

DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE MEDIDA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA: MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO E MÉTODO DO DISCO DE SOMBREAMENTO

A. Dal Pai¹, J. F. Escobedo², E. Dal Pai³, B. N. Naimaite⁴,

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

^{2,3,4}Departamento de Engenharia Rural /FCA/UNESP. Botucatu/SP/Brasil.

Recibido 10/09/15, aceptado 09/10/15

Resumo: O objetivo do trabalho foi verificar o desempenho dos métodos de medida da radiação solar difusa do anel e do disco de sombreamento em relação ao método da diferença (referência) para cinco cenários distintos de cobertura de céu: todas as condições de céu, céu nublado, céu parcialmente nublado, céu parcialmente aberto e céu aberto. A base de dados de irradiâncias global, difusa e direta de 1998 foi cedida pelo Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu-UNESP. A verificação de desempenho foi realizada a partir da análise da regressão linear e dos desvios relativos entre os métodos de medida do anel e disco em relação ao método de referência. Os resultados mostram que o método do anel de sombreamento, além das correções geométricas, necessita de correções numéricas adicionais para compensar a radiação circunsolar bloqueada pelo anel. Já o método do disco apresentou melhor desempenho com diferenças inferiores a 2,5%.

Palavras-chave: radiação solar difusa, anisotropia, método de medidas, anel, disco.

INTRODUÇÃO

A radiação solar é uma fonte limpa e renovável de energia e é um dos principais parâmetros meteorológicos responsáveis por processos físicos e químicos observados na atmosfera. Como é uma das principais fontes de energia do planeta, é responsável pela distribuição da fauna e da flora com importantes impactos nas atividades fisiológicas dos seres vivos (BAUERLE et al, 2004). Aplicações de radiação solar podem ser encontradas em diversas áreas do conhecimento, como agrometeorologia, engenharia, arquitetura, biologia, e também em processos de conversão energética, como fotovoltaicas, fototérmicas e em bioprocessos.

A radiação solar mais comumente medida, por questões operacionais e financeiras, é a radiação global, a qual representa o total incidente na superfície terrestre após interagir com os constituintes atmosféricos. Na realidade, ao penetrar na atmosfera, a radiação proveniente do Sol sofre processos físicos de atenuação (reflexão, espalhamento e absorção), gerando componentes conhecidas como radiação direta e radiação difusa. A soma dessas duas componentes é a radiação global que incide em superfície.

A radiação solar direta representa o fluxo de raios solares que atravessam a atmosfera sem sofrerem desvio de sua trajetória inicial e, como são mais energéticos, despertam interesse em projetos de painéis fotovoltaicos para geração de eletricidade e em projetos de coletores solares para aquecimento de ar e água. Entretanto, a metodologia envolvida na medida da radiação direta requer elementos construtivos de alta precisão, o que encarece sua medida de rotina e inviabiliza sua implantação (MANI e RANGARAJAN, 1983; MAXWELL, 1987).

¹ Prof. Doutor (FCA/UNESP)

² Prof. Livre Docente (FCA/UNESP)

³ Prof. Doutor (FCA/UNESP)

A radiação difusa é a componente solar que chega na superfície causada pelo espalhamento da radiação por gases e partículas suspensas na atmosfera. Dessa forma, os níveis da radiação difusa de uma determinada localidade podem trazer informações importantes acerca da quantidade e distribuição da poluição local (CODATO et al, 2008). Muitos trabalhos também podem ser encontrados relacionando a radiação solar difusa com processos fotossintéticos (ALADOS et al, 2002) e com iluminação passiva (MUNNER et al, 1998).

Para estudos de aproveitamento de energia solar, é desejável que se estabeleça uma sistemática de medição das radiações solares global, direta e difusa. No entanto, a medida da radiação solar direta demanda alto investimento financeiro, enquanto que a medida das radiações solares global e difusa é mais acessível. Dessa forma, para composição de um banco de dados de qualidade com os três tipos de radiação, comumente se mede as radiações global e difusa e se estima a radiação direta por diferença.

Na literatura se apresentam três métodos de medida da radiação solar difusa: método da diferença; método do disco de sombreamento e; método do anel de sombreamento. No método da diferença, tido como referência, a radiação difusa é calculada pela diferença entre as radiações global e direta e, dessa forma, também é um método que demanda alto investimento financeiro. O método do disco de sombreamento, com investimento financeiro moderado devido ao uso de um sistema de rastreamento solar, um disco consistindo de uma superfície circular é posicionado acima do sensor do piranômetro e tem a função de barrar a radiação solar incidente. Já o método do anel de sombreamento é considerado o mais viável do ponto de vista financeiro. Neste método, o piranômetro é posicionado à sombra de um anel fixo e o sensor é transladado paralelamente ao plano de horizonte local em uma base móvel para compensar as variações da declinação solar (DRUMMOND, 1956; ROBINSON e STOCK, 1964; MELO e ESCOBEDO, 1994).

No entanto, o método do anel de sombreamento produz subestimativas na medida da radiação difusa e, por isso, necessita de fatores de correção para compensar a irradiância difusa bloqueada pelo anel. Desvios da ordem de 5% na medida da radiação difusa podem propagar até 20% na estimativa da radiação direta. Assim, na literatura, dois tipos de correção são sugeridos: 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).

Portanto, o objetivo do trabalho foi comparar o desempenho dos três métodos de medida da radiação solar difusa para cinco cenários distintos de cobertura de céu: todas as condições de céu, céu totalmente nublado, céu parcialmente nublado, céu parcialmente aberto e céu totalmente aberto.

MATERIAL E MÉTODOS

Local e Instrumentação

Os dados de radiação solar foram cedidos pelo Laboratório de Radiometria Solar durante os anos de 1996 a 1999. 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; a irradiância solar direta I_b por um pireliômetro Eppley NIP equipado com um dispositivo de rastreamento solar ST-3; a irradiância solar difusa disco por um piranômetro Eppley - PSP sombreado por um disco distante xx

cm do sensor e de diâmetro xx cm disposto perpendicular aos raios solares; e a irradiância solar difusa anel por um piranômetro Eppley-PSP sob o anel de sombreamento *MEO* (raio de 0,40 m e largura de 0,10 m). A Fig. 1 mostra os equipamentos de medidas utilizados no estudo, enquanto que a Tab. 1 mostra as características operacionais dos mesmos.

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^2 .

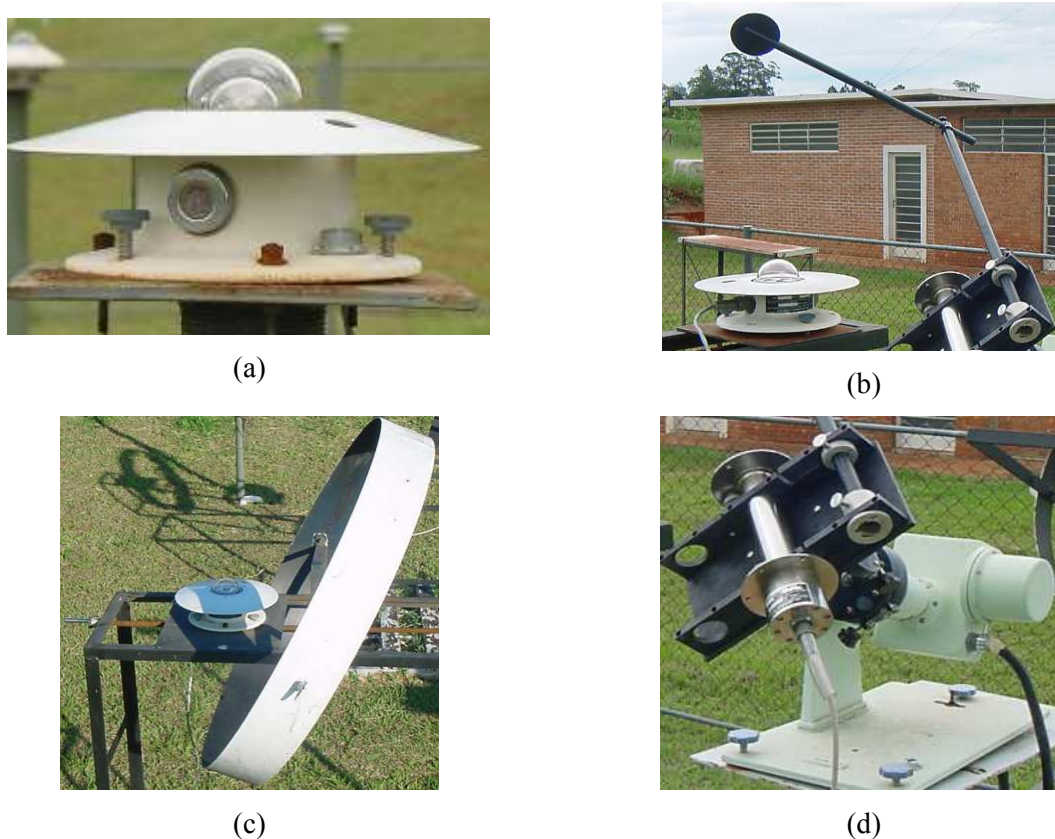


Figura 1. Aparelhos de medida de radiação solar. a) Piranômetro (global); b) Piranômetro com disco de sombreamento (difusa); c) Piranômetro com anel de sombreamento (difusa); d) Pireliômetro (direta).

	Irradiância			
	Global	Direta	Difusa Anel	Difusa Disco
Sensor-marca	Eppley Precision Spectral Pyranometer	Eppley Normal Incidence Pyrheliometer	Eppley Precision Spectral Pyranometer	Eppley Precision Spectral Pyranometer
Sensibilidade	$7,45 \mu V/Wm^{-2}$	$7,59 \mu V/Wm^{-2}$	$7,47 \mu V/Wm^{-2}$	$8,12 \mu V/Wm^{-2}$
Intervalo Espectral	295 – 2800 nm	295 – 2800 nm	295 – 2800 nm	295 – 2800 nm
Tempo de resposta	1 s	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)	$\pm 0,5\%$ (0 até 2800 W/m^2)
Efeito Cosseno	$\pm 1\%$ ($0^\circ < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$)	–	$\pm 1\%$ ($0^\circ < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$)	$\pm 1\%$ ($0^\circ < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$)
Dependência Temperatura	$\pm 1\%$ (de $-20^\circ C$ até $+40^\circ C$)	$\pm 1\%$ (de $-20^\circ C$ até $+40^\circ C$)	$\pm 1\%$ (de $-20^\circ C$ até $+40^\circ C$)	$\pm 1\%$ (de $-20^\circ C$ até $+40^\circ C$)

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 foram corrigidos usando os fatores de correção geométricos propostos por Oliveira *et al* (2002) (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 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.

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

A filtragem dos dados foi baseada nos critérios adotados por Kudish e Evseev (2008). 4,76% dos dados foram removidos devido ao 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)

Para comparar os métodos de medida da radiação solar difusa foram apresentados gráficos de relacionamento entre os métodos de medida por meio de regressão linear e os desvios entre eles foram calculados pela Eq (5):

$$D(\%) = 100 * \left(\frac{\text{Método}_i - \text{Método}_{REF}}{\text{Método}_{REF}} \right) \quad (5)$$

onde o índice “i” representa o método de medida a ser avaliado: anel sem correção, anel com correção geométrico e/ou disco.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para comparar o desempenho dos métodos de medida da radiação difusa, os métodos do anel de sombreamento sem correção geométrica ($I_{d_{ANS}}$), com correção geométrica ($I_{d_{ANC}}$) e disco ($I_{d_{DIS}}$) foram comparados com o método da diferença ($I_{d_{REF}}$) (considerado mais preciso pelo fato de não necessitar de correções adicionais, pois nenhum sensor é sombreado).

Foram feitos gráficos correlacionando os métodos em estudo e o método de referência, e as regressões lineares obtidas representam o quanto os métodos de medidas estão distantes dos valores de referência. A Figura 2 mostra a correlação entre os métodos de medida do anel de sombreamento (sem e com correção geométrica) e disco em relação ao método de referência para todas as condições de cobertura de céu.

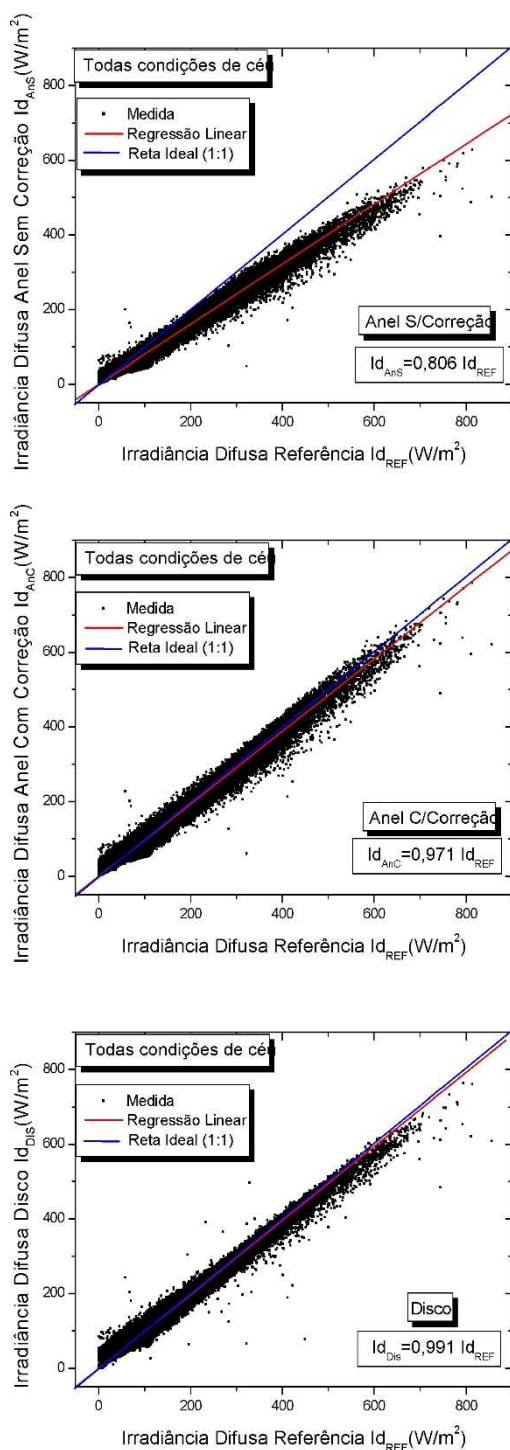


Figura 2. Comparação entre os métodos de medida do anel de sombreamento (sem e com correção geométrica) e disco em relação ao método de referência para todas as condições de cobertura de céu.

A comparação entre o método de medida do anel de sombreamento sem correção em relação ao método de referência mostrou uma diferença de 19,4%, ou seja, a medida da radiação difusa monitorado pelo anel de sombreamento não levando em consideração as correções geométricas está, na média, 19,4% abaixo do valor de referência. De fato, a parcela obstruída pelo anel é significativa e,

portanto, requer correções para melhorar o desempenho da medida. Ao aplicar as correções geométricas, observa-se que o método do anel com as devidas correções, melhora sua precisão, diminuindo a subestimativa de 19,4% para 2,9%. O melhor desempenho ocorreu para o método do disco, com subestimativas menores que 1%.

Para verificar o efeito da atmosfera sobre o desempenho dos métodos de medida da radiação difusa, os dados foram agrupados em diferentes coberturas de céu. A Fig. 3 mostra a correlação entre os métodos de medida do anel de sombreamento (sem e com correção geométrica) e disco em relação ao método de referência para as coberturas de céu nublado e parcialmente nublado e a Fig 4. para as coberturas de céu parcialmente aberto e aberto.

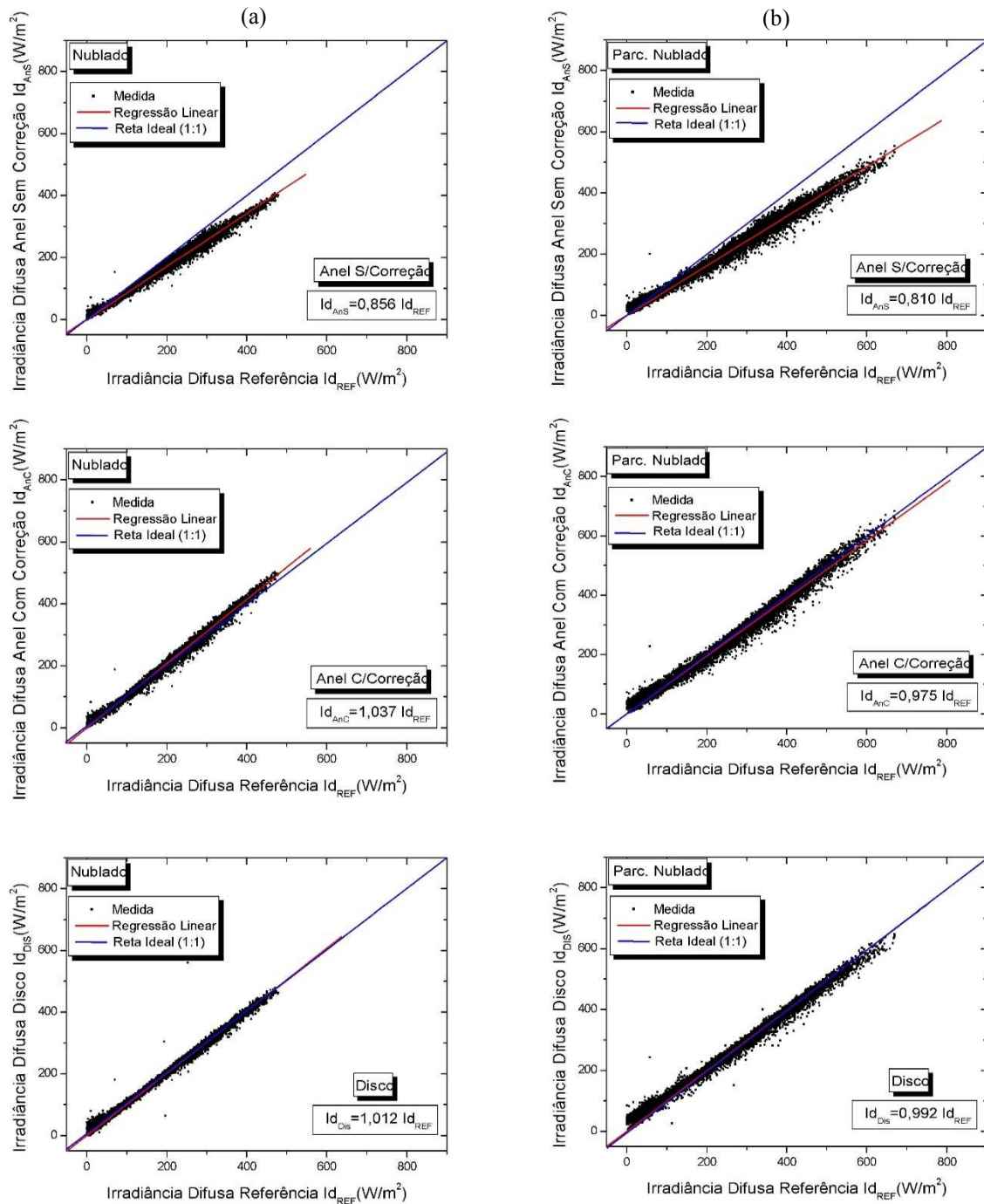


Figura 3. Comparação entre os métodos de medida do anel de sombreamento (sem e com correção geométrica) e disco em relação ao método de referência. a) Cobertura de céu totalmente nublado; b) Cobertura de céu parcialmente nublado.

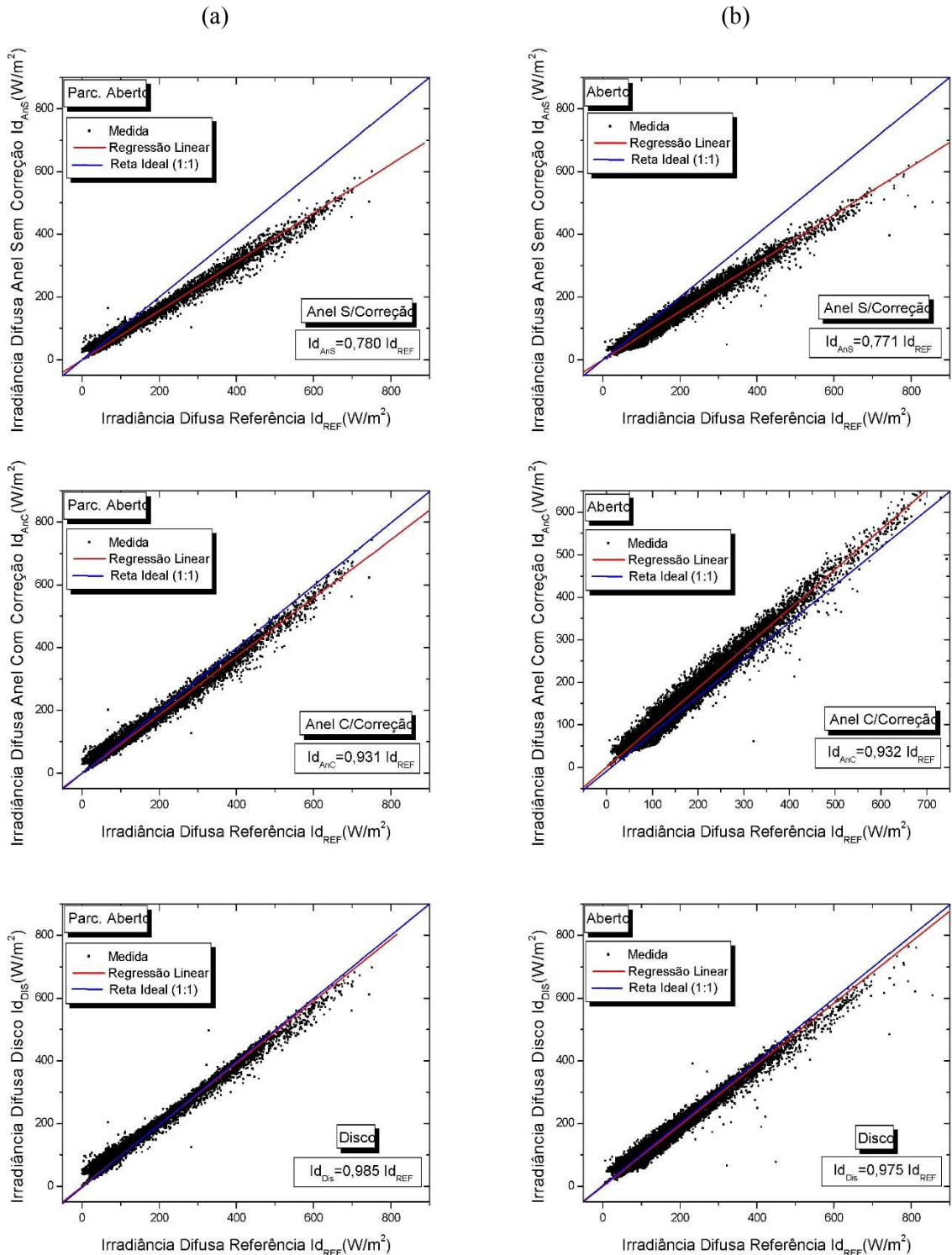


Figura 4. Comparação entre os métodos de medida do anel de sombreamento (sem e com correção geométrica) e disco em relação ao método de referência. a) Cobertura de céu parcialmente aberto; b) Cobertura de céu totalmente aberto.

Os gráficos mostram boa correlação entre os métodos de medida com elevado coeficiente de determinação. Observa-se também que o método do disco apresenta o valor da regressão linear mais próximo da linha ideal para as quatro coberturas de céu. Desse modo, quanto menor a dimensão do sombreamento, menor será a diferença em relação à medida obtida pelo método de referência.

Para facilitar a análise, os valores dos desvios entre os métodos em função das coberturas é apresentado na Fig. 5.

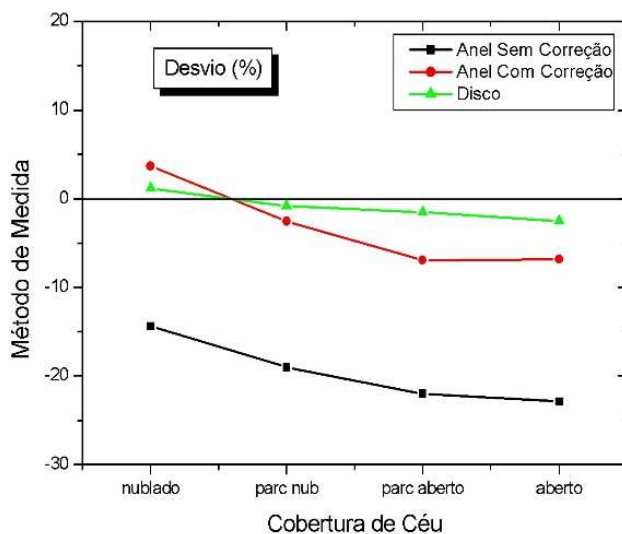


Figura 5. Desvio relativo entre os métodos de medida do anel de sombreamento (sem e com correção geométrica) e disco de sombreamento em relação ao método de referência.

De forma geral, os maiores desvios ocorreram para a medida realizada pelo método do anel de sombreamento sem aplicação das correções geométricas, sendo que os desvios aumentaram à medida que o céu passou de nublado à aberto. Em relação aos métodos do anel com correções e disco notou-se desvios positivos para a cobertura nublada e desvios negativos para as demais coberturas.

Em relação à cobertura nublada, o desvio positivo do método do disco é muito pequeno e está na ordem de grandeza das incertezas do aparelho de medida. Já o desvio positivo do método do anel é da ordem de 5% e pode estar associado à correção prévia aplicada devido à geometria da sombra sobre o sensor. Em situações de céu nublado, os efeitos da isotropia da radiação são mais significativos. A cobertura de nuvens serve como 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 pelas superestimativas de radiação difusa do anel.

Nas demais coberturas, tanto o método do anel com correções quanto o disco apresentam desvios negativos. Provavelmente tanto o anel de sombreamento quanto o disco, além de bloquear a irradiância solar direta na incidência, bloqueiam também uma parcela da radiação circunsolar, tornando os desvios negativos. À medida que a transmissividade atmosférica aumenta, os efeitos da radiação circunsolar aumentam e como, juntamente com a radiação direta, são bloqueados pelo anel ou disco, a medida da radiação difusa se apresenta menor que o valor verdadeiro. Essa diferença é maior para o método do anel e menor para o método do disco. Dessa forma sugere-se a aplicação de correções numéricas adicionais para os métodos do anel e disco de sombreamento para otimização das medidas da radiação solar difusa.

CONCLUSÃO

A comparação entre os métodos de medidas da radiação solar difusa permitiu as seguintes conclusões:

- ✓ O método do anel de sombreamento sem as correções geométricas apresentou o pior desempenho na medida da radiação solar difusa.
- ✓ A aplicação das correções geométricas inerentes ao anel de sombreamento minimiza a diferença em relação à medida obtida pelo método de referência. No entanto, o aumento da

- ✓ transmissividade aumenta a radiação circunsolar bloqueada, requerendo correções numéricas adicionais.
- ✓ O método do disco de sombreamento apresentou o melhor desempenho na medida da radiação solar difusa para todas as coberturas de céu.

REFERÊNCIAS

- Alados I., Foyo-Moreno I., Olmo F. J., Alados-Arboledas L. Improved estimation of diffuse photosynthetically active radiation using two spectral models. *Agricultural and Forest Meteorology* 111, 1–12. 2002.
- 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.
- Bauerle W. L., Weston D. J., Bowden J. D., Dudley J. B., Toler J. E. Leaf absorptance of photosynthetically active radiation in relation to chlorophyll meter estimates among woody plant species. *Scientia Horticulturae* 101, 169–178. 2004.
- Codato, G, Oliveira, A P, Soares, J, Escobedo, J F, Gomes, E N, Dal Pai, A., 2008. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theor Appl Climatol*, v 93, p 57-73.
- 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.
- 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.
- 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.
- Mani, A., Rangarajan, S. Techniques for the precise estimation of hourly values of global, diffuse and direct solar radiation. *Solar Energy*, v.31, n.6, p. 577-595, 1983
- Maxwell, A.L. A quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation. Report SERI/TR-215-3087, Solar Energy research Institute, Golden, CO, 1987
- Melo, J. M. D., Escobedo, J. F., 1994. Medida da radiação solar difusa. In: *Energias Limpas En Progreso, VII Congresso Ibérico De Energia Solar*, Vigo, Espanha. *Anais International Solar Energy Society*, v. 1.
- Muneer, T., Gul, M., Kinghorn, D. 1998. Development of a meteorological illuminance model for daylight computations. *Applied Energy*, Volume 59, Issue 4, April 1998, Pages 235-260.
- 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.
- Vartiainen, E., 1999. An anisotropic shadow ring correction method for the horizontal diffuse irradiance measurements. Renewable Energy, v.17, p.311-317.

PERFORMANCE OF DIFFUSE SOLAR RADIATION MEASURING METHODS: SHADOW RING AND SHADOW DISK MEASURING METHOD

Abstract: The objective was to verify the performance of shading ring and disk measuring methods of diffuse solar radiation in relation to the method of difference (reference) for five different sky coverage: all sky conditions, cloudy sky, partly cloudy skies, partially open and open. The Solar Radiometry Laboratory Botucatu-UNESP provided a 1998 database of global, diffuse and direct irradiances. The performance verification was carried out of the linear regression analysis and deviations between the ring and disk measurement methods relative to the reference method. The results show that the shading ring method, besides the geometrical corrections, require additional numerical corrections to compensate for the circumsolar radiation blocked by the ring. The disk method showed better performance with differences below 2.5%.

Key words: diffuse solar radiation, anisotropy, measuring methods, ring, disk.