

# INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS CONSTRUTIVOS (LARGURA E RAIOS) DO ANEL DE SOMBREAMENTO NA MEDIDA DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA

Alexandre Dal Pai – [dal.pai@unesp.br](mailto:dal.pai@unesp.br)

Marcus Vinícius Contes Calça

Enzo Dal Pai

João Francisco Escobedo

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônomicas.

**Resumo.** Este trabalho estuda a influência dos aspectos construtivos (largura e raio) na medida da irradiância difusa do anel de sombreamento MEO (Melo-Escobedo-Oliveira). São analisados dados de 4 montagens do anel de sombreamento com dimensões diferentes e razão largura/Raio (b/R). Os dados foram obtidos da estação radiométrica da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP- Botucatu do ano de 2021. O estudo foi realizado com dados de céu aberto para maximizar o efeito da anisotropia da radiação. O Anel com maior relação largura/raio foi o que causou a maior subestimativa. O método do anel de sombreamento permite estudos da radiação circunsolar e dos constituintes atmosféricos.

**Palavras-chave:** Método de Medidas, Anisotropia, Radiação Circunsolar.

## 1. INTRODUÇÃO

A irradiância solar difusa é um importante parâmetro meteorológico para diversos setores do conhecimento, com aplicações em modelos de previsão do tempo, em plasticultura e em estudos de luminância de ambientes.

Dentro da área de engenharia térmica, por questões financeiras, utiliza-se a irradiância solar difusa para se estimar a irradiância solar direta. A irradiância solar direta, usada na validação de modelos de eficiência energética de coletores solares e módulos fotovoltaicos, requer um aporte financeiro elevado na aquisição do sensor e do sistema de rastreamento solar, inviabilizando sua medida de rotina em muitas estações meteorológicas. Uma solução, então, é medir as irradiâncias solares global e difusa, que não requerem elevado investimento financeiro, e estimar a irradiância solar direta por diferença.

O método mais vantajoso financeiramente para medida da irradiância difusa é o método do anel de sombreamento, onde o sensor fica sob a sombra de um anel que é utilizado para obstruir a radiação direta. Na literatura há três montagens para o método do anel de sombreamento: Drummond (Drummond, 1956), Robinson-Stoch (Robinson e Stoch, 1964) e MEO (Oliveira et al, 2002). Neste trabalho foi utilizado a montagem MEO. Diferentemente das montagens de Drummond e Robinson-Stoch, na montagem MEO o anel é mantido fixo e orientado para o eixo polar com uma inclinação igual à latitude local. A declinação solar é compensada com a movimentação do piranômetro no plano horizontal através de um mecanismo dotado de uma barra roscada e uma manivela. Este mecanismo confere a configuração MEO maior robustez além de simplificar a sua operação quando comparado às outras configurações que mantêm o sensor fixo (Oliveira et al., 2002). A Figura 1 mostra o método de medida do anel de sombreamento na montagem MEO.

No entanto, esse anel também obstrui uma parcela da radiação difusa, necessitando de correções. Imprecisões de até 5% na medida da radiação difusa com uso do anel de sombreamento podem propagar até 20% de incertezas na estimativa da radiação direta, comprometendo aplicações fototérmicas e fotovoltaicas. São duas as correções aplicadas: uma geométrica, que depende de aspectos construtivos (largura e raio do anel) e de aspectos geoespaciais (latitude e declinação solar) e outra atmosférica, que depende dos constituintes atmosféricos.

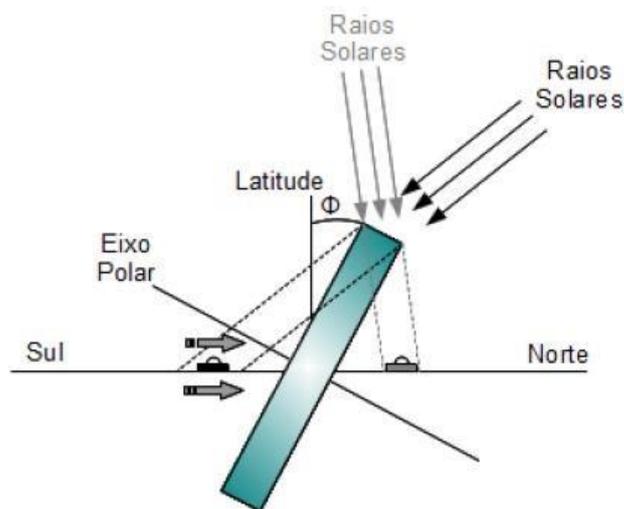


Figura 1 – Montagem do anel de sombreamento MEO.

A correção geométrica está muito bem apresentada e discutida na literatura especializada (Drummond, 1956; Robinson e Stoch, 1964; Oliveira et al, 2002). Já a correção atmosférica, por depender dos constituintes atmosféricos e apresentar dependência espacial e sazonal, ainda é motivo de discussão e investigação no meio científico (Iqbal, 1983; Kasten et al, 1983; Stanhill, 1985; Pollard e Langevine, 1988; Le Baron et al, 1990; Battles et al, 1995; Kudish e Evseev, 2008; Dal Pai et al, 2016).

A correção atmosférica se deve ao efeito da anisotropia, fruto da interação da radiação com os constituintes atmosféricos (nuvens, vapor d'água e aerossóis). Esse efeito ocasiona um aumento da radiação difusa e é mais pronunciado na região em torno da auréola solar. Por essa razão, esse incremento de radiação, que também é obstruído pelo anel, recebe o nome de radiação circumsolar. Essa correção adicional apresenta dependência temporal e espacial em função das diferentes concentrações e distribuições dos constituintes atmosféricos, sendo, portanto, também motivo de investigação.

Dessa forma, o problema estudado neste trabalho é o efeito que a radiação circumsolar provoca na precisão das medidas da irradiância difusa monitorada pelo método do anel de sombreamento MEO. Há suspeitas que a quantidade de radiação circumsolar obstruída pelo anel de sombreamento esteja diretamente relacionada com a dimensão do anel, especificamente sua largura, impactando quantitativamente nas correções atmosféricas. Mesmo mantendo a mesma relação largura/raio, mas com conjuntos de valores absolutos diferentes, como por exemplo 10/40 cm ou 5/20 cm para largura/raio, respectivamente, suspeita-se que as correções atmosféricas possam ser diferentes. Apesar da relação largura/raio ser a mesma e, portanto, termos a mesma correção geométrica, uma largura de 5 cm em relação a uma de 10 cm obstruiria uma parcela menor do céu, bloqueando menos radiação circumsolar. Assim, para analisar quantitativamente o efeito da radiação circumsolar, a proposta é montar diferentes configurações de valores para largura/raio do anel e analisar sua influência nas correções atmosféricas.

Os resultados permitirão uma compreensão melhor da interação entre a radiação circumsolar e os constituintes atmosféricos, além de melhorar a precisão do método de medida da radiação difusa pelo anel de sombreamento MEO e, consequentemente, a estimativa da radiação direta

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A base de dados utilizada neste trabalho foi obtida da estação de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista UNESP- Botucatu (latitude 22,85° Sul, longitude 48,45° Oeste, altitude 786m). O período fornecido para o estudo foi de dezembro de 2020 a novembro de 2021. A cidade de Botucatu no estado de São Paulo possui uma população estimada de 146.497 habitantes (IBGE, 2020). A economia é baseada na agricultura, indústria, turismo e comércio.

No verão o clima em Botucatu é quente e úmido e no inverno frio e seco. O dia mais longo ocorre em dezembro (13,4 horas) e o dia mais curto em junho (10,6 horas). O período das chuvas ocorre em fevereiro, mas o mês de janeiro apresenta a maior precipitação mensal acumulada (260,7mm). No mês de agosto a precipitação cai para (38,2 mm) sendo o mês mais seco. Entre o período de seca e o início das chuvas (meados de julho a novembro), usinas de açúcar e álcool promovem extensas queimadas aumentando a concentração de aerossóis na atmosfera. Isto ocorre em um raio de 100 km.

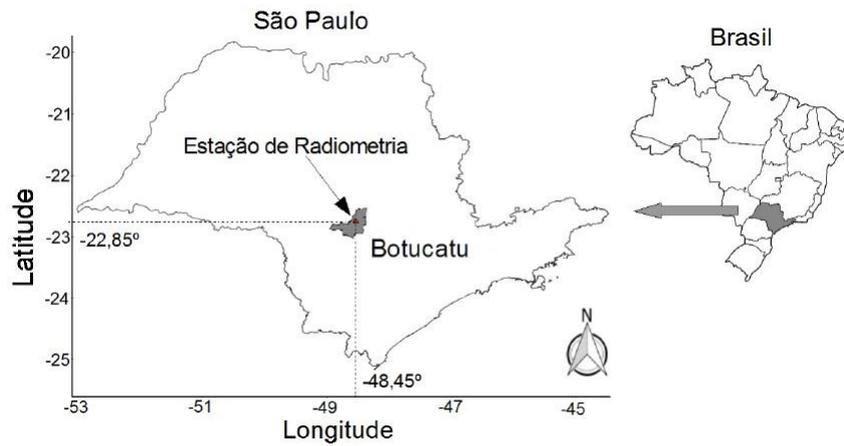


Figura 2 – Localização da Estação de Radiometria da FCA/UNESP/Botucatu/SP.

Para este trabalho as irradiâncias solares difusas foram monitoradas com o método de medida do anel de sombreamento – montagem MEO. Os aparelhos de medida da radiação solar instalados no Laboratório de Radiometria Solar da FCA/UNESP/Botucatu e utilizados no trabalho foram: a) piranômetro Kipp Zonen para monitoramento da irradiância difusa com anel de sombreamento nas dimensões 10cm de largura e 40cm de raio (razão largura/raio = 0,250); b) piranômetro Kipp Zonen para monitoramento da irradiância difusa com anel de sombreamento nas dimensões 5cm de largura e 40cm de raio (razão = 0,125); c) piranômetro Kipp Zonen para monitoramento da irradiância difusa com anel de sombreamento nas dimensões 10cm de largura e 20cm de raio (razão = 0,500); d) piranômetro Kipp Zonen para monitoramento da irradiância difusa com anel de sombreamento nas dimensões 5cm de largura e 20cm de raio (razão = 0,250); e) irradiância solar direta na incidência e; f) irradiância solar global. A Tabela 1 mostra as diferentes configurações de largura e raio do anel de sombreamento *MEO* utilizados no trabalho.

Tabela 1. Diferentes configurações de largura e raio do anel de sombreamento *MEO*.

Montagem	Largura (b)	Raio (R)	Razão (b/R)
Anel 1	10 cm	40 cm	0,250
Anel 2	5 cm	40 cm	0,125
Anel 3	10 cm	20 cm	0,500
Anel 4	5 cm	20 cm	0,250

Todos esses equipamentos foram conectados em um Datalogger CR 1000 da empresa Campbell Scientific Inc numa frequência de varredura de 1 Hz. Os valores então foram armazenados em médias de 1 minuto. A escolha de partições de tempo menor justifica-se pela rapidez e complexidade dos fenômenos atmosféricos, em especial, a anisotropia da radiação, a qual pode ser computada na forma de radiação circunsolar.

Uma vez realizadas as medidas e armazenadas em banco de dados apropriado, filtros físicos e filtros lógicos foram aplicados para o controle de qualidade das medidas das irradiâncias solares. Sob os valores das irradiâncias difusa, foram aplicados também os fatores de correção geométricos, dados pelas Eq. (1) e Eq. (2) (Oliveira et al, 2002).

$$F_{perda} = \left(\frac{2b}{\pi R}\right) \cdot \cos \delta \cdot \left[\frac{\cos(\phi - \delta)}{\cos \phi}\right]^2 \int_0^{w_z} \cos Z \, d\omega \quad (1)$$

$$F_G = \frac{1}{1 - F_{perda}} \quad (2)$$

onde  $\delta$  é a declinação solar,  $\phi$  é a latitude,  $Z$  é o ângulo zenital e  $w$  é o ângulo horário. Já os aspectos construtivos do anel, largura e raio, são dados por  $b$  e  $R$ , respectivamente.  $F_{perda}$  e  $F_G$  são os fatores de perda e os fatores de correção geométrico, respectivamente. A Figura 3 mostra os fatores de correção geométricos para as diferentes razões largura/raio dos anéis de sombreamento *MEO*.

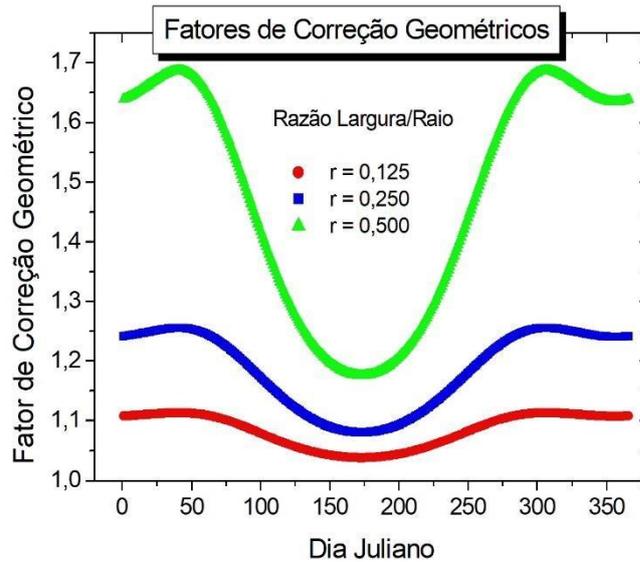


Figura 3 – Fatores de correção geométricos para cada uma das razões largura/raio dos anéis de sombreamento ( $r = 0,125$ ;  $r = 0,250$ ;  $r = 0,500$ ).

Para quantificar o efeito da anisotropia da radiação (radiação circunsolar), foram selecionados dias com condições de céu aberto. A Figura 4 mostra a precipitação acumulada diária para o período de medição. Os dias selecionados correspondem a um período ininterrupto de precipitação nula entre os dias 28/04/2021 e 28/08/2021.

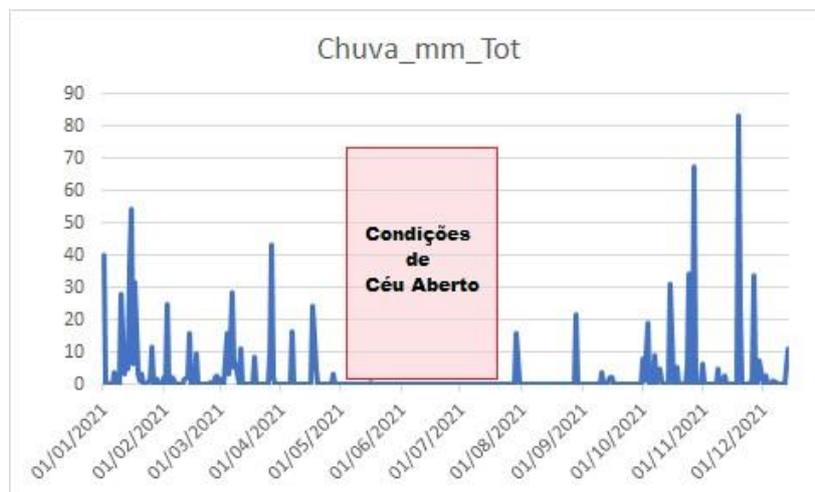


Figura 4 – Precipitação acumulada diária para o período de medidas. Condições de céu aberto entre os dias 28/04/2021 e 28/08/2021.

Os valores das irradiância difusa das 4 estruturas propostas para o anel de sombreamento foram comparadas com a irradiância difusa de referência. A irradiância difusa referência é calculada a partir da diferença, em superfície horizontal, entre as irradiâncias global ( $I_G$ ) e direta ( $I_{Dh}$ ) e necessita, portanto, de um piranômetro e de um pireliômetro. Este método é considerado de referência por não necessitar de correções adicionais e tem, como desvantagem, o elevado aporte financeiro investido na aquisição dos aparelhos e na manutenção do sistema de rastreamento solar. A Eq. (3) mostra o cálculo da irradiância solar difusa de referência.

$$I_{dREF} = I_G - I_{Dh} \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificar o efeito das dimensões do anel na medida da irradiância difusa monitorada pelo método do anel de sombreamento, a irradiância difusa medida pelo anel foi comparada com a irradiância difusa de referência por meio de regressão linear. O coeficiente angular da regressão linear é o valor da subestimativa causada pelo uso do anel de sombreamento. Quanto maior seu valor, mais radiação circumsolar é obstruída. A Figura 5 mostra as comparações entre as irradiâncias difusa com diferentes dimensões do anel

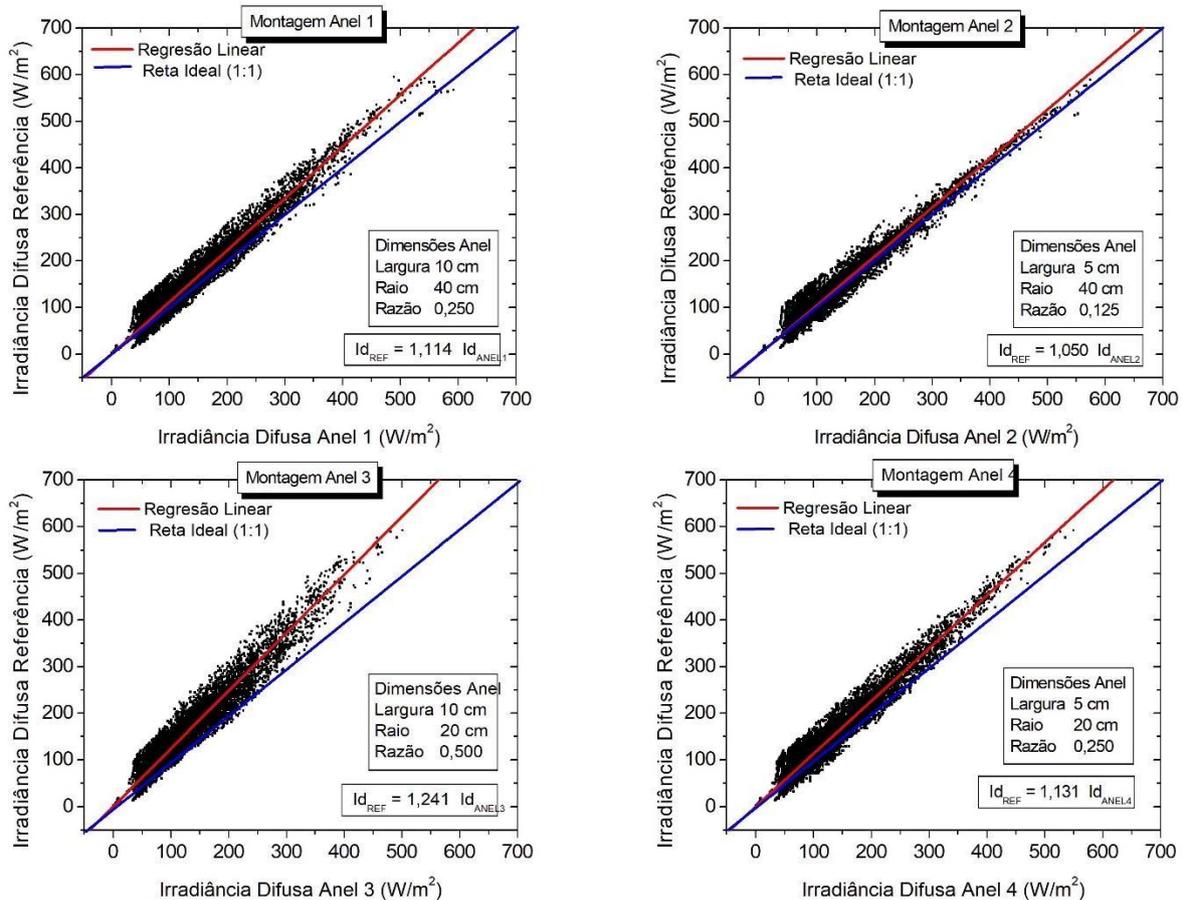


Figura 5 – Irradiâncias difusa para diferentes dimensões do anel comparadas com a irradiância difusa de referência.

As dimensões do anel (largura e raio) são informações que são usadas no cálculo dos fatores de correção geométricos. Esses fatores utilizam a relação largura/raio. No entanto, são necessárias correções adicionais que dependem dos constituintes atmosféricos. Essas correções adicionais são fruto do efeito da anisotropia da radiação (espalhamento Mie) que causam a radiação circumsolar. Dessa forma, o anel de sombreamento bloqueia essa radiação e, portanto, as dimensões do anel interferem diretamente na quantidade de radiação obstruída.

Foram propostas 4 combinações de largura/raio do anel e as medidas foram comparadas com a irradiância difusa de referência. As montagens foram: Anel1 (largura 10cm, raio 40 cm, razão 0,250), Anel2 (largura 5cm, raio 40 cm, razão 0,125), Anel3 (largura 10cm, raio 20 cm, razão 0,500), Anel4 (largura 5cm, raio 20 cm, razão 0,250).

A menor subestimativa ocorreu para o Anel2, com razão largura/raio de 0,125. Essa montagem apresenta a menor relação de tamanho entre largura e raio, obstruindo uma menor quantidade de radiação e, por isso apresentou a menor subestimativa (5%). No entanto, como a largura de sombra é menor, operacionalmente foi a montagem que necessitou de maior manutenção, apresentando o maior percentual de corte de dados indevidos em relação às demais montagens. Já a maior subestimativa ocorreu para o Anel3, com maior relação largura/raio (0,500). Neste caso, a subestimativa foi de 24,1%. Observa-se, portanto, uma relação direta entre razão largura/raio e radiação circumsolar obstruída: quanto maior a razão largura/raio, maior radiação circumsolar obstruída.

Já os Anéis 1 e 4 possuem a mesma razão largura/raio de 0,250, porém com dimensões diferentes de largura e raio. As dimensões do Anel 4 são metade do Anel 1. O Anel 1 apresentou uma subestimativa de 11,4%, enquanto o Anel 4 apresentou 13,1% de subestimativa.

Esses resultados são preliminares, pois o banco de dados ainda está sendo construído. No entanto, isso mostra a limitação das correções geométricas na medida da irradiância difusa e o impacto das dimensões do anel. Com um banco de dados maior, estudos para outras coberturas de céu serão realizadas, como as coberturas de céu nublada e parcialmente nublada, bem como a evolução dessas subestimativas ao longo do dia e em função da sazonalidade.

Com um banco de dados maior, serão realizadas associações com nuvens, aerossóis, ângulo zenital e outros constituintes atmosféricos (Kocifaj e Gueymard, 2011; Abreu et al, 2020), além de considerações sobre o ângulo de abertura dos pireliômetros comerciais, que acabam medindo também a radiação circunsolar e, portanto, superestimando o desempenho de modelos conversão de energia térmica e fotovoltaica (Blanc et al, 2014; Eissa et al, 2018).

Dessa forma, o método do anel de sombreamento permite estudos da anisotropia da radiação, bem como da concentração dos constituintes atmosféricos

#### 4. CONCLUSÃO

Mesmo mantendo a mesma relação largura/raio do anel, informação que é utilizada no cálculo das correções geométricas, as dimensões largura e raio contribuem para o desempenho das correções atmosféricas e, conseqüentemente, para a radiação circunsolar bloqueada pelo anel. Essas informações são necessárias, pois a grande maioria dos trabalhos sobre correções atmosféricas encontrados na literatura não mencionam essas observações. Conclui-se que, para garantir a qualidade das medições da irradiância difusa monitorada pelo método do anel de sombreamento MEO, as correções atmosféricas precisam estar atreladas aos aspectos construtivos do anel de sombreamento, principalmente o raio. As correções atmosféricas foram maiores para a cobertura de céu aberto e para montagens com maior razão largura/raio.

Como proposta de continuidade dos estudos, o próximo passo é verificar o efeito que aerossóis e vapor d'água causam separadamente na radiação circunsolar. Para isso, deverão ser abordadas situações de céu aberto com longos períodos de estiagem para estudos com aerossóis e situações de céu aberto logo após as chuvas, o que causaria a deposição de aerossóis, elevando a umidade relativa e, conseqüentemente, a concentração de vapor d'água. Estudos envolvendo a interação de nuvens tipo Cirrus e a dependência do ângulo zenital também poderão ser objeto de investigação.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro do trabalho (Processo FAPESP nº 2019/05721-4).

#### REFERÊNCIAS

- Abreu, E. F. M.; Canhoto, P.; Costa, M. J. 2020. Development of a clear-sky model to determine circumsolar irradiance using widely available solar radiation data. *Solar Energy*, v.205, p.88-101
- 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.
- Blanc, P.; Espinar, B.; Geuder, N.; Gueymard, C.; Meyer, R.; Pitz-Pall, R.; Reinhardt, B.; Renné, D.; sengupta, M.; Wald, L.; Wilbert, S., 2014. Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. *Solar Energy*, v.110, p.561-577.
- 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.
- Dal Pai, A., Escobedo, J. F., Dal Pai, E., Oliveira, A. P., Soares, J. R., Codato, G. 2016. MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: correction based on sky cover. *Renewable Energy*, v. 99, pp. 754-763.
- Drummond, A. J., 1956. On the measurements of sky radiation. *Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie*, v.7, p.413-436.
- Eissa, Y.; Blanc, P.; Ghedira, H.; Oumbe, A.; Wald, L. 2018. A fast and simple model to estimate the contribution of the circumsolar irradiance to measured broadband beam irradiance under cloud-free conditions in desert environment. *Solar Energy*, v.163, p.497-509.
- IBGE .Cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 28/01/2020.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.
- Kasten, F., Dehne, K., Brettschneider, W. 1983. Improvement of measurement of diffuse solar radiation. *Solar radiation data, série F*, n.2, pp.221-225, D. Redel, Dordrecht.
- Kocifaj, M.; Gueymard, C. 2011. Theoretical evaluation of errors in aerosol optical depth retrievals from ground-based direct-sun measurements due to circumsolar and related effects. *Atmospheric Environment*, v. 45, p 1050-1058.
- 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.
- 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.
- Pollard, D. G. E Langevine, L. P., 1988. An anisotropic correction for diffuse irradiance measurements in Guyana. In: *Proceeding of the 1988 Annual Meeting*, M. J. Coleman (Ed.), p. 238-243, ASES Cambridge.

- ROBINSON, H.; STOCH, L. Sky radiation and measurements and corrections. *Journal of Applied Meteorology*, v.3, p.179-81, 1964.
- 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.

**INFLUENCE OF THE CONSTRUCTIVE ASPECTS (WIDTH AND RADIUS) OF THE SHADOW RING ON THE MEASUREMENT OF DIFFUSE SOLAR IRRADANCE**

**Abstract.** *This work studies the influence of the constructive aspects (width and radius) in measuring the diffuse irradiance of the MEO (Melo-Escobedo-Oliveira) shading ring. Data from 4 shading ring assemblies with different dimensions and width/radius (b/R) ratio are analyzed. Data were obtained from the radiometric station of the Faculty of Agronomic Sciences, State University of São Paulo UNESP- Botucatu, in the year 2021. The study was carried out with open sky data to maximize the effect of radiation anisotropy. The Ring with the greatest width/radius ratio was the one that caused the greatest underestimation. The shading ring method allows studies of circumsolar radiation and atmospheric constituent.*

**Key words:** *Measuring Method, Anisotropy, Circumsolar Radiation*