

IRRADIAÇÕES UV, PAR E IV MÉDIAS MENSAIS EM BOTUCATU/SP/BRASIL

J. F. Escobedo¹, D. Rodrigues², A. Dal Pai³, A. P. Oliveira⁴, J. Soares⁵

Departamento de Recursos Naturais/FCA/UNESP – Rua José Barbosa de Barros nº 1780 – CEP 18610-307, Botucatu, São Paulo, Brasil – TEL (5514) 3880-7100, e-mail: escobedo@fca.unesp.br
Faculdade de Tecnologia (FATEC) - Botucatu/SP/Brasil
Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP/São Paulo/SP/Brasil

Recibido: 03/08/12; Aceptado: 04/10/12

Resumo: No trabalho é apresentado os valores médios mensais das irradiações \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} (horária e diária); das transmissividade atmosférica \bar{K}_t , $\bar{K}_{t_{UV}}$, $\bar{K}_{t_{PAR}}$ e $\bar{K}_{t_{IV}}$ e das razões UV/G, PAR /G e IV/G (\bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV}) no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2005 em Botucatu, SP, Brazil. As irradiações horárias foram maiores em março com valores de 1,7MJ/m², 0,073MJ/m², 0,85MJ/m² e 0,79MJ/m² e menores em julho com valores de 1,37MJ/m², 0,052MJ/m², 0,67MJ/m² e 0,65MJ/m² respectivamente. Similarmente, as irradiações diárias foram maiores em fevereiro com valores de 21,5MJ/m², 10,7MJ/m², 9,84MJ/m² e 0,92MJ/m² e menores em junho com valores de 13,05MJ/m², 0,504MJ/m², 6,36MJ/m² e 6,19MJ/m² respectivamente. A transmissividade atmosférica das irradiações foi menor no mês mais nebuloso e úmido (janeiro), e maior no mês com maior número de dias com céu claro (abril): \bar{K}_t , variou de 44,5% a 60,8%; $\bar{K}_{t_{UV}}$ de 34,8% a 42,3%, $\bar{K}_{t_{PAR}}$ de 57,7% a 74,8% e $\bar{K}_{t_{IV}}$ de 36,4% a 53,2%. As razões \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} foram maiores e a razão \bar{K}_{IV} menor no mês mais nebuloso e úmido (janeiro). Por outro lado as razões \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} foram menores e a razão \bar{K}_{IV} maior no mês mais seco, sem nuvens e com aerossóis (agosto): \bar{K}_{UV} variou de 4,6% a 3,9%, \bar{K}_{PAR} de 50,7% a 48,2% e \bar{K}_{IV} de 44,6% a 48,3%.

Palavras-chave: radiações solares ultravioleta, fotossinteticamente ativa e infravermelha.

INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre as relações entre a radiação solar Global (0,285 μ m a 3,0 μ m) e a radiações solares ultravioleta-UV (0,285 μ m a 0,385 μ m), fotossinteticamente ativa-PAR (0,385-0,7 μ m) e infravermelha-IV (0,7 μ m – 3,0 μ m) por meio de séries (temporal e espacial) ou por modelos de estimativas, é importante para muitas áreas científicas e tecnológicas. A literatura mostra que a grande maioria dos trabalhos vem de estudos com os modelos estatísticos, os quais são simples e precisos nas estimativas dessas radiações para locais específicos de origem dos modelos. A radiação UV já foi investigada em cidades como Postam na Alemanha, Valência e Córdoba na Espanha, Cairo no Egito, Kwangju na Coreia do Sul, Athalassa em Chipre, Botucatu e Recife no Brasil, entre outros locais. A razão UV/G é altamente dependente das variações das concentrações de nuvens, vapor d'água, ar seco e aerossóis, na atmosfera do local. Os resultados mostram que a radiação UV total constitui uma fração entre 2,0 % a 9,5% da radiação solar global G (Al-Aruri et al., 1988; Robaa, 2004; Cañada et al., 2003; Martinez-Lozano et al., 1999; Jacovides et al., 2006; Ogunjobi e Kim, 2004; Tiba, 2010; Escobedo et al., 2009 e 2011). Similarmente, a razão entre as radiações PAR e G, já foi estudado em muitos locais e com diferentes climas. Os resultados mostram que a razão PAR/G representa um percentual entre 40,8% a 63,1% como mostram os trabalhos de Jacovides et al. (2004 e 2007) para Athalassa no Chipre e Atenas 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 Atenas na Grécia; de Stigter e Musabilha (1982) em Llorim na Nigéria, e Escobedo et al. (2009 e 2011) em Botucatu no Brasil. Com as radiações IV e G existem poucas informações experimentais simultâneas na superfície terrestre. Resultados recentes mostram que a radiação IV constitui o percentual entre 46,9% a 51,0% da radiação global, como mostram os trabalhos de Escobedo et al. (2011) em Botucatu no Brasil; Zhang et al. (2000) em Lhasa na China e Bolsenga (1997) em Thule na Groenlândia. Medidas simultâneas das radiações espectrais UV, PAR e IV, em um único local, ainda são escassas, e há poucas informações disponíveis na literatura. Com esse propósito, a Estação de Radiometria Solar monitorou as radiações G, UV e IV no período de 2001 a 2005 em Botucatu/SP/Brasil, e neste trabalho é apresentada uma análise estatística e climática dessas medidas. Foram calculadas ainda as transmissividade atmosféricas das radiações espectrais, bem como as frações UV, PAR e IV da radiação G médias mensais.

MATERIAS E METODOS

Clima e instrumentação As medidas foram realizadas no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2005 na Estação de Radiometria Solar de Botucatu-SP, UNESP (latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m). O clima local é temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido, e o inverno é frio e seco. A Fig. 1(a, b, c,) mostra as séries climáticas da temperatura, umidade relativa, nebulosidade e precipitação, do período de 1970 a 2000 em Botucatu. A

¹ Prof. Adjunto III do Departamento de Recursos Naturais/FCA/UNESP

² Técnico especializado do Departamento de Recursos Naturais/FCA/UNESP

³ Prof. Associado II da Faculdade de Tecnologia de Botucatu

⁴ Prof. Adjunto do Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP

⁵ Prof. Doutor do Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP

evolução anual da temperatura e umidade relativa média mensal segue a variação astronômica da declinação solar: os valores da temperatura e umidade relativa são maiores quando o sol declina mais próximo da latitude local nos meses de outubro a março, e menor quando declina mais distante da latitude local nos meses de abril a setembro. Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de $23,2^{\circ}\text{C}$ e $17,1^{\circ}\text{C}$. Os meses de fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmido, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

A nebulosidade (Fig. 1b) segue na grande maioria dos meses, as variações climáticas da temperatura e umidade relativa: é maior nos meses de janeiro (61,0%) e menor no mês de agosto (27,0%). A exceção ocorre nos meses de maio e junho, nos quais a temperatura e umidade relativa decrescem, e a nebulosidade aumenta em relação a abril. Essa singularidade existe devido às 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. O ciclo da precipitação (Fig. 1c) é constituído de períodos bem distintos, de acordo com o regime de chuvas: período chuvoso (outubro à março) e o período seco (abril à setembro), onde os índices pluviométricos encontram-se abaixo do nível de 100mm. No período chuvoso, a precipitação é de natureza microclimática originada do processo de convecção livre e macro-climáticas originadas dos eventos meteorológicos como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Atlântico Sul. É do tipo localizada e com grande variabilidade espacial.

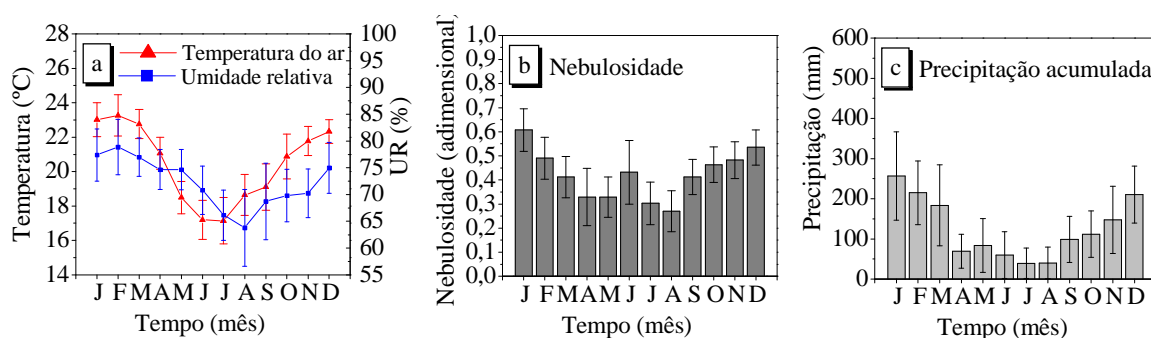


Figura 1(a, b, c): Séries climáticas da temperatura e umidade relativa (a), nebulosidade (b), precipitação (c) do período de 1970 a 2000 em Botucatu.

No período seco, de abril a setembro (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 distribuição da chuva frontal é generalizada na região; a intensidade é de fraca a moderada, dependendo do tipo de frente fria; e a duração é de média a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm.

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 $3,0\mu\text{m}$. 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 ($\mu\text{E m}^{-2}$ ou $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}$) absorvido entre 0,400 e $0,700\mu\text{m}$. Aqui a PAR será expressa em Wm^{-2} para irradiância e MJm^{-2} para irradiações horárias e diárias. O erro da estimativa da radiação PAR está associado à imprecisão das medidas da radiação global e infravermelha pelos piranômetros da Eppley e da medida da radiação UV pelo 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 5,0% (Huang et al., 2011). 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 9,0%. A estação de Radiometria Solar de Botucatu dispõe de radiômetros solares adicionais, os quais são utilizados unicamente para aferição dos equipamentos de rotina. As aferições são realizadas a cada 2 anos pelo método comparativo sugerido pela OMM (1986). Na aquisição dos dados foi utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1Hz e armazenando médias de 300 leituras ou 5 minutos. Inicialmente, os dados passam por um controle de qualidade, eliminando-se os valores espúrios, que causariam ausência de correlação e numa segunda etapa, os dados são processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das irradiações horárias e diárias.

Calculo das irradiações, transmissividade atmosférica e razões médias mensais (horárias e diárias)

As irradiações médias G, UV, PAR e IV no período de 2001 a 2005 foram calculadas para dois processos estatísticos: total e intra-anos. Na estatística total, os valores das irradiações médias (horárias e diárias) com os respectivos desvios padrões foram calculadas para cada intervalo mensal em MJm^{-2} , pela Equação 1, com a base de dados totais, onde all representa o número da irradiação (horária e diária) dos 5 anos.

$$\overline{H_x} = (\sum_{i=1}^{all} H_{x_i}) / all \quad (1)$$

Na estatística Inter-Anos, os valores das irradiações médias mensais (horárias e diárias) com os respectivos desvios padrões foram calculadas para cada intervalo mensal em MJ/m² pela Equação 2, com os valores das irradiações médios mensais de cada ano, onde n é o número de radiação horária em cada intervalo horário de cada ano, e m é o número de anos (5 anos).

$$\langle \overline{H_X} \rangle = [\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n H_{X_i}/n)]/m \quad (2)$$

O índice X representa as irradiações G, UV, PAR e IV respectivamente.

A transmissividade atmosférica média mensal (horária e diária) $\overline{K_t}$, $\overline{K_{t_{UV}}}$, $\overline{K_{t_{PAR}}}$ e $\overline{K_{t_{IV}}}$ das irradiações G, UV, PAR e IV no período de 2001 a 2005 foram calculadas com os respectivos desvios padrões em cada intervalo mensal em MJ/m², pela Equação 3, com os dados totais onde all é o número da irradiação horária e diária dos 5 anos.

$$\overline{K_{t_x}} = (\sum_{i=1}^{all} H_{X_i}/H_{0X_i})/all \quad (3)$$

O índice X representa as irradiações G, UV, PAR e IV respectivamente, e 0X as irradiações extraterrestres G, UV, PAR e IV.

As razões médias mensais (horárias e diárias) $\overline{K_{UV}} = UV/G$, $\overline{K_{PAR}} = PAR/G$ e $\overline{K_{IV}} = IV/G$ no período de 2001 a 2005 foram calculadas para os processos estatísticos, total e intra-anos. Na estatística total, os valores das razões médias mensais $\overline{K_{UV}}$, $\overline{K_{PAR}}$ e $\overline{K_{IV}}$ com os respectivos desvios padrões foram calculadas para cada intervalo mensal em MJ/m², pela Equação 4, com os dados totais, onde all é o número da irradiação (horária e diária) dos 5 anos.

$$\overline{K_Y} = (\sum_{i=1}^{all} H_{Y_i}/H_{G_i})/all \quad (4)$$

Na estatística Inter-Anos, os valores das irradiações médias mensais (horárias e diárias) com os respectivos desvios padrões foram calculadas para cada intervalo horário em MJ/m² pela Equação 5, com os valores das razões médias mensais de cada ano, onde n é o número de radiação horária em cada intervalo mensal de cada ano, e m é o número de anos (5anos).

$$\langle \overline{K_Y} \rangle = [\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n (H_{Y_i}/H_{G_i})/n)]/m \quad (5)$$

O índice Y representa as irradiações UV, PAR e IV respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Série anual da irradiação média mensal (horária e diária): total e intra-anos

Os valores de $\overline{H_G}$, $\overline{H_{UV}}$, $\overline{H_{PAR}}$ e $\overline{H_{IV}}$ anual e de $\langle \overline{H_G} \rangle$, $\langle \overline{H_{UV}} \rangle$, $\langle \overline{H_{PAR}} \rangle$ e $\langle \overline{H_{IV}} \rangle$ inter-anos (horária e diária) calculadas por dois métodos estatísticas, anual e intra-anos, de acordo com as Equações 1 e 2 em cada intervalo mensal são aproximadamente iguais, e quando submetidos ao teste t, o resultado mostrou que no intervalo de confiança de 99,0%, os valores das irradiações médias mensais total, não apresentaram diferença significativa estatisticamente em relação às irradiações médias mensais intra-anos. Assim para representar graficamente as irradiações médias mensais usaremos a obtida pela estatística total, como mostrado na Fig. 2.

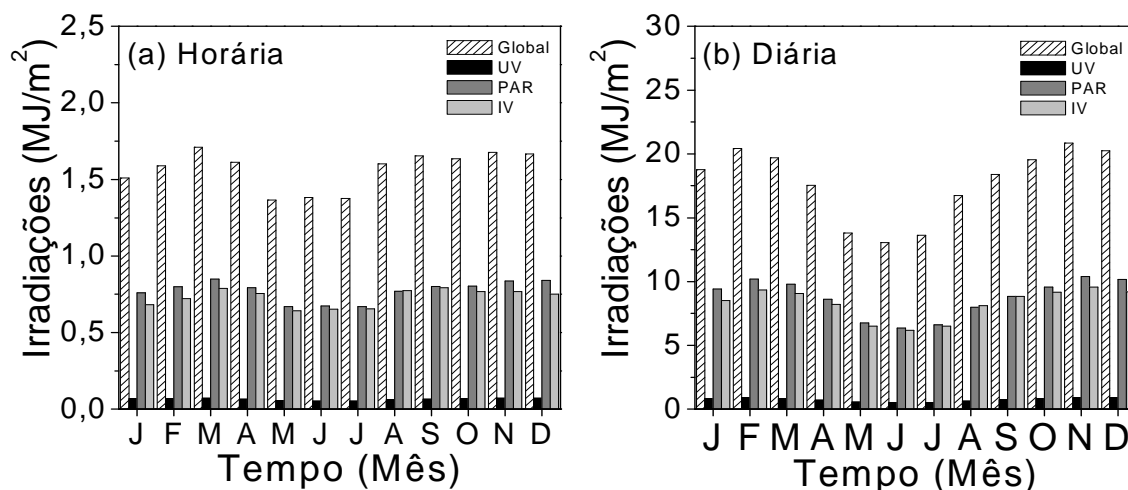


Figura 2: Evolução anual das irradiações médias mensais, horária e diária $\overline{H_G}$, $\overline{H_{UV}}$, $\overline{H_{PAR}}$ e $\overline{H_{IV}}$ total.

As variações sazonais de $\overline{H_G}$, $\overline{H_{UV}}$, $\overline{H_{PAR}}$ e $\overline{H_{IV}}$, horária e diária, são resultantes das variações astronômicas e climáticas. A evolução anual de $\overline{H_{UV}}$, $\overline{H_{PAR}}$ e $\overline{H_{IV}}$ acompanhou a da $\overline{H_G}$ com maiores valores na sequência para as radiações PAR, IV e UV em todos os meses do ano. Uma única exceção, ocorreu no mês de agosto, mês mais seco do ano onde a irradiação IV horária e diária foram superiores as irradiações da PAR. Os valores de $\overline{H_G}$, $\overline{H_{UV}}$, $\overline{H_{PAR}}$ e $\overline{H_{IV}}$, são maiores quando o sol declinou mais

próximo da latitude local (declinação solar negativa) nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro. Nestes meses do período chuvoso, as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, são maiores no ano (Fig. 1). Ao contrário, os valores das irradiações foram menores nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro quando o sol declinou mais distante da latitude local. Nesses meses do período seco, as concentrações de nuvens e vapor de água são as menores, e a concentração de aerossóis é maior no ano (Fig. 3). A variabilidade de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} do período chuvoso, está fortemente associada às variações da nebulosidade, precipitação e vapor d'água na atmosfera originadas pelas variações microclimáticas descrito na secção (2) e pelos fenômenos sinóticos macro-climáticos denominado Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Oceano Atlântico. O ZCAS gera aumento da nebulosidade com ocorrência de chuvas intensas e persistentes. A frequência desse evento é de duas a quatro vezes ao ano, com duração média de até 8 dias nos meses janeiro, fevereiro e março (Liebmann et al., 2001; Carvalho et al., 2002).

O Sistema Frontal do Oceano Atlântico é entrada de frentes úmidas originadas no oceano atlântico que geram aumento na nebulosidade e ocorrência de chuvas de média e alta intensidade nos meses de outubro, novembro e dezembro.

No período seco, os valores de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} também são afetados pelas variações da nebulosidade, precipitação e vapor d'água na atmosfera, porém são originada pelo fenômeno sinótico macro-climático denominado Sistema Frontal Polar, e por aerossóis originados nas queimadas da cana-de-açúcar. O Sistema Frontal Polar é resultante da passagem de frentes frias vindas da região polar que geram aumento na nebulosidade e ocorrência de chuvas de média e baixa intensidade nos meses de maio e junho. A frequência das frentes frias média de 5 eventos por mês no Estado de São Paulo (Satyamurty e Mattos, 1989).

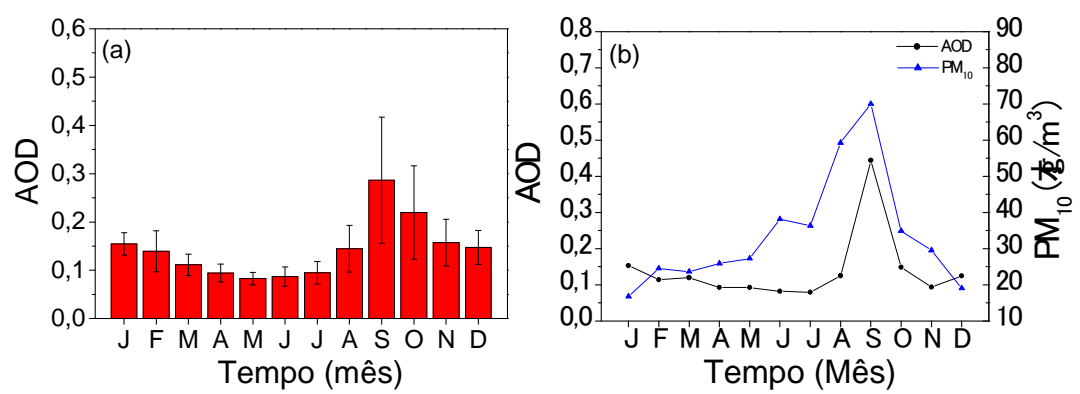


Figura 3: a) Relação entre a evolução anual da profundidade ótica de aerossóis AOD médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2005. b) Relação entre a e a concentração de materiais particulados PM₁₀ em $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Os aerossóis são originados anualmente nas queimadas da cana-de-açúcar nos meses entre julho a novembro. Na Fig. 3(a) está representada a evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA e mostra que o material particulado máximo ocorre em setembro. Na Fig. 3(b) é mostrado os resultados da calibração entre dados de satélite e as medidas para o ano de 2004 mostram que o valor máximo de AOD = 0.45 em setembro é equivalente a concentração PM₁₀ de 70.0 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Codato et al., 2008).

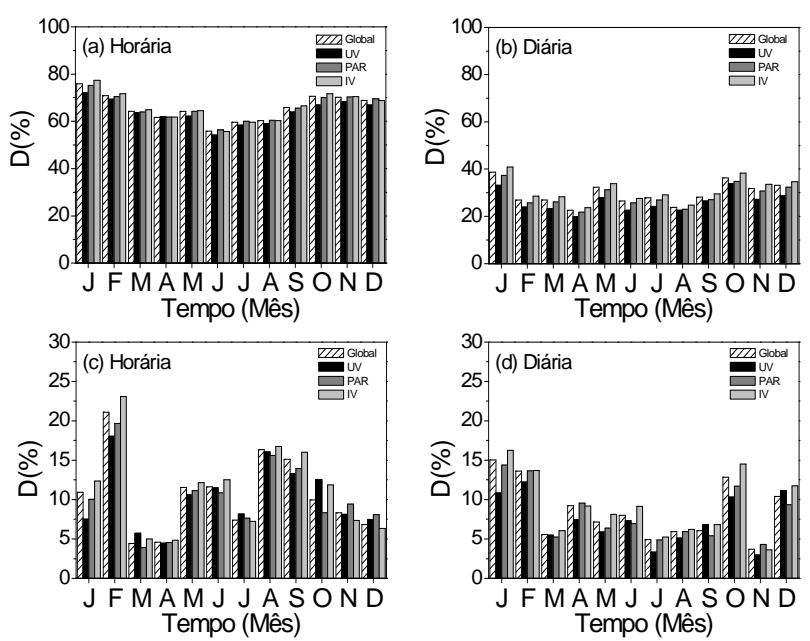


Figura 4: Evolução anual dos desvios padrões das irradiações médias mensais, total (4a, b) e intra-anos (4c, d).

O desvio padrão total (Fig. 4a, b) mostra a amplitude de variação de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} , em cada mês do ano, enquanto que o desvio padrão inter-anos (Fig. 4c, d) mostram a amplitude de variação de $\langle \bar{H}_G \rangle$, $\langle \bar{H}_{UV} \rangle$, $\langle \bar{H}_{PAR} \rangle$ e $\langle \bar{H}_{IV} \rangle$ em cada mês do ano, entre os anos. O desvio padrão das irradiações médias mensais (Fig. 4a, c) é maior que o desvio padrão das irradiações médias mensais diárias (Fig. 4a, c). Esse resultado já era esperado, pois as partições de tempo menores respondem com mais sensibilidade e rapidez às mudanças da atmosfera, permitindo melhor detalhamento da distribuição pontual das radiações, e consequentemente, produzindo uma maior variabilidade. Na partição de tempo maior, os efeitos da dinâmica da atmosfera são suavizados por meio da integração dos valores instantâneos, diminuindo a variabilidade dos valores das irradiações. O desvio padrão de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} , total é maior que o desvio padrão $\langle \bar{H}_G \rangle$, $\langle \bar{H}_{UV} \rangle$, $\langle \bar{H}_{PAR} \rangle$ e $\langle \bar{H}_{IV} \rangle$ intra-anos porque na estatística total, as variações das irradiações ($n = \text{dados}$) dependem das variações astronômicas (ângulo horário e declinação solar) e climáticas, enquanto que na estatística entre os anos, as variações dos valores médios das irradiações ($n = 5$) dependem das variações climáticas de cada ano. O desvio padrão total das quatro irradiações horárias (Fig. 4a) variou aproximadamente de 60,0% a 80,0% e as irradiações diárias (Fig. 4b) de 23,0% a 40,0%. O desvio padrão foi maior no período chuvoso nos meses de janeiro, fevereiro a março, outubro, novembro e dezembro, nos quais são maiores as variações das concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera.

Ao contrário, o valor do desvio padrão foi menor, no período seco nos meses de abril, junho, julho, agosto e setembro, nos quais as variações das concentrações da nebulosidade e vapor d'água são as menores e a concentração de aerossóis é maior, no ano. A exceção ocorreu de maio, onde o aumento do desvio padrão deu-se a uma variação atípica da nebulosidade ocorrida entre os anos de 2003 com valor de 0,21 e em 2004 com 0,47.

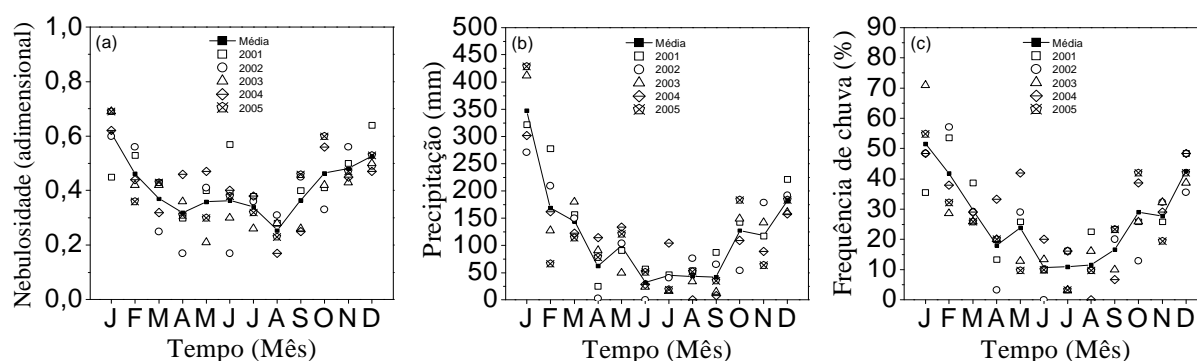


Figura 5: Valores médios mensais diários da nebulosidade, precipitação acumulada média mensal e frequência de chuvas nos anos 2001 a 2005.

O desvio padrão intra-anos (Fig. 4c, d) variou aproximadamente, entre 3,5% a 24,0% para as irradiações médias mensais horárias, e entre 3,0% a 16,0% para as irradiações médias mensais diárias. A Fig. 5 mostra que os fatores climáticos responsáveis pela variabilidade das irradiações nos anos foi a variabilidade nebulosidade, vapor de água e tipo de precipitação, em cada ano, em função da entrada do ZACS nos meses de janeiro e fevereiro; entrada de frentes frias nos meses de abril, maio e junho, juntamente com as queimadas da cana-de-açúcar em agosto e setembro, e entrada de frentes úmidas do Oceano Atlântico em outubro.

Transmissividade atmosférica das irradiações G, UV, PAR e IV média mensal: $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$

As evoluções de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} (horária e diária) mostrados na Fig. 2, quando normalizadas por suas respectivas radiações no topo da atmosfera, definem a transmissividade atmosférica de cada radiação, e eliminam a dependência do dia e local das medidas. Assim a sazonalidade mostrada na Fig. 6 da transmissividade média mensal das irradiações \bar{H}_G ($\bar{K}t$), \bar{H}_{UV} ($\bar{K}t_{UV}$), \bar{H}_{PAR} ($\bar{K}t_{PAR}$) e \bar{H}_{IV} ($\bar{K}t_{IV}$) calculadas pela Eq. 3 ao longo do ano é função apenas da variação climática local. Os valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ são os indicadores gerais dos processos de absorção e espalhamento por ozônio, nuvens, ar seco, vapor de água e aerossóis, que intervêm na transmissão das radiações G, UV, PAR e IV na atmosfera. A Fig. 6a mostra a evolução do valor de $\bar{K}t$ horário é maior que o valor diário em cada intervalo mensal. No entanto, o teste t mostra que no intervalo de confiança de 99,0%, os valores de $\bar{K}t$ horários, não apresentaram diferença significativa estatisticamente em relação aos $\bar{K}t$ diários. Assim a análise dos valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ com valores de clima (Fig. 5) será realizada apenas com os valores diários.

A Fig. 6b mostra que os valores de $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ acompanharam em todos intervalos mensais o valor de $\bar{K}t$ (Fig. 6a), sendo maior na sequência decrescente das radiações PAR, G, IV e UV. O valor percentual de $\bar{K}t_{PAR}$ variou de 57,7% a 74,8% com média total de 68,1%; $\bar{K}t$ de 44,5% a 60,8% com média total de 53,9%; $\bar{K}t_{IV}$ de 36,4% a 53,2% com média total de 45,4% e $\bar{K}t_{UV}$ de 34,8% a 42,3% com média total de 36,6%. Os valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ são menores no período chuvoso nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, nos quais as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, são maiores no ano. O mês de janeiro, o mais úmido e nebuloso possui o menor valor para $\bar{K}t = 44,5\%$; $\bar{K}t_{UV} = 34,8\%$; $\bar{K}t_{PAR} = 57,7\%$ e $\bar{K}t_{IV} = 36,4\%$. Por outro lado, os valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ é maior no período seco, nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, nos quais as concentrações de nuvens e vapor de água são as menores, e a concentração de aerossóis, é maior no ano. O mês de agosto, o mais seco, menos nebuloso e com aerossóis, possui o maior valor para $\bar{K}t = 60,9\%$ e $\bar{K}t_{IV} = 53,1\%$, enquanto que o mês de abril, o mês com maior número de dias de céu aberto possui a maior valor para $\bar{K}t_{UV} = 42,2\%$ e $\bar{K}t_{PAR} = 75,4\%$.

A sazonalidade da transmissividade atmosférica $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ mostrada da Fig. 6 está fortemente associada a nebulosidade e ao vapor de água na atmosfera (Fig. 5) de cada mês. No período chuvoso, nos meses de janeiro a abril, o valor de $\bar{K}t$ aumentou de 44,5% a 59,6%, $\bar{K}t_{UV}$ de 34,8% a 42,2%; $\bar{K}t_{PAR}$ de 57,7% a 75,5% e $\bar{K}t_{IV}$ de 36,4% a 50,2% em função dos decréscimos da nebulosidade de 0,60 a 0,32 e da precipitação de 322,2mm (52,0% dos dias com chuva) a 62,2mm (18,05% dos dias com chuva). O ZCAS incidiu muito fortemente no mês de janeiro nos anos de 2003 e 2005 onde a nebulosidade atingiu valor de 0,69 com frequência de 70% e 55,0% com dias chuvosos e precipitação de 412mm e 428,4mm, respectivamente.

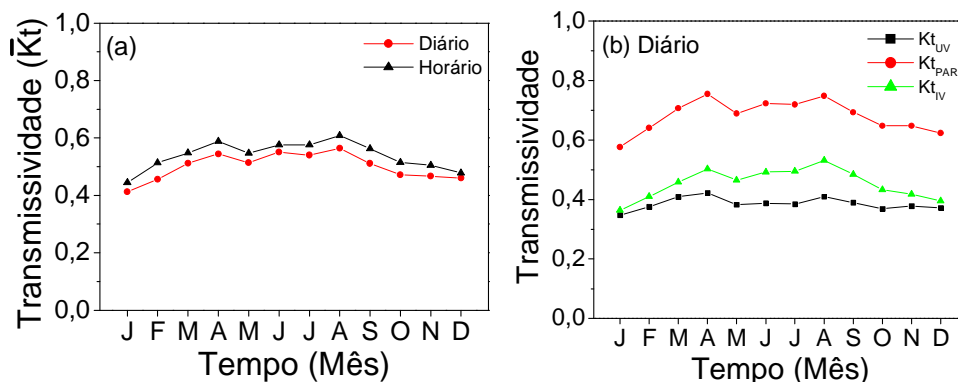


Figura 6: a) Transmissividade atmosférica da irradiação total global, horária e diária (Kt); b) transmissividade atmosférica das irradiações espectrais $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$

Ainda no período chuvoso, nos meses de outubro, novembro e dezembro, o valor de $\bar{K}t$ decresceu de 51,3% a 48,5%, $\bar{K}t_{UV}$ de 36,9% a 37,0%, $\bar{K}t_{PAR}$ de 64,8% a 62,3% e $\bar{K}t_{IV}$ de 43,3% a 39,6% em função do aumento de nebulosidade de 0,42 a 0,52 e da precipitação de 127mm com 29% dos dias com chuva para 183mm com 42,6% dos dias com chuva, originadas dos sistemas frontais vindas do oceano atlântico e início do ZCAS. No início do período seco, o mês de abril possui o maior valor de $\bar{K}t_{UV} = 42,2\%$ e $\bar{K}t_{PAR} = 75,5\%$ e o segundo maior valor de $\bar{K}t = 58,9\%$ e $\bar{K}t_{IV} = 50,2\%$. A elevada transmissividade das quatro radiações é atribuída a uma fase de transição entre os períodos chuvoso e o seco, no qual há uma redução acentuada da nebulosidade e da precipitação, aumentando o número de céu claro ($Kt > 0,65$) para 44,5%. Em abril o ZCAS desloca-se gradativamente para a região norte do país, permitindo o início das entradas das frentes frias vindas da região polar sul, que na maioria das vezes diminuem as concentrações de nuvens e vapor d'água da atmosfera. Em maio, a entrada das frentes frias diminuiu a frequência de dias abertos para 37,3% e os valores decresceram em relação ao valor no mês de abril para $\bar{K}t = 54,7\%$; $\bar{K}t_{UV} = 38,3\%$; $\bar{K}t_{PAR} = 68,8\%$ e $\bar{K}t_{IV} = 46,5\%$. De maio a agosto, período seco e baixa nebulosidade, o valor de $\bar{K}t$ aumentou de 54,7% a 60,9%, $\bar{K}t_{UV}$ de 38,3% a 41,0%; $\bar{K}t_{PAR}$ de 68,8% a 74,8% e $\bar{K}t_{IV}$ de 46,5% a 53,2% em função do aumento crescente do número de dias de céu aberto atingindo os valores de : 37,3%, 43,0%, 45,0% e 54,0% respectivamente em agosto. Nos meses de agosto e setembro, período seco e das queimadas, e nos meses outubro, novembro e dezembro, período úmido, os valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ decresceram em função do aumento da nebulosidade, vapor d'água e aerossóis na atmosfera: o valor de $\bar{K}t$ diminuiu de 60,9% a 48,5%, $\bar{K}t_{UV}$ de 41,0% a 37,2%; $\bar{K}t_{PAR}$ de 74,8% a 62,3% e $\bar{K}t_{IV}$ de 53,2% a 39,6%. Na análise da transmissividade atmosférica das irradiações espectrais com todos os tipos de cobertura de céu juntas, não é possível especificar o efeito individual da nebulosidade, ar seco, vapor d'água e aerossóis no processo de extinção das radiações G, UV, PAR e IV na atmosfera.

Razões médias mensais (horária e diária) \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV}

Os valores \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} (horária e diária) total e os valores $\langle \bar{K}_{UV} \rangle$, $\langle \bar{K}_{PAR} \rangle$ e $\langle \bar{K}_{IV} \rangle$ intra-anual são aproximadamente iguais, e o teste t, mostrou que no intervalo de confiança de 99,0%, os valores das razões médias mensais calculadas pelos dois métodos, não apresentam diferença estatística significativa. Assim na Figura(7a ,b) está representada os valores das razões \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} (horária e diária) obtidos na estatística total.

Os valores \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} horários (Fig. 7a) são iguais aos valores diários (Fig. 7b) estatisticamente no intervalo de confiança de 99,0% de acordo com o teste t. Assim a discussão sobre as variações dos valores \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} em função da variação do clima será analisada com os valores diários.

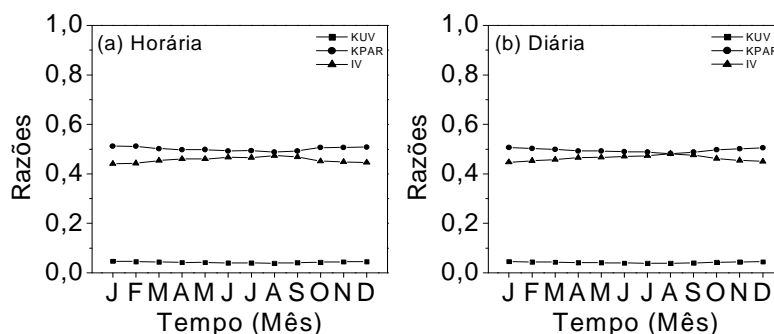


Figura 7: Evolução anual das razões médias mensais \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} total: a) horária e b) diária.

As variações os valores \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} ao longo do ano (Fig. 8b), como mencionado anteriormente, estão associadas à sazonalidade da nebulosidade e vapor d'água na atmosfera causada por fenômenos meteorológicos de micro e macroescala no período úmido, e por variações de concentrações do ar seco e aerossóis originados das queimadas da cana-de-açúcar, no período seco. Os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} decresceram quase que linearmente do maior valor percentual 4,6% e 50,7% no mês mais nebuloso e úmido (janeiro) ao menor valor 3,9% e 48,2% no mês mais seco, sem nuvens e com aerossóis (agosto) respectivamente. Do mês de agosto a dezembro, os valores \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} cresceram de 3,9% e 48,2% para os valores de 4,5% e 50,5% em função do crescimento da concentração de nuvens e vapor d'água na atmosfera. Contrário à evolução das \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} , o valor de \bar{K}_{IV} aumentou quase que linearmente do menor valor 44,6% no mês mais nebuloso e úmido (janeiro) ao maior valor 48,3% no mês mais seco, sem nuvens, e com aerossóis (agosto). A seguir a razão \bar{K}_{IV} decresceu de 48,3% até o valor de 45,0% no mês com elevada concentração de nuvens e vapor d'água (dezembro).

Os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} são maiores e valor de \bar{K}_{IV} é menor na atmosfera nebulosa e úmida, devido a alta absorção da radiação IV pelo vapor de água. Neste processo, os valores \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} aumentam na atmosfera em função da absorção não proporcional entre a radiação global G e as radiações UV e PAR pelo vapor de água. A radiação G é absorvida mais rapidamente que as radiações UV e PAR. Os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} são menores e o valor de \bar{K}_{IV} é maior na atmosfera seca, sem nuvens e com aerossóis, devido à absorção e espalhamento das radiações UV e PAR pelo ar seco e aerossóis. Neste processo, os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} diminuem em função da absorção e espalhamento não proporcional entre as radiações UV e PAR, e a radiação G, por ar seco e aerossóis. As radiações UV e PAR são absorvidas e espalhadas mais rapidamente que a radiação G. A razão \bar{K}_{IV} aumenta devido à absorção e espalhamento por ar seco e aerossóis não proporcional das radiações UV e PAR que reduzem mais a radiação G que a radiação IV.

CONCLUSÕES

Os valores das irradiações médias mensais G, UV, PAR e IV obtidas a partir das medidas no período de 2001 a 2005 em Botucatu/SP/Brasil, dependem das variações astronômicas e climáticas: são maiores nos meses do período chuvosos janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, nos quais o sol declinou mais próximo da latitude local e as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera são as maiores no ano. Em contraste, são menores nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, os quais o sol declinou mais distante da latitude local, e as concentrações de nuvens e vapor de água são mais baixas menores, e a concentração de aerossóis é maior no ano. Os valores da transmissividade atmosférica \bar{K}_t , $\bar{K}_{t_{UV}}$, $\bar{K}_{t_{PAR}}$ e $\bar{K}_{t_{IV}}$ são menores no período chuvoso nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, nos quais as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, são as maiores no ano. Por outro lado, são maiores no período seco, nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, nos quais as concentrações de nuvens e vapor de água são os menores, e a concentração de aerossóis, são as maiores no ano. As variações dos valores de \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} ao longo do ano, dependem da sazonalidade da nebulosidade e vapor d'água na atmosfera e por variações de concentrações do ar seco e aerossóis originados das queimadas da cana-de-açúcar, no período seco. Os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} decresceram do mês mais nebuloso e úmido (janeiro) ao mês mais seco, sem nuvens e com aerossóis (agosto) respectivamente. Por outro lado, o valor de \bar{K}_{IV} cresceu do mês mais nebuloso e úmido (janeiro) ao maior valor no mês mais seco, sem nuvens, e com aerossóis (agosto).

Agradecimentos à FAPESP, CNPQ.

REFERENCIAS

- Al-Aruri S., Rasas M., Al-Jamal K., Shaban N. (1988). An assessment of global UV solar radiation in the range (0.290-0.385 μ m) in Kuwait. *Solar Energy* 41, 159-62.
- Blackburn W. J., Proctor J. T. A. (1983). Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Solar Energy* 31, 233-34.
- Bolsenga S. J. (1997). Near Infrared Radiation in Northern Greenland. *Journal Applied Meteorology* 6, 449-451.
- Cañada J., Pedros G., Bosca J. V. (2003). Relationships between UV (0.290-0.385 μ m) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy* 28, 199-217.
- Carvalho L. M. V., Jones C., Liebmann, B. (2002). Extreme precipitation events in sputheastern South America and large-scale convective patters in the South Atlantic Convergence Zone. *Jornal of Climate* 15, 2377-2394.
- Codato G., Oliveira A. P., Soares J., Escobedo J. F., Gomes E. N., Dal Pai A. (2008). Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* (in press).
- Escobedo J. F., Gomes E. N., Oliveira A. P., Soares J. R. (2011). Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy* 36, 169-178.
- Escobedo J. F., Gomes E., Oliveira A. P., Soares J. (2009). Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy* 86, 299-309.
- Finch D. A., Bailey W. G., Mearthur L. J. B., Nasitwitwi M. (2004). Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 122, 229-38.
- Huang M., Jiang H., JU W. (2011). Ultraviolet Radiation over Two Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China: An Innovative Model for UV Estimation. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, v. 22, n. 5, p. 491-506.
- Jacovides C. P., Tymvios F. S., Assimakopoulos V. D. (2007). The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agricultural and Forest Meteorology* 143, 277-87.
- Jacovides C. P., Assimakopoulos V. D., Tymvios F. S., Assimakopoulos D. N. (2006). Solar global UV (280-380nm) radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy* 31, 2728-38.
- Jacovides C. P., Tymvios F. S., Papaioannou G., Assimakopoulos D. N., Theofilou C. M. (2004). Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 135-40.

- Liebmann B., Jones C., Carvalho L. M. V. (2001). Interannual variability of daily extreme precipitation events in the state of São Paulo, Brazil. *J. Climate* 14, 208–218.
- Martinez-Lozano J. A., Tena F., Utrillas M. P. (1999). Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology* 19, 903–11.
- Ogunjobi K. O., Kim Y. J. (2004). 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* 71, 193-214.
- Papaioannou G., Nikolidakis G., Asimakopoulos D., Retalis D. (1996). Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology* 81, 287–298.
- Rao C. R. N. (1984). Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology* 34, 353-64.
- Robaa S. M. (2004). A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy* 77, 251-59.
- Satyamurti P., Mattos L. F. (1989). Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Mon. Wea. Rev.* 108, 410-520.
- Stigter C. J., Musabilha M. M. (1982). The conservative ratio of photosynthetically active to total radiation in the tropics. *Journal of Applied Ecology* 19, 853-58.
- Tiba C., Leal N. M., Piacentini R. (2010). Estudo da radiação solar ultravioleta em Pernambuco. In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar, BELÉM. III Congresso Brasileiro de Energia Solar, v. 3.
- Zhang X., Zhang Y., Zhou Y. (2000). Measuring and modeling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April-October. *Agricultural Meteorology* 102, 207-12.

Abstract: This work describes hourly and daily values of solar radiation components (\bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} and \bar{H}_{IR}), broadband atmospheric transmissivity (\bar{K}_t , $\bar{K}_{t_{UV}}$, $\bar{K}_{t_{PAR}}$ and $\bar{K}_{t_{IR}}$) and monthly ratios UV/G, PAR /G and IR/G (\bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} and \bar{K}_{IR}) for the city of Botucatu, Brazil. The largest hourly values of solar radiation components occur in March (respectively 1.7MJ/m², 0.073MJ/m, 0.85MJ/m² and 0.79MJ/m²) and the smallest in July (respectively 1.37MJ/m², 0.052MJ/m², 0.67MJ/m² and 0.65MJ/m²). The largest daily values of solar radiation components occur in February (respectively 21.5MJ/m², 10.7MJ/m, 9.84MJ/m² and 0.92MJ/m²) and the smallest in June (respectively 13.05MJ/m², 0.504MJ/m², 6.36MJ/m² and 6.19MJ/m²). The broadband transmissivity is smaller in the cloudy and wet months (January) and larger in the month with large number of clear sky days (April): \bar{K}_t varies from 44.5% to 60.8%; $\bar{K}_{t_{UV}}$ from 34.8% to 42.3%, $\bar{K}_{t_{PAR}}$ from 57.7% to 74.8% and $\bar{K}_{t_{IR}}$ from 36.4% to 53.2%. The ratios \bar{K}_{UV} and \bar{K}_{PAR} are larger and \bar{K}_{IR} smaller during the cloudy and wet months (January). On the other hand, \bar{K}_{UV} and \bar{K}_{PAR} are smaller and the ratio \bar{K}_{IR} larger during the dry, cloudless and with a large aerosol load months (August): \bar{K}_{UV} varied from 4.6% to 3.9%, \bar{K}_{PAR} from 50.7% to 48.2% and \bar{K}_{IR} from 44.6% to 48.3%.

Keywords. ultraviolet, photosynthetically active, infrared solar radiation.