está relacionado à dispersão dos valores em relação à média.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar como as medidas do método do anel de sombreamento MEO se comportam em função da massa ótica, calculou-se o fator de correção numérico (razão entre as irradiâncias difusa referência e anel) para cada intervalo de massa ótica. Os valores das irradiâncias difusa referência e anel foram agrupados em 84 classes de massa ótica de amplitude 0,05, o que representa um intervalo de 0,9 até 5,1 de massa ótica. Pela Fig. 2, observa-se que a grande maioria das observações estão em classes com massa ótica menor que 3. Para cada classe de massa ótica, calculou-se a fator de correção numérico por meio da divisão da irradiância difusa referência pela medida do anel e em seguida extraiu-se uma média para a referida classe. Este procedimento foi realizado para todas as condições de céu e também para condições específicas de céu, como as coberturas de céu nublado, parcialmente nublado, parcialmente aberto e aberto. A Fig. 3 mostra o fator de correção numérico médio para as classes de massa ótica para condições totais de cobertura de céu, condições de céu nublado, parcialmente nublado, parcialmente aberto e aberto.

Para as condições totais de cobertura de céu, observa-se que o fator de correção numérico é maior que 1 para massas óticas inferiores a 2,4. Desse modo, fica evidente que a irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento MEO é inferior a difusa de referência. Provavelmente o anel de sombreamento, além de bloquear a irradiância solar direta na incidência, bloqueia também uma parcela da radiação circunsolar, o que faz com que a medida fique subestimada. O valor máximo que o fator de correção numérico atingiu foi de 1,14 para massa ótica de 1,33. Este valor de massa ótica é um valor próximo de uma incidência solar ao ângulo zenital de 30°. Dessa forma, favorece-se uma situação de perpendicularidade entre o anel de sombreamento e a incidência dos raios solares, aumentando-se a área de sombreamento e provavelmente favorecendo o aumento do fator de correção numérico. Para valores de massa ótica superiores a 2,4, nota-se que os fatores de correção numéricos foram inferiores a 1, mostrando uma difusa anel maior que a difusa de referência. Neste caso, a baixa elevação solar pode ter sido responsável pelo aumento das reflexões internas, tanto no solo como nas estruturas internas do anel, elevando os níveis de irradiância difusa medida pelo sensor (LEBARON et al, 1980).

Em relação às coberturas de céu específicas, os fatores de correção numéricos para a cobertura de céu nublado foram todos inferiores a 1 para todas as classes de massa ótica. Em situações de céu nublado, os efeitos da isotropia da radiação são mais significativos. A cobertura de nuvens serve com elemento bloqueador dos raios incidentes, minimizando os efeitos da irradiância circunsolar sobre os fatores de correção numéricos. Sendo assim, a aplicação dos fatores de correção geométricos foi responsável pelos maiores valores da irradiância difusa anel, sendo a aplicação dos fatores numéricos necessária para diminuir essas superestimativas causada pelos fatores de correção geométricos.

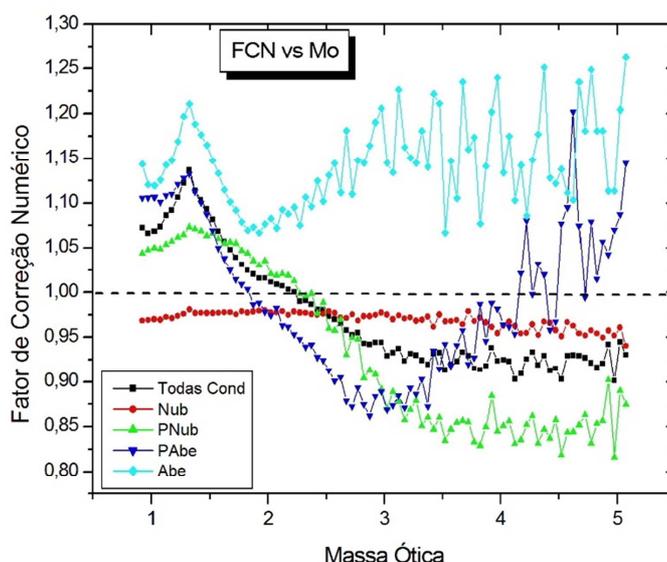


Figura 3. Fatores de correção numérica da irradiância solar difusa em função da massa ótica para as condições totais de cobertura de céu, céu nublado, céu parcialmente nublado, céu parcialmente aberto e céu aberto.

Para cobertura de céu parcialmente nublado, os fatores de correção numéricos são maiores que 1 para classes de massa ótica inferiores a 2,4 e menores que 1 para massa ótica maior que 2,4. Nesta cobertura de céu inicia-se a fase de transição de céu nublado para aberto, elevando-se assim os efeitos anisotrópicos da radiação causados pela interação anel e radiação circumsolar. Já os fatores numéricos menores que 1 ocorrem para situações de baixa elevação solar, favorecendo as multi-reflexões em elementos adjacentes ao sensor de medida. Para a cobertura de céu parcialmente aberta, os níveis de anisotropia aumentam gradativamente como pode ser verificado pelo aumento dos fatores de correção numéricos em relação a cobertura de céu parcialmente nublado. Os fatores de correção numéricos são maiores que 1 para classes de massa ótica inferiores a 1,8. Para classes de massa ótica maiores que 1,8, os fatores numéricos são inferiores a 1 em função das multi-reflexões causadas pela baixa elevação solar. No entanto, observa-se que o fator numérico atinge um valor mínimo na massa ótica de 3 e a partir daí eleva-se a ponto de superar o valor 1 para massas óticas superiores a 4,2. Nessas classes de massa ótica, além da quantidade de dados ser mínima como observado pela Fig 2, a variabilidade dos valores da difusa estão relacionadas a sensibilidade do aparelho em medir valores de irradiância muito pequenos, característicos do começo e/ou fim do dia.

Em relação a cobertura de céu aberto, os fatores de correção numéricos são maiores que 1 para todas as classes de massa ótica, isto é, nesta cobertura, a irradiância difusa medida pelo anel foi menor que a difusa referência. Nessas condições de cobertura de céu, a anisotropia tem seu efeito maximizado e a elevada radiação circumsolar barrada pelo anel de sombreamento causa a subestimativa da irradiância difusa medida pelo método do anel de sombreamento MEO. Ocorre um ponto de máximo (FCN=1,22) em Mo=1,33 semelhante ao ocorrido para todas as condições de céu.

Para classes de massa ótica entre 0,9 e 2,2, o comportamento do FCN parece estabilizado, o que não ocorre para classes de massa ótica superiores a 2,2. Neste caso, o FCN apresenta um comportamento oscilatório, alternando entre valores crescentes e decrescentes. Para estas classes, a frequência de ocorrência é baixa e em virtude da baixa elevação solar, os valores medidos são muito pequenos a ponto de serem afetados pela sensibilidade do aparelho, causando as oscilações observadas.

Na tentativa de se propor uma metodologia de correção da irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento MEO em função da massa ótica, foram propostas equações de correção. A Fig 4 mostra os fatores de correção numéricos em função da massa ótica para as condições totais de cobertura de céu e a equação de correção ajustada por um polinômio de 4º grau (Eq. 8).

$$FCN = 0,889 + 0,453Mo - 0,323Mo^2 + 0,076Mo^3 - 0,006Mo^4 \quad R^2=0,957 \quad (8)$$

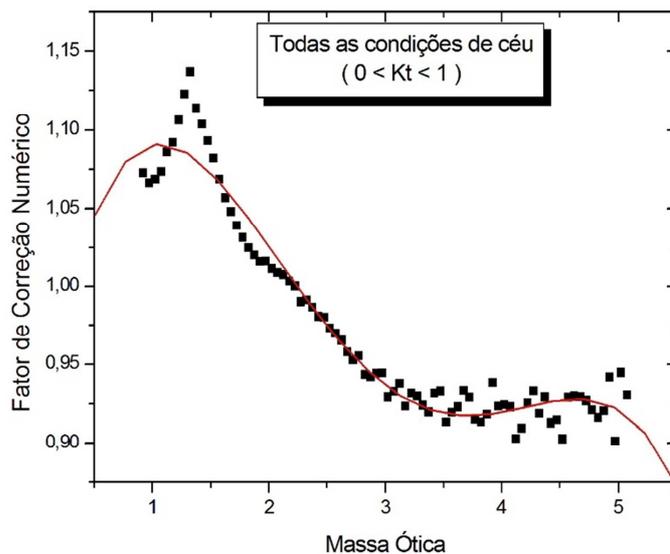


Figura 4. Equação ajustada para estimativa dos fatores de correção da irradiância solar difusa para condições totais de cobertura de céu.

Foram também propostas equações de correção para as demais coberturas de céu. A Fig 5 mostra os fatores de correção numéricos em função da massa ótica para as diferentes coberturas de céu, juntamente com as curvas de ajuste polinomial. Polinômios de 4º grau foram melhor ajustados para as coberturas de céu nublado e parcialmente aberto (Eqs 9 e 11 respectivamente); polinômio de 3º grau para cobertura de céu parcialmente nublado (Eq 10); e um polinômio de 5º grau para cobertura aberta (Eq 12). O caráter oscilatório verificado na cobertura de céu aberto necessitou de um polinômio de grau maior para explicar as variações do FCN e mesmo assim apresentou um coeficiente de determinação baixo ($R^2=0,301$).

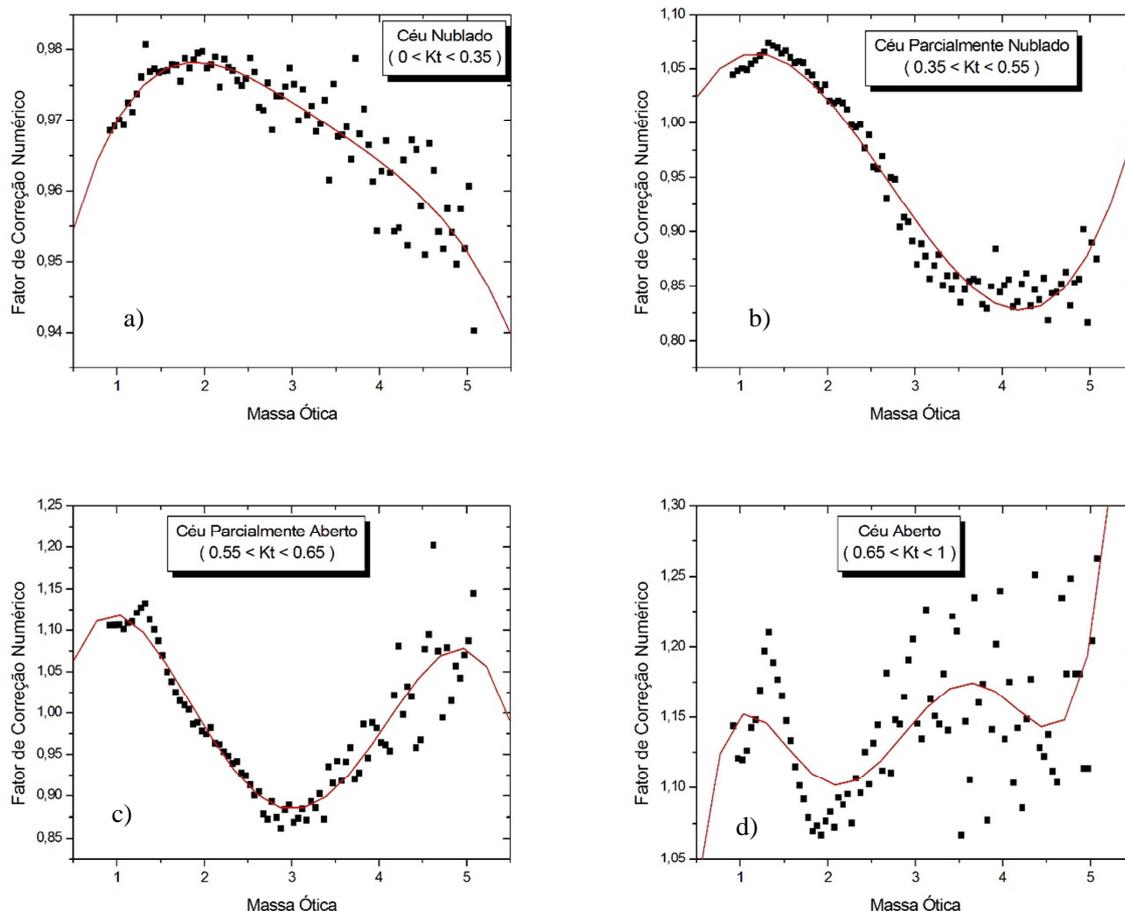


Figura 5. Equação ajustada para estimativa dos fatores de correção da irradiância solar difusa: a) céu nublado; b) céu parcialmente nublado; c) céu parcialmente aberto; d) céu aberto.

Equações de Correção	CoefDet	Céu	Eq.
$FCN = 0,926 + 0,073Mo - 0,035Mo^2 + 0,007Mo^3 - 0,0005Mo^4$	$R^2=0.802$	Nub	(9)
$FCN = 0,930 + 0,251Mo - 0,136Mo^2 + 0,017Mo^3$	$R^2=0.963$	P. Nub	(10)
$FCN = 0,805 + 0,784Mo - 0,620Mo^2 + 0,164Mo^3 - 0,014Mo^4$	$R^2=0.871$	P. Abe	(11)
$FCN = 0,490 + 1,731Mo - 1,632Mo^2 + 0,682Mo^3 - 0,129Mo^4 + 0,009Mo^5$	$R^2=0.301$	Abe	(12)

Tabela 3. Equações de correção da irradiância solar difusa em função da massa ótica para diferentes classificações de cobertura de céu.

Para a validação, foi utilizada uma base de dados independente composta pelos anos de 1996 e 2002. Os valores da irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento foram corrigidos pelos fatores de correção numéricos propostos pelas Eqs 8, 9, 10, 11 e 12 e foram comparadas com a irradiância difusa referência. Foram feitos dois tipos de validação: no primeiro tipo de validação o interesse destina-se a medida da irradiância difusa em uma determinada cobertura de céu apenas. Neste caso, a Tab. 4 mostra o resultado da validação por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e coeficiente angular e a Fig 6 os gráficos respectivos da validação entre a irradiância difusa referência e corrigida para as coberturas de céu nublado, parcialmente nublado, parcialmente aberto e aberto.

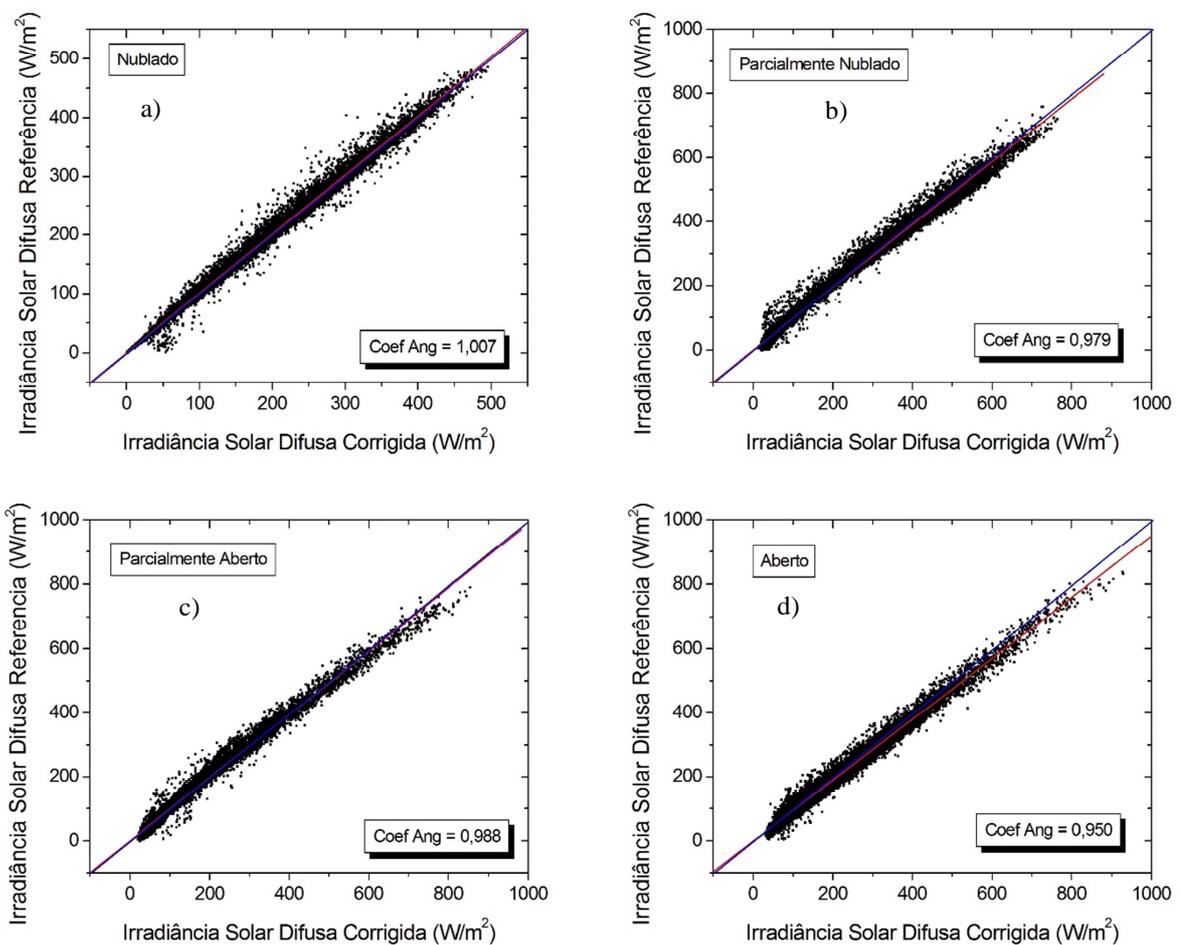


Figura 6. Comparação entre a irradiância difusa referência e corrigida para as coberturas de céu: a) nublado; b) parcialmente nublado; c) parcialmente aberto; d) aberto.

Coberturas Específicas de Céu	MBE (%)	RMSE (%)	Coefficiente Angular
Nublado	0,765	5,319	1,007
Parcialmente nublado	-0,931	8,163	0,979
Parcialmente Aberto	-0,378	10,123	0,988
Aberto	-4,680	11,008	0,950

Tabela 4. Indicativos estatísticos MBE(%) e RMSE(%) da validação para coberturas específicas de céu.

O indicativo estatístico MBE mostrou que as três primeiras coberturas de céu (nublado, parcialmente nublado e parcialmente aberto) apresentaram desvios da ordem de 1% em módulo, considerados adequados por estarem dentro da precisão do aparelho de medida. Já a cobertura de céu aberto apresentou o maior valor de MBE, próximo de 5%, considerado elevado por estar na mesma ordem de grandeza dos desvios da aplicação apenas da correção geométrica (DAL PAI e ESCOBEDO, 2011). Em relação ao espalhamento (RMSE), a cobertura de céu nublado apresentou menor variação de 5%, crescendo à medida que o céu tornava-se mais limpo, com espalhamento máximo de 11% para cobertura de céu aberto.

No segundo tipo de validação, o interesse foi observar, a longo prazo, como a aplicação das correções numéricas em função da massa ótica se comporta na correção do banco de dados da irradiância difusa. Aplicou-se as correções para todas as coberturas de céu na irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento e também foram aplicadas as correções específicas de cobertura de céu combinadas. A Tab. 5 mostra o resultado da validação por meio dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e coeficiente angular e a Fig 7 os gráficos respectivos da validação entre a irradiância difusa referência e corrigida todas as coberturas de céu e para as correções específicas de cobertura de céu combinadas.

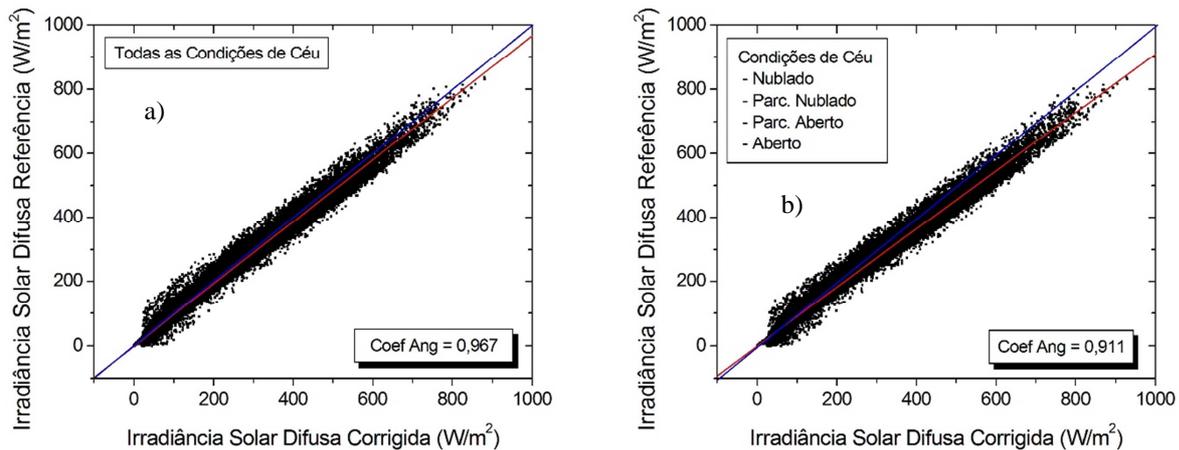


Figura 7. Comparação entre a irradiância difusa referência e corrigida para: a) todas as coberturas de céu; b) condições específicas de cobertura combinadas (nublado, parcialmente nublado, parcialmente aberto e aberto).

	MBE(%)	RMSE(%)	Coefficiente Angular
Condições Totais de Cobertura	-2,081	10,610	0,967
Coberturas específicas combinadas	-8,811	14,440	0,911

Tabela 5. Indicativos estatísticos MBE(%) e RMSE(%) da validação para condições totais de cobertura e combinando as coberturas específicas de céu.

O indicativo estatístico MBE mostrou que a aplicação das correções para todas as condições de céu apresentou os melhores resultados, com subestimativa próxima de 2%. Já o uso combinado das correções das coberturas específicas combinadas produziu um desvio de -8%. Em relação ao espalhamento RMSE, o espalhamento ficou entre 10 a 14%. Em termos gerais, as correções que dependem da massa ótica foram em média maiores que as correções que dependem da transmissividade atmosférica K_t . Diversos trabalhos na literatura apontam que a transmissividade atmosférica K_t é o melhor parâmetro para representar a anisotropia da radiação, vindo a massa ótica em segundo lugar. Em estudos futuros buscar-se-á equações de correção multivariadas que estabeleçam pesos para os parâmetros transmissividade atmosférica e massa ótica na tentativa de melhorar a precisão da medida da irradiância difusa pelo método do anel de sombreamento MEO.

CONCLUSÃO

- O estudo da relação entre a irradiância solar difusa e a massa ótica permitiu as seguintes conclusões:
- ✓ Os fatores de correção numéricos apresentam dependência da massa ótica
 - ✓ Massas ótica superiores a 3 promovem elevada variabilidade dos fatores de correção numéricos.
 - ✓ O método de medida do anel de sombreamento MEO causa subestimativas para qualquer valor de massa ótica na cobertura de céu nublado.
 - ✓ Superestimativas ocorrem para qualquer valor de massa ótica na cobertura de céu aberto devido a anisotropia da radiação.
 - ✓ A partir dos resultados pode-se concluir que a atenuação da radiação global obedece à equação de Beer-Lambert, com um decaimento exponencial, como uma função da massa ótica. Em relação a radiação directa e difusa, a atenuação também observada nos valores medidos devido ao aumento da massa de ar óptico. O aumento do comprimento do percurso óptico aumenta a probabilidade de colisão.
 - ✓ A análise conjunta da radiação directa e difusa permitiu sugerindo possíveis comportamentos dos fenômenos de atenuação atmosférica (absorção e espalhamento), o que pode ser melhorado no futuro, com dados adicionais para a sazonalidade, umidade relativa do ar, aerossóis e ozônio.
 - ✓

- ✓ A continuidade do estudo pode estabelecer uma metodologia para a análise da composição da atmosfera devido à radiação global, direta e difusa.

REFERÊNCIAS

- Battles, F. J., Olmo, F. J., Alados-Arboledas, L., 1995. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, v.54, n.2, p.105-114.
- Dal Pai, A., Escobedo, J. F., 2011. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowing measuring method, ISES SOLAR WORLD CONGRESS, Kassel, Germany.
- Dehne, K., 1984. 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. 263-267.
- Drummond, A. J., 1956. On the measurements of sky radiation. *Archiv. furMeteorologie. GeophysikBioklimatologie*, v.7, p.413-436.
- Escobedo, J F, Gomes, E N, Oliveira, A P, Soares, J., 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*, v. 86, p 299-309.
- Ineichen, P, Gremaud, J M, Guisan, O, Mermoud, A., 1984. Study of the corrective factor involved when measuring the diffuse solar radiation by use of the ring method. *Solar Energy*, v.32, p 585-590.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.
- Kudish, A I, Evseev, E G., 2008. The assessment of four different correction models applied to the diffuse radiation measured with a shadow ring using global and normal beam radiation measurements for Beer Sheva, Israel. *Solar Energy*, v.82, p.144-156.
- Lebaron, B. A., Michalsky, J. J., Perez, R. 1990. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, v.44, n.5, pp.249-256.
- Lebaron, B. A., Peterson, W. A., Dirmhirn, I. 1980. Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. *Solar Energy*, v.25, p.1-13.
- Melo, J. M. D., Escobedo, J. F., 1994. Medida da radiação solar difusa. In: ENERGIAS LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, Vigo, Espanha. *Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY*, v. 1.
- Oliveira, A. P., Escobedo, J. F., Machado, A. J., Soares, J. 2002a. Correlation models of diffuse solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy*, v. 71, n. 1, p. 59-73.
- Oliveira, A. P., Escobedo, J. F., Machado, A. J. 2002b. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Boston, v. 19, p. 698-708.
- Painter, H. E., 1981. The shade ring correction for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, v.26, p.361-363.
- Robinson, H., Stoch, L., 1964. Sky radiation and measurements and corrections. *Journal of Applied Meteorology*, v.3, p.179-181.
- Stanhill, G. 1985. Observations of shading correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.111, pp.1125- 30.
- Stone, R. J. 1993. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, v.51, n.4, pp.289-291.
- Vartiainen, E., 1999. An anisotropic shadow ring correction method for the horizontal diffuse irradiance measurements. *Renewable Energy*, v.17, p.311-317.

NUMERIC CORRECTION FACTORS DUE TO OPTICAL AIR MASS FOR THE DIFFUSE SOLAR IRRADIANCE MEASURED BY THE MEO SHADOWRING METHOD

Abstract: The objective was to propose a numerical correction of radiation to the diffuse irradiance measured by the shading MEO ring due to discrete intervals of optical mass method factors. The database of global, direct and diffuse irradiance from 1996 to 2005 was provided by the Laboratory of Solar Radiometry Botucatu-UNESP. Four-fifths (4/5) data were used in modeling and the rest (1/5) for validation purposes. The sky coverages were determined from atmospheric transmissivity K_t (cloudy $0 < K_t < 0.35$; partly cloudy diffuse $0.35 < K_t < 0.55$; partly cloudy Direct $0.55 < K_t < 0.65$, and open $0.65 < K_t < 1$). The validation was performed from the statistical indicative MBE, RMSE and slope of the correlation between the diffuse irradiance ring and reference. The correction model based on total sky cover conditions showed the best results, with underestimation of the order of 2% and 10% scattering. It is suggested the use of atmospheric transmissivity K_t together with the optical mass to better characterize the complex effects of the atmosphere..

Key words: diffuse solar radiation, anisotropy, optical air mass.