

# CORREÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA MEDIDA PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO *MEO* EM FUNÇÃO DE INTERVALOS DISCRETOS DA TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA

Alexandre Dal Pai – adalpai@fatecbt.edu.br

Faculdade de Tecnologia de Botucatu – FATEC-BT – São Paulo

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP – Botucatu – São Paulo

**Resumo.** O objetivo do trabalho é propor um modelo de correção dos efeitos anisotrópicos da radiação para a irradiância solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento *MEO* em função de intervalos discretos da transmissividade atmosférica  $K_t$ . 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. A transmissividade atmosférica  $K_t$  foi dividida em cem intervalos iguais de amplitude 0,01 e as correções foram obtidas a partir dos valores médios da razão entre a irradiância difusa de referência pela irradiância difusa anel. A validação foi realizada a partir dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e coeficiente angular da correlação entre as irradiâncias difusa anel e de referência. Verificou-se que somente a aplicação das correções geométricas não foi suficiente para corrigir os valores da irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento *MEO*. Já a aplicação combinada das correções geométricas com as correções propostas em função da transmissividade atmosférica  $K_t$  reduziu significativamente a diferença entre as irradiâncias difusa de referência e anel, com uma diferença média de 0,75% entre os valores.

**Palavras-chave:** Irradiância solar difusa, Métodos de medidas, Anel de sombreamento

## 1. INTRODUÇÃO

Entre as componentes da radiação solar monitoradas nas estações meteorológicas no mundo, a radiação global é a componente mais extensivamente medida, enquanto que o monitoramento das radiações direta e difusa é escasso. No entanto, em função dos custos operacionais associados aos dispositivos de rastreamento solar, é comum as estações de meteorologia medirem as componentes global e difusa e calcularem a componente direta pela diferença (Eq.(1)).

$$I_D = I_G - I_d \quad (1)$$

onde  $I_D$  é a irradiância direta,  $I_G$  a irradiância global e  $I_d$  a irradiância difusa. O método mais adotado no monitoramento da irradiância difusa devido à facilidade de manutenção e custos relativamente baixos é o método do anel de sombreamento. Neste método, o anel, orientado perpendicularmente ao eixo polar num ângulo igual à latitude local, obstrui os raios solares diretos do nascer ao por-do-sol, deixando o sensor sempre à sombra e permitindo somente a incidência da irradiância difusa. As montagens mais conhecidas são as montagens de Drummond (Drummond, 1956) e Robinson (Robinson e Stoch, 1964). Na montagem de Drummond, o sensor é fixo e o anel é transladado paralelamente ao eixo polar para compensar as variações da declinação solar. Assim, distância anel-sensor e largura da sombra são variáveis. Na montagem de 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. Nesta montagem, a distância anel-sensor e largura da sombra são constantes. Uma configuração alternativa para o método do anel de sombreamento foi proposta por Melo e Escobedo (1994) – anel de sombreamento *MEO* (Fig. 1). Nesta configuração, a operação mecânica é inversa à montagem de Drummond. Na configuração do anel de sombreamento *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.

## Anel de Sombreamento MEO

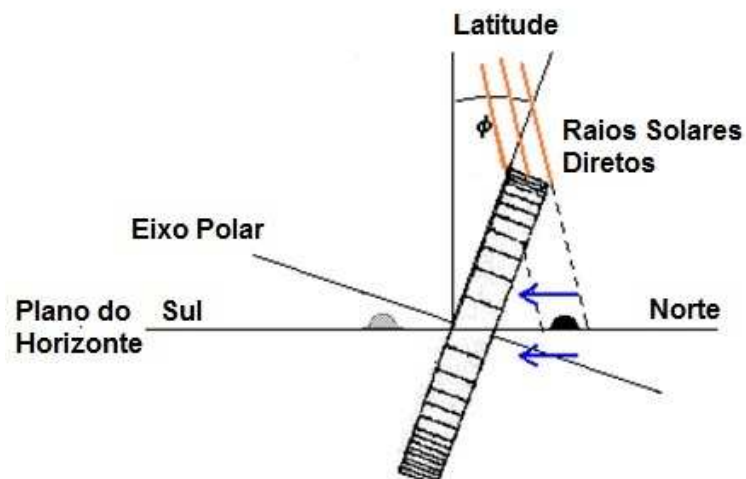


Figura 1 - Montagem do anel de sombreamento MEO.

Uma desvantagem do método do anel de sombreamento é o uso de fatores de correção geométricos (FC) para compensar a irradiância difusa bloqueada pelo anel (Drummond, 1956; Dehne, 1984; Ineichen *et al*, 1984; Stanhill, 1985) dado pelo Eq. (2). A fração de perda ( $F_p$ ) baseia-se na isotropia da radiação, que depende dos aspectos construtivos do anel (raio e largura) e de fatores geoespaciais (latitude e declinação solar). Oliveira *et al* (2002) calculou a fração de perda para o anel de sombreamento *MEO* (Eq. (3)).

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

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

onde  $b$  é a largura do anel,  $R$  o raio do anel,  $\delta$  a declinação solar,  $\phi$  latitude,  $\omega$  o ângulo horário e  $\Theta_z$  o ângulo zenital.

No entanto, as correções geométricas não contemplam 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 é propor um modelo de correção dos efeitos anisotrópicos da radiação para a irradiância solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento *MEO* em função de intervalos discretos da transmissividade atmosférica  $K_t$ .

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 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 da economia baseada em serviços.

A irradiância solar global  $I_G$  foi medida por um piranômetro Eppley - PSP ( $K = 7,45 \text{ Vm}^2 / \text{W}$ ); a irradiância solar direta  $I_b$  por um pireliômetro Eppley NIP ( $K = 7,59 \text{ Vm}^2 / \text{W}$ ) equipado com um dispositivo de rastreamento solar ST-3; e a irradiância solar difusa  $I_d$  por um piranômetro Eppley-PSP ( $K = 7,47 \text{ V/Wm}^2$ ) 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.

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

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

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 0,2Hz. Foram calculados os valores médios a cada 5 minutos e armazenados no formato W/m<sup>2</sup>.

## 2.2 Controle de qualidade e indicativos estatísticos

Os dados de irradiância difusa medidos pelo anel de sombreamento *MEO* ( $I_{d_{ANEL}}$ ) foram corrigidos usando os fatores de correção geométricos propostos por Oliveira *et al* (2002). A irradiância difusa verdadeira, denominada irradiância difusa de referência ( $I_{d_{REF}}$ ), foi calculada pela diferença entre as irradiâncias global e direta projetada na horizontal. Dos 525592 dados disponíveis nos dez anos de monitoramento, 47725 deles (representando 9,09% do total) foram removidos devido à aplicação dos filtros mostrados na Tab. 2 (Kudish e Evseev, 2008). Os valores de corte são devido ao desalinhamento, fios danificados, falta de eletricidade e reflexões internas ocorridas no anel de sombreamento causada pela baixa altitude solar.

Tabela 2. Filtros de controle de qualidade e resultados (Kudish e Evseev, 2008).

Irradiância Solar	Filtro	Dados removidos (%)
Global	$I_G < I_0$	1577 (0,30%)
Direta na Incidência	$I_b \leq I_0$	27384 (5,22%)
Difusa Anel	$0,1 I_G \leq I_{d_{ANEL}} < I_G$	6307 (1,20%)
Difusa Referencia	$0 \leq I_{d_{REF}} \leq I_0$	12457 (2,37%)
Todos filtros	--	47725 (9,09%)

A avaliação do modelo de correção baseou-se nos indicativos estatísticos MBE e RMSE dados pelas Eq. (4) e Eq. (5), respectivamente.

$$MBE = \left( \sum_i^N (y_i - x_i) / N \right) \quad (4)$$

$$RMSE = \left( \sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N \right)^{1/2} \quad (5)$$

onde  $y_i$  representa os valores da irradiância difusa anel,  $x_i$  os valores da irradiância difusa de referencia 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. Os desvios relativos entre as irradiâncias difusa anel de sombreamento e de referencia foram calculados pela Eq. (6).

$$D(\%) = 100 * \left( \frac{I_{d_{ANEL}} - I_{d_{REF}}}{I_{d_{REF}}} \right) \quad (6)$$

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar do método anel de sombreamento de medida da radiação difusa apresentar vantagens operacionais e financeiras, seu uso causa subestimativas nos valores medidos em função da área sombreada pelo anel que, além de bloquear a radiação direta, bloqueia também uma parcela da radiação difusa. Para compensar essa parcela obstruída, a literatura especializada (Drummond, 1956; Painter, 1981) sugere a aplicação de fatores de correção geométricos na

medida da radiação difusa levando-se em consideração o espalhamento uniforme da radiação no hemisfério celeste (isotropia). Esses fatores dependem das características construtivas do anel (raio e largura), da época do ano (declinação solar) e da localidade (latitude) onde é realizada a medida. A Fig 2 mostra a correlação entre os valores das irradiâncias difusa medida pelo método do anel de sombreamento *MEO* e de referência: na Fig 2a os dados de irradiância difusa medidos pelo método do anel de sombreamento não foram corrigidos geometricamente, enquanto que na Fig 2b os dados foram corrigidos geometricamente pelos fatores de correção propostos por Oliveira *et al* (2002).

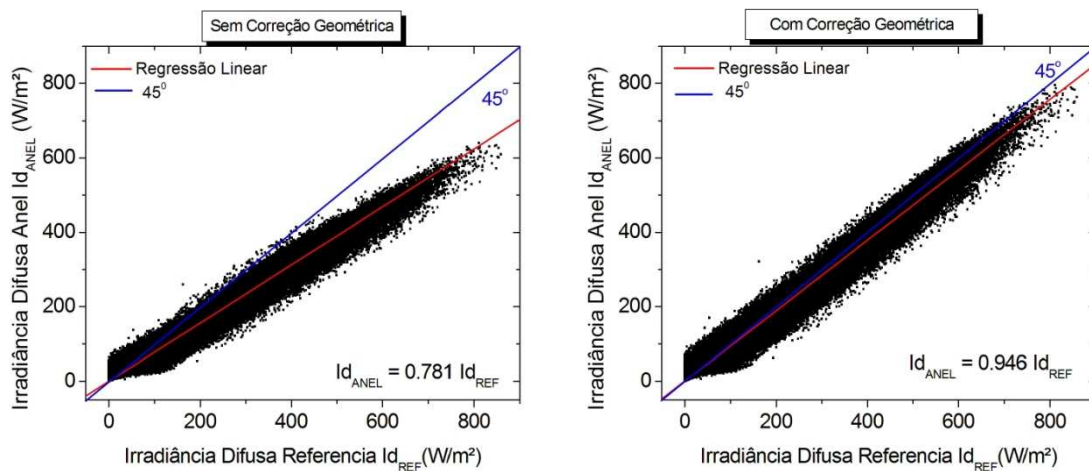


Figura 2 - Comparação entre as irradiâncias difusa medida pelo anel de sombreamento *MEO* e referencia para uma base de dados de 10 anos de medidas. a) Sem correção geométrica. b) Com correção geométrica.

O elevado espalhamento observado dos dados em torno da reta de regressão linear deve-se a partição de tempo média-5-minutos escolhida. Como partições de tempo menores respondem mais rapidamente à dinâmica atmosférica, o aumento da frequência de aquisição dos dados proporciona maior probabilidade de ocorrência de fenômenos atmosféricos complexos, como o caso das reflexões por nuvens adjacentes em coberturas de céu parcialmente nublado, as quais contribuem para o aumento da variabilidade dos valores medidos (Suehrcke e McCormick, 1988). No entanto, as Fig 2a e 2b mostram que as irradiâncias difusa dos métodos de medida do anel de sombreamento e de referencia apresentam elevada correlação, com coeficientes de correlação de 0,987 e 0,988, respectivamente

A partir do coeficiente angular da reta de regressão linear é possível verificar a proporcionalidade entre os valores médios das irradiâncias difusa medidos pelos métodos do anel de sombreamento e de referencia. Coeficientes angulares iguais a 1 indicam que, na média, as medidas obtidas dos dois métodos são iguais. Já para coeficientes maiores que 1, a irradiância difusa anel é maior que a de referencia, enquanto que para coeficientes menores que 1, a irradiância difusa anel é menor que a de referencia. Assim, na Fig 2a, o coeficiente angular de 0,781 e o desvio relativo de -20,6% mostram que, sem o uso da correção geométrica, a medida da irradiância difusa pelo anel de sombreamento é, em média, menor que o valor da irradiância difusa de referencia. Essa diferença deveria ser eliminada com o uso das correções geométricas. No entanto, a aplicação das correções geométricas não elimina totalmente essa subestimativa. O coeficiente angular de 0,946 da Fig 2b e o desvio relativo de -4,7% mostram que a irradiância difusa anel ainda é menor que a irradiância difusa de referencia. Subestimativas semelhantes foram obtidas por Drummond (1956) e Battles (1995) após a aplicação das correções geométricas desenvolvidas para o anel de sombreamento de Drummond.

Diversos trabalhos na literatura relacionam a causa dessa diferença residual à atmosfera e apontam para a necessidade de correções numéricas adicionais, as quais devem levar em consideração o comportamento anisotrópico da radiação (Battles, 1995, Vartiainen, 1999). Como a concentração dos constituintes atmosféricos apresenta dependência temporal, a base de dados foi separada por ano e foi calculado o desvio relativo entre as irradiâncias difusa anel de sombreamento e de referencia para cada ano.

A Fig 3 mostra o desvio relativo médio entre as irradiâncias difusa anel de sombreamento e de referencia juntamente com a transmissividade atmosférica média  $K_t$  para cada ano da base de dados. Valores de  $K_t$  próximos de zero indicam baixa transmissividade, característicos de dias de céu nublado, enquanto que valores próximos de 1 indicam elevada transmissividade, comum em dias de céu limpo e aberto.

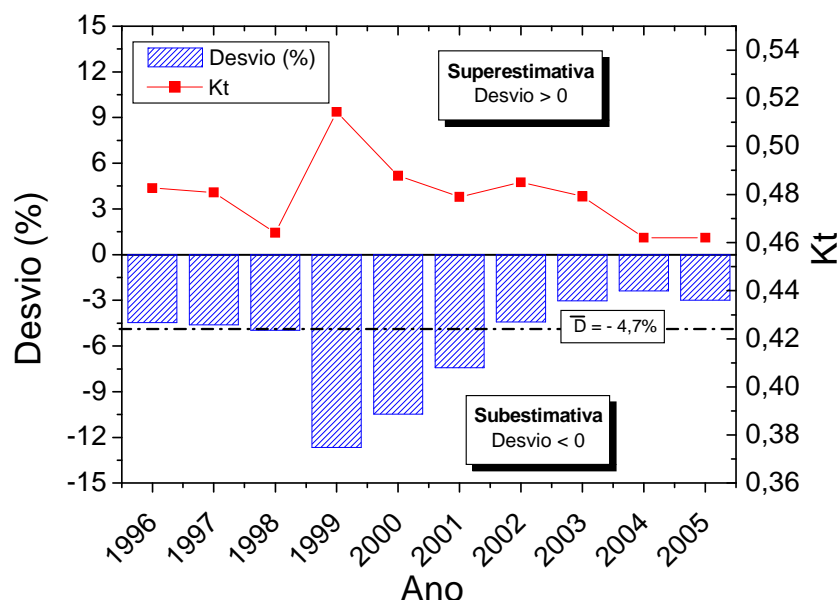


Figura 3 - Desvio relativo entre as irradiâncias difusas anel de sombreamento *MEO* e de referência e transmissividade atmosférica *Kt* para cada ano dos dez anos da base de dados.

Pela Fig 3 observa-se que todos os anos apresentaram desvios relativos negativos, ou seja, para todos os anos a irradiância difusa anel foi menor que a irradiância difusa de referência. A causa dessas subestimativas é o comportamento anisotrópico da radiação. Em dias com menos nuvens e mais aerossóis, a colisão dos feixes solares diretos com o material particulado em suspensão na atmosfera gera um espalhamento adicional com características direcionais no sentido atmosfera-solo. Esse espalhamento, conhecido como radiação circunsolar, também é obstruído pelo anel de sombreamento e não é levado em consideração na formulação das correções geométricas, justificando assim as subestimativas. Como os processos atmosféricos são dinâmicos e diferem de ano a ano em termos de nuvens e aerossóis, essa subestimativa na medida não é constante e varia ao longo dos anos.

A interferência desses processos atmosféricos no desempenho das correções geométricas pode ser relacionada com a transmissividade atmosférica *Kt*. A transmissividade atmosférica *Kt* traduz a quantidade de irradiância solar transmitida incidente em superfície após a interação com a atmosfera, sendo, portanto, um indicativo indireto da concentração de nuvens, vapor d'água, gases e aerossóis. Valores elevados de *Kt* favorecem a incidência dos feixes solares diretos, aumentando assim a probabilidade de colisão com o material particulado em suspensão na atmosfera. Dependendo do tamanho da partícula envolvida na colisão, pode ocorrer um aumento do efeito da anisotropia seguido de um aumento da radiação bloqueada pelo anel, explicando assim os desvios negativos. Pela Fig 2, a maior subestimativa (-12,65%) e a maior transmissividade atmosférica *Kt* (51,4%) ocorreram para o ano de 1999, enquanto que a menor subestimativa (-2,38%) e a menor transmissividade atmosférica *Kt* (46,2%) ocorreram para o ano de 2004. Os demais anos apresentaram valores de desvio oscilando em torno do valor médio (-4,7%). Portanto, verifica-se que as correções geométricas não são suficientes para corrigir os valores da irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento e como os desvios são proporcionais à transmissividade atmosférica *Kt*, as correções numéricas adicionais necessárias são dependentes da atmosfera.

A metodologia adotada para desenvolvimento do modelo de correção baseou-se na divisão da transmissividade atmosférica *Kt* em intervalos discretos, ou seja, o intervalo de 0 a 1 de *Kt* foi dividido em 100 partes iguais de amplitude 0,01 e as correções foram obtidas a partir dos valores médios da razão entre a irradiância difusa de referência pela irradiância difusa anel. A Fig. 4 mostra as correções numéricas em função dos intervalos discretos da transmissividade atmosférica *Kt*.

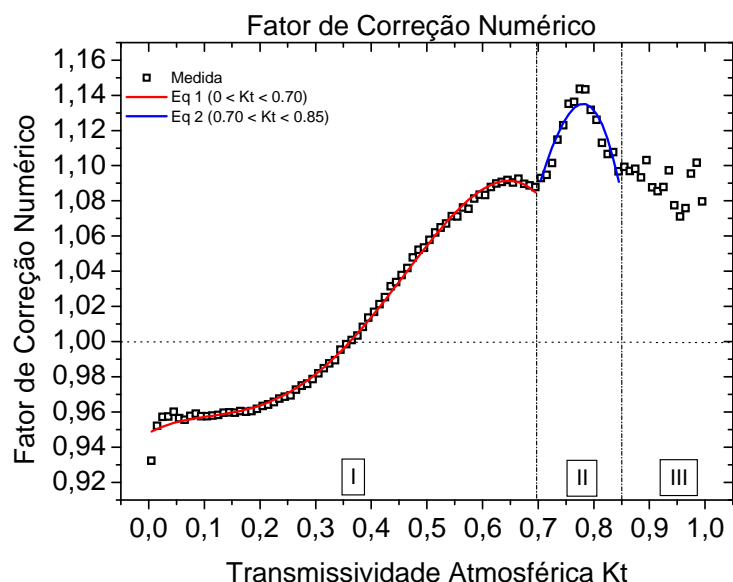


Figura 4 - Fatores de correção numéricos para irradiância difusa medida pelo método do anel de sombreamento *MEO* em função de intervalos discretos da transmissividade atmosférica *Kt*

A Fig 4 foi dividida em três regiões para facilitar o ajuste das curvas de correção. A região (I) compreende o intervalo de 0 a 0,7 de *Kt* e a equação de correção que melhor se adaptou foi um ajuste polinomial de 4º grau; a região (II) compreende o intervalo de 0,7 a 0,85 de *Kt* e o melhor ajuste foi um polinômio de 3º grau; e a região (III) compreende o intervalo de 0,85 a 1 de *Kt* e não foi proposta equação de correção visto a baixa frequência de ocorrência de *Kt* (<1,15%). *Kt*s próximos de 1 representam situações físicas improváveis, com quase 100% de transmissão de radiação, que ocorre somente na ausência de atmosfera. A Tab 2 mostra as equações de correção do modelo de correção em função de intervalos discretos da transmissividade atmosférica *Kt*.

Tabela 2. Equações de correção do modelo de correção em função da transmissividade atmosférica *Kt*.

INTERVALO DE <i>Kt</i>	EQUAÇÃO DE CORREÇÃO					$R^2$
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	
$0 < Kt \leq 0,70$	0,948	0,174	-1,271	4,801	-4,209	0,997
$0,70 < Kt \leq 0,85$	6,479	-27,791	44,889	-23,133	--	0,883
$0,85 < Kt \leq 1$	--	--	--	--	--	--

No intervalo de *Kt* entre 0 e 0,35 é possível observar que os fatores de correção são todos menores do que 1, ou seja, a aplicação das correções geométricas gerou valores de irradiância difusa anel maiores que os valores de referência. Esse comportamento não era esperado, já que nesse intervalo ocorre com maior frequência condições de isotropia da radiação, sendo a cobertura de nuvens responsável pela uniformização do espalhamento da radiação (Dal Pai e Escobedo, 2011). Para valores de *Kt* maiores que 0,35, os fatores de correção são todos maiores do que 1. Neste intervalo, a aplicação das correções não foi suficiente, gerando valores da irradiância difusa anel menores que os valores de referência. O aumento da transmissividade atmosférica e a diminuição da nebulosidade favorecem o espalhamento da radiação por aerossóis que, dependendo de seus tamanhos, podem amplificar os efeitos da anisotropia. Como a anisotropia gera uma radiação adicional com características direcionais, essa radiação também é bloqueada pelo anel de sombreamento, explicando assim os menores valores da irradiância difusa anel em relação aos valores da irradiância difusa de referência.

Para efetuar a validação do modelo de correção proposto, os indicativos estatísticos foram aplicados para três situações distintas: na primeira comparou-se a irradiância difusa anel sem correção geométrica com a irradiância difusa de referência; na segunda comparou-se a irradiância difusa anel corrigida geometricamente com a irradiância difusa de referência; e na terceira comparou-se a irradiância difusa anel com correções geométrica e em função de *Kt* com a irradiância difusa de referência. A Tab. 3 mostra os indicativos estatísticos da validação e a Fig. 5 mostra as correlações gráficas entre os diferentes procedimentos de correção para a irradiância difusa anel.

Tabela 4. Indicativos estatísticos utilizados na comparação entre os valores da irradiâncias difusas corrigidas pelos modelos de correção e a irradiância difusa de referencia.

MODELO DE CORREÇÃO	INDICATIVOS ESTATÍSTICOS				
	MBE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (%)	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	RMSE (%)	Coef Ang
Sem Correção	-31,6	-19,82	47,12	29,55	0,786
Correção Geométrica	-5,98	-3,75	18,52	11,61	0,954
Correção Geométrica + Modelo de correção Kt	1,19	0,75	14,05	8,81	0,999

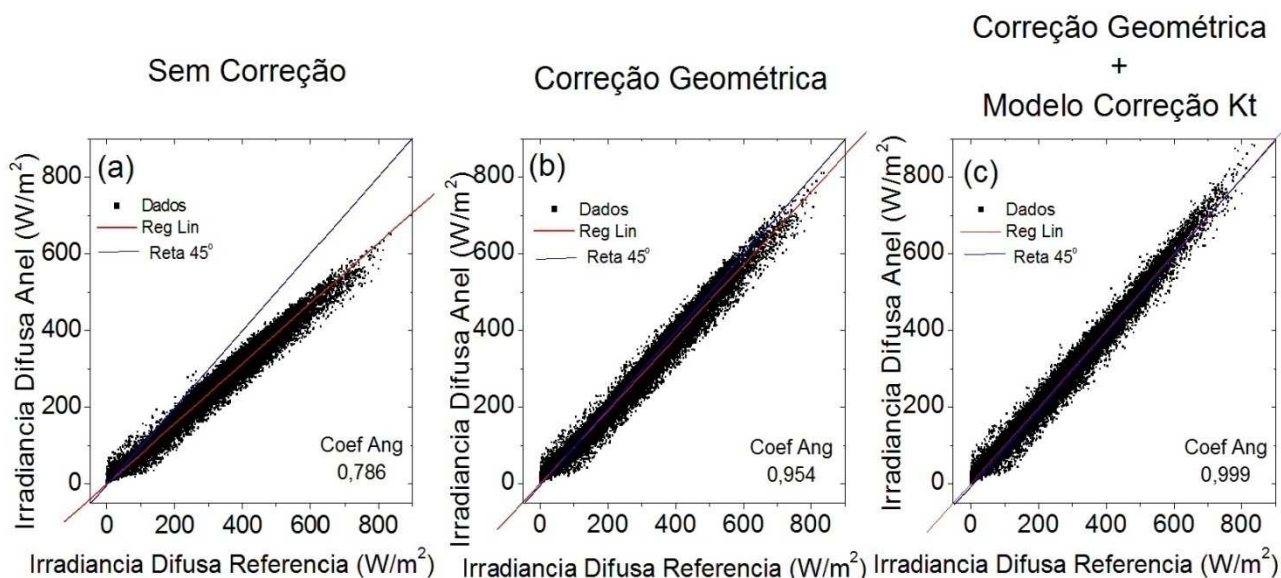


Figura 5 - Correlação e coeficiente angular entre as irradiâncias difusas corrigidas pelos modelos de correção e a irradiância difusa de referencia

Para os valores do indicativo estatístico MBE, o procedimento sem correção apresentou uma subestimativa de -19,82% e, ao se aplicar as correções geométricas, essa subestimativa sofreu uma redução significativa para -3,75%. Ao se combinar as correções geométricas com o modelo de correção em função da transmissividade Kt, o indicativo MBE apresentou seu menor valor de 0,75%, mostrando que este procedimento de correção praticamente iguala os valores da irradiância difusa anel de sombreamento com os valores de referencia. Já para o indicativo RMSE, como ele mostra o espalhamento dos dados em relação à média, o procedimento sem correção apresentou as maiores dispersões (29,55%), o modelo da correção geométrica apresentou RMSE=11,61% e o procedimento de correção que combina as correções geométricas e o modelo de correção em função de Kt apresentou o menor RMSE de 8,81%. A comparação gráfica (Fig. 5) dos procedimentos de correção mostrou que o coeficiente angular mais próximo de 1 (igualdade entre as difusas do anel e de referencia) foi alcançado pelo método de correção que combina as correções geométricas com as correções em função de Kt (coef. Ang = 0,999).

A análise da validação mostrou que o modelo de correção em função de Kt, associado a aplicação prévia das correções geométricas é o procedimento de correção mais preciso e confiável no monitoramento e na composição de um banco de dados da irradiância difusa anel de sombreamento *MEO*.

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados do trabalho conduzem às seguintes conclusões:

- As correções geométricas não são suficientes para corrigir os valores da irradiância solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento *MEO*.
- As correções adicionais propostas dependem da transmissividade atmosférica Kt.
- A aplicação conjunta das correções geométricas e em função da transmissividade atmosférica Kt reduzem significativamente a diferença entre as irradiâncias difusa do anel e de referencia, sendo a diferença média entre ambas de 0,75%, valor considerado da mesma ordem de grandeza da precisão fornecida pelo fabricante do aparelho de medida.

## 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 shadowring 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. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie*, v.7, p.413-436.
- 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.
- 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, p.249-256.
- 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., 2002. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Boston, v. 19, p. 698-708.
- 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 shade-ring correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.111, p.1125-1130.
- Suehrcke, H., McCormick, P. G., 1988. The frequency distribution of instantaneous insolation values. *Solar Energy*, v.40, n.5, p.413-422.
- Vartiainen, E., 1999. An anisotropic shadow ring correction method for the horizontal diffuse irradiance measurements. *Renewable Energy*, v.17, p.311-317.

### CORRECTION OF MEO SHADOWRING DIFFUSE SOLAR IRRADIANCE AS FUNCTION OF THE DISCRETE ATMOSPHERIC TRANSMISSIVITY INTERVALS

**Abstract.** *The objective of this paper is to develop an anisotropic correction model for the MEO shadowring diffuse irradiance as a function of  $K_t$  atmospheric transmissivity. Global, diffuse and direct irradiances from 1996 to 2005 were provided by the Laboratory of Solar Radiometry of Botucatu-UNESP. Four-fifths (4/5) of the data were used in the modeling and the remainder (1/5) for validation purposes. The  $K_t$  atmospheric transmissivity was divided into one hundred intervals of 0.01 and the corrections were obtained from the average values of the ratio of reference diffuse irradiance by the shadowring diffuse irradiance. The validation was performed by the MBE and RMSE statistical indicators and slope of the correlation between the shadowring and reference diffuse irradiances. It was found that only the application of the geometrical corrections was not sufficient to adjust the values of the MEO shadowring diffuse irradiance. The combined application of geometric corrections and the proposed corrections as a function of  $K_t$  atmospheric transmissivity significantly reduced the difference between the reference and shadowring diffuse irradiances, with a mean difference of 0.75% between the values.*

**Key words:** *Diffuse solar irradiance, Measuring methods, Shadowring.*