

DESEMPENHO MENSAL DAS CORREÇÕES GEOMÉTRICAS SOBRE OS VALORES DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA MEDIDOS PELO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO EM DIFERENTES COBERTURAS DE CÉU

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 Agrônômicas – UNESP – Botucatu – São Paulo

Resumo. O objetivo do trabalho é verificar o desempenho mensal das correções geométricas sobre os valores da irradiância difusa medida pelo método do anel de sombreamento MEO nas coberturas de céu nublada, parcialmente nublada difusa, parcialmente nublada direta e aberta. Os dados de irradiâncias global, direta e difusa foram cedidos pelo Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu. O período cedido para o estudo compreendeu os anos de 1996 a 2005. 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 análise das correções geométricas sobre os valores da irradiância difusa foram obtidas a partir dos desvios relativos entre as irradiâncias difusa anel e de referência. Os resultados mostraram que somente a aplicação das correções geométricas não é suficiente. Em relação às coberturas, a cobertura de céu nublada apresentou superestimativas, com desvio médio de 2,7%. Já as demais coberturas apresentaram subestimativas com máximo de -11,10% na cobertura de céu aberta. Em relação aos meses, para cobertura nublada, os meses da estação primavera-verão apresentaram as maiores superestimativas relacionadas ao aspecto sazonal das correções geométricas. Para as demais coberturas, as maiores subestimativas ocorreram para os meses das estações outono-inverno relacionadas ao comportamento anisotrópico da radiação, característicos de períodos de maior transmissividade atmosférica.

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

1. INTRODUÇÃO

O correto conhecimento dos níveis de radiação solar incidente numa determinada região guarda especial importância em setores estratégicos como economia, política e meio ambiente. Países emergentes ou em desenvolvimento usam informações da distribuição da energia solar para seu melhor aproveitamento na aplicação de políticas sociais, disponibilizando para setores carentes da sociedade tecnologias para melhor aproveitamento dessa forma alternativa de energia.

A radiação solar é uma forma de energia limpa e barata e constitui a principal fonte de energia para processos físicos, biológicos e químicos, tais como derretimento de gelo das calotas polares, fotossíntese vegetal, evapotranspiração, crescimento de culturas, dentre outras. Serve também como parâmetro para avaliação de riscos de incêndios florestais, modelos de simulação hidrológica e modelos matemáticos de processos naturais. A partir de uma base de dados de qualidade é possível dimensionar sistemas para armazenamento e conversão, principalmente nas áreas de arquitetura, conforto térmico, processos térmicos de aquecimento de água e painéis fotovoltaicos.

Mudanças nos níveis de radiação solar podem provocar mudanças climáticas drásticas, afetando diretamente a produção agrícola. Em algumas estações de radiometria espalhadas no mundo têm-se observado diminuição da quantidade de radiação solar ao longo das décadas. A causa provável desta redução significativa é o aumento de aerossóis e poluentes lançados diariamente na atmosfera, modificando significativamente suas propriedades óticas e sua distribuição de nuvens, contribuindo de forma negativa para o efeito do aquecimento global. Muitos pesquisadores utilizam informações sobre a redução de radiação solar para estudos de poluição e impacto ambiental.

A radiação solar mais comumente medida mundialmente, por questões financeiras e práticas, é a radiação solar global, a qual representa o total de energia solar incidente em uma determinada superfície da terra. Esta radiação 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 $5,0\mu\text{m}$. A radiação solar global é composta por duas componentes: 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. A parcela da radiação solar global espalhada pela atmosfera é conhecida como radiação solar difusa e é composta pelos 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). O processo de espalhamento baseia-se na interação entre onda eletromagnética e átomo. A onda eletromagnética, ao incidir no átomo, perturba o movimento dos elétrons ligados, deixando o átomo em um

estado excitado devido à absorção de energia. Por sua vez, o átomo excitado pode emitir radiação eletromagnética de frequência igual à da onda incidente.

Condições de elevada nebulosidade, além de dificultarem a passagem de radiação solar, promovem um espalhamento mais uniforme (Rayleigh), conhecido como isotropia da radiação, 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), conhecido como anisotropia da radiação (Battles, 1995; Vartiainen, 1999).

Os métodos de medida da irradiância difusa são os métodos da diferença (referência), do disco de sombreamento e do anel de sombreamento. No método da diferença, a irradiância difusa é calculada a partir da diferença entre a irradiância global pela irradiância direta e necessita portanto de um piranômetro e de um pireliômetro. No método do disco de sombreamento, um disco de pequenas dimensões é posicionado sobre um piranômetro, mantendo-o sempre a sombra. Nestes dois métodos de medida são necessários equipamentos de rastreamento solar, elevando os custos de operação, além da necessidade de mão-de-obra especializada para manutenção do pireliômetro e dos dispositivos de rastreamento solar. Uma solução alternativa, de baixo custo e de operacionalização simples é o método do anel de sombreamento MEO (Melo-Escobedo-Oliveira) (Melo e Escobedo, 1994). Um piranômetro é posicionado à sombra de um anel fixo inclinado na latitude local. Periodicamente, o sensor é transladado em função da declinação solar para que o mesmo permaneça sempre à sombra. No entanto, o sistema requer a aplicação de fatores de correção geométricos devido à parcela do hemisfério celeste obstruída pelo anel (Dehne, 1984; Oliveira *et al*, 2002).

O objetivo do trabalho é realizar a análise mensal dos valores da irradiância solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento MEO após a aplicação das correções geométricas nas coberturas de céu nublada, parcialmente nublada difusa, parcialmente nublada direta e aberta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local e clima

O presente estudo é baseado em medições registradas pelo Laboratório de Radiometria Solar durante os anos de 1996 a 2005. O Laboratório de Radiometria Solar está localizado no Campus de Botucatu da Universidade Estadual Paulista (22° 54'S, 48° 27'W, 716 m). Botucatu (Fig. 1) 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.

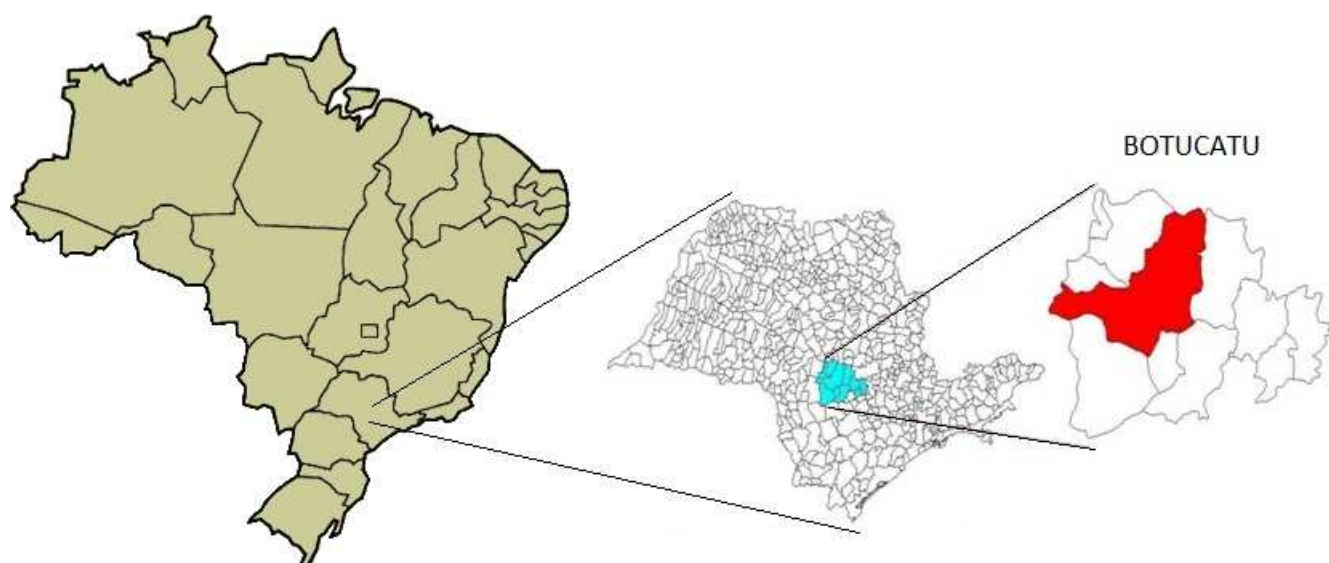


Figura 1 - Mapa do Brasil com as divisões de estados mostrando o local de amostragem.

De acordo com a classificação climática de Köppen o clima local é classificado como Cwa (clima subtropical úmido - mesotérmico), com verões quentes e úmidos e inverno seco. A Fig. 2 mostra os valores médios mensais de temperatura do ar, umidade relativa, insolação e precipitação para um banco de dados de 35 anos. A temperatura do ar e a umidade relativa acompanharam as variações solares astronômicas e os valores máximos e mínimos são 23,12 ° C (fevereiro) e 17,10 ° C (julho) para a temperatura do ar e 78,25% (fevereiro) e 63, 97% (agosto) para umidade relativa, respectivamente.

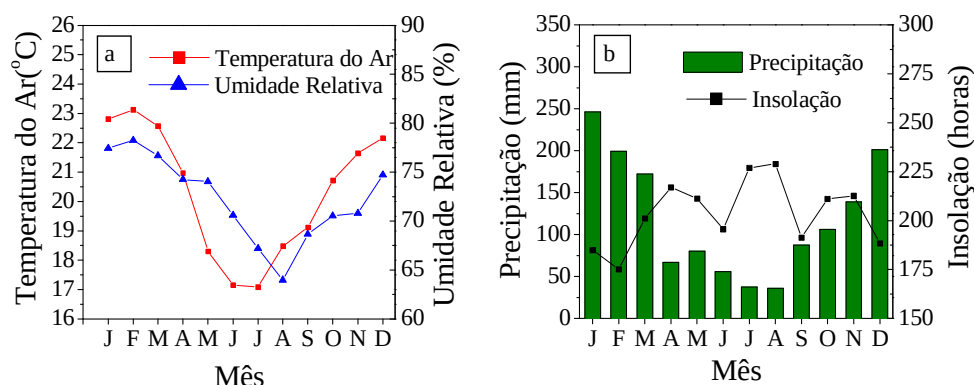


Figura 2 - Variação anual das médias mensais dos valores diários para um banco de dados 35 anos. a) Temperatura do ar e umidade relativa. b) Insolação e precipitação.

A estação chuvosa ocorre nas estações primavera-verão, quando há mais de 80% das precipitações anuais totais com valor máximo em janeiro (246,2 mm). Nesse período, as chuvas são convectivas e causadas pela evaporação intensa de superfícies úmidas e aquecidas. Estas chuvas ocorrem principalmente nos finais de tarde e começo das noites, são localizadas, com grande variabilidade espacial, intensidade de moderada a forte e duração curta. Na estação seca (outono-inverno), a precipitação mensal-média é inferior a 100 mm, com valor mínimo em agosto (36,10 mm). Neste período, a precipitação é frontal causada pelo encontro de massas frias e secas do sul com as massas quentes e úmidas da região amazônica. A massa de ar quente, sendo menos densa que a massa de ar fria, começa a se elevar na atmosfera, sofrendo, assim, resfriamento adiabático. Quando atinge a temperatura de ponto de orvalho, começa a condensar e formar nuvens que levam à precipitação. Esta chuva cai sobre uma vasta área, a intensidade é de baixa a moderada e a duração é longa (horas ou dias) dependendo da velocidade da frente. Para insolação, apesar de um aumento no fotoperíodo, os meses de verão apresentaram valores inferiores a 200 horas, com um mínimo em fevereiro (175,1 horas), devido à cobertura de céu nublada, característica do período. Para os meses de inverno, o número de dias claros é maior, conseqüentemente, aumentando as horas mensais de sol com um máximo em agosto (229 horas). No que diz respeito aos aerossóis emitidos para a atmosfera, os veículos a motor e indústrias são os principais emissores de partículas. No entanto, a área de estudo está rodeada por 70 cidades que liberam grandes quantidades de material particulado como um resultado da queima da cana de açúcar, especialmente no inverno. De acordo com Codato *et al* (2008), a concentração mais elevada de aerossol ocorre nesse período devido à falta de dias de chuva, impedindo assim a deposição de matéria particulada.

2.2 Instrumentação e controle de qualidade

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 ²)	$\pm 0,5\%$ (de 0 até 1400 W/m ²)	$\pm 0,5\%$ (de 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°C)	$\pm 1\%$ (de -20°C até +40°C)	$\pm 1\%$ (de -20°C até +40°C)

Os dados de irradiância difusa medidos pelo anel de sombreamento MEO ($I_{d\text{ANEL}}$) 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 (I_{dREF}), 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	$0,1 I_G \leq I_{dANEL} < I_G$	6307 (1,20%)
Difusa Referência	$0 \leq I_{dREF} \leq I_0$	12457 (2,37%)
Todos filtros	--	47725 (9,09%)

Para verificação do desempenho das correções geométricas na medida da irradiância difusa pelo anel de sombreamento, foram calculados os desvios relativos entre as irradiâncias difusa anel e de referência, dadas pela Eq.(3):

$$D(\%) = 100 * \left(\frac{I_{dANEL} - I_{dREF}}{I_{dREF}} \right) \quad (3)$$

Desvios relativos positivos significam superestimativas, ou seja, irradiância difusa anel maior que a de referência. Desvios relativos negativos indicam subestimativas, ou seja, a irradiância difusa anel é menor que a de referência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Somente a aplicação das correções geométricas não é suficiente para corrigir os valores da irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento MEO e as diferenças entre os valores verdadeiros e os medidos são proporcionais à transmissividade atmosférica K_t , ou seja, são dependentes da atmosfera (Dal Pai e Escobedo, 2011). Para melhor detalhamento do efeito da atmosfera na medida da irradiância difusa pelo método do anel de sombreamento MEO, os dados foram separados e agrupados em função da cobertura de céu: 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 ($0,65 < K_t < 1$) (Escobedo *et al*, 2009). A Fig. 3 mostra a correlação entre as irradiâncias difusa medida pelo anel de sombreamento e de referência para a cobertura de céu nublado, parcialmente nublado difuso, parcialmente nublado direto e aberto, respectivamente, para os dez anos de medidas.

O coeficiente angular da reta de regressão linear de 1,024 da cobertura de céu nublado mostra que a aplicação das correções geométricas nesta cobertura causou uma superestimativa nas medidas da irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento MEO, ou seja, irradiância difusa anel tornou-se maior que a irradiância difusa referência. Este comportamento não era esperado, pois sendo esta cobertura caracterizada por condições de isotropia, a aplicação das correções geométricas deveria, no máximo, promover a igualdade entre os valores das irradiâncias difusa referência e anel (coef ang = 1 e desvio = 0). Inicialmente pensou-se que este aumento pudesse estar ligado às reflexões internas ocorridas nas paredes no anel. No entanto, o uso de tinta preta minimizou significativamente os efeitos das reflexões internas (Lebaron *et al*, 1980). Em contraste, Drummond (1956) encontrou subestimativas da ordem de 3% para a cobertura de céu nublado utilizando sua montagem. À medida que se diminui a nebulosidade e, consequentemente, aumenta-se a transmissividade atmosférica, a aplicação das correções geométricas na irradiância difusa anel apresentou resultados opostos daqueles observados na cobertura de céu nublado. Os coeficientes angulares menores que 1 das outras três coberturas de céu mostram que a aplicação das correções geométricas não foram suficientes para a correção da medida da irradiância difusa devido ao anel de sombreamento MEO, ou seja, mesmo após a aplicação das correções geométricas, a irradiância difusa anel continuou menor que a irradiância difusa de referência. As maiores subestimativas foram proporcionais aos valores de coeficiente angular mais afastados de 1 e ocorreram nessa ordem para as coberturas de céu: aberto (coef ang = 0,888), parcialmente nublado direto (coef ang = 0,917) e parcialmente nublado difuso (coef ang = 0,962). Assim, coberturas de céu aberto favorecem mais a ocorrência de eventos de anisotropia da radiação, resultando numa radiação adicional que, ao ser também bloqueada pelo anel de sombreamento, explica as subestimativas observadas (Battles, 1995; Vartiainen, 1999). Portanto, essas subestimativas apontam para a necessidade de correções adicionais em função da atmosfera.

Para entender melhor de que forma as correções geométricas afetaram a medida da irradiância difusa nessas coberturas, a Tab. 3 mostra numericamente os valores mensais dos desvios relativos entre as irradiâncias difusas anel e de referência após aplicação das correções geométricas para as quatro coberturas de céu.

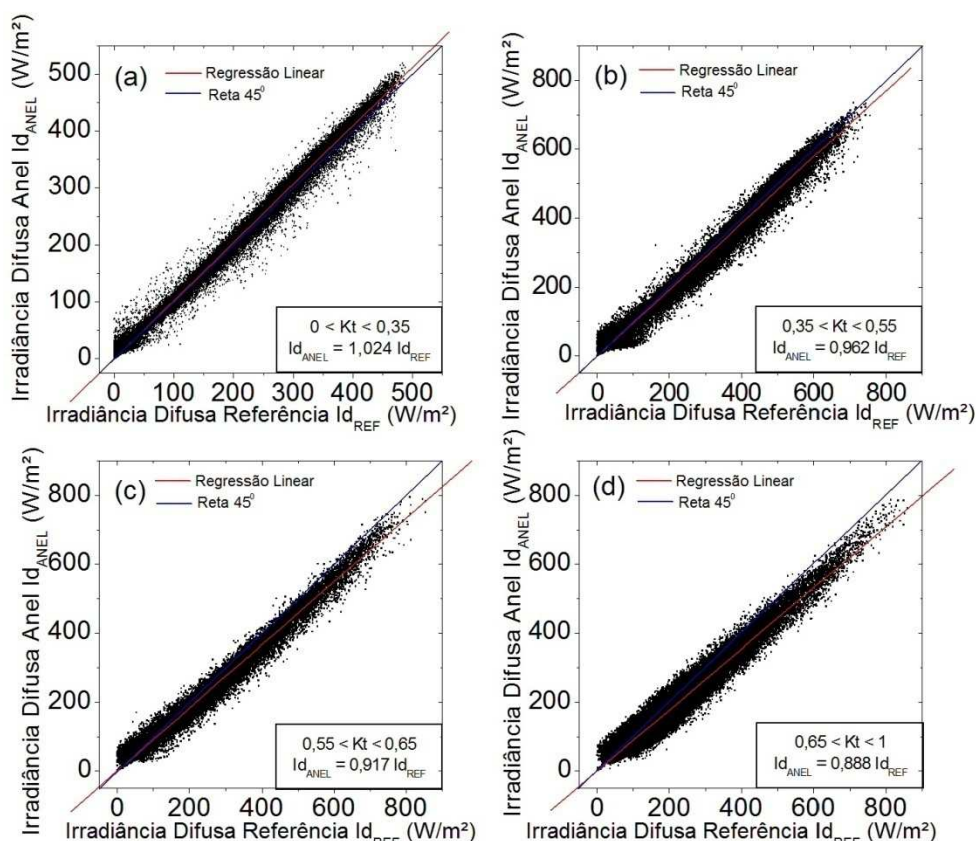


Figura 3 - Correlação entre as irradiâncias difusa medida pelo método do anel de sombreamento MEO e referência. a) Cobertura de céu nublada ($0 < K_t < 0,35$). b) Cobertura de céu parcialmente nublada difusa ($0,35 < K_t < 0,55$). c) Cobertura de céu parcialmente nublada direta ($0,55 < K_t < 0,65$). d) Cobertura de céu aberto ($0,65 < K_t < 1$).

Tabela 3. Desvio relativo médio mensal entre as irradiâncias difusas anel e de referência após aplicação das correções geométricas para as coberturas de céu nublado, parcialmente nublado difuso, parcialmente nublado direto e aberto.

Mes	Cobertura de Céu			
	Nublada ($0 < K_t < 0,35$)	Parc Nub Difusa ($0,35 < K_t < 0,55$)	Parc Nub Direta ($0,55 < K_t < 0,65$)	Aberta ($0,65 < K_t < 1$)
	Superestimativa (%)	Subestimativa (%)	Subestimativa (%)	Subestimativa (%)
jan	3,27	-2,11	-6,38	-9,64
fev	3,12	-2,83	-5,64	-7,85
mar	2,45	-3,67	-7,35	-10,01
abr	2,38	-3,04	-6,36	-13,48
mai	1,16	-4,05	-5,73	-12,62
jun	0,63	-5,18	-8,19	-15,98
jul	0,86	-4,89	-7,44	-15,11
ago	1,94	-3,42	-6,41	-12,30
set	3,11	-2,54	-5,69	-10,90
out	3,19	-3,00	-5,99	-9,67
nov	2,85	-2,25	-6,10	-10,42
dez	3,00	-2,24	-5,97	-9,79
Média	2,70	-2,97	-6,34	-11,10

A partir da média dos desvios relativos para cada cobertura e dos coeficientes angulares da Fig. 3, verificou-se que a aplicação das correções geométricas sobre os valores das irradiâncias difusas medidas pelo anel de sombreamento MEO produz efeitos diferenciados na cobertura de céu nublado em relação às demais coberturas. Enquanto ocorreram superestimativas para a cobertura de céu nublado, nas demais coberturas, com o aumento da transmissividade atmosférica, ocorreram subestimativas. A Fig 4 mostra a variação sazonal das correções geométricas aplicadas ao longo do ano e o desvio relativo médio mensal entre a irradiâncias difusa anel e de referência após a aplicação das correções geométricas para a cobertura de céu nublada.

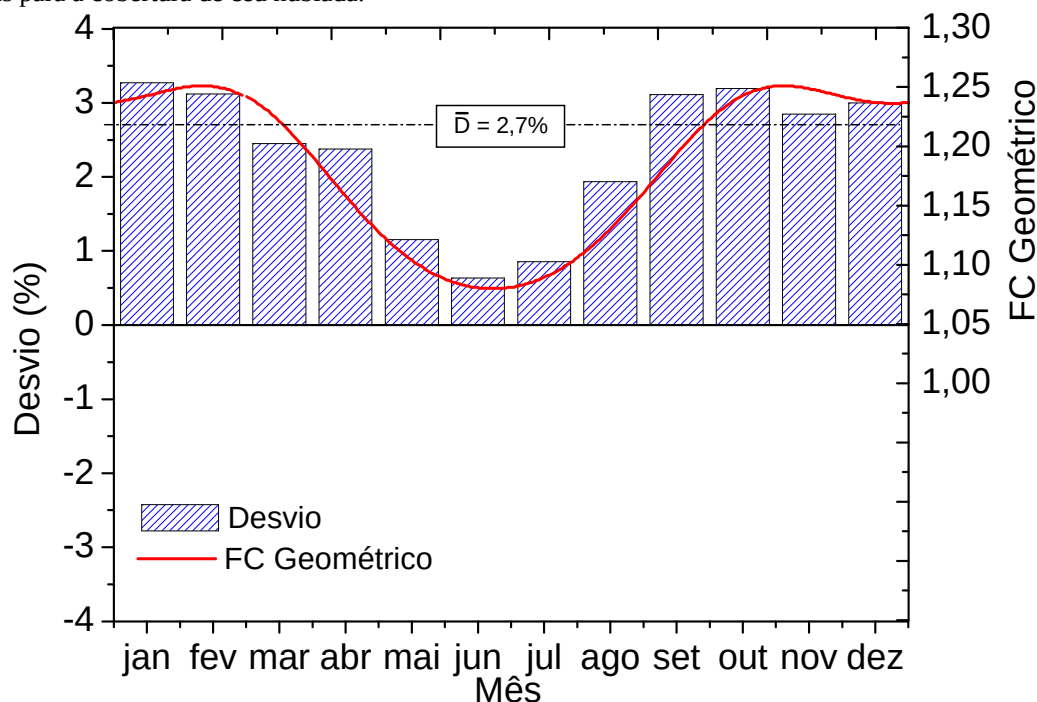


Figura 4 - Correções geométricas aplicadas ao longo do ano e desvio relativo mensal entre as irradiâncias difusa anel e de referência após aplicação das correções geométricas para condições de cobertura de céu nublada.

Como as correções geométricas dependem da geometria solar, elas apresentam comportamento sazonal. Na primavera-verão as correções geométricas são maiores, com valor máximo de 25% nos meses de fevereiro e novembro. No outono-inverno ocorrem as menores correções, com valor mínimo de 8% no mês de junho. Ao serem aplicadas nos valores da irradiância difusa anel na cobertura de céu nublado causam superestimativas, tornando os valores da irradiância difusa anel maiores que os valores de referência para todos os meses. Porém, nesta cobertura, como prevalece o comportamento isotrópico da radiação, o uso das correções geométricas deveria promover a igualdade de valores entre as irradiâncias difusa anel e de referência (desvio = 0). As maiores superestimativas ocorreram para os meses da primavera-verão, onde as correções geométricas e a frequência de condições de cobertura de céu nublado são maiores. Nos meses do outono-inverno, as correções geométricas menores foram mais eficientes, promovendo as menores superestimativas e, assim, as irradiâncias difusa de referência e anel ficaram mais próximas da igualdade. Em janeiro, a difusa anel superou a difusa referência em 3,27%, enquanto que em junho a superestimativa foi de apenas 0,63%. O desvio relativo médio anual foi de 2,7% e encontra-se mais próximo dos valores obtidos para os meses da primavera-verão, pois é nesses meses que ocorrem as maiores frequências de ocorrência de condições de céu nublado. Portanto, nesta cobertura as próprias nuvens funcionam como elemento sombreador, limitando o uso do anel de sombreamento e das correções geométricas. Como a irradiância direta é nula por causa da obstrução pelas nuvens, a irradiância difusa é praticamente igual a irradiância global.

Com o aumento da transmissão atmosférica, os efeitos da anisotropia ficam mais significativos (Pollard e Langevine, 1988). Assim, para melhor compreensão do efeito da anisotropia sobre os valores da irradiância difusa anel nas coberturas de céu parcialmente nublado difuso, parcialmente nublado direto e aberto, efetuou-se uma análise mensal dos desvios relativos entre as irradiâncias difusa do anel e de referência após a aplicação das correções geométricas. A Fig. 5 mostra, mensalmente, o efeito da aplicação das correções geométricas no desvio relativo entre as irradiâncias difusa do anel e de referência para as coberturas de céu parcialmente nublada difusa, parcialmente nublada direta e aberta, respectivamente.

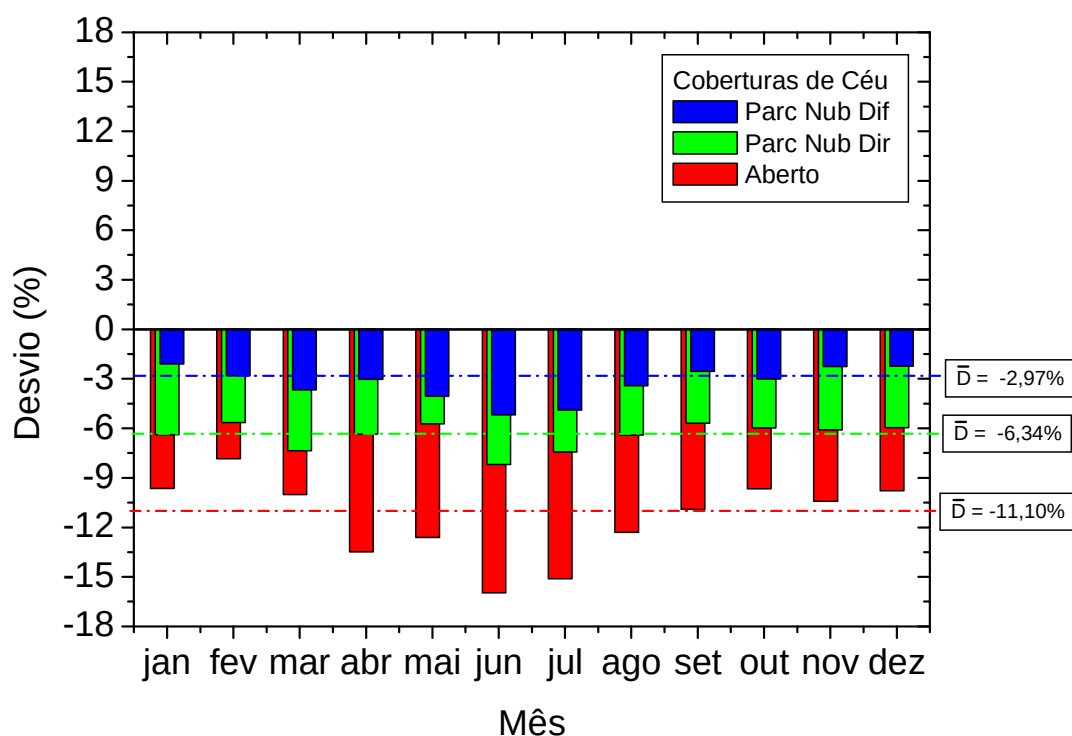


Figura 5 - Desvio relativo médio mensal entre as irradiâncias difusa anel e de referência após aplicação das correções geométricas para condições de cobertura de céu parcialmente nublado difuso, parcialmente nublado direto e aberto.

Para as três coberturas e para todos os meses, os valores dos desvios relativos foram negativos, indicando claramente que a irradiância difusa anel foi menor que a referência, ou seja, as correções geométricas não foram suficientes para correção dos valores medidos da irradiância difusa pelo método do anel de sombreamento MEO. Em relação às coberturas, a média dos desvios relativos cresceu nessa ordem: cobertura de céu parcialmente nublada difusa, parcialmente nublada direta e aberta, com desvios relativos médios anuais de -2,97%, -6,34% e -11,10%, respectivamente. O aumento da transmissividade atmosférica K_t e, consequentemente da anisotropia, foram os responsáveis pelo aumento das subestimativas (desvios). Em relação à evolução mensal, as três coberturas apresentaram comportamento similar: subestimativas menores para meses das estações primavera-verão e subestimativas maiores para meses das estações outono-inverno. Para a cobertura de céu parcialmente nublada difusa, a menor subestimativa foi de -2,11% para o mês de janeiro; para a cobertura de céu parcialmente nublada direta, a menor subestimativa foi de -5,64% para o mês de fevereiro; e para a cobertura de céu aberta, a menor subestimativa foi de -7,85% para o mês de fevereiro. Já as maiores subestimativas ocorreram no mês de junho para as três coberturas, com desvios -5,18% para cobertura de céu parcialmente nublada difusa; -8,19% para cobertura de céu parcialmente nublada direta; e -15,98% para a cobertura de céu aberta. Esses valores mostram a influência sazonal da atmosfera no desempenho do método do anel de sombreamento MEO na medida da irradiância difusa.

As menores subestimativas apresentadas pelos meses da primavera-verão se justificam em função dos maiores níveis de nebulosidade, pluviometria e umidade relativa do período, os quais contribuem para minimizar os efeitos anisotrópicos da radiação. Enquanto a nebulosidade favorece condições de isotropia por promover um espalhamento mais uniforme da radiação pelas nuvens, a pluviometria permite a remoção do material particulado da atmosfera e, em consequência, diminui o espalhamento Mie responsável pela anisotropia da radiação. Já os níveis elevados de umidade relativa indicam maiores concentrações de vapor d'água e, portanto, ocorre maior probabilidade de absorção do que espalhamento da radiação, principalmente para a componente do infravermelho, a qual representa 50% do espectro total de radiação solar (Escobedo *et al*, 2009). Já as maiores subestimativas ocorrem para os meses do outono-inverno, principalmente para a cobertura de céu aberto, onde a diferença média entre os valores medidos e os valores verdadeiros pode chegar a 16%. Essa diferença elevada entre os valores medidos e verdadeiros está relacionada aos baixos níveis de nebulosidade, precipitação e umidade relativa do período, os quais promovem uma maior concentração de material particulado de diferentes tamanhos na atmosfera, elevando assim a probabilidade de ocorrência do espalhamento Mie e, consequentemente, aumentando os efeitos anisotrópicos da radiação.

4. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que somente a aplicação das correções geométricas não é suficiente para correção dos valores da irradiância difusa medida pelo método do anel de sombreamento MEO. Em relação às coberturas, a cobertura de céu nublada apresentou superestimativas, com desvio médio de 2,7%. Já as demais coberturas apresentaram subestimativas com máximo de -11,10% na cobertura de céu aberta. Em relação aos meses, para cobertura nublada, os meses da estação primavera-verão apresentaram as maiores superestimativas relacionadas ao aspecto sazonal das

correções geométricas. Para as demais coberturas, as maiores subestimativas ocorreram para os meses das estações outono-inverno relacionadas ao comportamento anisotrópico da radiação, característico de períodos de maior transmissividade atmosférica. Recomenda-se, portanto, o desenvolvimento de correções adicionais que levem em consideração os aspectos sazonais e atmosféricos para se melhorar a precisão da irradiância difusa medida pelo método do anel de sombreamento MEO.

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.
- 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., 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.
- 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.
- 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., 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: *ENERGÍAS 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.
- 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.
- Vartiainen, E., 1999. An anisotropic shadow ring correction method for the horizontal diffuse irradiance measurements. *Renewable Energy*, v.17, p.311-317.

MONTHLY PERFORMANCE OF GEOMETRIC CORRECTIONS ON THE VALUES OF DIFFUSE SOLAR IRRADIANCE MEASURED BY THE MEO SHADOWRING METHOD FOR DIFFERENT SKY COVERS

Abstract. *The objective is to perform monthly analysis of the diffuse irradiance measured by the MEO shadowring method after the application of geometric corrections in different sky covers: cloudy, diffuse partly cloudy, direct partly cloudy and clear. Global, direct and diffuse solar irradiances were supplied by the Laboratory of Solar Radiometry of Botucatu. The period assigned for the study comprised the years 1996 to 2005. The sky coverage were determined from the atmospheric transmissivity K_t (cloudy $0 < K_t < 0.35$; diffuse partly cloudy $0.35 < K_t < 0.55$; direct partly cloudy $0.55 < K_t < 0.65$, and clear $0.65 < K_t < 1$). The analysis of the geometric corrections on the diffused irradiance values were obtained from the relative deviations between the ring and reference diffuse irradiances. The results showed that only the application of the geometrical corrections is not sufficient. Regarding coverage, the cloudy coverage presented an overestimation, with average deviation of 2.7%. The other coverages presented underestimations with a maximum of 11.10% in the clear sky coverage. Regarding the month, for the cloudy coverage, the months of spring-summer season had the highest overestimation related to the seasonal aspect of geometric corrections. For the other coverages, the largest underestimations occurred for the months of autumn-winter seasons related to the anisotropic behavior of the radiation that is characteristic of periods of increased atmospheric transmissivity.*

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