

EFEITO DE NUVENS, VAPOR DE AGUA E AEROSSÓIS NAS FRAÇÕES SOLARES UV, PAR E IV DA RADIAÇÃO G EM BOTUCATU/SP/BRASIL.**J. F. Escobedo¹; E. N. Gomes²; D. Martins, A. P. Oliveira³, J. Soares⁴, G. Codato**¹Departamento de Recursos Naturais – FCA/UNESP – Botucatu/SP/BrasilTel. +55143811-7162 e-mail: escobedo@fca.unesp.br²Unesp Campus Experimental de Registro/SP/BrasilTel. +55133828-3044 e-mail: engomes@registro.unesp.br^{3,4,5}Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP/São Paulo/SP/Brasil*Recibido: 03/08/12; Aceptado: 01/10/12*

RESUMO: No trabalho é apresentada uma análise dos efeitos da nebulosidade, conteúdo de vapor d'água e de aerossol nos valores das frações UV, PAR e IV da radiação G para uma base de dados medida no período de 2001 a 2005, em Botucatu, São Paulo/Brasil. A variação sazonal mostrou que as amplitudes das frações UV/G e PAR/G são maiores do que a da fração IV/G. Os maiores valores de UV/G e PAR/G ocorrem no período mais chuvoso (outubro a março), quando a frequência de nuvens e a concentração de vapor d'água na atmosfera são maiores. Por outro lado, os maiores valores de IV/G ocorrem no período mais seco (abril a setembro), quando a frequência de nuvens e a concentração do vapor d'água são menores e a concentração de aerossóis é maior no ano.

Palavras-chave: Frações Solares, Radiações Ultravioleta, Fotossinteticamente Ativa, Infravermelha e Global.

INTRODUÇÃO

A fração UV da radiação solar global G, tem sido investigada por meio de observações experimentais em muitos países, como mostram os trabalhos de Al-Aruri et al. (1988); Robaa (2004); Cañada et al. (2003); Martínez-Lozano et al. (1994 e 1999); Jacovides et al. (2006); Ogunjobi e Kim (2004) e Escobedo et al. (2009 e 2011). Os resultados mostram que a correlação entre as radiações UV e G para agrupamentos das radiações anual, sazonal ou por cobertura de céu, é altamente dependente das condições do clima. A radiação UV total constitui uma fração média aproximada entre 2.0 % a 9.5% da radiação solar global G, onde os menores valores da fração UV/G são obtidos nas condições de cobertura de céu claro, com ar seco e aerossóis na atmosfera, enquanto que os maiores valores das frações UV/G são obtidos em atmosfera nebulosa e úmida.

O efeito da cobertura de céu na relação entre as radiações PAR e G, também para agrupamentos anuais, sazonais ou por cobertura de céu, já foi estudado em muitos locais e com diferentes climas, como mostram os trabalhos de Jacovides et al. (2004 e 2007) para Athalassa em Cyprus e Athenas na Grécia, respectivamente; Finch et al. (2004) para Lusaka na Zâmbia; Blackburn e Proctor (1983) em Guelph Ontário Canadá; Rao (1984) para Corvallis em Oregon no Estados Unidos; de Papaioannou et al. (1996) para Athenas na Grécia; Stigter e Musabilha (1982) em Llorim na Nigéria, e Escobedo et al. (2009 e 2011) em Botucatu no Brasil. Os resultados mostram que a correlação entre as radiações PAR e G, também dependem das condições do clima local e mostram que a fração PAR representa um percentual entre 40,8% a 63,1% da radiação solar global G. Similarmente a variação UV/G na atmosfera, os menores valores da fração PAR/G são obtidos em atmosfera clara, seca com presença de aerossóis, enquanto os maiores valores, em atmosfera nebulosa e úmida.

Com as radiações G e IV, existem poucas informações sobre observações experimentais simultâneas das duas radiações na superfície terrestre. Resultados recentes mostram que a radiação IV depende das condições de cobertura de céu, principalmente da presença de vapor d'água na atmosfera, e constitui uma fração média da radiação global G entre 44,0% na cobertura de céu nublado a 51,5% na cobertura de céu aberto (Escobedo et al., 2009). Para valores médios sobre todas as coberturas de céu, a fração IV constitui o percentual entre 46,9% a 51,0% da radiação global, como mostram os trabalhos de Escobedo et al. (2011) para Botucatu no Brasil; Zhang (2000) em Lhasa na China e Bolsenga (1997) em Thule na Groenlândia.

A região de Botucatu é de extrativismo da cana-de-açúcar e eucalipto, e anualmente no período das chuvas, além das chuvas convectivas locais, recebe as oscilações na presença de nuvens e de chuvas devido ao evento meteorológico da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Nos meses do período da seca, há baixa nebulosidade e chuvas, geralmente são de pequena intensidade, e são associadas à passagem de sistemas frontais originadas na região polar. A atmosfera no período da seca, meses de agosto a novembro, apresenta elevada concentração de materiais particulados proveniente das queimadas da cana-de-açúcar e das usinas que produzem o álcool e açúcar.

Dada a importância dos efeitos dos aerossóis nos valores das frações solares UV/G, PAR/G e IV/G, não só para as áreas Agrônomicas e Florestais, como também para a área Ambiental e de Saúde, este trabalho descreve uma análise climática dos valores das frações solares UV/G, PAR/G e IV/G, horária e diária, em função dos efeitos sazonais de nuvens, vapor d'água e aerossóis, para uma base de dados das radiações G, UV, PAR e IV medida no período de 2001 a 2005 em Botucatu.

¹ Físico, Dr. Departamento de Ciências Ambientais - FCA - UNESP

² Eng^o Agr^o, Dr. Campus Experimental de Registro - UNESP

³ Meteorologistas, PHD. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG - USP

MATERIAL E MÉTODOS

Clima

As medidas foram realizadas no período de 2001 a 2005 na Estação de Radiometria Solar de Botucatu, UNESP-FCA, Botucatu-SP, com coordenadas geográficas: latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m. O clima local é temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno. O dia mais longo do ano (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 média mensal segue as variações astronômicas do sol. Os meses de fevereiro e julho são os meses 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 afeta diretamente a radiação solar e é definida pela equação $f = 1 - n/N$ e expressa o número de horas que o sol ficou encoberto numa razão de insolação n/N , onde n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo. A evolução temporal da nebulosidade é proporcional às evoluções da temperatura e umidade relativa, na grande maioria dos meses. A nebulosidade é mais elevada nos meses de janeiro ($f=0,61$) e menos elevada em agosto ($f=0,27$). Contrastando com a nebulosidade, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229,0h e 175,28h respectivamente.

A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm. O ciclo da precipitação é constituído de períodos bem distintos, de acordo com o regime de chuvas: o período chuvoso (outubro a março) e o período seco (abril a setembro), onde os índices pluviométricos encontram-se abaixo do nível de 100mm.

A evolução anual das médias mensais diárias da AOD500 (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 2000 a 2005, mostra que 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 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Codato et al. 2008).

Instrumentação

A irradiância global (I_G) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSP, a irradiância ultravioleta (I_{UV}) por um radiômetro CUV-3 da Kipp-Zonen e a irradiância infravermelha (I_{IV}) por um piranômetro Eppley PSP com cúpula seletiva de transmissão na faixa espectral de 0,7 a 3,0 μm . Por sugestão do fabricante, o fator de calibração do piranômetro IV é multiplicado por um fator de 0,92 para corrigir o efeito da transmissão da cúpula no elemento sensível do sensor.

A irradiância PAR (I_{PAR}) utilizada neste trabalho foi gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância I_G e a soma das irradiâncias I_{UV} e I_{IV} medidas na mesma frequência, por meio da equação: $I_{PAR} = I_G - (I_{UV} + I_{IV})$. Em muitos trabalhos na literatura a irradiância PAR é expressa em termos da densidade de fluxo de fótons ($\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ou $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) absorvido entre 0.400 e 0.700 μm . Aqui a PAR será expressa em Wm^{-2} para irradiância e MJ m^{-2} para irradiações horárias e diárias.

Na aquisição dos dados é utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias de 300 leituras ou 5 minutos. O erro da estimativa da radiação PAR está associado à imprecisão das medidas da radiação global e infravermelha pelos piranômetros da Eppley e do radiômetro UV da Kipp & Zonen: o piranômetro PSP possui uma incerteza da ordem de 1,5% a 2,0%, enquanto que, o radiômetro UV da Kipp & Zonen de 6,0%. Assim a radiação PAR que foi obtida por diferença por meio da equação: $I_{PAR} = I_G - (I_{UV} + I_{IV})$ possui uma incerteza estimada de 10,0%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Evolução anual das frações UV/G, PAR/G e IV/G.

A Figura 1 mostra a evolução temporal das frações, horária e diária, UV/G, PAR/G e IV/G para os anos de 2001 a 2003 do período total. A normalização das radiações espectrais pela radiação G tornou as frações UV/G, PAR/G e IV/G adimensionais e eliminou a dependência do dia e local, respectivamente. Assim, as variações sazonais ao longo do ano das frações UV/G, PAR/G e IV/G mostradas na Figura 1 são resultante das variações da cobertura de céu devido às variações da nebulosidade, vapor d'água e aerossóis, na atmosfera local.

Para melhor visualização das variações das frações UV/G, PAR/G e IV/G em função dos efeitos de nuvens e vapor d'água na atmosfera individualmente, as frações foram separadas em função de Kt e estão apresentadas em cores diferentes para quatro tipos de cobertura de céu (I, II, III e IV), onde a cobertura I - representa céu nebuloso (CN) com $Kt < 0,35$; cobertura II - céu parcialmente nublado com dominância para difuso (CPN1) com $0,35 < Kt < 0,55$; cobertura III - céu parcialmente nublado com dominância para claro (CPN2) com $0,55 < Kt < 0,65$ e cobertura IV - céu aberto ou sem nuvens (CA) com $Kt > 0,65$ (Escobedo et al., 2009). Para as frações horárias, 27,3% do total das frações são CN; 21,9% de CPN1; 15,5% de CPN2 e 35,3% de CA. Similarmente, para frações diárias, 16,2% são CN; 24,3% de CPN1; 25,4% de CPN2 e 34,1% céu de CA.

A sazonalidade das frações UV/G, PAR/G e IV/G pode ser observada por meio da evolução temporal das três frações na Figura 1. Na partição diária a sazonalidade das frações é similar a uma onda que se propaga no tempo passando por máximo e mínimo nos mesmos intervalos de tempo. A evolução em fase das frações UV/G e PAR/G com amplitude de variação contrária a evolução da fração IV/G, mostra que os efeitos da cobertura de céu ao longo do ano para as radiações UV e PAR são contrários ao da radiação IV. Há período de tempo em que a cobertura de céu aumenta as frações UV/G e PAR/G e diminui a fração IV/G, enquanto outras diminuem as frações UV/G e PAR/G, e aumenta a fração IV/G. Independentemente do tipo de cobertura de céu, os valores das frações UV/G e PAR/G são maiores e o valor da fração IV/G é menor de outubro a março, no período chuvoso nas estações da primavera e verão, onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são maiores no ano. Por outro lado, os valores das frações UV/G e PAR/G são menores, e o valor da fração IV/G é maior de abril a setembro no período da seca, nas estações de outono e inverno, onde as concentrações

de nuvens e vapor d'água são menores e a concentração de aerossóis é maior no ano.

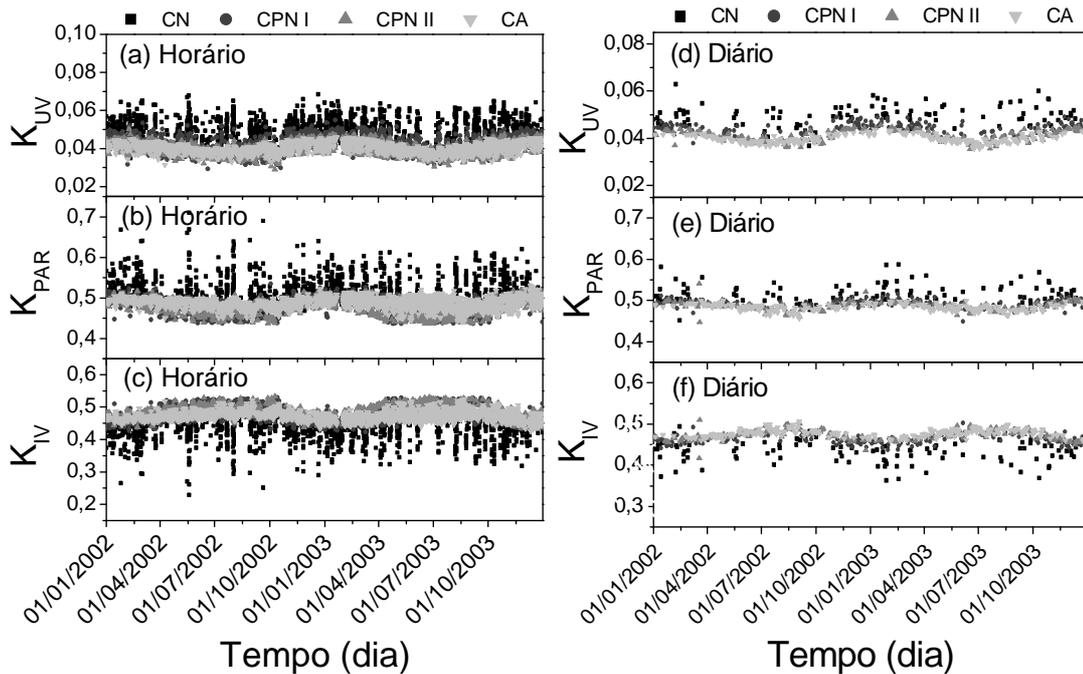


Figura 1: Evolução temporal das frações solares UV/G, PAR/G e IV/G entre os anos de 2001a 2003.

Os maiores valores das frações UV/G e PAR/G, e o menor valor da fração IV, ocorridos na atmosfera nebulosa e úmida é devido à forte absorção da radiação IV pelo vapor d'água. As frações UV/G e PAR/G aumentam em consequência da absorção não proporcional da radiação global G e das radiações UV e PAR, pelo vapor d'água. Na atmosfera nebulosa e úmida a radiação G é absorvida mais rapidamente que as radiações UV e PAR. Os menores valores das frações UV/G e PAR/G, que ocorrem na atmosfera seca, sem nuvens e com aerossóis, é devido à atenuação por espalhamento que reduzem mais acentualmente a radiação UV e PAR, que a radiação G (Robaa 2004; Papaioannou et al., 1996). Enquanto que, os maiores valores das frações IV/G é devido ao espalhamento não proporcional por aerossóis da radiação G que da radiação IV. O efeito de nuvens especificamente é mostrado por meio das distribuições dos pontos experimentais no formato de cascata. Nessa cobertura ocorrem os maiores intervalos de variações das frações solares UV/G, PAR/G e IV/G, e onde os valores das frações, horária e diária, UV/G e PAR/G atingem os maiores valores, enquanto que, a fração IV/G, o menor valor. Para as frações UV/G e PAR/G, a cascata é voltada para cima, e as variações são no sentido dos menores valores das frações (UV/G=2,8% e PAR/G = 43,0%) para os maiores valores das frações (UV/G= 6,9% e PAR/G = 71,1%). Para a fração IV/G, a cascata é voltada para baixo e a variação da fração é no sentido de decréscimo do maior valor (IV/G = 53,4%) para o menor valor (IV/G = 23,0%). Similarmente, as variações das frações diárias UV/G e PAR/G também foram dos menores valores das frações (UV/G = 3,4% e PAR/G = 45,6%) para os maiores valores das frações (UV/G = 6,3% e PAR/G=60,1%). Para a fração IV/G, a variação é do maior valor (IV/G=51,0%) para menor valor (IV/G = 34,0%).

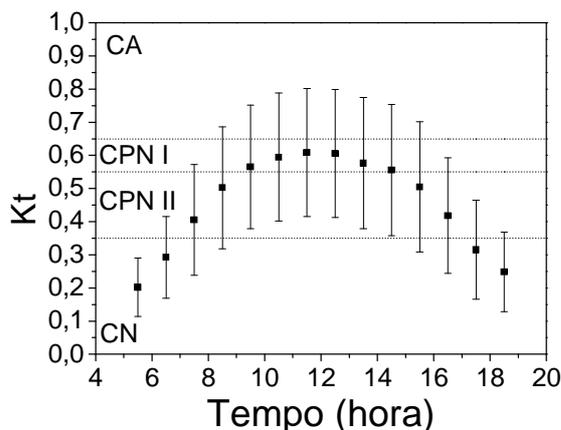


Figura 2: Evolução média horária de Kt mostrando as quatro coberturas de céu.

O efeito do vapor d'água nas variações das frações solares UV/G, PAR/G e IV/G pode ser observado na evolução da cobertura de céu aberto representados na Figura 1 pelos pontos experimentais em azul. Nessa cobertura ocorrem os menores intervalos de variações das frações solares horárias: UV/G variou de 2,9% a 4,6%; PAR/G de 43,8% a 57,9% e IV/G

de 38,0% a 53,0%, enquanto que, as frações diárias UV/G variaram de 3,4% a 4,4%; PAR de 45,6% a 51,6% e IV/G de 44,3% a 50,6%.

Diferentemente das frações diárias como mostra a Figura 1, as frações horárias não atingem os menores valores UV/G e PAR/G, e a fração IV/G o maior valor na cobertura de céu aberto, e sim nas coberturas de céu parcialmente nublada (II) e (III). Essa singularidade ocorre porque as frações horárias UV/G, PAR/G e IV/G, dependem do ângulo de elevação solar ou da massa ótica. Como pode ser observado na evolução diurna de K_t médios horários (figura 2), os menores valores das frações UV/G e PAR/G, e os maiores valores da fração IV/G, ocorridas nas coberturas II ($0,35 < K_t < 0,55$) e cobertura III ($0,55 < K_t < 0,65$) foram geradas nos intervalos horários das 5h às 9h e das 15h às 19h, onde a massa ótica é maior. A Figura 2 mostra ainda que as frações UV/G e PAR/G de menores valores e as frações IV/G de maiores valores ocorridos na cobertura de céu aberto ($K_t > 0,65$) foram geradas para as menores massas óticas, no intervalo das 9h às 15h.

Fração Sazonal UV, PAR e IV na radiação global G.

Na Tabela 1 são mostrados os valores médios das frações obtidas por regressão linear passando pela origem do tipo $Y = aX$ e os coeficientes de determinação, para agrupamentos das radiações UV, PAR e IV anual e por estações do ano em função da radiação G, horária e diária. O coeficiente angular da reta $a = Y/X$ expressa os valores das frações médias das radiações espectrais UV, PAR, IV em G no ano e estação do ano.

Mês	UV			
	Horária		Diária	
	H_{UV}/H_G	R^2	H_{UV}/H_G	R^2
Verão	0,043	0,9823	0,043	0,9869
Outono	0,040	0,9798	0,040	0,9686
Inverno	0,039	0,9789	0,039	0,9632
Primavera	0,042	0,9740	0,042	0,9720
Anual	0,042	0,9783	0,042	0,9590
	PAR			
	Horária		Diária	
	H_{PAR}/H_G	R^2	H_{PAR}/H_G	R^2
Verão	0,503	0,9928	0,497	0,9976
Outono	0,491	0,9968	0,489	0,9968
Inverno	0,480	0,9963	0,478	0,9969
Primavera	0,492	0,9953	0,491	0,9958
Anual	0,491	0,9973	0,490	0,9950
	IV			
	Horária		Diária	
	H_{IV}/H_G	R^2	H_{IV}/H_G	R^2
Verão	0,454	0,9911	0,460	0,9975
Outono	0,469	0,9959	0,471	0,9960
Inverno	0,481	0,9959	0,483	0,9969
Primavera	0,466	0,9938	0,467	0,9950
Anual	0,467	0,9961	0,469	0,9932

Tabela 1: Frações horárias e diárias e coeficientes de determinação R^2 .

Os coeficientes de determinação R^2 das equações lineares horárias e diárias indicados na Tabela 1 foram superiores a 0,9590 e expressam a ótima correlação linear entre as radiações PAR, IV, UV e G, para as quatro estações do ano. No geral, para as três radiações, o coeficiente de determinação R^2 foi mais elevado nas correlações diárias que nas horárias. Entre as radiações, o coeficiente de determinação foi mais elevado para as radiações PAR, IV e UV em seqüência. O coeficiente de determinação entre as estações do ano foi melhor em seqüência, no verão, primavera, outono e inverno, para as três radiações.

Os valores dos coeficientes angulares das equações lineares sazonal para UV/G, PAR/G e IV/G (Tabela 1) variaram em função da frequência do número de horas e dias com $K_t < 0,55$ (CN + CPN1) e umidade relativa (UR%) em cada estação do ano. Os resultados mostram que, quanto maior a frequência de horas e dias com $K_t < 0,55$ e a UR%, maiores foram os valores dos coeficientes angulares UV/G, PAR/G, e menor o valor do coeficiente angular IV/G, nas estações ou meses do ano (Figura 3).

Os valores dos coeficientes angulares das equações lineares para o agrupamentos de dados anuais das frações horárias foram UV/G = 4,2%, PAR/G = 49,1% e IV/G = 46,7%, e frações diárias UV/G = 4,2%, PAR/G = 49,0% e IV/G = 46,9%.

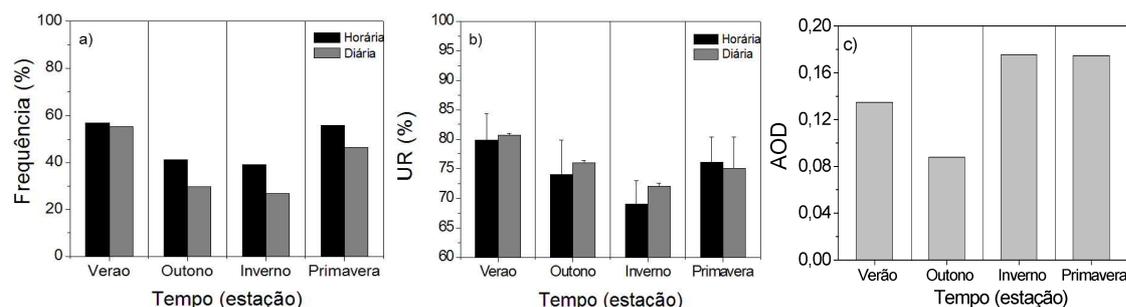


Figura 3: Frequência de cobertura de céu nebulosa ($K_t < 0,55$), umidade relativa média e aerossóis por estações do ano.

O coeficiente angular, das equações lineares para o agrupamento de dados sazonal, UV/G e PAR/G decresceu e a fração IV/G cresceu, em seqüência, nas estações verão, primavera, outono e inverno (Figura 4 a, b, c). No verão para 56,9% de (CN + CPN1) e UR% de 79,8%, os valores das frações horárias foram: UV/G = 4,3%; PAR/G = 50,3% e IV/G = 45,4%; na primavera, para 55,8% de (CN + CPN1) e UR% de 76,0%, UV/G = 0,04,2%; PAR/G = 49,2% e IV/G = 46,6%; outono para 41,1% de (CN + CPN1) e UR% de 73,09%, UV/G = 04,0%; PAR/G = 49,1% e IV/G = 46,9% e inverno para 39,2% de (CN + CPN1) e UR% de 69,0% UV/G = 3,9%; PAR/G = 48,0% e IV/G = 48,1%.

Similarmente, o coeficiente angular das equações diárias, no verão para 55,4% de (CN + CPN1) e UR% de 80,7% UV/G = 4,3%; PAR/G= 49,7%; IV/G = 46,0%; na primavera para 46,4% de (CN + CPN1) e UR% de 75,0%, UV/G = 4,2%; PAR/G = 49,1%; IV/G = 46,7%; no outono, para 29,9% de (CN + CPN1) e UR% de 76,0%, UV/G = 4,0%; PAR/G = 48,9; IV/G = 47,1; no inverno para 26,9% de (CN + CPN1) e UR%=72,0%, UV/G = 3,9%; PAR/G = 47,8%; IV/G = 48,3%.

A comparação entre o coeficiente angular das equações sazonais e equação anual pode ser observada na Figura 4 a, b, c, onde os desvios percentuais calculados pela Equação 1 expressam a capacidade da equação anual em superestimar ou subestimar a equação sazonal nas estimativas das radiações UV, PAR e IV a partir da radiação G (Figura 5a, b, c).

$$\text{Desvio Relativo } D(\%) = 100 \cdot (\mathbf{a}_a - \mathbf{a}_s) / \mathbf{a}_a \quad (1)$$

onde \mathbf{a}_a é o coeficiente angular das correlações anual e \mathbf{a}_s coeficiente angular das correlação sazonal.

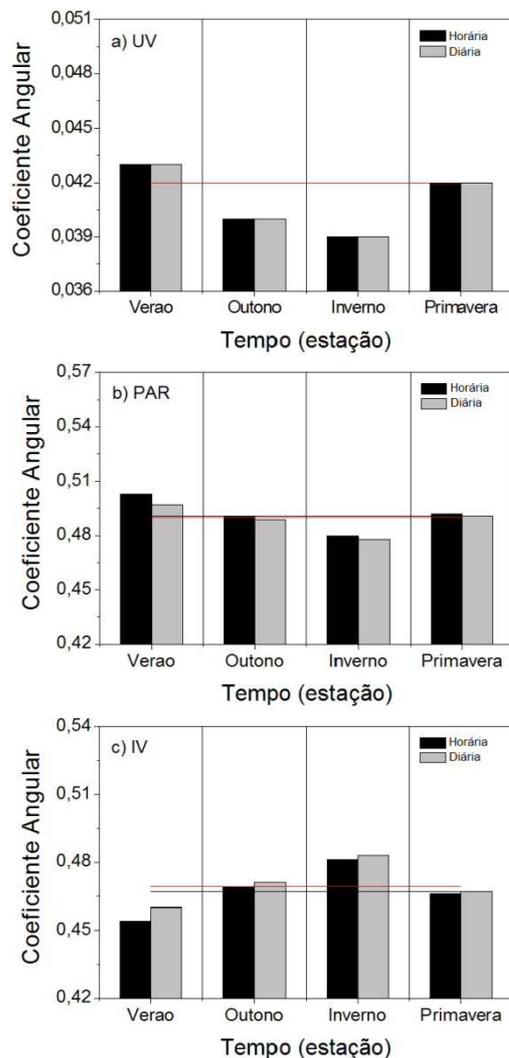


Figura 4: Comparação dos coeficientes angulares das equações de estimativas sazonal e total.

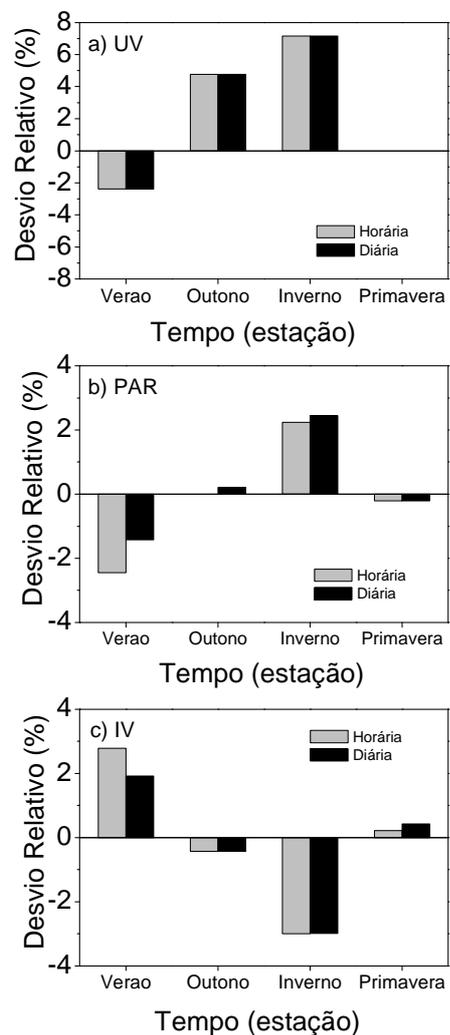


Figura 5: Desvio relativo entre os coeficientes angulares sazonais e anuais.

Para a radiação UV, horária e diária, a equação anual superestima a equação sazonal no outono e inverno em 4,8% e 7,1%, respectivamente, e subestima no verão em -2,4%. Na primavera, a estimativa da equação anual (horária e diária) é igual a da equação sazonal. Para a radiação PAR, a equação anual subestima a equação sazonal no verão em -2,5% na horária, e -1,4% na diária, e subestima na primavera em -0,2% na horária e diária. A equação anual superestima a equação sazonal do inverno em 2,2% na horária e 2,5% na diária. No outono, a estimativa da equação anual (horária e diária) é igual a equação sazonal. Para a radiação IV, a equação anual superestima a equação sazonal no verão em 2,8% na horária e 2,0 na diária, e superestima na primavera em 2,1% na horária e 4,3% na diária. Nas outras estações, outono e inverno, a equação anual

(horária e diária), subestima as equações sazonais em -4,3% e -3,0% respectivamente. A fração sazonal horária UV/G obtida em Botucatu: verão 4,3%, primavera 4,2%, outono 4,0% e inverno 3,9%, é superior aos valores da fração sazonal UV/G: verão 3,31%, primavera 3,37%, outono 3,45% e inverno 3,19%, em Athalassa em Cyprus (Jacovides et al 2006), e da fração UV/G: verão 3,27%, primavera 3,37%, outono 3,2% e inverno 3,0%, em Valencia na Espanha (Martinez-Lozano et al., 1994 e 1999). É aproximadamente igual ao valor da fração sazonal UV/G: verão 4,2%, primavera 4,33%, outono 4,13% e inverno 3,97%, em Cordoba na Espanha (Cañada, 2003) e inferior ao valor da fração sazonal UV/G: verão 5,17%, primavera 5,13%, outono 4,57% e inverno 4,33%, em Valencia na Espanha (Cañada, 2003) e a fração UV/G: verão 8,38%, primavera 7,49%, outono 7,11% e inverno 7,67%, em Kwangju na Coreia do Sul (Ogunjobi & Kim, 2004).

A fração sazonal diária UV/G obtida em Botucatu: verão 4,3%, primavera 4,2%, outono 4,0% e inverno 3,9%, é superior ao valor da fração sazonal UV/G: verão 3,31%, primavera 3,17%, outono 3,27% e inverno 3,2%, em Athalassa em Cyprus (Jacovides et al., 2006) e ao valor da fração sazonal UV/G: verão 3,23%, primavera 3,33%, outono 3,2% e inverno 2,93%, em Valencia na Espanha (Martinez-Lozano et al., 1994 e 1999).

A fração sazonal horária PAR/G obtida em Botucatu: verão 50,3%, primavera 49,2%, outono 49,1% e inverno 48,0%, é superior ao valor da fração sazonal PAR/G: verão 44,6%, primavera 43,2%, outono 43,3% e inverno 41,9%, em Atenas na Grécia (Jacovides et al., 2007). A fração sazonal diária PAR/G obtida em Botucatu: verão 49,7%, primavera 49,1%, outono 48,9% e inverno 47,8%, é superior ao valor PAR/G: verão 46,0 %, primavera 47,0 %, outono 45,0 % e inverno 44,3%, em LLorin na Nigéria (Udo e Aro, 1999); ao valor PAR/G: verão 44,4 %, primavera 43,9%, outono 42,6% e inverno 41,9%, em Atenas na Grécia (Papaioannou et al., 1996); ao valor PAR/G: verão 45,7 %, primavera 45,5%, outono 45,8% e inverno 45,6%, em Corvalis em Oregon (Nagajara et al., 1984); ao valor PAR/G: verão 42,2 %, primavera 42,1%, outono 41,5% e inverno 41,3%, em Athalassa em Cyprus (Jacovides et al., 2004); ao valor PAR/G: verão 45,0 %, primavera 44,5%, outono 44,9% e inverno 44,5%, em Fresno em USA (Howell et al., 1983); a fração sazonal PAR/G: verão 43,5 %, primavera 43,6%, outono 43,7% e inverno 43,9%, em Atenas na Grécia (Jacovides et al., 2007) e ao valor da fração sazonal verão 42,1%, primavera 44,9%, outono 44,3% e inverno 43,9%, em Lusaka na Zambia (Finch et al., 2004). A fração sazonal horária PAR/G obtida em Botucatu: verão 50,3%, primavera 49,2%, outono 49,1% e inverno 48,0%, é superior ao valor da fração sazonal PAR/G: verão 44,6%, primavera 43,2%, outono 43,3% e inverno 41,9%, em Atenas na Grécia (Jacovides et al., 2007). A fração sazonal diária PAR/G obtida em Botucatu: verão 49,7%, primavera 49,1%, outono 48,9% e inverno 47,8%, é superior ao valor PAR/G: verão 46,0 %, primavera 47,0 %, outono 45,0 % e inverno 44,3%, em LLorin na Nigéria (Udo e Aro, 1999); ao valor PAR/G: verão 44,4 %, primavera 43,9%, outono 42,6% e inverno 41,9%, em Atenas na Grécia (Papaioannou et al., 1996); ao valor PAR/G: verão 45,7 %, primavera 45,5%, outono 45,8% e inverno 45,6%, em Corvalis em Oregon (Nagajara et al., 1984); ao valor PAR/G: verão 42,2 %, primavera 42,1%, outono 41,5% e inverno 41,3%, em Athalassa em Cyprus (Jacovides et al., 2004); ao valor PAR/G: verão 45,0 %, primavera 44,5%, outono 44,9% e inverno 44,5%, em Fresno em USA (Howell et al., 1983); a fração sazonal PAR/G: verão 43,5 %, primavera 43,6%, outono 43,7% e inverno 43,9%, em Atenas na Grécia (Jacovides et al., 2007) e ao valor da fração sazonal verão 42,1%, primavera 44,9%, outono 44,3% e inverno 43,9%, em Lusaka na Zambia (Finch et al., 2004). A fração sazonal diária PAR/G obtida em Botucatu: verão 49,7%, primavera 49,1%, outono 48,9% e inverno 47,8%, é aproximadamente igual ao valor médio da fração sazonal PAR/G: verão 50,3 %, primavera 49,1%, outono 48,5% e inverno 47,5%, em Washington em USA (Stanhill & Fuchs, 1977).

CONCLUSÕES

A sazonalidade das frações UV/G, PAR/G e IV/G observadas em Botucatu é resultante das variações da nebulosidade, vapor d'água e aerossóis, na atmosfera. Os valores das frações UV/G e PAR/G são maiores e os da fração IV/G são menores, no período chuvoso, de outubro a março, onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são maiores no ano. Em contraste, os valores das frações UV/G e PAR/G são menores, e o da fração IV/G maior no período da seca, de abril a setembro, onde as concentrações de nuvens e vapor d'água são menores e a concentração de aerossóis é maior no ano.

A nuvem é responsável pelos maiores intervalos de variações das frações solares UV/G, PAR/G e IV/G. As variações são no sentido de aumento dos menores para os maiores valores das frações. Para a fração IV/G, a variação da fração é no sentido de decréscimo do maior para o menor valor de IV/G. Similarmente, as variações das frações diárias UV/G e PAR/G também foram dos menores valores para os maiores valores das frações UV/G e PAR/G. Para a fração IV/G, a variação é do maior valor para menor valor de IV/G.

O efeito do vapor d'água nas variações das frações solares UV/G, PAR/G e IV/G pode ser observado na cobertura de céu aberto. Nessa cobertura ocorrem os menores intervalos de variações das frações horárias e diárias, UV/G, PAR/G e IV/G %. Independentemente da sazonalidade, é na cobertura de céu aberto, onde as frações diárias UV/G e PAR/G atingem os menores valores, enquanto que, a fração IV/G o maior valor. Diferentemente, as frações horárias atingem os menores valores UV/G e PAR/G, e a fração IV/G o maior valor nas coberturas parcialmente nubladas e não na cobertura de céu aberto. Essa singularidade ocorre porque as frações horárias UV/G, PAR/G e IV/G, dependem do ângulo de elevação solar ou da massa ótica.

As equações de estimativas lineares passando pela origem do tipo $(Y/X=a)$ anual, sazonal e mensal, para as radiações UV, PAR e IV estão bem correlacionadas com a radiação G com coeficientes de determinação próximos de um (1) e quantificam os valores das frações UV/G, PAR/G e IV/G.

No modelo anual, as frações médias, em percentagem, obtidas foram: horárias UV/G = 4,2%, PAR/G = 49,1%, IV/G = 46,8% e diária UV/G = 4,2%, PAR/G = 49,0% e IV/G = 46,8%. No modelo sazonal as frações UV/G e PAR/G decresceram e a fração IV/G cresceu em sequência nas estações verão, primavera, outono e inverno. No verão: UV/G = 4,3%, PAR/G = 50,3% e IV/G = 45,4%; primavera UV/G = 4,2%, PAR/G = 49,2% e IV/G = 46,6%; outono, UV/G = 4,0%, PAR/G = 49,1% e IV/G = 46,9% e inverno UV/G = 3,9%, PAR/G = 48,0% e IV/G = 48,1%. Similarmente, as frações diárias foram: verão UV/G = 4,3%, PAR/G = 49,7%, IV/G = 46,0; primavera UV/G = 4,2%, PAR/G = 49,1%, IV/G = 46,7%; outono, UV/G = 4,0%, PAR/G = 48,9%, IV/G = 47,1%; inverno UV/G = 3,9%, PAR/G = 47,8, IV/G = 48,3%.

Agradecimentos à FAPESP, CNPQ.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Aruri S, Rasas M, Al-Jamal K, Shaban N. An assessment of global UV solar radiation in the range (0.290-0.385 μm) in Kuwait. *Solar Energy* 1988;41:159-62.
- Blackburn WJ, Proctor JTA. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Solar Energy* 1983;31:233-34.
- Bolsenga SJ. Near Infrared Radiation in Northern Greenland. *Journal Applied Meteorology*, 1997, 6, 449-451.
- Cañada J, Pedros G, Bosca JV. Relationships between UV (0.290-0.385 μm) and broad band solar radiation hourly values in Valência and Córdoba, Spain. *Energy* 2003; 28:199-217.
- Codato G, Oliveira AP, Soares J, Escobedo JF, Gomes E N, Pai AD. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 2008 (in press).
- Escobedo, J.; Gomes, E. N.; Oliveira, A. P. ; Soares, J. R. . 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, 2009.
- Escobedo, João F.; Gomes, E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J. R. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, v. 36, p. 169-178, 2011.
- Finch DA, Bailey WG, Mcarthur LJB, Nasitwitwi M. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 2004;122:229-38.
- Howell, TA; Meek, D.W. Relationship of photosynthetically active radiation to shortwave radiation in the San Joaquin Valley. *Agric. Meteorol*, v.28, p.157-75, 1983.
- Jacovides CP, Assimakopoulos VD, Tymvios FS, Theophilou K, Asimakopoulos DN. Solar global UV (280-380nm) radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy* 2006;31:2728-38.
- Jacovides CP, Tymvios FS, Papaioannou G, Asimakopoulos DN, Theofilou CM. Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. *Agricultural and Forest Meteorology* 2004;121:135-40.
- Jacovides CP, Tymvios FS, Assimakopoulos VD, Kaltsounides NA. The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agricultural and Forest Meteorology* 2007;143:277-87.
- Martinez-Lozano JA, Casanovas AJ, Utrillas M.P. Comparison of global UV (290 -385 nm) and global irradiation measured during the warm season in Valência, Spain. *International Journal of Climatology* 1994;14:93-102.
- Martinez-Lozano JA, Tena F, Utrillas MP. Ratio of UV to global broad band irradiation in Valência, Spain. *International Journal of Climatology* 1999;19:903-11.
- Nagajara, C.R.; Takoshima, T.; Bradley, W.A.; Lee, T.Y. Near ultraviolet at the earth's surface: measurements and model comparison. *Tellus*, v.36B, p.286-293, 1984.
- Ogunjobi KO, Kim YJ. Ultraviolet (0.280-0.400 μm) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research* 2004;71:193-214.
- Papaioannou G, Nikolidakis G, Asimakopoulos D, Retalis D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology* 1996; 81:287-298.
- Rao CRN. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology* 1984;34:353-64.
- Robaa SM. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy* 2004;77:251-59.
- Stanhill, G.; Fuchs, M. The relative flux of density photosynthetically active radiation. *J. Appl. Ecol.*, v.14, p.317-22, 1977.
- Stigter CJ, Musabilha MM. The conservative ratio of photosynthetically active to total radiation in the tropics. *Journal of Applied Ecology* 1982;19:853-58.
- Udo, S.O.; Aro, T.O. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. *Agriculture And Forest Meteorology*, v.97, p.21-31, 1999.
- Zhang X, Zhang Y, Zhou Y. Measuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April-October. *Agricultural Meteorology* 2000;102:207-12.

INVESTIGATION OF CLOUDINESS, WATER VAPOR AND AEROSOL EFFECTS ON UV, PAR AND NIR FRACTIONS OF GLOBAL SOLAR RADIATION AT THE SURFACE IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

ABSTRACT: In this work the effects of cloudiness, water vapor and aerosol load on UV, PAR and NIR fractions of G radiation are analyzed for the city of Botucatu, São Paulo State, Brazil, based on observations carried out continuously during 5 years, from 2001 to 2005. The amplitude of seasonal variation of UV/G and PAR/G is higher than that of NIR/G. The highest UV/G and PAR/G values occur during the rainy period (October to March), when the water vapor content of the atmosphere and frequency of clouds are the highest. The highest NIR/G values occur during the dry season (April to September) when the atmospheric water vapor content and frequency of clouds are the lowest and aerosol concentration is the highest in the year.

Keywords: Global Fractions, Ultraviolet Radiation, Photosynthetically Active Radiation, Near Infrared Radiation, Global Solar Radiation.

Acknowledgement: This work was supported by FAPESP and CNPq.