

MODELO DE ANGSTRÖM-PRESCOTT PARA ESTIMATIVA DAS RADIAÇÕES UV, PAR E IV EM BOTUCATU/SP/BRASILF. C. P. Correa¹, J. F. Escobedo², A. Dal Pai³, É. T. Teramoto⁴Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP - Rua José Barbosa de Barros, nº 1780, CEP 18.610-307, Botucatu, São Paulo, Brasil – Tel. (5514) 3880-7100, e-mail: pires-correa@ig.com.br.
Faculdade Tecnologia de Botucatu (FATEC)/Botucatu/SP/Brasil*Recibido: 03/08/12; Aceptado: 05/10/12*

Resumo: O trabalho descreve a análise da transmissividade atmosférica K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N). A base de dados das radiações global (G), ultravioleta (UV), fotossinteticamente ativa (PAR), infravermelha (IV) e o número de horas de brilho solar (n) foram medidas no período de 2001 a 2005 em Botucatu, São Paulo, Brasil. Os valores de K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} e de (n/N) foram menores na estação úmida, resultantes da elevada concentração de nuvens e vapor d'água na atmosfera, e maior na estação seca, quando há baixa concentração de nuvens e vapor d'água e alta concentração de aerossóis. O modelo de estimativa de Angström obtido mostra que as correlações de K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamentos total dos dados diários (anual) se ajustaram a dois tipos de equações de regressão: linear e parabólico com coeficientes de correlações R^2 variando entre 0,750 a 0,880. Na validação do modelo linear, os indicativos estatísticos: MBE inferior a $\pm 6,0\%$; RMSE inferior a 13,6% e “d” de Willmott superior a 0,946 mostram um bom nível de ajustamento em relação a medida. Na validação do modelo parabólico, os indicativos estatísticos foram: MBE inferior a $\pm 6,1\%$; RMSE inferior a 12,9% e “d” de Willmott superior a 0,948.

Palavras-chave: radiação solar, razão de insolação, horas de brilho solar, transmissividade atmosférica.

INTRODUÇÃO

A radiação ultravioleta (UV), faixa espectral de 0,280 a 0,385 μ m, exerce influência significativa sobre a superfície atmosférica e terrestre: na estratosfera, a absorção da radiação UV , exercida pelos constituintes atmosféricos, provoca o aumento da temperatura do ar nas camadas superiores (Lacis y Hansen, 1974). Em condições atmosféricas de céu aberto, cerca de 11,0% da radiação UV é atenuada pelo ozônio, 14,0% por aerossóis e 25,0% pelo ar seco. Na superfície terrestre, o efeito da radiação UV é importante em múltiplas áreas de pesquisa como desenvolvimento e modificações de ecossistemas; decomposição de águas residuais, fotodegradação de plásticos, corantes, tintas, fibras naturais e sintéticas, incidência de câncer de pele, cataratas e influência nas mudanças climáticas em escala mundial (Jiménez et al., 2000; Parisi y Wong, 2000). A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é fundamental nos processos fisiológicos, pois ativa os pigmentos fotossintéticos, permitindo que as plantas absorvam a energia radiante do sol e a convertam em energia química, através do processo de fotossíntese. A radiação PAR contribui ainda no sistema de produção e investimento tecnológico, para aumentar a eficiência agrícola e produtividade. A radiação infravermelha (IV), faixa espectral entre 0,7 a 3,0 μ m, é usada na técnica observacional por satélites e em algumas aplicações nas áreas biológicas e agrônomicas. O efeito biológico da radiação IV nas plantas, no intervalo 0,7 a 7,3 μ m, é importante para o desenvolvimento vegetativo da cultura como germinação das sementes, alongamento, floração e coloração dos frutos.

O conhecimento sobre as radiações solares UV , PAR e IV é importante em muitas áreas científicas e tecnológicas. A literatura mostra que a grande maioria dos trabalhos vem de estudos com os modelos estatísticos tipo linear o qual é simples e preciso na estimativa dessas radiações para locais específicos de origem dos modelos. O primeiro modelo relaciona as radiações UV , PAR e IV em função da radiação global (H_G) (Papaioannou et al. 1996; Jacovides et al. 2006; Escobedo et al. 2009). Um segundo modelo (polinomial) relaciona a transmissividade atmosférica das radiações UV ($K_{TUV} = UV/UV_0$), PAR ($K_{TPAR} = PAR/PAR_0$) e IV ($K_{TIV} = IV/IV_0$) com a da radiação global ($K_T = H_G/H_0$) (Cañada et al. 2003; Ogunjobi y Kim 2004; Jacovides et al., 2004). Na literatura há pouquíssimas informações disponíveis sobre estimativas das radiações espectrais UV , PAR e IV em função do brilho solar por meio do modelo de Angström-PreScott (Dal Pai y Escobedo, 2011). O modelo de Angström-PreScott relaciona linearmente a transmissividade da radiação global na atmosfera ($K_T = H_G/H_0$) com a razão de insolação (n/N) por meio da equação $K_T = (H_G/H_0) = a + b(n/N)$, onde H_G é a radiação global, H_0 é radiação solar extraterrestre, n é número de horas de brilho solar e N é a duração astronômica do dia, ou fotoperíodo. A normalização da radiação global pela radiação extraterrestre e do número de horas de brilho solar pelo fotoperíodo elimina as dependências astronômica (declinação solar) e geográfica (latitude) nas estimativas de H_G . Assim, as variações sazonais existentes nas estimativas de H_G são proporcionadas pelas variações climáticas quanto a nuvens, vapor d'água, ar seco e aerossóis na atmosfera, representadas na equação de Angström-PreScott pelos coeficientes: “s” e “b”.

¹ Mestre em Agronomia do Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP.

² Prof. Adjunto III do Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP.

³ Prof. Associado II da Faculdade de Tecnologia de Botucatu (FATEC).

⁴ Doutorando em Agronomia do Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP.

A literatura mostra que a equação de Angström-Prescott sofreu varias correções nos coeficientes: “a” e “b” e na ordem, passando também a ser expressa por equação de segundo grau.

Neste trabalho foi avaliada a possibilidade da equação de Angström-Prescott ser usada para estimativa das radiações espectrais UV, PAR e IV em função de “n”. Numa primeira análise, são mostradas as relações entre a transmissividade atmosférica \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e a razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) médias mensais e, posteriormente, é apresentada a obtenção e validação do modelo de Angström-Prescott anual para as estimativas das radiações UV, PAR e IV a partir do “n”.

MATERIAL E MÉTODOS

Instrumentação

A irradiância global (G) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSP, a irradiância ultravioleta (UV) por um radiômetro CUV-3 da Kipp y Zonen e a irradiância infravermelha (IV) por um piranômetro Eppley PSP com cúpula seletiva de transmissão na faixa espectral de 0,7 a 3,0 μ m (Fig. 1).



Figura 1: (a) piranometro PSP; (b) radiômetro CUV-3 Kipp y Zonen; (c) piranômetro PSP com cúpula seletiva.

A irradiância fotossinteticamente ativa (PAR) utilizada neste trabalho foi gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância G e a soma das irradiâncias UV e IV medidas na mesma frequência, por meio da equação: $H_{PAR} = H_g - (H_{UV} + H_{IV})$. Na literatura a irradiância PAR pode ser expresso em energia ($MJ m^{-2}$) e unidade fotobiológica como fóton ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$). Aqui neste trabalho a PAR será expressa em W/m^2 para irradiância e $MJ m^{-2}$ para irradiações horárias e diárias (McCree, 1972). 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 y Zonen: o piranômetro PSP possui uma incerteza da ordem de 1,5% a 2,0%, enquanto que, o radiômetro UV da Kipp y Zonen de 5,0% (Huang *et al.*, 2011). Assim a radiação PAR que foi obtida por diferença por meio da equação: $H_{PAR} = H_g - (H_{UV} + H_{IV})$ possui uma incerteza estimada de 10,0%.

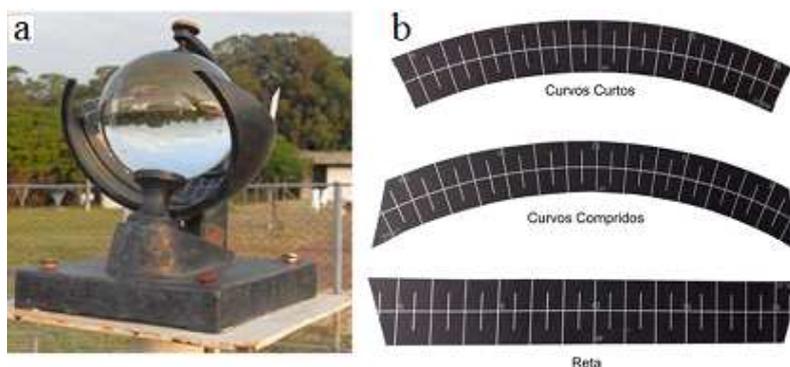


Figura 2: (a) Heliógrafo Campbell-Stokes; (b) Tiras heliográficas.

Na aquisição dos dados é utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na faixa de 5 segundo de varredura em todos os sensores, obtendo leituras e armazenando de médias de 300 leituras ou 5 minutos. O instrumento utilizado para medir o brilho solar foi o Heliógrafo de Campbell-Stokes (Fig. 2).

Índices Estatísticos

Os índices estatísticos MBE (Mean Bias Error), RMSE (Root Mean Square Error) e “d” de Willmott foram empregados para validação dos modelos, sendo calculados a partir das equações:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (3)$$

onde: P_i - valores estimados; O_i - valores medidos; N - número de observações; $|P_i|$ - valores absoluto da diferença $P_i - O_i$; $|O_i|$ - valor absoluto da diferença $O_i - O_i$. O MBE indica a exatidão de modelos estatísticos, onde valores do MBE positivos indicam a ocorrência de superestimativa do modelo testado, ou subestimativa quando os valores forem negativos. Além disto, quanto menores forem os valores de MBE, maior é a exatidão do modelo testado. O RMSE indica o valor real do erro gerado pelo modelo. Quanto menores forem os valores de RMSE obtidos, melhor será desempenho do modelo (Stone, 1993). O índice de ajustamento “d” foi utilizado para avaliar a precisão dos modelos (Willmott, 1981):

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Transmissividade atmosférica das radiações G, UV, PAR e IV média mensal

A Fig. 3 mostra os valores da transmissividade atmosférica média mensal das radiações global ($\bar{K}_T = \bar{G}/\bar{H}_0$), ultravioleta ($\bar{K}_{TUV} = \bar{UV}/\bar{UV}_0$), fotossinteticamente ativa ($\bar{K}_{TPAR} = \bar{PAR}/\bar{PAR}_0$) e infravermelha próxima ($\bar{K}_{TIV} = \bar{IV}/\bar{IV}_0$) diárias, e da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) diárias, para o período de 2001 a 2004 em Botucatu. A normalização das radiações global (G), ultravioleta (UV), fotossinteticamente ativa (PAR) e infravermelha (IV) pelas radiações no topo da atmosfera (H_0), (UV_0), (PAR_0) e (IV_0), respectivamente, eliminou a dependência do dia e local nos valores das frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} . Assim, a sazonalidade observada nos valores da transmissividade atmosférica das radiações e da razão de insolação mostradas na Fig. 6, é devido às variações climáticas em Botucatu. As radiações do topo da atmosfera UV_0 , PAR_0 e IV_0 , utilizada nos cálculos para a obtenção das transmissividade atmosférica K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} diárias foram: $UV_0 = 5,7\%$ (Foyo-Moreno *et al.*, 1999), $PAR_0 = 38,8\%$ (Alados-Arboledas *et al.*, 2000) e $IV_0 = 55,5\%$ do total do espectro (100%), obtido pelo método diferença entre o 100% de H_0 e a soma das radiações ($UV_0 + PAR_0$).

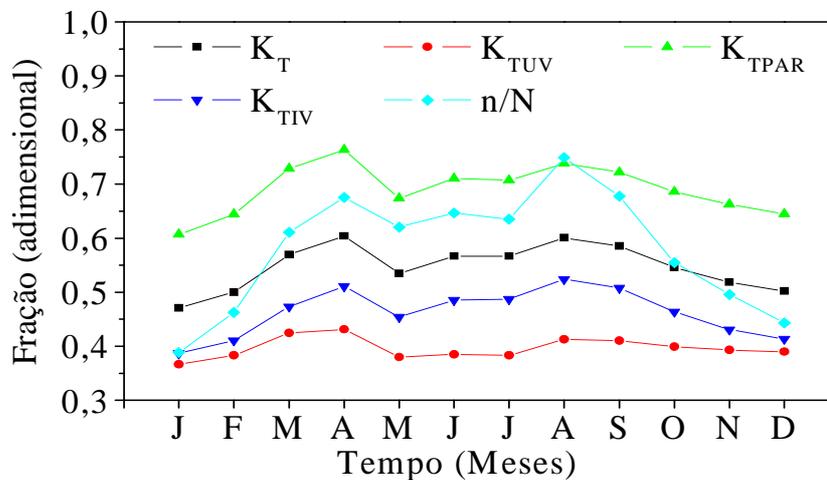


Figura 3: Transmissividade \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}).

Comparando-se a evolução das transmissividade atmosférica \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} com a evolução da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}), fica evidente que a das radiações G, UV, PAR e IV possuem uma dependência com a fração de tempo em que sol ficou exposto na atmosfera: a transmissividade de cada radiação foi elevada na condição atmosférica de maior valor da razão de insolação e, ao contrário, foi baixa na condição atmosférica de menor valor da razão de insolação. Sob o ponto de vista climático, os valores de \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) foram menores no período chuvoso, nas estações do verão e primavera, onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são maiores no ano. Os maiores valores de \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) foram no período seco, nas estações do outono e inverno, onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são menores e a concentração de aerossóis é maior no ano (Fig. 2d).

Independentemente da sazonalidade das radiações, a transmissividade atmosférica foi mais elevada para a radiação PAR, decrescendo em seqüência para as radiações G, IV e UV respectivamente. A fração \bar{K}_T variou de 47,1% em janeiro a 60,4% em abril, com média geral de 54,7%; a fração \bar{K}_{TUV} variou de 36,6% em janeiro a 43,1% em abril com média geral de 39,7%;

\bar{K}_{TPAR} variou de 60,7% em janeiro a 76,3% em abril com média geral de 69,0%, e a fração \bar{K}_{TIV} variou de 38,7% em janeiro a 52,4% em agosto com média geral de 46,2%. A razão de insolação variou de 38,8% em janeiro a 75,0% em agosto, com média geral de 58,0%. Os resultados obtidos nos meses de janeiro e fevereiro mostram que os elementos climáticos responsáveis pelos menores valores da transmissividade atmosférica das radiações G, UV, PAR e IV, e menor razão de insolação, foram a nebulosidade, a precipitação e o vapor d'água, que nestes dois meses atingiram valores acumulados de: 260,7mm e 198mm para precipitação, e $f = 0,61$ e $f = 0,49$ para nebulosidade, respectivamente. Além dos fenômenos microclimáticos (aumento da nebulosidade com chuvas convectivas de verão), o aumento da nebulosidade e precipitação e vapor d'água na atmosfera nesse período têm origem no fenômeno macroclimático denominado Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esse fenômeno é caracterizado como uma faixa de nebulosidade de orientação noroeste-sudeste, que vai desde a Bacia Amazônica até o oceano Atlântico Sul, resultante da convergência de massas de ar quente e úmido oriundas da Bacia Amazônica e do oceano Atlântico Sul. (Carvalho *et al.*, 2002). A frequência de ocorrência é de duas a quatro vezes ao ano, com duração média de 8 dias e de intensidade variável (Ferreira *et al.*, 2004). O resultado obtido para o mês de abril mostra que a maior transmissividade atmosférica das radiações G, UV, PAR e IV é consequência de um período de transição entre o ZCAS e as entradas de frentes frias vindas da região polar, que limpam as nuvens da atmosfera local. Por outro lado, o decréscimo repentino que ocorrem em maio e que se entendem nos meses de junho e julho, são devido aos sistemas frontais, resultantes da passagem de frentes frias polares, que geram aumento na nebulosidade e ocorrência de chuvas de média à baixa intensidade, principalmente durante o outono, inverno e primavera austrais (Satyamurty y Mattos, 1989). Segundo Lemos y Calbete (1996), ocorrem em média 5 eventos de sistemas frontais por mês no Estado de São Paulo. O aumento da transmissividade atmosférica das radiações G, UV, PAR e IV e da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) nos meses de julho, agosto e setembro, é consequência do período seco com elevada frequência de dias de céu claro. O mês de agosto, mês mais seco do ano e claro, porém com elevada concentração de aerossóis (Codato *et al.*, 2008), apresentou uma pequena anomalia ao valor da razão de insolação, sendo muito elevado sem que houvesse uma mudança na transmissividade das radiações na mesma proporcionalidade. É muito provável que esse efeito seja devido à aerossóis na atmosfera que absorveu e espalhou mais as radiações UV e PAR que a IV. Se for comparado à proporcionalidade do aumento de G, UV, PAR e IV com o aumento de (\bar{n}/\bar{N}), entre os meses agosto e abril, mês mais claro e com maior número de dias de céu aberto, porém úmido, pode-se constatar que a fração \bar{K}_{TIV} não foi atenuada por aerossóis, e foi à única das quatro frações que aumentou em relação ao aumento desproporcional de (\bar{n}/\bar{N}). Para uma variação de (\bar{n}/\bar{N}) de 60,4% para 75,0% em agosto, a fração \bar{K}_{TIV} aumentou de 67,5% para 75,0%, enquanto que, as frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} e \bar{K}_{TPAR} tiveram seus valores diminuídos de 60,4% para 60,0%, 4,31% para 4,13%, 76,3% para 74,0% respectivamente.

Equações de Estimativa Linear e Parabólicas das Frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da Razão de Insolação (n/N) Anual e Validação

A Fig. 4, apresenta as correlações para agrupamentos das radiações G, UV, PAR e IV diárias em função da razão de insolação (n/N) diária no período de 2001 a 2004. Dois tipos de equações foram ajustados nas correlações pela técnica estatística de regressão: linear do tipo $y = a + bx$ e parabólica de segundo grau do tipo $y = a + bx + cx^2$. As equações lineares e parabólicas obtidas estão apresentadas nas Tab. 1 e 2 com respectivos coeficientes de determinação R^2 . O resultado foi melhor na seqüência para as radiações IV, G, PAR e UV, onde o coeficiente de determinação variou entre 0,749 obtida para radiação UV a 0,852 para radiação IV. O coeficiente de determinação R^2 das equações lineares apresentados na Tab. 3, expressa uma correlação estatística significativa entre a transmissividade das radiações G, UV, PAR e IV, e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. O valor do coeficiente de determinação 0,843 obtido para a radiação global está em concordância com os valores de R^2 obtidos para outros locais por outros autores (Conceição y Mandelli, 2006; Bakirci, 2009).

Radiações	Equações Lineares – Anual	R ²
G	$(K_T) = 0,273 + 0,471 (n/N)$	0,843
UV	$(K_{TUV}) = 0,234 + 0,279 (n/N)$	0,749
PAR	$(K_{TPAR}) = 0,361 + 0,566 (n/N)$	0,826
IV	$(K_{TIV}) = 0,215 + 0,426 (n/N)$	0,852

Tabela 1: Equações de estimativa lineares das radiações G, UV, PAR e IV anual.

Radiações	Equações Parabólicas de Segundo Grau – Anual	R ²
G	$(K_T) = 0,219 + 0,852 (n/N) - 0,386 (n/N)^2$	0,877
UV	$(K_{TUV}) = 0,190 + 0,590 (n/N) - 0,316 (n/N)^2$	0,808
PAR	$(K_{TPAR}) = 0,290 + 1,064 (n/N) - 0,505 (n/N)^2$	0,866
IV	$(K_{TIV}) = 0,171 + 0,731 (n/N) - 0,310 (n/N)^2$	0,880

Tabela 2: Equações de estimativa parabólica das radiações G, UV, PAR e IV anual.

No modelo de Ångström-Prescott, a estimativa da radiação H_G em função de (n/N) depende da variação dos parâmetros climáticos como nebulosidade, vapor d'água e aerossóis na atmosfera de um local para o outro. Os valores dos coeficientes a e b dependem ainda dos seguintes fatores: latitude, altitude, albedo da superfície e elevação solar. Os valores de $a = 0,273$ (fator de intercepto) e $b = 0,471$ (coeficiente angular) da equação linear da Tab. 1 indicam que a transmissividade mínima (a) e a máxima (a + b) em Botucatu é da ordem de 27,3% e 74,4% respectivamente. Os valores dos coeficientes $a = 0,273$ (fator de intercepto) e $b = 0,471$ (coeficiente angular) da equação linear de Ångström-Prescott e R^2 obtidos para Botucatu são inferiores, iguais e superiores a outras localidades (Martínez-Lozano *et al.*, 1984).

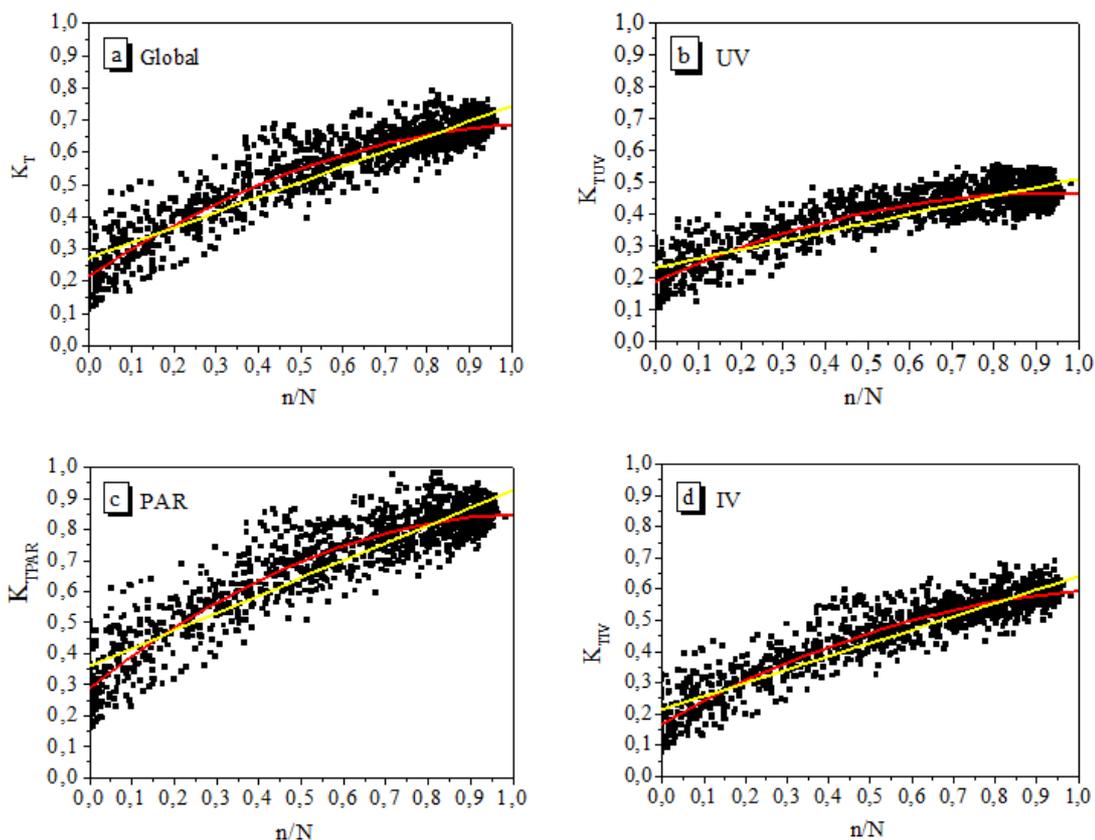


Figura 4: Correlação das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) anual.

O coeficiente de determinação R^2 das equações parabólicas apresentados na Tab. 2, também expressa uma significativa correlação estatística entre a transmissividade das radiações G, UV, PAR e IV e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. A comparação entre os coeficientes de determinação R^2 dos dois modelos mostra que o ajuste foi melhor para a equação parabólica para as quatro radiações. Similarmente ao modelo linear, o valor de R^2 foi melhor na sequência para as radiações IV, G, PAR e UV, onde o coeficiente de determinação variou entre 0,808 obtida para radiação UV a 0,880 para radiação IV, no modelo parabólico. O valor do coeficiente de determinação $R^2 = 0,877$ obtido para a radiação global está em concordância com valores de R^2 obtidos para outros locais (Ampratwum y Dorvlo, 1999; Almorox y Hontoria, 2004; Bakirci, 2009).

Para validação dos modelos foi usada uma base de dados de radiações G, UV, PAR e IV medidos no ano de 2005 em Botucatu. Os índices estatísticos MBE, RMSE e coeficiente “d” de ajuste obtido na comparação entre os modelos estimados e os medidos estão apresentados na Tab. 3 (fig 5).

Modelo	MBE (MJ m^{-2})	RMSE (MJ m^{-2})	MBE (%)	RMSE (%)	d
G	0,566	1,837	3,306	10,720	0,970
UV	0,042	0,094	6,010	13,615	0,946
PAR	0,135	0,920	1,587	10,780	0,968
IV	0,391	0,916	4,939	11,581	0,968

Tabela 3: Validação das equações lineares geradas para 2001 a 2004 e validadas no ano de 2005.

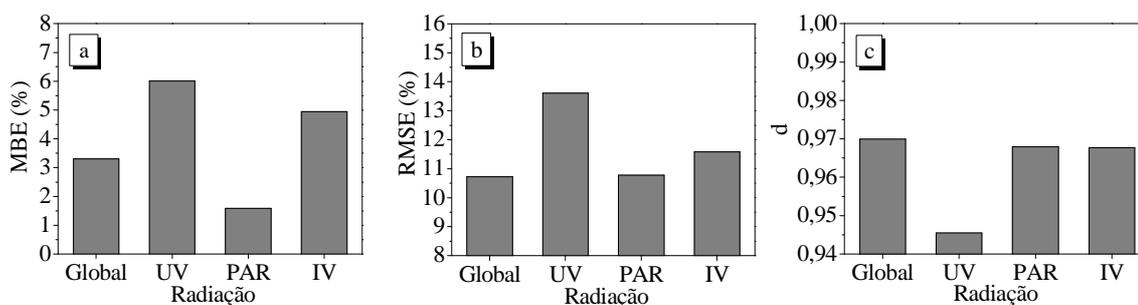


Figura 5: Índices estatísticos MBE (a), RMSE (b) e “d” (c) do modelo linear gerados na validação anual de 2005.

O indicativo MBE mostra por meio do sinal positivo que a estimativa das radiações G, UV, PAR e IV superestimam a medida. Entre as radiações, o melhor desempenho foi para as radiações em seqüência PAR, G, IV e UV, respectivamente. Na estimativa, a radiação G superestima a medida em 3,3%, a UV em 6,0%, a PAR em 1,6% e a IV em 4,9%, respectivamente. Os valores inferiores a $\pm 6,0\%$ foram significativos estatisticamente, pois os do MBE são da ordem de grandeza do erro experimental. O indicativo estatístico RMSE variou até um valor máximo de 13,6%. Entre as radiações o RMSE foi aproximadamente igual com pequena vantagem no desempenho em seqüência para as radiações G (10,7%), PAR (10,8%), IV (11,6%) e a UV (13,6%). O resultado obtido para o espalhamento foi considerado estatisticamente significativo, pois é inferior aos valores de RMSE citados na literatura para diferentes validações de modelos de estimativas em diferentes locais e com outras radiações. O coeficiente “d” de Willmott superior a 0,946 mostram bom nível de ajustamento da estimativa das radiações G, UV, PAR e IV em relação à medida. A razão principal pelo qual o ajuste da UV foi menos significativo que as demais radiações, foi a medida da UV do ano de 2005, que foi inferior a medida média do período 2001 a 2004, utilizada na modelagem, (Fig. 6).

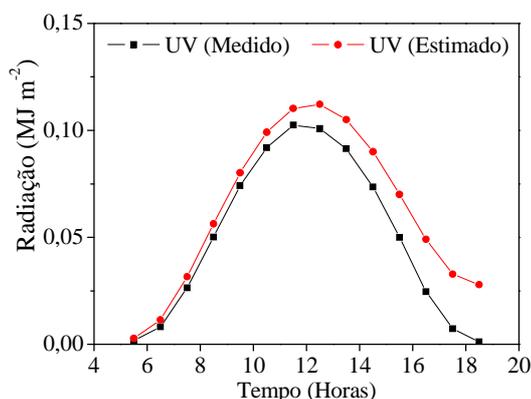


Figura 6: Evolução diurna das médias diárias da radiação UV medido com o modelo estimado.

A validação do modelo parabólico também foi usada a base de dados de radiações G, UV, PAR e IV medidos no ano 2005 em Botucatu. Os indicativos estatísticos MBE, RMSE e coeficiente “d” de ajustamento estão apresentados na Tab 4 e mostrados na figura 7. Similarmente a validação do modelo linear, o indicativo MBE obtido do modelo parabólico, mostram que a estimativa das radiações G, UV, PAR e IV superestimam a medida. Entre as radiações, o melhor desempenho foi para as radiações em seqüência PAR, G, IV e UV, respectivamente. Na estimativa, a radiação G superestima a medida em 3,3%; a UV em 6,1%, a PAR em 1,6% e a IV em 5,0%, a medida, respectivamente. Os valores inferiores a $\pm 6,1\%$ também foram significativos estatisticamente, pois os do MBE são da ordem de grandeza do erro experimental. O indicativo estatístico RMSE variou até um valor máximo de 12,86%.

Modelo	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
Global	0,575	1,726	3,358	10,073	0,975
UV	0,042	0,089	6,071	12,860	0,955
PAR	0,140	0,849	1,640	9,955	0,974
IV	0,395	0,884	4,988	11,178	0,971

Tabela 4: Validação das equações parabólicas geradas para 2001 a 2004 e validadas no ano de 2005.

Entre as radiações o RMSE, apresenta melhor desempenho para a radiação PAR com valor de 9,9% e as demais radiações foram aproximadamente iguais com G = 10,1%, a IV = 11,2% e a UV = 12,8%. Igualmente ao resultado obtido para o espalhamento na validação linear, o espalhamento do modelo parabólico foi considerado estatisticamente significativo, pois é inferior aos valores de RMSE citados na literatura para diferentes validações de modelos de estimativas em diferentes locais e com outras radiações. Os valores do coeficiente “d” para o modelo parabólico é um pouco superior ao obtido na validação do modelo linear.

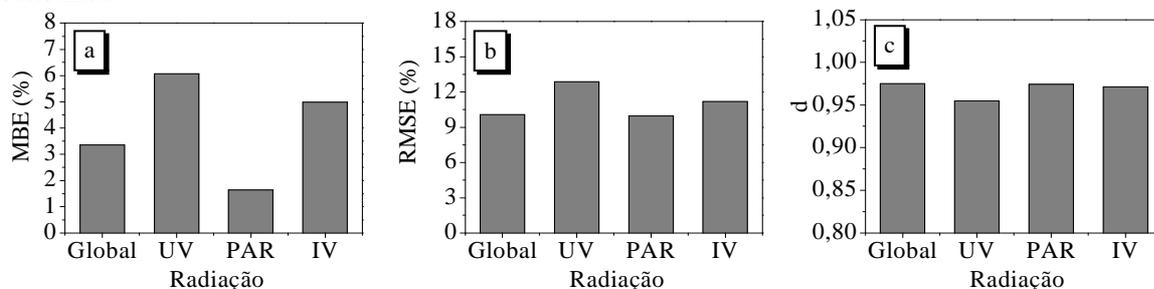


Fig. 7: Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” do modelo parabólico, gerados na validação anual de 2005.

Da análise do modelo linear e parabólico, os resultados mostram que o ajuste foi melhor no modelo parabólico em todas as radiações G, UV, PAR e IV, sendo assim, o modelo parabólico foi escolhido para estudo nas partições sazonal e mensal.

CONCLUSÕES

Existe uma correlação entre a transmissividade atmosférica das radiações global (K_T), ultravioleta (K_{TUV}), fotossinteticamente ativa (K_{TPAR}) e infravermelha próxima (K_{TIV}) diárias, e a razão de insolação (n/N) em Botucatu. A transmissividade das radiações foi elevada na condição atmosférica de maior valor da razão de insolação onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são as menores no ano, e ao contrário, é baixa na condição atmosférica de menor valor da razão de insolação onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são maiores e a concentração de aerossóis é menor no ano. A transmissividade atmosférica das radiações foi maior para a radiação PAR, decrescendo em seqüência para as radiações G, IV e UV. A transmissividade da fração de K_T variou de 47,1% em janeiro a 60,4% em abril; a fração K_{TUV} variou de 3,66% em janeiro a 4,13% em setembro; K_{TPAR} variou de 60,7% em janeiro a 76,3% em abril, e a fração K_{TIV} variou de 38,8% a 75,1% em agosto. A razão de insolação variou de 38,8% em janeiro a 75,0% em agosto.

As relações das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamentos total dos dados diários (anual) se ajustaram a dois tipos de equações de regressão: linear do tipo $y = a + bx$, e a parabólica de segundo grau tipo $y = a + bx + cx^2$ com elevados coeficientes de correlações. Para o modelo linear e parabólico o valor de R^2 foi melhor na seqüência para as radiações IV, G, PAR e UV. Na validação do modelo linear e parabólico os resultados da validação mostraram as estimativas radiações G, PAR e IV se ajustaram estatisticamente os indicativos estatísticos MBE, RMSE e "d". Para a radiação UV, o ajuste foi menos significativo estatisticamente, pelo uso da medida da radiação UV do ano de 2005, na qual foi inferior a medida média do período 2001 a 2004. O modelo de estimativa linear e parabólico pode ser utilizado com precisão e exatidão para aplicações agrárias, biológicas.

Agradecimentos à FAPESP, CNPQ.

REFERÊNCIAS

- Alados-Arboledas, L. y M., Perez. Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, 101, 187-201, 2000.
- Almorox, J. y Hontoria, C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, Amsterdam, 45, 1529-1535, 2004.
- Ampratwum, D. B. y Dorvlo, A. S. S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. *Applied Energy*, Oxford, 63, 161-167, 1999.
- Bakirci, K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy*, Oxford, 34, 485-501, 2009.
- Cañada, J.; Pedros, G.; Bosca, J. V. Relationships between UV (0.290-0.385 nm) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy*, 28, 199-217, 2003.
- Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, Lawrence, 15, 2377-2394, 2002.
- Codato, G., Oliveira, A. P., Soares, J., Escobedo, J. F., Gomes, E. N., Pai, A. D. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. *Theory. and Appl. Climat.*, 93, 57-73, 2008.
- Conceição, M. A. F. y Mandelli, F. Estimativa diária da radiação solar incidente com base no número de horas de brilho solar para a região de Bento Gonçalves-RS. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006. 12p.
- Dal Pai, E. y Escobedo, J. F. Estimativa da radiação solar global em estufa de polietileno a partir do brilho solar. *Energia na Agricultura*, 26, 3, 44-54, 2011.
- Escobedo, J.; Gomes, E. N.; Oliveira, A.; Soares, J. 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, 2009.
- Ferreira, N. J.; Sanches, M.; Silva Dias, F. A. F. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em períodos de EL Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, 19, 89-98, 2004.
- Foyo-Moreno, I.; Vida, J.; Alados-Arboledas, L. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290-385 nm). *Journal of Applied Meteorology*, Lawrence, 38, 1021-1026, 1999.
- Huang, M., Jiang, H.; Ju, W.; Xiao, Z. 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.*, 22, 5, p. 491-506, outubro 2011.
- Jacovides C. P.; Assimakopoulos, V. D.; Tymvios, F. S.; Theophilou, K.; Assimakopoulos, D. N. Solar global UV (280-380 nm) radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy*, 31, 2728-2738, 2006.
- Jacovides, C. P.; Tymvios, F. S.; Papaioannou, G.; Assimakopoulos, D. N.; Theophilou, C. M. Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 35-140, 2004.
- Jiménez A. E., Estrada, C. A., Cota, A. D. and Román, A. Photocatalytic degradation of DBSNa using solar energy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 60, 85-95, 2000.
- Lacis, A. A. y Hansen, J. E. A parametrization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 118-133, 1974.
- Lemos, C. F; Calbete, N. O. Sistemas Frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995. *Revista Climanálise Especial de 10 Anos*. 1996.
- McCree, K. J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, 10, 443-53, 1972.
- Martínez-Lozano, J. A.; Tena, F.; Onrubia, J. E.; De La Rubia, J. The historical evolution of the Angström formula and its modifications: review and bibliography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 33, 109-128, 1984.
- Ogunjobi, K. O. y Kim, Y. J. Ultraviolet (0.280-0.400 nm) 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, 2004.
- PARISI, A.V., WONG, J.C.F. An estimation of biological hazards due to solar radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*. 54, 126-130, 2000..

Papaioannou G.; Nikolidakis, G.; Asimakopoulos, D.; Retalis, D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81, 287-98, 1996.

Satyamurty P. y Mattos L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Monthly Weather Review*, Boston, 117, 1355-1364, 1989.

Stone, R. J. Improved statistical procedure for evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, Phoenix, 51., 289-91, 1993.

Willmott, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, Columbia, 2, 184-194, 1981.

ANGSTRÖM-PRESCOTT MODEL FOR TO ESTIMATE UV, PAR AND IV RADIATIONS IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

Abstract: The paper describes the analysis of the transmissivity K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} as a function of n/N . Sunshine values and the global (G), ultraviolet (UV), photosynthetically active (PAR) and infrared (IV) radiation database were measured in the period from 2001 to 2005 in Botucatu, São Paulo, Brazil. The values of K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} and relative sunshine duration (n/N) were lower in the rainy season, in function of the high concentration of clouds and water vapour in the atmosphere, and higher in the dry season, when there are low concentration of clouds and water vapour and high concentration of aerosols. The annual estimated models show that K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} correlations due to relative sunshine duration fitted into linear and parabolic correlation equations, with R^2 ranging from 0.750 to 0.880. The linear model validation shows MBE less than $\pm 6.0\%$, RMSE less than 13.6% and “d” (Willmott) above 0.946. The parabolic model validation shows MBE less than $\pm 6.1\%$, RMSE less than 12.9% and “d” (Willmott) above 0.948.

Key words: solar radiation, relative sunshine duration, hours of sunshine, atmospheric transmissivity.