

## **CORRELAÇÕES MÉDIAS MENSAIS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, DIFUSA E DIRETA DOS ESPECTROS TOTAL E PAR EM BOTUCATU/SP/BRASIL.**

**J. F. Escobedo<sup>1</sup>; N.P. Gaiad<sup>2</sup>; E. N. Gomes<sup>3</sup>; A. P. Oliveira<sup>4</sup> e J. Soares<sup>4</sup>.**

<sup>1</sup>Departamento de Recursos Naturais – FCA/UNESP – Botucatu/SP/Brasil

Tel. +55143811-7162 e-mail: [escobedo@fca.unesp.br](mailto:escobedo@fca.unesp.br)

<sup>3</sup>Unesp Campus Experimental de Registro/SP/Brasil

Tel. +55133828-3044 e-mail: [engomes@registro.unesp.br](mailto:engomes@registro.unesp.br)

<sup>4</sup>Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP/São Paulo/SP/Brasil

*Recibido: 03/08/12; Aceptado: 02/10/12*

**RESUMO:** No trabalho é apresentado os valores médios mensais das radiações solar global, direta e difusa do espectro total e das radiações PAR-global, PAR-direta e PAR-difusa do espectro PAR, calculados a partir de uma base de dados dessas radiações medidas num período de 15 meses em Botucatu /SP/Brasil. Determinou-se ainda os seguintes parâmetros: valores médios mensais da transmissividade atmosférica das radiações solar global, difusa e direta dos espectros total e PAR; valores médios mensais da fração PAR/global da radiação global, fração PAR-difusa da radiação difusa e fração PAR-direta da radiação direta; valores médio mensais das frações difusa e direta da radiação global e das frações Par-difusa e PAR-direta da radiação da PAR-global.

**Palavras-chave:** radiação solar, radiação fotossintética ativa, transmissividade atmosférica.

### **INTRODUÇÃO**

As radiações global ( $H_G$ ) e a PAR-global ( $H_{PG}$ ) podem ser representadas matematicamente pelas equações (1) e (2) :

$$H_G = H_d + H_D \quad (1)$$

$$H_{PG} = H_{pd} + H_{PD} \quad (2)$$

onde  $H_{pd}$  é a radiação PAR-difusa e  $H_{PD}$  é a radiação PAR-direta na horizontal. Dentre as três componentes, a  $H_{pg}$  é a mais conhecida, como mostrado nos trabalhos de Papaioannou et al. (1996), Alados & Alados-Arboledas (1999), entre muitos outros. As radiações  $H_d$ ,  $H_D$ ,  $H_{pd}$  e  $H_{PD}$  ainda são pouco estudadas se comparadas às radiações  $H_G$  e  $H_{pg}$ . Isso se deve muito provavelmente devido a restrições instrumentais. A medida de  $H_D$  e  $H_{PD}$  exige um mecanismo de rastreamento solar de alto custo e manutenção permanente, enquanto que a medida de  $H_d$  e  $H_{pd}$  é realizada por sombreamento pelo método do anel ou disco. O método do disco de sombreamento também exige um mecanismo de rastreamento solar, portanto há restrição nos custos e manutenção permanente. O método do anel de sombreamento é dependente de fatores de correção geométricos (largura e diâmetro) e geográficos (latitude) e não leva em conta os efeitos da cobertura de céu, como nuvens e a anisotropia da radiação difusa. Dentre os dois métodos de sombreamento, o método do anel é o mais utilizado como mostra trabalhos de Weiss & Norman (1985), Alados-Arboledas et al. (2000), Escobedo et al. (1994 e 2000), e Frisina et al. (2000) entre outros. Dada a importância atual das radiações fotossintéticas na produção agrícola e florestal em Botucatu, região de extrativismo de cana-de-açúcar, eucaliptos e produtos florestais, esse trabalho teve por objetivo medir as radiações global e difusa do espectro total e as radiações PAR-global e PAR-difusa do espectro PAR para calcular os valores e analisar a sazonalidade das radiações médias mensais do espectro total e PAR; das transmissividade atmosféricas médias mensais das radiações do espectro total e PAR; da fração PAR-global na global, fração PAR-difusa na difusa e fração PAR-direta na direta; os valores médio mensais das frações difusa e direta da radiação global e frações Par-difusa e PAR-direta da radiação da PAR-global.

### **DESCRIÇÃO DO CLIMA**

O clima local é classificado como Cwa (Cepagri, 2012), 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 evolução anual da temperatura e umidade relativa local segue a variação astronômica do sol (declinação solar); os valores da temperatura e umidade relativa são maiores quando o sol declina próximo da latitude local e menores quando declina no hemisfério norte mais distante da latitude local. Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2°C e 17,1°C, enquanto que 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

<sup>1</sup> Físico, Dr. Departamento de Ciências Ambientais - FCA – UNESP

<sup>2</sup> Graduanda, Engenharia Florestal, FCA – UNESP.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Agr<sup>o</sup>, Dr. Campus Experimental de Registro - UNESP

<sup>4</sup> Meteorologistas, PHD. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG - USP

insolação,  $n$  é o número de horas de brilho solar e  $N$  é o fotoperíodo (Iqbal, 1978). A evolução anual da nebulosidade, na grande maioria dos meses, segue as variações das séries climáticas da temperatura e umidade relativa. É mais elevada nos meses de janeiro ( $f=0,61$ ) e menor em agosto ( $f=0,27$ ). A exceção ocorre nos meses de maio e junho, nos quais a temperatura e umidade relativa decrescem, e a nebulosidade permanece constante em maio com relação a abril, e aumenta em junho comparado a maio. Essa singularidade existe por conta de entradas das frentes frias vindas do sul e sudeste do país, que arrastam grandes quantidades de massas de ar frio, para a região nordeste no outono, nos meses de abril e maio. Contrastando a 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.

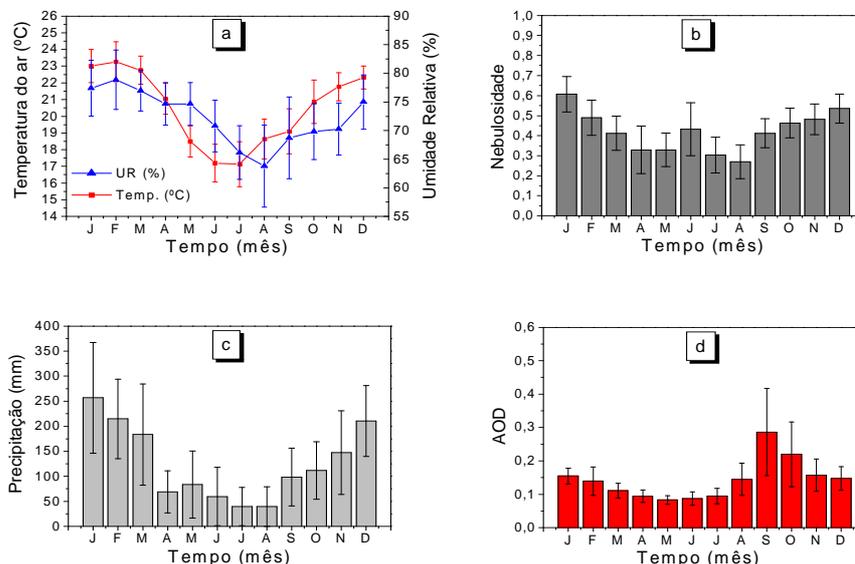


Figura 1: Séries climáticas da temperatura (a), umidade (a), nebulosidade (b), precipitação (c) do período de 1970 a 2000 em Botucatu, Profundidade Ótica de Aerossóis (d) do período de 2001 a 2004 em Botucatu.

A evolução anual da precipitação segue a evolução da nebulosidade. É constituída de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação de 100mm, aproximadamente. No período chuvoso, de outubro a março (estações primavera e verão) a precipitação é de natureza convectiva, originada do processo microclimático de convecção livre e macroclimático originado dos eventos meteorológicos de grande escala como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Atlântico Sul. No período seco, de abril a setembro (estações outono e inverno), a precipitação é do tipo frontal, originada do encontro das massas frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas, da região sudeste. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com média total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm.

A cidade de Botucatu com 100 mil habitantes não possui grandes indústrias poluidoras, mas está inserida em uma região rural de cultivo da cana-de-açúcar e produção de álcool. Nos meses do período da seca e início do período chuvoso, de julho a novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana-de-açúcar e das usinas que produzem o álcool e açúcar localizadas num raio de 100Km do centro da cidade. A evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 1998 a 2007, mostra que a partir do 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 a concentração  $PM_{10}$  de  $70,0\mu g.m^{-3}$  (Codato *et al.*, 2008). Nos meses de outubro a dezembro, com a entrada do período chuvoso, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, aos valores da ordem de  $AOD=0,16$  ou  $20,0\mu g.m^{-3}$ . Nos meses do ano seguinte, de janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir, no mês de maio, o menor nível de concentração  $PM_{10}$ , antes de iniciar o novo ciclo.

## MEDIDAS DAS RADIAÇÕES GLOBAL, DIFUSA, PAR-GLOBAL E PAR-DIFUSA

O experimento foi realizado no período de Junho de 1999 a dezembro 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).

A irradiância global  $I_G$  foi medida por meio de piranômetro Eppley PSP e Kipp-Zonen CM 3, enquanto que a irradiância PAR-global  $I_{Pg}$  por detectores quânticos da Li-Cor.

As irradiâncias difusas ( $I_d$  e  $I_{pd}$ ) foram monitoradas por meio de anéis de sombreamento MEO proposto por Melo & Escobedo, (1994) nas seguintes especificações: 80cm de diâmetro e 10cm de largura, usando os piranômetro Kipp-Zonen e Eppley PSP para a medida da irradiância  $I_d$  e um sensor quântico Li-Cor para a medida de  $I_{pd}$  (figura 2).

O anel de sombreamento MEO desenvolvido em Botucatu, é constituído de um anel fixo e inclinado na latitude local, orientado na direção polar. O método operacional do anel de sombreamento MEO é inverso do anel de sombreamento de Drummond, onde as variações na declinação solar são compensadas por meio da translação do piranômetro numa base móvel mantido sempre à sombra do anel. A parede interna do anel de sombreamento é pintada de preto fosca para minimização dos efeitos das reflexões internas. As reflexões causadas pelas paredes internas do anel podem aumentar a quantidade de radiação

difusa medida pelo sensor, propagando erros da ordem de até 20% para medidas em horários em torno do nascer e pôr-do-sol (LeBaron *et al.*, 1980).

Quando se utiliza o anel de sombreamento na medida da radiação difusa do espectro total ou da PAR-difusa é necessário correções para a parcela de radiação difusa ou da PAR-difusa obstruída pelo próprio anel, os quais dependem fortemente de vários parâmetros, tais como: geometria do anel (largura e diâmetro), latitude, declinação solar, elevação solar, turbidez e cobertura da atmosfera (Drummond, 1956; Kasten *et al.*, 1983; Dehne, 1984; Stanhill, 1985; Ineichen *et al.*, 1984).



Figura 2: Anéis de Sombreamento com sensor quântico Li-Cor e piranometro Eppley PSP medindo as irradiâncias PAR-difusa ( $I_{pd}^{ex}$ ) e difusa ( $I_d^{ex}$ ).

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, quando a distribuição espacial é considerada isotrópica, aqui denominada por correção isotrópica, foi determinado pela expressão:  $FC = [1 - (H'_d/H_d)]^{-1}$ , onde  $H_d$  é a irradiância difusa e  $H'_d$ , a irradiância 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):

$$H'_d / H_d = \left( \frac{2b}{\pi R} \right) \cos(\delta) \left[ \frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \int_0^{\omega_p} \cos(z) d\omega \quad (3)$$

onde  $b$  e  $R$  são a largura e raio do anel,  $\delta$  é a declinação solar,  $\phi$  é a latitude,  $z$  é o ângulo zenital e  $\omega$  é o ângulo horário do sol, variando do nascer até o pôr do sol.

As irradiâncias direta ( $I_D$ ) e PAR-direta ( $I_{PD}$ ) utilizada neste trabalho foram calculadas pelo método indireto, por meio das equações:  $I_D = I_G - I_d$  e  $I_{PD} = I_{PG} - I_{pd}$  ou seja, pela diferença entre a irradiância  $G$  e a irradiância difusa do espectro total, e entre a irradiância PAR-Global e a PAR-difusa do espectro PAR respectivamente, medidas na mesma frequência. O erro da estimativa das irradiâncias direta e PAR-direta está associado à imprecisão das medidas da radiação global e difusa pelos piranômetros da Eppley e à imprecisão das medidas da radiação PAR-global e PAR-difusa pelos detectores da LI-COR: o piranômetro PSP possui uma incerteza da ordem de 2,0%, enquanto que, os detectores da LI-COR de 5,0%. Assim a radiação a direta e PAR-direta que foi obtida por diferença por meio das equações:  $I_D = I_G - I_d$  e  $I_{PD} = I_{PG} - I_{pd}$  possui uma incerteza estimada de 7,0%.

Na literatura a radiação PAR é expressa na unidade de energia instantânea por irradiância ( $Wm^{-2}$ ) ou integrada por irradiação ( $MJ m^{-2}$ ) ou unidade fotobiológica como fóton ( $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ ). Aqui neste trabalho a PAR será expressa em  $MJ m^{-2}$  para irradiações diárias (McCree, 1972).

Na aquisição dos dados, utilizou-se um Datalogger Campbell 23X, operando na frequência de 1Hz e armazenando médias de 5 minutos. As leituras dos detectores quânticos Li-Cor, em mV, foram convertidas para  $W/m^2$  utilizando-se o valor de  $4,6 \mu mol s^{-1} W^{-1}$  (McCree, 1972)..A base de dados para a obtenção dos valores médios das três radiações em ( $MJ/m^2$ ) foram obtidas a partir da integração diária da irradiância ( $W/m^2$ ), no período de 15 meses.

## RESULTADOS

### RADIAÇÕES SOLAR GLOBAL, DIFUSA, DIRETA DO ESPECTRO TOTAL E PAR

A Figura 3(a) mostra os valores médios mensais da radiação total no topo da atmosfera ( $H_o$ ) e os valores médios mensais das radiações global ( $H_G$ ), difusa ( $H_d$ ) e direta ( $H_D$ ) do espectro total. Similarmente a figura(3b) mostra os valores médios mensais da radiação PAR no topo da atmosfera ( $H_{op}$ ) e os valores médios mensais das radiações PAR-global ( $H_{pg}$ ), PAR-difusa ( $H_{pd}$ ) e PAR-direta ( $H_{pd}$ ), na superfície terrestre em Botucatu. Para o cálculo da radiação fotossinteticamente ativa no topo da atmosfera ( $H_{op}$ ) foi utilizada a fração percentual de 38.8% da radiação total extraterrestre  $H_o = 1376 W/m^2$  (Alados-Arboledas *et al.*, 2000).

A variação sazonal observada nos valores das radiações  $H_G$ ,  $H_d$  e  $H_D$  do espectro total e das radiações  $H_{pg}$ ,  $H_{pd}$  e  $H_{pd}$  do espectro PAR, em  $MJ/m^2$  na Figura (3 a,b) é devido a variação astronômica solar (declinação solar) para a latitude local, e principalmente a variação do clima, por meio das variações da cobertura do céu, como nuvens, vapor d'água e aerossóis, na atmosfera local. Esses parâmetros meteorológicos atenuam as radiações por meio da absorção e espalhamento na atmosfera, reduzindo os valores das energias das radiações que atingem a superfície terrestre. É evidente que as radiações  $H_{pg}$ ,  $H_{pd}$  e

$H_{PD}$  são menores respectivamente que as radiações  $H_G$ ,  $H_d$  e  $H_D$  porque o espectro PAR representa um percentual do espectro total.

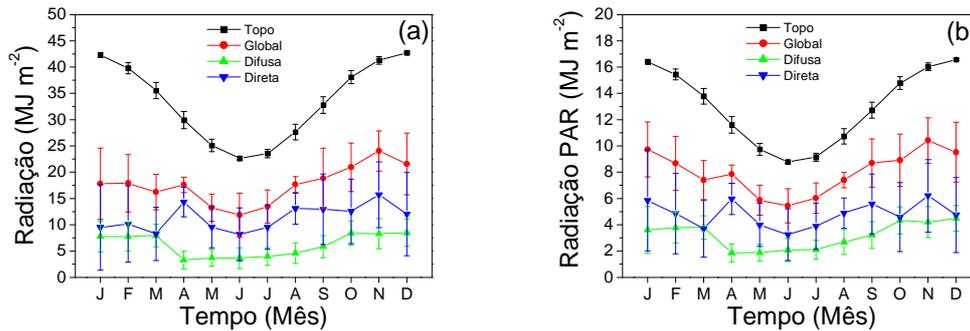


Figura 3: Radiações médias mensais: (a) No topo da atmosfera ( $H_o$ ), global ( $H_G$ ), difusa ( $H_d$ ) e direta ( $H_D$ ); (b) PAR no topo da atmosfera ( $H_{op}$ ), PAR-global ( $H_{pg}$ ), PAR-difusa ( $H_{pd}$ ) e PAR-direta ( $H_{pd}$ ).

Os valores das radiações  $H_G$  e  $H_D$  do espectro total e  $H_{PG}$  e  $H_{PD}$  do espectro PAR são maiores, enquanto que os valores das radiações  $H_d$  do espectro total e  $H_{pd}$  do espectro PAR são menores, quando a declinação solar é mais próxima da latitude local (sul) nas estações da primavera (meses de outubro, novembro e dezembro), e no verão (meses de outubro, novembro e dezembro), nas quais as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são mais elevadas no ano (figura 1). Por outro lado os valores das radiações  $H_G$  e  $H_D$  do espectro total,  $H_{PG}$  e  $H_{PD}$  do espectro PAR são menores, enquanto que os valores das radiações  $H_d$  do espectro total e  $H_{pd}$  do espectro PAR são maiores quando a declinação solar é mais distante da latitude local (norte) nas estações do inverno (meses de julho, agosto e setembro), e no outono (meses de março, abril e junho), nas quais as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são menos elevadas e a concentração de aerossóis é mais elevada no ano (figura 1). A radiação  $H_G$  variou de 24,0 MJ/m<sup>2</sup> (novembro) a 11,9 MJ/m<sup>2</sup> (junho); a  $H_{PG}$  de 10,4 MJ/m<sup>2</sup> (novembro) a 5,4 MJ/m<sup>2</sup> (junho); a  $H_D$  de 15,7 MJ/m<sup>2</sup> (novembro) a 8,2 MJ/m<sup>2</sup> (junho); a  $H_{PD}$  de 6,2 MJ/m<sup>2</sup> (novembro) a 3,25 MJ/m<sup>2</sup> (junho); a  $H_d$  de 8,31 MJ/m<sup>2</sup> (novembro) a 3,3 MJ/m<sup>2</sup> (abril) e a  $H_{pd}$  de 4,5 MJ/m<sup>2</sup> (dezembro) a 1,8 MJ/m<sup>2</sup> (abril).

### TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DAS RADIAÇÕES SOLAR GLOBAL, DIFUSA E DIRETA DO ESPECTRO TOTAL E PAR.

A Figura 4(a) mostra a evolução das frações  $K_t$  e  $K_{tp}$  média mensal para Botucatu: as razões  $K_t = H_G/H_o$  e  $K_{tp} = H_{pg}/H_{op}$  definem a transmissividade da radiação solar global e da radiação PAR-global, na atmosfera local, respectivamente. Os valores de  $K_t$  e  $K_{tp}$  são os indicadores gerais dos processos de absorção e espalhamento por nuvens, ar seco, vapor de água e aerossóis, que intervêm na transmissão das radiações global e PAR-global na atmosfera. Para o cálculo da transmissividade atmosférica da radiação fotossinteticamente ativa no topo da atmosfera ( $H_{op}$ ) foi utilizada a fração percentual de 38,8% da radiação total extraterrestre ( $H_o$ ) (Iqbal, 1983).

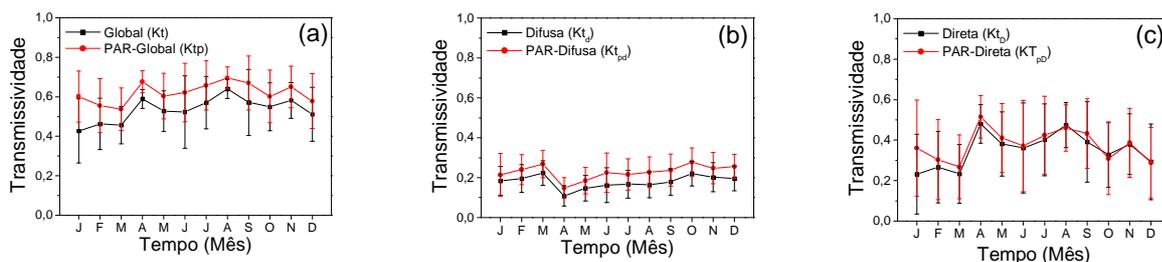


Figura 4: Evolução anual da transmissividade atmosférica média mensal das radiações: (a) global ( $K_t$ ) e PAR-global ( $K_{tp}$ ); (b) difusa ( $K_{td}$ ) e PAR-difusa ( $K_{tpd}$ ) e (c) direta ( $K_{td}$ ) e PAR-direta ( $K_{tpd}$ ).

Os valores de  $K_t$  e  $K_{tp}$  nas evoluções mostram uma tendência sazonal na transmissão da radiação global e PAR-global, que depende da condição da cobertura de céu, principalmente quanto à concentração de nuvens e vapor d'água de cada mês. Os valores de  $K_{tp}$  são mais elevados em todos os meses do ano em relação a  $K_t$ . As nuvens e vapor d'água são ótimos absorvedores da radiação infravermelha, portanto, os valores de  $H_G$  ou  $K_t$  decresceram mais que  $H_{pg}$  ou  $K_{tp}$ . Os menores valores de  $K_t$  e  $K_{tp}$  ocorreram no período chuvoso, meses de outubro a março, no qual as concentrações de nuvens e vapor d'água são mais acentuadas no ano, enquanto que os maiores valores ocorreram no período seco, meses de abril a setembro, no qual a concentração de nuvens e vapor d'água são as mais baixas do ano e a concentração de aerossóis é mais elevada. No geral,  $K_t$  variou entre 42,7% e 64,0%, com média anual de 53,4%, enquanto que,  $K_{tp}$  variou de 53,7% a 69,5%, com média de 62,0%. A transmissividade na faixa espectral PAR ( $K_{tp}$ ) média foi de 8,6% superior à transmissão da global ( $K_t$ ). A diferença entre os dois índices é devido à presença do vapor d'água na atmosfera que absorve de maneira não

proporcional as radiações, global e PAR-global. O vapor d'água na atmosfera absorve mais a radiação global que a radiação PAR na faixa espectral da PAR, devido à absorção na faixa do infravermelho.

A Figura 4(b) mostra a transmissividade das radiações difusa ( $K_{td}$ ) e PAR-difusa ( $K_{t_{pd}}$ ) calculada pelas razões  $K_{td} = H_d/H_o$  e  $K_{t_{pd}} = H_{pd}/H_{op}$ , as quais representam as frações das radiações difusa e PAR-difusa que atingiram a superfície terrestre, em relação às radiações total e PAR no topo da atmosfera. As radiações difusa e PAR-difusa que atingiram a superfície terrestre são provenientes de espalhamentos Rayleigh, para partículas de tamanho pequeno comparado ao tamanho do comprimento de onda, causado principalmente pela interação com os gases de oxigênio e nitrogênio e ocorreram para situações de atmosfera limpa e livre de poluição. Esse espalhamento é conhecido como espalhamento isotrópico, pois a radiação é espalhada uniformemente tanto no sentido atmosfera-solo como no sentido atmosfera-espaço. O espalhamento de Mie, para partículas do tamanho do comprimento de onda, por gases e partículas suspensas na atmosfera e das multi-reflexões que ocorrem na atmosfera, causado por aerossóis e vapor d'água, ocorrendo portanto para situações de atmosferas poluídas e túrbidas. O espalhamento causado por partículas maiores deixa de ser uniforme, havendo um maior fluxo radiativo no sentido atmosfera-solo do que atmosfera-espaço.

A exemplo da transmissividade de  $K_t$  e  $K_{tp}$ , os valores de  $K_{t_{pd}}$  foram mais elevados em todos os meses do ano que  $K_{td}$ . É conhecido que os comprimentos de onda curtos são preferencialmente extintos no processo de espalhamento na atmosfera. Assim, o espalhamento aumentou mais a radiação PAR-difusa que a radiação difusa do espectro total, elevando a fração  $K_{t_{pd}}$  mais que  $K_{td}$ . A transmissividade das radiações difusa ( $K_{td}$ ) e PAR-difusa ( $K_{t_{pd}}$ ) também apresentaram variações sazonais ao longo do ano, e no geral, foram pouco mais elevados nos meses mais nebulosos e úmidos (outubro a março), que nos meses mais claros, secos e com aerossóis (abril a setembro).

Os maiores valores da transmissividade das radiações difusa e PAR-difusa foram  $K_{td} = 22,4\%$  no mês de março e  $K_{t_{pd}} = 27,8\%$  no mês de outubro, período de atmosfera com elevadas concentrações de vapor d'água e nuvens. Os menores valores da transmissividade das radiações difusa e PAR-difusa foram  $K_{td} = 10,9\%$  e  $K_{t_{pd}} = 14,8\%$ , ambas em abril, período de céu parcialmente claro, parcialmente seco e sem aerossóis. No geral, os valores médios da transmissividade atmosférica das radiações difusa e PAR-difusa foram  $K_{td} = 17,9\%$  e  $K_{t_{pd}} = 22,8\%$ , respectivamente.

A Figura 4(c) mostra a transmissividade das radiações direta ( $K_{t_D}$ ) e PAR-direta ( $K_{t_{pD}}$ ) calculados pelas razões  $K_{t_D} = H_D/H_o$  e  $K_{t_{pD}} = H_{pD}/H_{op}$ , as quais representam as frações das radiações direta e PAR-direta que atingiram a superfície terrestre, em relação as radiações total ( $H_o$ ) e PAR no topo da atmosfera ( $H_{op}$ ).

Os valores de  $K_{t_{pD}}$  foram mais elevados em todos os meses do ano que  $K_{t_D}$ , a exceção nos meses de outubro e dezembro, em que as frações  $K_{t_{pD}}$  e  $K_{t_D}$  foram iguais. A transmissividade das radiações direta ( $K_{t_D}$ ) e PAR-direta ( $K_{t_{pD}}$ ) também apresentou variações sazonais ao longo do ano e, no geral, foram pouco mais elevados nos meses (abril a setembro) sem nuvens, secos e com aerossóis. Os maiores valores da transmissividade das radiações direta e PAR-direta  $K_{t_D} = 47,2\%$  e  $K_{t_{pD}} = 46,0\%$ , ambas em agosto, mês que apresenta atmosfera sem nuvens, seca e com aerossóis. Os menores valores das transmissividade das radiações direta e PAR-direta foram  $K_{t_D} = 23,2\%$  no mês de janeiro e  $K_{t_{pD}} = 26,8\%$  no mês de março, período de céu nebuloso e úmido. No geral, os valores médios da transmissividade atmosférica das radiações direta e PAR-direta foram  $K_{t_D} = 35,2\%$  e  $K_{t_{pD}} = 37,7\%$ , respectivamente.

#### FRAÇÕES PAR-GLOBAL, PAR-DIFUSA E PAR-DIRETA RESPECTIVAMENTE DAS RADIAÇÕES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA.

A Figura 5 mostra a evolução anual das frações PAR-global ( $K_{pG} = H_{pG}/H_G$ ), PAR-difusa ( $K_{pd} = H_{pd}/H_d$ ) e PAR-direta ( $K_{pD} = H_{pD}/H_D$ ). A normalização das radiações do espectro PAR pelas radiações do espectro total, tornou as frações  $K_{pG}$ ,  $K_{pd}$  e  $K_{pD}$  adimensionais e eliminou a dependência do dia e local, respectivamente. Assim, as variações sazonais ao longo do ano das frações  $K_{pG}$ ,  $K_{pd}$  e  $K_{pD}$  mostradas na Figura 4 são resultante das variações da nebulosidade, vapor d'água e aerossóis, na atmosfera local.

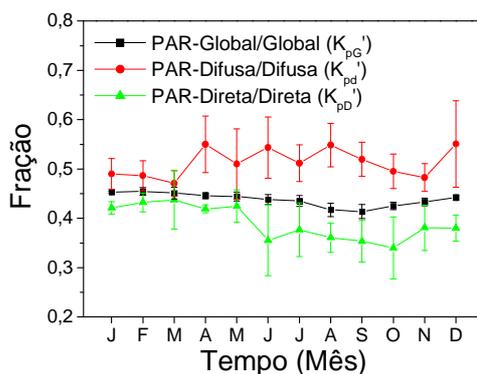


Figura 5: Evolução anual das frações PAR-global ( $K_{pG}$ ), PAR-difusa ( $K_{pd}$ ) e PAR-direta ( $K_{pD}$ )

Os valores de  $K_{pG}$ ,  $K_{pd}$  e  $K_{pD}$  mostram uma evidente tendência sazonal devido a atenuação por absorção e espalhamento das radiações dos espectros total e PAR na atmosfera, dependendo da concentração de nuvens, vapor d'água e aerossóis de cada mês. O valor da fração  $K_{pG}$  decresceu no mesmo sentido do decréscimo das concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, nos períodos mensais de janeiro a setembro, e de dezembro a setembro. O valor da fração  $K_{pG} = H_{pG}/H_G$  é maior no período úmido devido a absorção não proporcional das radiações  $H_G$  e  $H_{pG}$  pelo vapor de água: a  $H_G$  é absorvida mais rapidamente que a  $H_{pG}$  aumentando o valor da fração  $K_{pG}$  (Papaioannou, 1996). O valor de  $K_{pG}$  variou de 41,3% nos

mais seco em setembro, a 45,30% no mes com maior concentrações de vapor de agua e nuvens em janeiro. A média anual obtida para  $K_{PG}$  foi de 43,8%.

O valor da fração  $K_{Pd}$  foi maior do periodo seco nos meses abril , maio, junho, julho, agosto e setembro, nos quais são baixas as concentrações de nuvens, vapor de água e alta concentrações de ar seco e aerossóis. O aumento diferenciado da fração ( $K_{Pd} = H_{Pd}/H_d$ ) no periodo seco é devido ao processo de espalhamento não proporcional das radiações difusa  $H_d$  e  $H_{Pd}$  na cobertura atmosférica com alta concentrações de ar seco e aerossóis que espalham mais a radiação difusa de espectro PAR que a radiação do espectro total. Portanto, há um aumento nas mesmas proporções dos valores de  $K_{Pd}$ . O espalhamento não proporcional na cobertura atmosférica com alta concentrações de ar seco e aerossóis 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). A fração  $K_{Pd}$  variou entre 49,0% em janeiro, mês mais seco, a 45,30% em janeiro, mês mais úmido e nebuloso. A média anual obtida para  $K_{Pd}$  foi de 51,3%. Similarmente a evolução de  $K_{PG}$ , a fração  $K_{PD}$  no geral também decresceu no sentido do decréscimo das concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, nos periodo mensais de janeiro a outubro, e de dezembro a outubro. A fração  $K_{PD}$  variou entre 34,0% em outubro, mês úmido com aerossóis, a 43,7% em março, mês úmido e nebuloso. A média anual obtida para  $K_{PD}$  foi de 39,0%.

### FRAÇÃO DIFUSA E DIRETA DA RADIAÇÃO GLOBAL, E FRAÇÃO PAR-DIFUSA E PAR-DIRETA DA RADIAÇÃO DA PAR-GLOBAL.

A figura 6(a) mostra a evolução anual das frações  $K_d$  e  $K_{pd}$  média mensal para Botucatu. As razões  $K_d = H_d/H_G$  e  $K_{pd} = H_{pd}/H_{PG}$  definem a fração da radiação difusa da radiação global e a fração PAR-difusa da PAR-global. A evolução anual das frações  $K_d$  e  $K_{pd}$  mostram que as variações sazonais dependem das condições de cobertura de céu características de cada mês do ano. No geral, as frações  $K_d$  e  $K_{pd}$  foram maiores no periodo úmido, nos meses de janeiro a março, e de outubro a dezembro, onde são maiores as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, e são menores no periodo seco, nos meses de abril a setembro, onde são maiores as concentrações de ar seco e aerossóis, e são menores as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera. As exceções ocorreram nos meses de junho e novembro em que os valores das frações  $K_d$  e  $K_{pd}$  foram pouco acima e abaixo dos outros meses do periodo seco e úmido, respectivamente. É provável que no mês de junho houve um aumento da nebulosidade devido a entrada das frentes frias (figura 1), enquanto que no mês de novembro ocorreu uma diminuição da nebulosidade atípica, possivelmente devido a não entrada de frentes úmidas vindas do oceano atlântico ou não entrada do evento macroclimático Zona de Convergência do Atlântico Sul que trazem aumento da nebulosidade e precipitação na atmosfera local.

Os valores de  $K_{pd}$  foram mais elevados que  $K_d$  em quase todos os meses do ano, a exceção ocorreu em janeiro e fevereiro. As nuvens espalham mais  $H_{PG}$  que  $H_G$  aumentando conseqüentemente, mais a fração  $K_{pd}$  que  $K_d$ . A fração  $K_d$  variou entre 19,4% em abril a 53,0% em março, com média anual de 40,0%, enquanto que a fração  $K_{pd}$  variou de 24,6 em abril % a 53,7% em março, com média de 43,1%. A fração  $K_{pd}$  foi aproximadamente 3,0% superior a fração  $K_d$ .

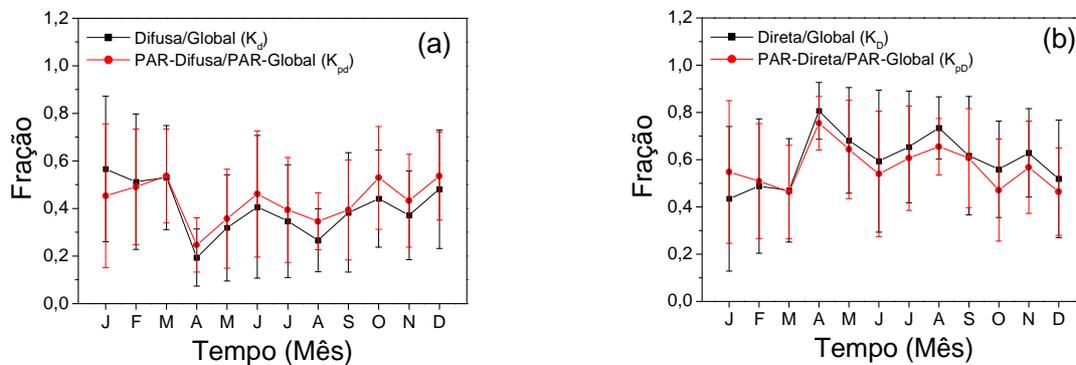


Figura 6: Evolução anual das frações: a) difusa ( $K_d$ ) e PAR-difusa ( $K_{pd}$ ); b) direta ( $K_D$ ) e PAR-direta ( $K_{PD}$ ).

A figura 6(b) mostra a evolução das frações  $K_D$  e  $K_{PD}$  média mensal para Botucatu. As razões  $K_D = H_D/H_G$  e  $K_{PD} = H_{PD}/H_{PG}$  definem as frações das radiações direta e PAR-direta nas radiações global e PAR-global, do espectro total e espectro PAR, respectivamente. Similarmente a evolução das frações  $K_D$  e  $K_{PD}$  média mensal mostram variações sazonais e depende das condições climáticas de cada mês do ano. As frações  $K_D$  e  $K_{PD}$  foram em média maiores no periodo úmido e menores no periodo seco. No geral, as frações  $K_D$  e  $K_{PD}$  foram menores no periodo úmido, nos meses de janeiro a março, e de outubro a dezembro, onde são maiores as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, e foram maiores no periodo seco, nos meses de abril a setembro, onde são maiores as concentrações de ar seco e aerossóis, e são menores as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera. A evolução anual  $K_D$  e  $K_{PD}$  é inversa a evolução anual de  $K_d$  e  $K_{pd}$  onde os valores de  $K_D$  são mais elevados em quase todos os meses do ano em relação a  $K_{PD}$ , a exceção ocorreu em janeiro e fevereiro. As nuvens absorvem mais  $H_G$  que  $H_{PG}$  aumentando conseqüentemente, mais a fração  $K_D$  que  $K_{PD}$ . No geral, a fração  $K_D$  variou entre 43,4% em janeiro a 73,4% em agosto, com média anual de 60,0%, enquanto que, a fração  $K_{PD}$  variou de 46,3% em março % a 65,4% em agosto, com média de 56,9%. A fração  $K_D$  foi aproximadamente 3,0% superior a fração  $K_{PD}$ .

## CONCLUSÕES

A global variou de 24,0 MJ/m<sup>2</sup> a 11,9 MJ/m<sup>2</sup> a PAR-global de 10,4 MJ/m<sup>2</sup> a 5,4 MJ/m<sup>2</sup>, a direta de 15,7 MJ/m<sup>2</sup> a 8,2 MJ/m<sup>2</sup>, a PAR-direta de 6,2 MJ/m<sup>2</sup> a 3,25 MJ/m<sup>2</sup>, a difusa de 8,31 MJ/m<sup>2</sup> a 3,3MJ/m<sup>2</sup> e a PAR-difusa de 4,5MJ/m<sup>2</sup> a 1,8 MJ/m<sup>2</sup>. A transmissividade atmosférica média anual das radiações global e PAR-global foram  $K_t = 53,4\%$  e  $K_{tp} = 62,0\%$ , das radiações difusa e PAR-difusa foram  $K_{td} = 17,9\%$  e  $K_{tpd} = 22,8\%$  e das radiações direta e PAR-direta foram  $K_{tD} = 35,2\%$  e  $K_{tpD} = 37,7\%$ , respectivamente. A fração PAR-global da radiação global média anual foi de 43,8%, a fração PAR-difusa da radiação difusa foi de 51,3% e a fração PAR-direta da radiação direta foi de 39,0%. As frações difusa e direta da radiação global média anual foram  $K_d = 40,0\%$  e  $K_D = 60,0\%$ , enquanto que as frações PAR=difusa e PAR-direta foram  $K_{pd} = 43,1\%$  e  $K_{pD} = 56,9\%$ . Os resultados numéricos apresentados mostram as relações as componentes da PAR em relação ao espectro total. Os valores das frações conhecidos possibilitam a estimativa das radiação fotossinteticamente ativa (PAR), que normalmente não são monitorados nas estações meteorológicas, através das componentes do espectro total, que são mais usualmente monitorada nas redes meteorológicas. Este processo resulta em uma grande economia de custos de aquisição e manutenção de equipamentos importados que ainda apresentam custos elevados.

## Agradecimentos à FAPESP, CNPQ.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alados, I., Alados-Arboledas, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agric. and For. Meteorol.*, v.93, p.27-38, 1999.
- Alados-Arboledas, L., Olmo, F.J., Alados, I., Pérez, I. Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain *Agric. and For. Meteorol.*, v.101, p.187-201, 2000.
- Battles, F. J., Olmo, F. J., Alados-Arboledas, L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, v.54, n.2, pp.105-114. 1995.
- CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_086.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html), acesso em 14/09/2012.
- Codato, G. Oliveira A. P. Soares J. Escobedo, J. F. Gomes, E. N. Dal Pai, A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil, *Theoretical and Applied Climatology*, v.93 pag. 57-73, 2008.
- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F. Série temporal diária média horária e anual média mensal diária da irradiação solar difusa anisotrópica. *Energia na Agricultura*, v. 21, p. 1-15, 2006.
- Dehne, K. 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. 263-7. 1984.
- Drummond, A. J. On the measurements of sky radiation. *Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie*, v.7, pp.413-436. 1956.
- Escobedo, J.F., Galvani, E., Oliveira, A.P., Chaves, M.A. Models to estimate daily diffuse irradiation inside polyethylene greenhouse lined east-west and north-south. *World Renewable Energy Congress VI*, v. IV, p. 2481-2484, 2000.
- Escobedo, J.F., Melo, J.M.D., Frisina, V.A. Radiações solar global e fração da global refletida em estufa tipo túnel em cobertura de polietileno. In: *Congresso Ibérico De Energia Solar*, 7, 1994. *Energias Limpas em Progreso*. Vigo, 1994. v.1, p.53-58.
- Frisina, V.A., Escobedo, J.F., Gomes, E.N. Instantaneous estimates of global, diffuse and reflected photosynthetically active radiation (PAR) inside a polyethylene greenhouse. *World Renewable Energy Congress VI*, v. IV, p. 2394-2397, 2000.
- Grant, R. H. Shadow-band corrections for photosynthetically-active radiation under clear and overcast conditions, *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol 87, pp. 213-222. 1997.
- Gueymard, C. A. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, vol. 71, n. 5, pp. 325-346. 2001.
- Horowitz, J.L. An easily constructed shadow-band for separating direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy*, v.12, p. 543-545, 1969.
- Ineichen, P., Gremaud, J. M., Guisan, O., Mermoud, A. Study of the corrective factor involved when measuring the diffuse solar radiation by use of the ring method. *Solar Energy*, vol. 32, n. 5, pp. 585-590. 1984.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 390p., 1983.
- Iqbal, M. Estimation of the monthly average of the diffuse component of total insolation on a horizontal surface. *Solar Energy*, v. 20, p. 101-105. 1978.
- Kasten, F., Dehne, K., Bretschneider, W. Improvement of measurement of diffuse solar radiation. *Solar radiation data*, série F, n.2, pp.221-225, D. Redel, Dordrecht. 1983.
- LeBaron, B. A., Peterson, W. A., Dirmhirn, I. Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. *Solar Energy*, vol. 25, pp. 1-13. 1980.
- McCree, K.J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, v.10, p.443-53, 1972.
- Papaioannou, G., Nikolidakis, G., Asimakopoulos, D., Retalis, D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agric. and For. Meteorol*, v.81, p. 287-98, 1996.
- Pollard, D. G. E Langevine, L. P. An anisotropic correction for diffuse irradiance measurements in Guyana. In: *Proceeding of the 1988 Annual Meeting*, M. J. Coleman (Ed.), pp. 238-243, ASES Cambridge. 1988.
- Robinson, N., Stock, L. Sky radiation measurement and correction. *Journal of Applied Meteorology*, v.3, p.179-181, 1964.
- Stanhill, G. Observations of shading correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol.111, pp.1125-30. 1985.
- Weiss, A., Norman, J.M. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. *Agric. and For. Meteorol*, v.34, p.205-13, 1985.

**MONTHLY MEAN CORRELATIONS OF GLOBAL, DIFFUSE AND DIRECT SOLAR RADIATIONS OF THE TOTAL AND PAR SPECTRA IN BOTUCATU/SP/BRAZIL.**

**SUMMARY:** Monthly mean values of global, direct and diffuse solar radiations of the total spectrum and PAR-global, PAR-direct and PAR-diffuse radiations of the PAR spectrum were determined from a data base of these radiations measured in a period of 15 months in Botucatu/SP/Brazil. The following parameters were also determined: monthly mean values of atmospheric transmissivity of global, diffuse and direct solar radiations of the total and PAR spectra; monthly mean values of the PAR/global fraction of global radiation, PAR-diffuse fraction of diffuse radiation and PAR-direct fraction of the direct radiation; monthly mean values of diffuse and direct fractions of global radiation and PAR-diffuse and PAR-direct fractions of PAR-global radiation.

**Key-words:** solar radiation, Photosynthetically Active Radiation, atmospheric transmissivity.