

EFEITO DA COBERTURA DO CÉU NO AUMENTO DAS FRAÇÕES SOLAR DIFUSA E PAR-DIFUSA EM ESTUFA DE POLIETILENO.

J. F. Escobedo, E. Dal Pai L.C. Lenz, M.B Prado
Dep. Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP. Botucatu/SP/Brasil.
Rua José Barbosa de Barros, 1780 - CEP 18610-307 - Tel. (14) 3880-7100 - Fax (14) 3815-3438
e-mail:escobedo@fca.unesp.br

Recibido 14/08/13, aceptado 30/09/13

Resumo: Objetivou-se no trabalho a obtenção das correlações entre as frações difusa (K_d^{in}) e PAR-difusa (K_{pd}^{in}) das radiações global e PAR-global respectivamente, no interior e exterior de uma estufa de polietileno. A estufa utilizada nas medidas foi do tipo túnel nas dimensões ($L=7m$; $C= 20m$ e $h=3,5m$) com filme de polietileno ($100\mu m$ de espessura). Os resultados mostram que a taxa de crescimento das frações no interior da estufa K_d^{in} e K_{pd}^{in} é dependente da cobertura de céu: o aumento das frações K_d^{in} e K_{pd}^{in} é maior na cobertura de céu aberto(CA), decrescendo na céu parcialmente nublada(CPN) e quase iguais na cobertura de céu nebuloso(CN). Os resultados mostram ainda que o aumento da fração PAR-difusa (K_{pd}^{in}) é maior que a fração difusa (K_d^{in}) do espectro total: 9,0% na CN; 6,0% na CPN e 2,2% na CA.

Palavras Chave: radiação difusa, radiação PAR-difusa, fração solar e estufa de polietileno

INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores que favorece o melhor desenvolvimento da cultura em meio protegido é o aumento da fração difusa da radiação global ($K_d = H_d/H_G$) provocado pelo espalhamento das radiações direta e difusa na cobertura de polietileno. A radiação difusa por atingir área foliar mais homoganeamente é considerada a componente solar mais eficiente no processo de conversão fotossintética (Weiss & Norman, 1985).

Alterações ambientes protegidos da radiação solar global, refletida, PAR e saldo de radiação têm sido estudadas por muitos pesquisadores com objetivo de compreender melhor processos físicos e agrometeorológicos responsáveis pelo aumento do rendimento e produtividade das culturas (Steidle Neto *et al.*, 2008; Souza & Escobedo, 1997). No entanto, a radiação difusa e a PAR-difusa, ainda são pouco estudadas como mostram os trabalhos de Alados-Arboledas *et al.*,(1999); Alados *et al.*, (2000), Jacovides *et al* (2007). Isto se deve, muito provavelmente, ao alto custo do equipamento do piranometro com anel de sombreamento e as restrições de metodologia para medida da radiação difusa: o método do anel de sombreamento, utiliza fatores de correção em função da geometria do anel e local, e não considera os efeitos da nebulosidade e anisotropia, os quais aumentam e diminuem os valores das medidas das duas radiações, respectivamente. Estudos com a radiação difusa e a PAR-difusa, são mais escassos ainda em estufas de polietileno e há poucas informações disponíveis na literatura especializada(Escobedo *et al.* 2000; Frisina *et al.*, 2000).

Dada a importância atual dos ambientes protegidos para produção agrícola no Brasil, esse trabalho teve por objetivo medir as radiações difusa e PAR difusa no interior e exterior de uma estufa tipo túnel para obter as correlações das frações difusa e PAR-difusa das radiações global e PAR-global que permitam quantificar o aumento da radiação difusa e PAR-difusa no interior da estufa.

MATERIAL E MÉTODOS

As medidas foram realizadas no período de Junho de 1999 a Setembro de 2000, na Estação de Radiometria Solar de Botucatu-SP, da UNESP (latitude de $22^{\circ}54'$ S, longitude de $48^{\circ}27'$ W e altitude de 786 m). O clima local é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho. A Figura 1(a, b, c,d) mostra as séries climáticas da temperatura, umidade relativa, precipitação e nebulosidade, do período de 1970 a 2000 em Botucatu. A evolução anual media mensal da temperatura e umidade relativa, segue a variação astronômica do sol (declinação solar): fevereiro é mês mais quente e julho é o mais frio do ano, com temperaturas médias de $23,2C^{\circ}$ e $17,1C^{\circ}$, respectivamente. Fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

A nebulosidade f , calculada pela expressão $f=1-n/N$, expressa a fração do número de horas em que o sol fica encoberto por nuvens no dia, onde n/N é a razão de insolação, n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo (Iqbal, 1978). É mais elevada nos meses de janeiro ($f=0,61$) e menor em agosto ($f=0,27$). Em contraste à nebulosidade, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229h e 175,28h, respectivamente.

A evolução anual da precipitação segue a evolução da nebulosidade (Fig. 1c). Constitui de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação de 100 mm, aproximadamente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm.

A cidade de Botucatu está inserida em uma região rural com plantações de cana de açúcar e eucalipto. Nos meses de seca, de junho à novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar. A evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 2000 a 2005 (Fig. 1d), mostra que no início das queimadas da cana de açúcar em julho, a concentração de aerossóis mensal aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de AOD=0,35 em setembro, o que é equivalente à concentração PM₁₀ de 70,0 ug.m⁻³ (CODATO *et al.*, 2008).

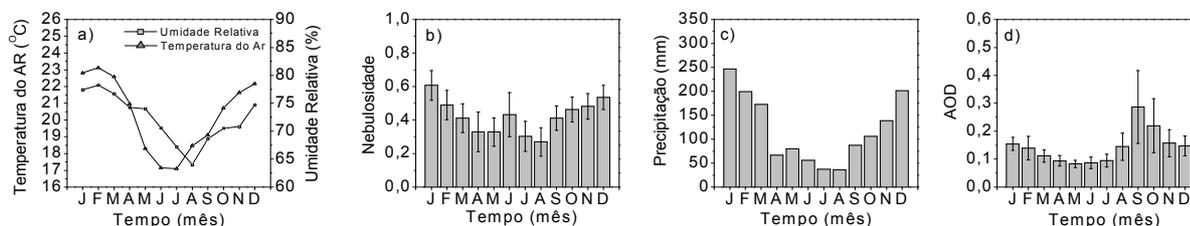


Figura 1: Séries Climáticas da Temperatura e Umidade Relativa (a), Nebulosidade (b), Precipitação(c), Profundidade Ótica de Aerossóis (d) do período de 1970 a 2000 em Botucatu.

O ambiente protegido utilizada no trabalho é do tipo túnel orientada com eixo principal na direção leste-oeste, coberta com filme de polietileno transparente (100 µm de espessura) de baixa densidade e lateral de tela de nylon (sombreamento de 50%) com as seguintes dimensões: 7m largura, 20m comprimento e 3,5m de altura (Fig. 2).



Figura 2: Vista da estufa de polietileno sem e com cultura de pimentão.

O período experimental, durante o qual foi efetuado o monitoramento das irradiâncias, ocorreu sob duas condições: em uma primeira etapa, em solo descoberto e, em uma segunda etapa, em solo cultivado com pimentão. As medidas em condições de solo descoberto foram iniciadas em 01/06/1999 e finalizadas em 14/02/2000. O transplântio das mudas de pimentão foi realizado em 15/02/2000 e, assim, a segunda etapa foi desenvolvida ao longo do ciclo da cultura, entre 15/02/2000 e 05/09/2000.

As irradiâncias global I_G^{in} e I_G^{ex} foram medidas utilizando-se um piranômetro Eppley PSP e Kipp-Zonen CM3 e as irradiâncias PAR global (I_{PG}^{in} e I_{PG}^{ex}) utilizando-se detectores quânticos Li-Cor. As irradiâncias difusas (I_d^{in} , I_d^{ex} , I_{pd}^{in} e I_{pd}^{ex}) foram monitoradas por anéis de sombreamento tipo **MEO** (Melo e Escobedo, 1994) com as seguintes especificações: 80cm de diâmetro, 10cm de largura e 1mm de espessura, usando os piranômetro Kipp-Zonen e Eppley PSP para a medida das irradiâncias I_d^{in} e I_d^{ex} e sensores quânticos Li-Cor para a medida de I_{pd}^{in} e I_{pd}^{ex} . Para aquisição dos dados, utilizou-se um Datalogger Campbell 23X, operando na frequência de 1Hz e armazenando médias de 5 minutos.

O fator de correção (FC) usado para compensar a radiação difusa do espectro total e PAR-difusa do espectro PAR barrada pelo anel de sombreamento **MEO**, denominado correção isotrópica, foi determinado pela expressão:

$$FC = [1 - (H'_d/H_d)]^{-1} \quad (1)$$

onde H_d é a irradiação difusa e H'_d a irradiação difusa interceptada durante o dia. A razão H'_d/H_d foi calculada pela equação proposta por Oliveira et al 2002 em função das dimensões do anel (largura e diâmetro) do dia (declinação solar) e local das medidas (latitude):

$$H'_d / H_d = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \int_0^{\omega_p} \cos(z) d\omega \quad (2)$$

onde b e R são a largura e raio do anel, δ é a declinação solar, ϕ é a latitude, z é o ângulo zenital e ω é o ângulo horário do sol, variando do nascer até o pôr do sol.

A correção isotrópica apresenta uma limitação para dias nebulosos em que a radiação global é praticamente igual à difusa, e a aplicação do FC isotrópico pode aumentar desnecessariamente a radiação de 8,0% no inverno até aproximadamente 26,0% no verão, devido à metodologia utilizada. Para compensar esse efeito da cobertura nebulosa, a radiação difusa isotrópica foi corrigida pela equação $H_{\text{final}} = -0,950H_{\text{isotrópica}}$ diminuindo a radiação difusa do espectro total final em 5,0%, enquanto que, a radiação PAR-difusa foi corrigida pela equação $H_{\text{pd}_{\text{final}}} = -0,920H_{\text{pd}_{\text{isotrópica}}}$ diminuindo a radiação PAR-difusa do espectro PAR final em 8,0%.

A correção devido a anisotropia, foi feita por meio de equações lineares obtidas em função da transmissividade atmosférica de intervalos discretos de K_t . Para cobertura de céu parcialmente nublado a radiação difusa isotrópica foi corrigida pela equação $R_{\text{d}_{\text{final}}} = 1,034 H_{\text{d}_{\text{isotrópica}}}$ aumentando a radiação difusa final em 3,4%. Na cobertura de céu parcialmente nublado com dominância para claro ($0,55 < K_t < 0,65$) a radiação difusa isotrópica foi corrigida por $R_{\text{d}_{\text{final}}} = 1,084 R_{\text{d}_{\text{isotrópica}}}$ aumentando a radiação difusa final em 8,4%. Finalmente, na cobertura de céu aberto ($K_t > 0,65$) a radiação difusa isotrópica foi corrigida por $R_{\text{d}_{\text{final}}} = 1,120 R_{\text{d}_{\text{isotrópica}}}$ aumentando a radiação difusa final em 12,0%. A correção da irradiância difusa isotrópica em função da transmissividade atmosférica K_t aproximou a irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento **MEO** em menos de 1% da irradiância difusa obtida pelo método da diferença.

A base de dados para a obtenção dos modelos de estimativa foi constituída de irradiações (MJ/m^2) obtidas a partir da integração diária da irradiância (W/m^2), dentro e fora da estufa, no período de 1 ano e a validação, no período de 3 meses. Para a obtenção das equações de estimativa, foi utilizado a base de dados das radiações diárias (MJ/m^2) do período de 01/06/1999 a 31/05/2000 e para a validação das equações de estimativa, de 01/06/2000 a 31/08/2000.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As radiações direta e difusa do espectro total (0,285 a 4,0 μm) e radiações PAR-direta e PAR-difusa do espectro PAR (0,4 a 0,7 μm) ao interagirem com a cobertura de polietileno tipo túnel com cultura em desenvolvimento no interior da estufa, são transmitidas para dentro da estufa, como mostra o esquema na Figura 3. Se as radiações PAR-direta e PAR-difusa no meio externo forem incluídas no modelo proposto por Farkas et al (2001), as radiações direta e PAR-direta, difusa, e PAR-difusa, após interagirem com a cobertura de polietileno contribuem nas medidas das radiações global e Par-Global, com as seguintes componentes: 1) – 1a: direta transmitida; 1b- direta espalhada; 1c: refletida; 1d- multirefletidas das superfícies horizontal interna e externa, e então espalhada ou refletida novamente na cobertura, e 1e- multirefletidas na cultura e então espalhada ou refletida novamente na cobertura. As radiações difusa e PAR-difusa contribuem nas medidas das radiações global e Par-Global dentro da estufa com as componentes: 2)- 2a- radiações difusa e PAR-difusa externa transmitida direcionalmente, 2b- difusas espalhadas e 2c- difusas refletidas na cobertura e todas as demais irradiâncias difusas que sofreram múltiplas reflexões na superfície horizontal e na cultura. Similarmente, as radiações direta e PAR-direta, difusa e PAR-difusa, após interagirem com a cobertura de polietileno contribuem nas medidas das radiações difusa e Par- difusa, com as mesmas componentes medidas das radiações global e Par- Global, com exceção da componente direta transmitida (1a) que é barrada pelo anel de sombreamento **MEO**.

Para quantificar o aumento das radiações difusa (H_d^{in}) e Par-difusa ($Q_{\text{pd}}^{\text{in}}$) no interior da estufa de polietileno optou-se em normalizar as radiações dentro e fora da estufa por meio das radiações global e Par-Global, e representar as variações da radiação difusa do espectro total por frações $K_d^{\text{ex}} = (H_d^{\text{ex}}/H_g^{\text{ex}})$ e $K_d^{\text{in}} = (H_d^{\text{in}}/H_g^{\text{in}})$, e a Par-difusa do espectro PAR por $K_{\text{pd}}^{\text{ex}} = (Q_{\text{pd}}^{\text{ex}}/Q_{\text{pg}}^{\text{ex}})$ e $K_{\text{pd}}^{\text{in}} = (Q_{\text{pd}}^{\text{in}}/Q_{\text{pg}}^{\text{in}})$, respectivamente.

A fração K_d^{ex} representa a radiação difusa da radiação solar global no meio externo, enquanto que a fração K_d^{in} representa a radiação difusa na radiação solar global dentro da estufa, ambas na faixa do espectro total. Similarmente, para a faixa espectral PAR, a fração $K_{\text{pd}}^{\text{ex}}$ representa a radiação PAR- difusa na radiação PAR-global no meio externo, enquanto que a fração $K_{\text{pd}}^{\text{in}}$ representa a radiação PAR-difusa da PAR-global dentro da estufa. O uso das frações elimina a dependência da declinação solar (dia) e geográfica da latitude (local), assim as variações das frações K_d^{in} e $K_{\text{pd}}^{\text{in}}$ dentro da estufa, somente irão depender apenas dos efeitos que ocorrem na cobertura de polietileno e das condições de céu.

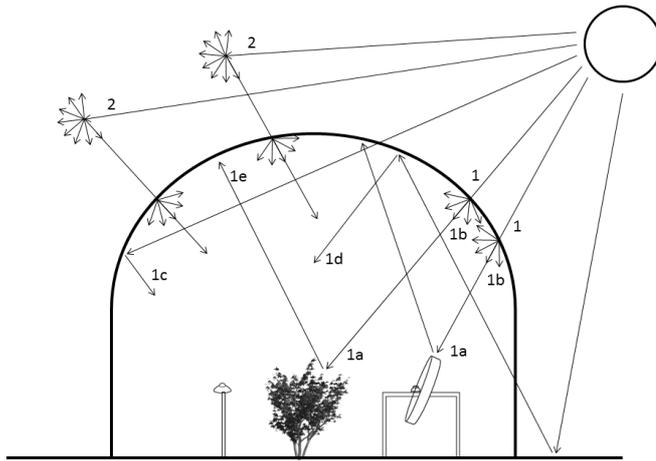


Figura 3: Esquema da interação das radiações direta e difusa dos espectros total e PAR na cobertura de polietileno da estufa tipo túnel.

As Figuras 4a e 4b mostram as correlações entre a fração difusa do espectro total (K_d^{in} x K_d^{ex}) e a fração difusa do espectro PAR (K_{Pd}^{in} x K_{Pd}^{ex}) dentro e fora na estufa de polietileno. As correlações (K_d^{in} x K_d^{ex}) e (K_{Pd}^{in} x K_{Pd}^{ex}) mostram que a cobertura de polietileno aumenta linearmente os valores das frações difusas K_d^{in} e K_{Pd}^{in} em todo intervalo de variação de K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} entre 0 a 1 ou ao longo do intervalo variação de cobertura de céu desde claro a nebuloso.

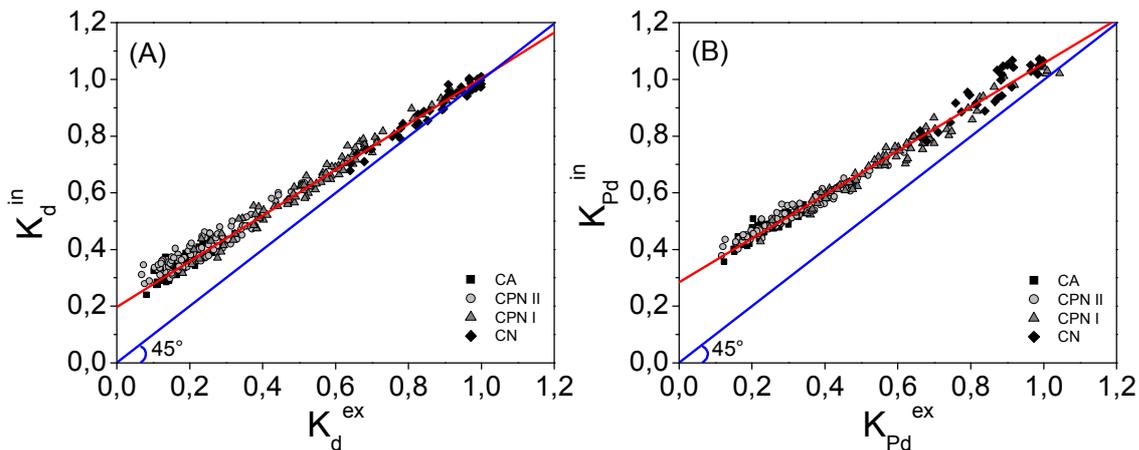


Figura 4: Correlações entre as frações difusa da radiação global e PAR-difusa da radiação PAR-global dentro e fora da estufa de polietileno.

Os pontos experimentais posicionados acima da reta de 45° mostram que a fração difusa interna (K_d^{in}) é maior que a fração difusa externa (K_d^{ex}) e similarmente, a fração PAR-difusa interna (K_{Pd}^{in}) é maior que a fração PAR-difusa externa (K_{Pd}^{ex}) em quase todo intervalo de variação das frações K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} , exceto para condições de extrema nebulosidade ($K_d^{ex} = 1$ e $K_{Pd}^{ex} = 1$) onde uma pequena quantidade das frações K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} foram um pouco maior que K_d^{in} e K_{Pd}^{in} , respectivamente. A Figura 4 mostra ainda que para os mesmos valores das frações K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} , o valor da fração K_{Pd}^{in} é maior que K_d^{in} . Considerando-se que a razão Q_{Pg}^{ex}/H_g^{ex} é menor que 1, pode-se concluir que o espalhamento da radiação difusa $PARQ_{Pd}^{in}$ na cobertura de polietileno é maior que o da radiação difusa (H_d^{in}).

A falta do paralelismo observada nas correlações lineares da figura 4a e 4b em relação à reta de 45° mostra que o aumento dos valores das frações internas K_d^{in} e K_{Pd}^{in} em função dos valores das frações externas K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} é dependente da cobertura de céu: os valores das frações K_d^{in} e K_{Pd}^{in} são maiores nas condições em que os valores das frações K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} são menores, ou seja, na cobertura de céu aberto. Os valores das frações K_d^{in} e K_{Pd}^{in} , decrescem para valores intermediários de K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} na cobertura de céu parcialmente nublada. Na cobertura de céu nublada, os valores das frações K_d^{in} e K_{Pd}^{in} são praticamente iguais aos valores das frações K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} , ou seja, não há aumento das radiações difusa e Par-difusa dentro da estufa.

Para melhor visualização e quantificação das variações das frações K_d^{in} , K_d^{ex} , K_{Pd}^{in} e K_{Pd}^{ex} em função da cobertura de céu, as frações foram separadas em função do índice de claridade de K_t , e estão apresentadas na Figura 4a e 4b para quatro tipos de cobertura de céu (CN, CPNI, CPNII e CA). O índice de claridade K_t é um indicador geral dos processos de absorção e espalhamento por nuvens, aerossóis e vapor d'água, que intervêm na transmissão da G através da atmosfera por meio da relação $K_t = G/H_o$ na superfície terrestre. Na cobertura nebulosa (CN), $K_t < 0,35$, a radiação difusa representa 90,0% da global; na cobertura parcialmente nublado com dominância para difuso (CPNI), $0,35 < K_t < 0,55$, a radiação difusa representa 90,0% a 50,0% da global; na cobertura parcialmente nublado com dominância para claro (CPNII), $0,55 < K_t < 0,65$, a radiação

difusa representa de 50,0% a 15,0% da global, e na cobertura de céu aberto ou sem nuvens (CA), $K_t > 0,65$, a radiação difusa representa percentual abaixo de 15,0% da global (Escobedo *et al* 2009).

Na cobertura CN, a fração K_d^{ex} variou de 20,6% a 103,0% com média de 87,5%, enquanto que, K_d^{in} variou de 27,3% a 103,6% com valor médio de 88,1%. Em média, K_d^{in} foi praticamente igual a K_d^{ex} , pois houve um aumento da fração difusa interna de apenas 1,0% em relação à fração externa. Similarmente, a fração K_{pd}^{ex} variou de 22,7% a 1,06% com média de 89,7%, enquanto que a fração K_{pd}^{in} variou de 39,8% a 116,0% com média de 98,5%. A fração K_{pd}^{in} aumentou em 9,8% com relação a K_{pd}^{ex} .

Na CNPI, a fração K_d^{ex} variou de 18,0% a 92,4% com média de 52,8%, enquanto que a fração K_d^{in} variou de 31,5% a 96,6% com média de 63,2%. A fração K_d^{in} foi maior que a K_d^{ex} em 19,7%. A fração K_{pd}^{ex} variou de 22,3% a 104,4% com média de 59,2%, enquanto que K_{pd}^{in} variou de 42,7% a 123,1% com média de 74,8%. A fração K_{pd}^{in} aumentou em 26,3% em relação a K_{pd}^{ex} .

Para cobertura CNPII, a fração K_d^{ex} variou de 6,8% a 57,3% com média de 24,6%, enquanto que a fração K_d^{in} variou de 27,9% a 65,1% com média de 41,5%. A fração K_d^{in} foi superior à fração K_d^{ex} em 68,6%. A fração K_{pd}^{ex} variou de 11,6% a 69,0% com média de 31,4%, enquanto que a K_{pd}^{in} variou de 37,7% a 1,124% com média de 54,8%. A fração K_{pd}^{in} aumentou em 74,5% em relação a K_{pd}^{ex} .

Para cobertura CA, a fração K_d^{ex} variou de 8,0% a 33,3% com média de 17,8%, enquanto que a fração K_d^{in} variou de 24,0% a 45,8% com média de 34,7%. A fração K_d^{in} em relação a K_d^{ex} , aumentou em 97,7%. Similarmente, a fração K_{pd}^{ex} variou de 12,3% a 43,4% com média de 25,3%, enquanto a K_{pd}^{in} variou de 35,8% a 1,14% com média de 50,0%. A fração K_{pd}^{in} foi 100,0% maior que a K_{pd}^{ex} .

Os resultados mostram (Fig. 5) que nas quatro coberturas o valor médio da fração difusa do espectro PAR (K_{pd}^{in}) foi maior que o valor da fração difusa do espectro total K_d^{in} dentro da estufa, em relação às frações difusas K_d^{ex} e K_{pd}^{ex} do meio externo.

O aumento diferenciado entre as frações difusas dos espectros PAR (K_{pd}^{in}) e total (K_d^{in}) é devido ao processo de espalhamento não proporcional das radiações direta, PAR-direta, radiações difusa e PAR-difusa na cobertura de polietileno, que espalham mais as radiações de espectro PAR que as radiações do espectro total. Portanto, há um aumento nas mesmas proporções dos valores das frações difusa PAR (K_{pd}^{in}) e difusa do espectro total (K_d^{in}). O espalhamento não proporcional na cobertura de polietileno deve-se ao fato que comprimentos de onda curtos são preferencialmente extintos, e portanto a radiação PAR- difusa aumenta mais que a radiação difusa do espectro total (Alados e Arboledas 1999 e Jacovides *et al* 2007).

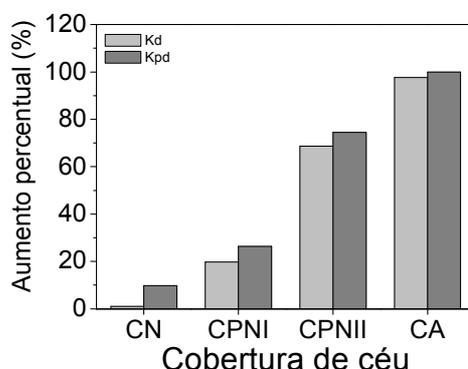


Figura 5: Aumento percentual das frações K_d^{in} e K_{pd}^{in} dentro da estufa em função das quatro coberturas de céu.

As correlações entre as frações difusas do espectro total (K_d^{in} x K_d^{ex}) e as frações difusas do espectro PAR (K_{pd}^{in} x K_{pd}^{ex}) mostradas nas Figuras 4a e 4b geraram por meio de regressão, as equações lineares do tipo $Y = a + bX$ com elevados coeficientes de determinação R^2 :

$$K_d^{in} = 0,197 + 0,808K_d^{ex} \quad \text{com} \quad R_d^2 = 0,9479 \quad (3)$$

$$K_{pd}^{in} = 0,284 + 0,773K_{pd}^{ex} \quad \text{com} \quad R_{pd}^2 = 0,8642 \quad (4)$$

Os valores dos coeficientes de determinação próximo de 100% mostram que a fração difusa do espectro total e a fração espectral PAR, no interior e exterior a estufa de polietileno, estão altamente correlacionadas estatisticamente. A análise das equações mostra que quando as frações K_d^{ex} e K_{pd}^{ex} tendem a 1, condições de céu nebuloso extremo, as frações K_d^{in} e K_{pd}^{in} tendem a 1, e as frações $K_d^{in} = K_d^{ex}$ e $K_{pd}^{in} = K_{pd}^{ex}$, e portanto, não há aumento da radiação difusa e PAR-difusa dentro da estufa. Na condição em que K_d^{ex} e K_{pd}^{ex} tendem a 0 (zero), condições de céu claro ao extremo, os valores de K_d^{in} e K_{pd}^{in} tendem aos valores do coeficiente linear das equações $a_d = 0,197$ e $a_{pd} = 0,284$ respectivamente. Os coeficientes representam a capacidade máxima que essa cobertura de polietileno pode aumentar os valores das frações K_d^{in} e K_{pd}^{in} dentro da estufa, que seriam de 197,0 % para K_d^{in} ou 1,97 vezes, e 284,0% para K_{pd}^{in} ou 2,84 vezes em relação a K_d^{ex} e K_{pd}^{ex} , respectivamente. Os

resultados obtidos para a radiação difusa do espectro total para condições de céu claro, estão em concordância com o intervalo de variação (1,5 a 2,4 vezes) apresentado por Farkas *et al* 2001.

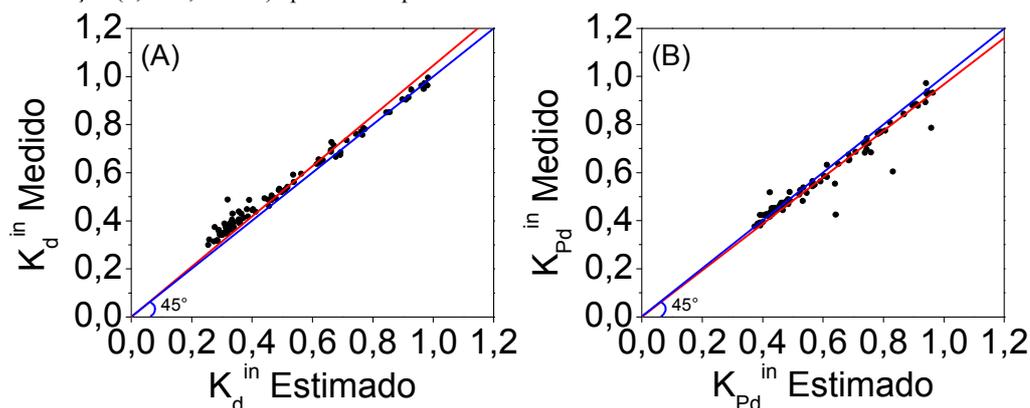


Figura 6: Comparação entre as frações K_d^{in} e K_{Pd}^{in} estimadas pelas equações (3) e (4) e as frações K_d^{in} e K_{Pd}^{in} obtidas por meio das medidas de (H_d^{in}/H_g^{in}) e $(Q_{Pd}^{in}/Q_{Pg}^{in})$.

As equações (3) e (4) foram validadas comparando-se os valores estimados com os valores mensurados de uma base de dados independente da utilizada para gerar os modelos. Os indicativos estatísticos utilizados para comparação foram MBE, RMSE e “d” de Willmott. A figura (6) mostra a comparação entre valores estimados e mensurados.

Para as frações K_d^{in} e K_{Pd}^{in} dentro da estufa, os baixos valores dos indicativos MBE, RMSE, e os elevados valores do “d” de Willmott, mostram que os resultados foram significativos estatisticamente: a estimativa da equação (3) subestima os valores medidos em -6,8% e a equação (4) superestima em 2,7%, com espalhamentos de 8,8% e 8,0 % e elevados níveis de ajustamentos $d_d=0,9871$ e $d_{Pd}=0,9814$ respectivamente.

Os resultados mostram que as equações(3) e (4) podem ser utilizadas nas estimativas das frações K_d^{in} e K_{Pd}^{in} a partir de K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} com precisão e exatidão, desde que sejam conhecidas as medidas externas das radiações difusa (H_d^{ex}) e global (H_g^{ex}) do espectro total e as radiações PAR-Difusa(Q_{Pd}^{ex}) e PAR-global(Q_{Pg}^{ex}) do espectro PAR.

CONCLUSÕES

A cobertura de polietileno aumenta a fração difusa da radiação global do espectro total e a fração PAR-difusa da radiação PAR-global dentro da estufa. A taxa de crescimento das duas frações dentro da estufa é dependente da cobertura de céu: as frações difusa total e PAR-difusa decrescem da cobertura de céu claro ou aberto, para parcialmente nublado e à nublado.

Nas quatro coberturas de céu descritas neste trabalho, os valores médios da fração K_{Pd}^{in} foram superiores aos valores das frações K_d^{in} em relação as frações K_d^{ex} e K_{Pd}^{ex} respectivamente: na cobertura céu nublado K_d^{in} foi 1,0% maior que K_d^{ex} , enquanto que, a fração K_{Pd}^{in} aumentou de 9,8% em relação a K_{Pd}^{ex} . Na cobertura de céu parcialmente nublado para difuso, a fração K_d^{in} foi maior que a K_d^{ex} em 19,7%, enquanto que, a fração K_{Pd}^{in} foi maior que K_{Pd}^{ex} em 26,3%. Na cobertura de céu parcialmente nublado para claro, a fração K_d^{in} foi maior que a fração K_d^{ex} em 68,6%, enquanto que, a fração K_{Pd}^{in} foi maior que K_{Pd}^{ex} em 74,5%. Para céu aberto, a fração K_d^{in} foi maior que K_d^{ex} em 97,7%, enquanto que a fração K_{Pd}^{in} foi maior que K_{Pd}^{ex} em 100,0%.

Existem correlações entre as frações difusas do espectro total ($K_d^{in} \times K_d^{ex}$) e as frações difusas da PAR ($K_{Pd}^{in} \times K_{Pd}^{ex}$) no interior e exterior da estufa de polietileno com elevados coeficientes de correlação. As correlações por meio de regressão linear geraram equações de estimativas $K_d^{in} = 0,18 + 0,83K_d^{ex}$ e $K_{Pd}^{in} = 0,25 + 0,76K_{Pd}^{ex}$ com coeficientes de determinação próximos a 100% ($R_d^2 = 0,9733$ e $R_{Pd}^2 = 0,9712$) e mostraram que as frações do espectro total (K_d^{in} e K_d^{ex}) e as frações do espectro PAR(K_{Pd}^{in} e K_{Pd}^{ex}) apresentam correlação estatística altamente significativa.

BIBLIOGRAFIA

- Alados, I., Alados-Arboledas, L. (1999). Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agric. and For. Meteorol.* 93, 27-38.
- Alados, I., Olmo, F.J., Foyo-Moreno, I., Alados-Arboledas, L. (2000). Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. *Agric. and For. Meteorol.* 102, 39-50.
- Codato, G.; Oliveira, A. P.; Soares, J. R.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Dal Pai, A. (2008). Global and Diffuse Solar Irradiances in Urban And Rural Areas In Southeast Of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 93, 57-73.
- Escobedo, J.F.; Galvani, E.; Oliveira, A.P.; Chaves, M.A. (2000). Models to estimate daily diffuse irradiation inside polyethylene greenhouse lined east-west and north-south. *In. World Renewable Energy Congress VI*, v. IV, 2481-2484.

- Escobedo, J.F.; Gomes, E.N.; Oliveira, A.P.; Soraes, 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* 86, 299-309.
- Frisina, V.A.; Escobedo, J.F.; Gomes, E.N. (2000). Instantaneous estimates of global, diffuse and reflected photosynthetically active radiation (PAR) inside a polyethylene greenhouse. *In*. World Renewable Energy Congress VI, v. IV, 2394-2397.
- Farkas I.; Weihs P.; Biró A.; Laube W.; Eitzinger J.; Wójcicki A. (2001). Modelling of radiative PAR transfer in a tunnel greenhouse. *Mathematics and Computers in Simulation* 56, 357-368.
- Iqbal, M. (1978). Estimation of the monthly average of the diffuse component of total insolation on a horizontal surface. *Solar Energy* 20, 101-105.
- Jacovides, C. P.; Tymvios, F. S.; Assimakopoulos, V. D.; Kaltsounides, N. A. (2007). The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agr. Forest. Meteorol.* 143, 277-287.
- Melo, J. M. D.; Escobedo, J. F. (1994). Uso do Anel de Sombreamento para Medida Contínua da Radiação Solar Difusa. *Energia na Agricultura* 9, 1-13.
- Oliveira, A.P.; Escobedo, J.F.; Machado, A.J.; Soares, J. (2002). Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy* 71, 59-73.
- Souza, J. L.; Escobedo, J. F. (1997). Balanço de Radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 32, 1, 1-15.
- Steidle Neto, A. J.; Zolnier, S.; Marouelli, W. A.; Carrijo, O. (2008). A Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12, 626-631.
- Weiss, A., Norman, J.M. (1985). Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. *Agric. and For. Meteorol*, 34, 205-213.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the correlations between diffuse (K_d^{in}) and diffuse PAR (K_{pd}^{in}) fractions of global and global-PAR radiation, respectively inside and outside a polyethylene greenhouse. A tunnel greenhouse model (7m wide x 20m long x 3.5 high) with polyethylene film (100 μ m thick) was used. The results showed that the increasing rate of the fractions inside the greenhouse (K_d^{in} e K_{pd}^{in}) is dependent on the sky cover: the increase of K_d^{in} and K_{pd}^{in} fractions is higher in clear sky, they decrease in partially cloudy sky, and they are almost the same in cloudy sky covers. The results also showed that the increase of the (K_{pd}^{in}) diffuse-PAR fraction is higher than the (K_d^{in}) diffuse fraction of the total spectrum: 9.0% in cloudy; 6.0% in partially cloudy and 2.2% in clear sky conditions.

Keywords: diffuse radiation, diffuse-PAR radiation, solar fraction and polyethylene greenhouse