

RADIAÇÕES SOLARES UV, PAR E IV: II-ESTIMATIVA DAS FRAÇÕES EM FUNÇÃO DE K_T .

João F. Escobedo¹, Eduardo N. Gomes², Amauri P. de Oliveira³, Jacyra Soares³

Estação de Radiometria Solar do Departamento de Recursos Naturais - Ciências Ambientais, Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP, Caixa Postal 237, 18603-970, Botucatu, SP, e-mail: escobedo@fca.unesp.br

RESUMO: No trabalho é apresentado as equações de estimativas horária e diária, para as frações médias \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} em função de intervalos centesimais do índice de claridade (K_t). É apresentada também a validação das equações, por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e “d” de Willmott. As correlações das frações UV, PAR e IV, em função do índice de claridade (K_t), geraram equações de estimativas de terceiro grau, com elevados coeficientes de determinação: horários ($R^2_{uv}=0,9959$; $R^2_{par}=0,9889$ e $R^2_{iv}=0,9981$) e diários ($R^2_{uv}=0,9785$; $R^2_{par}=0,9768$ e $R^2_{iv}=0,9864$). Os indicativos estatísticos da validação foram: MBE inferior a 5.0%; o RMSE inferior a 10.0% e o indicativo “d” de Willmott superior a 0,80. Este resultado mostra que as frações médias \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} horária e diária podem ser estimadas em função de K_t com precisão e exatidão em locais com características climáticas similar a de Botucatu/SP/Brasil.

Palavras Chave: radiação solar, estimativa, global, UV, PAR e IV

INTRODUÇÃO

O método de estimativa por meio de radiações na superfície terrestre possui uma limitação: a validade das equações é restrita para o local de origem das medidas, ou para regiões similares climaticamente. Desta forma, o uso de um modelo por meio de radiações não pode ser estendida a outros locais, principalmente no Brasil, país de extensão continental e com diferenças climáticas bastante significativas entre as regiões. O modelo proposto por Liu-Jordan em 1960, o qual substitui da equação de estimativa as radiações por frações, elimina grande parte da dependência do local. A mudança de variável de entrada, radiação por fração, tem a vantagem de eliminar a estacionalidade, porque a normalização por um fator que depende do dia e local, elimina igualmente muitos dos efeitos locais. É uma alternativa técnica e economicamente viável, pois as equações poderão ser estendidas a outras regiões, onde a radiação global é medida de rotina e tem como vantagem não necessitar de radiômetros solares custosos e de difícil aferição. Esse modelo vem sendo usado por muitos pesquisadores para as radiações: difusa, direta, fotossintética e ultravioleta (Liu & Jordan, 1960; Erbs et al., 1979; Iqbal, 1979a; Iqbal, 1979b; Jacovides et al., 1996; Martínez-Lozano, et al., 1994; Reindl et al., 1990. Tiris et al., 1995; Vignolia & Mcdaniels et al., 1986; Alados I., Alados-Arboledas, 1999). Assim, objetivou-se neste trabalho, desenvolver por meio do modelo de Liu-Jordan equações de estimativa, horária e diária, para as frações $K_{UV}(H_{UV}/G)$; $K_{PAR}(H_{PAR}/G)$ e $K_{IV}(H_{IV}/G)$ em função de $K_T(G/H_0)$, onde, H_{UV} , H_{PAR} , H_{IV} e G são as radiações ultravioleta, fotossintética, infravermelha e global, integradas na hora e no dia.

CLIMA E INSTRUMENTAÇÃO

A Estação de Radiometria Solar está inserida em ambiente rural na Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°O e altitude 786m). O clima local é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho. Os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 161,56h e 115,28h respectivamente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm

¹ Físico, Professor Adjunto da UNESP.

² Eng^o Agr^o, Dr. Departamento de Ciências Ambientais – UNESP.

³ Meteorologista, PHD., Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, USP.

e a mínima em agosto com 38,2mm. Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2C⁰ e 17,1C⁰, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

A irradiância global (I_G) é 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 3,0µm. 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 é 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}).

As características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global (Eppley PSP), radiômetro ultravioleta (CUV-3 da Kipp-Zonen) e do piranômetro infravermelho da (Eppley), bem como a base de dados de radiação UV, PAR e IV dos 5 anos, estão na parte I deste trabalho divulgado neste evento.

ANÁLISE VARIACIONAL DAS FRAÇÕES HORÁRIA E DIÁRIA

Distribuição de frequência e estatística das frações horária K_T^h , K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h

Na figura 1 é mostrado a distribuição de frequência das frações K_T^h , K_{UV}^h , K_{PAR}^h , K_{IV}^h , para os anos de 2001 a 2004, num total de 12365 horas. Foi necessária uma segunda limpeza de 204 frações na base das frações, as quais tiveram origens em dias chuvosos, cujas energias horárias foram muito baixas e geraram frações muito elevada ou muito baixa, em relação a média. O número de frações horárias diminuiu de 12569 para 12365 em relação ao número de horas das radiações. Na tabela 1 é apresentada a estatística das frações médias $\langle K_{UV}^h \rangle$, $\langle K_{PAR}^h \rangle$ e $\langle K_{IV}^h \rangle$ com respectivos desvios em percentagem, frações mínima e máxima, sobre o total de 12365 frações. Para intervalo total de K_T^h , entre 0,01 a 0,9 a fração média obtida foi $\langle K_T^h \rangle = 0,5464$ com desvio de 37,1%, enquanto as frações médias foram: $\langle K_{UV}^h \rangle = 0,0429$ e desvio de 13,5%; $\langle K_{PAR}^h \rangle = 0,4947$ e desvio de 5,8% e $\langle K_{IV}^h \rangle = 0,4624$ e desvio de 7,2%.

| Fração | Horas | Média | Desvio (%) | Mínimo | Máximo | Varição |
|-----------------------------|-------|--------|------------|--------|--------|---------|
| $\langle K_T^h \rangle$ | 12365 | 0,5464 | 37,10 | 0,01 | 0,90 | 0,89 |
| $\langle K_{UV}^h \rangle$ | 12365 | 0,0429 | 13,55 | 0,03 | 0,07 | 0,04 |
| $\langle K_{PAR}^h \rangle$ | 12365 | 0,4947 | 5,79 | 0,35 | 0,69 | 0,34 |
| $\langle K_{IV}^h \rangle$ | 12365 | 0,4624 | 7,17 | 0,24 | 0,60 | 0,36 |

Tabela 1: Estatística das frações médias $\langle K_{UV}^h \rangle$, $\langle K_{PAR}^h \rangle$ e $\langle K_{IV}^h \rangle$ com respectivos desvios em percentagem, frações mínima e máxima, sobre o total de 12365 frações

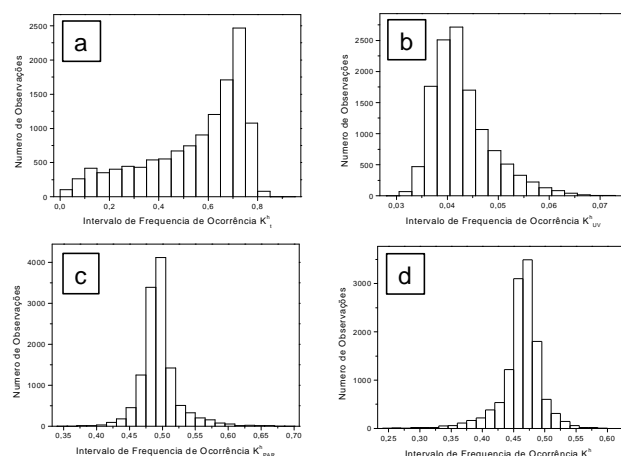


Figura 1: Histograma da distribuição de frequência das frações horárias (a) K_T^h ; (b) K_{UV}^h ; (c) K_{PAR}^h e (d) K_{IV}^h

A distribuição de frequência de K_T^h (figura 1a) é do tipo bimodal, com intervalo de variação entre 0.01(mínimo) a 0.90(máximo) e com maior número de frações, 1056 ou 8,5% da fração total de K_T^h em 0,73. Contabilizou-se, o número de frações nas quatro tipos de coberturas de céu como : para $K_T^h \leq 0,35$, atmosfera nebulosa, 2414 frações ou 19,52% do total; para $0,35 < K_T^h \leq 0,55$, parcialmente nublada com dominância para atmosfera difusa, 2508 frações ou 20,28% do total; para

$0,55 < K_T^h \leq 0,65$, parcialmente nublado com dominância para atmosfera de céu claro 2106 frações ou 17,03% do total, e $K_T^h > 0,65$, céu aberto, 5337 frações ou 43,16% do total.

A distribuição de frequência das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h (figura 1 b,c,d) mostra que os intervalos de variação das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h são bastantes extensos: a fração K_{UV}^h variou de 0,030 a 0,073 com 2508 frações, ou 20,3% do total em $K_T^h = 0,041$; a fração K_{PAR}^h variou no intervalo de 0,35 a 0,69 com 4117 frações ou 33,3 % do total em $K_T^h = 0,4975$; a fração K_{IV}^h variou de 0,24 a 0,60, com 4462 frações, ou 28,25% do total em $K_T^h = 0,4725$.

Distribuição de frequências e estatística das frações diárias K_T^d , K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d

A figura 2 mostra a evolução das frações diárias K_T^d , K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d para os quatro anos. As evoluções mostram as características sazonais da transmissão da radiação global na atmosfera (K_T^d), e das frações (K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d) na superfície terrestre, bem como, suas variações em função da nebulosidade.

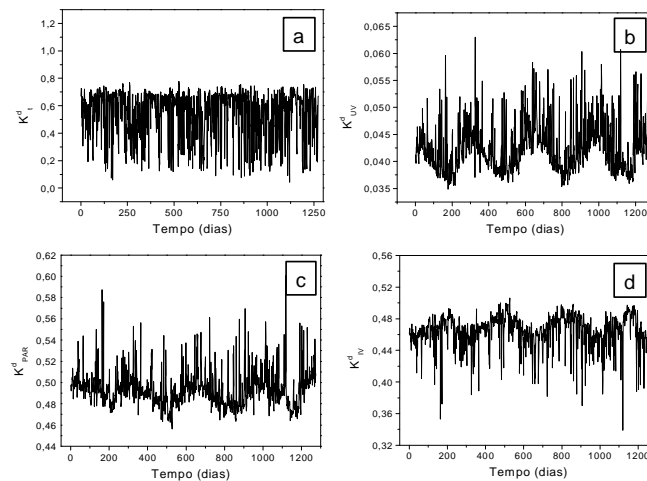


Figura 2: Evoluções das frações (a) K_T^d ; (b) K_{UV}^d ; (c) K_{PAR}^d e (d) K_{IV}^d , diária para os anos de 2001 a 2004.

As frações K_T^d e K_{IV}^d evoluem sazonalmente, igualmente quanto a fase, ambas apresentam máximo no inverno e mínimo no verão, enquanto K_{UV}^d e K_{PAR}^d evoluem também similarmente quanto a fase, porém com máximo no verão e mínimo no inverno.

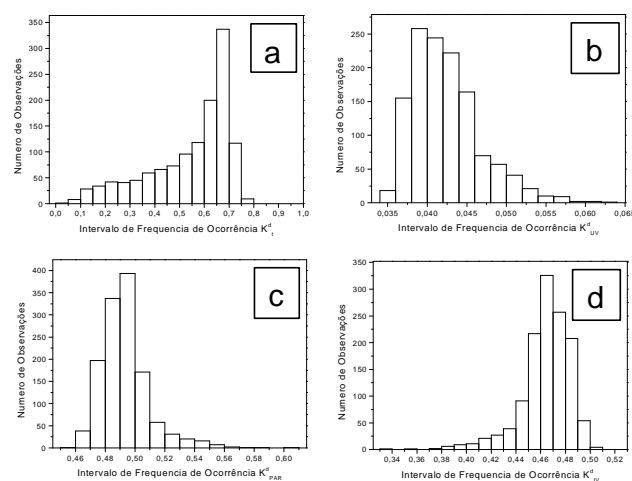


Figura 3: Histograma da de frequência das frações diárias: (a) K_T^d ; (b) K_{UV}^d ; (c) K_{PAR}^d e (d) K_{IV}^d .

Os dois pares de frações diárias evoluem periodicamente defasados de 180° . Em relação a cobertura do céu, as variações de K_T^d e K_{IV}^d , ocorrem por conta da absorção pelo vapor d'agua da camada atmosférica, nos dias nublados e parcialmente

nublados com predominância difusa, a variação é sempre do maior valor ou limite superior da fração para o menor valor ou limite inferior das frações. As frações K_{PAR}^d e K_{UV}^d apresentam variações inversas as K_T^d e K_{IV}^d , e ocorrem por conta da difusão nas nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosférica, sempre do menor valor ou limite inferior para o maior valor ou limite superior das frações.

A figura 3 mostra a curva de distribuição de frequência de K_T^d , K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d diário dos quatro anos, usados na modelagem. A distribuição de frequência de K_T^d (figura 3a) permitiu quantificar o número de dias nas quatro coberturas de céu: 217 dias nebuloso; 315 dias parcialmente nublado com dominância para a cobertura difusa, 337 dias parcialmente nublado com dominância para a cobertura de céu aberto e 490 dias de céu aberto. Na tabela 2 é apresentada a estatística das frações médias diárias $\langle K_{UV}^d \rangle$, $\langle K_{PAR}^d \rangle$ e $\langle K_{IV}^d \rangle$ com respectivos desvios em porcentagem, as frações mínima e máxima, sobre o total de 1359 dias.

| Fração | Dias | Média | Desvio (%) | Mínimo | Máximo | Varição |
|-----------------------------|------|-------|------------|--------|--------|---------|
| $\langle K_T^d \rangle$ | 1359 | 0,546 | 31,04 | 0,04 | 0,78 | 0,73 |
| $\langle K_{UV}^d \rangle$ | 1359 | 0,042 | 10,40 | 0,00 | 0,07 | 0,06 |
| $\langle K_{PAR}^d \rangle$ | 1359 | 0,493 | 3,52 | 0,41 | 0,60 | 0,19 |
| $\langle K_{IV}^d \rangle$ | 1359 | 0,464 | 4,49 | 0,34 | 0,53 | 0,19 |

Tabela 2: Estatística das frações médias diárias $\langle K_{UV}^d \rangle$, $\langle K_{PAR}^d \rangle$ e $\langle K_{IV}^d \rangle$ com respectivos desvios em porcentagem, as frações mínima e máxima, sobre o total de 1359 dias.

Para intervalo total de K_T^d , a fração média foi $\langle K_T^d \rangle = 0,546$ com desvio de 31,0%, enquanto as frações médias foram $\langle K_{UV}^d \rangle = 0,0424$ com desvio 10,4%; $\langle K_{PAR}^d \rangle = 0,493$ com desvio de 3,5% e $\langle K_{IV}^d \rangle = 0,464$ com desvio de 4,5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Equações de Estimativas das frações horárias

A figura 4 mostra que as correlações das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h variam nos sentidos vertical e horizontal em função de K_T^h : na vertical, as frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h possuem um largo intervalo de variação para cada intervalo centesimal de K_T^h , enquanto que na horizontal, as frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h decrescem e K_{IV}^h cresce, gradativamente, no sentido crescente de K_T^h .

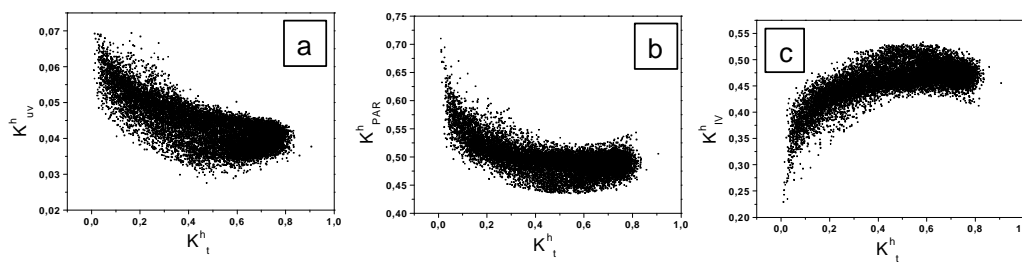


Figura 4: Correlações das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h em função de K_T^h .

A causa da dispersão vertical das frações está associada à variação da massa ótica. As frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h são maiores no sentido decrescente da massa ótica ou seja, as frações são maiores na massa ótica menores, enquanto que a evolução da fração K_{IV}^h é maior no sentido crescente da massa ótica, ou ainda, a fração é maior na massa ótica maior. Na variação horizontal, as frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h decrescem e K_{IV}^h crescem no sentido em que K_T^h aumenta devido as variações nas concentrações de nuvens, vapor d'água e aerossóis, decorrentes das mudanças de cobertura do céu. As frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h são maiores na cobertura de céu nublado ($K_T^h \leq 0,35$) e menores na cobertura de céu sem nuvens ($K_T^h \geq 0,65$), enquanto que K_{IV}^h evoluiu de forma inversa a K_{UV}^h e K_{PAR}^h , ou seja, aumenta no sentido crescente de K_T^h , sendo menor na cobertura de céu nublado e maior em céu claro.

A variação das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h em função de K_T^h são justificáveis com base nos processos de interação das radiação UV, PAR e IV, que ocorrem por conta da absorção e dispersão ou espalhamentos na atmosfera. Enquanto o espalhamento é um processo contínuo, a absorção é um processo discreto, o qual pode variar aleatoriamente dentro de curtos intervalos de comprimento de onda. Quando a radiação entra na atmosfera, primeiramente a energia é absorvida pelo ozônio, seguido de espalhamento por moléculas de gases puros e secos. O espalhamento, denominado molecular ou Rayleigh, é

dependente do comprimento de onda, sendo muito eficiente na relação em que o tamanho das moléculas é menor que 10,0% do comprimento de onda. Para radiações com comprimento de onda acima de $1,0 \mu m$ vão interagir nas atmosferas seguintes constituída de nuvens e aerossóis por meio de espalhamento de Mie.

Assim no intervalo de $K_T^h \leq 0,35$, na camada atmosférica é nebulosa com nuvens mais ou menos uniforme, as radiações UV e PAR são fracamente absorvidas, porém muito espalhada nas nuvens e aerossóis. Isto acarreta um aumento de até 50,0% nas frações UV e PAR do espectro da global. Com isto, as frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h na superfície terrestre são maiores que nos demais intervalos crescentes de K_T^h , os quais tendem a diminuir a concentrações de nuvens e vapor d'água, e aumentar a concentração de aerossóis. A radiação IV, a menos energética e com comprimento de onda da mesma ordem de grandeza das moléculas de vapor d'água, é fortemente absorvida pelas nuvens e pelo vapor de água e fracamente espalhada aerossóis na atmosfera. Conseqüentemente, a fração K_{IV}^h na superfície terrestre no intervalo nebuloso é menor que nos demais intervalos de K_T^h . A principal contribuição da radiação global vem da radiação difusa, que são aproximadamente iguais. A radiação difusa é relativamente rica em energias UV e PAR, e pobre de infravermelha.

No intervalo de $K_T^h \geq 0,65$, a cobertura de céu é aberto, isento de nuvens e com concentrações de vapor de água e aerossóis variáveis ao longo do ano. No verão, a atmosfera possui elevada concentrações de vapor d'água e baixa concentração de aerossóis em função da elevada precipitação, com isto as frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h são maiores que no período da seca, cuja atmosfera possui baixa concentrações de vapor d'água e elevada de aerossóis. A variação da fração K_{IV}^h ocorre basicamente por conta da absorção do vapor d'água na atmosfera que também é variável ao longo do ano. Quanto mais úmida for a atmosfera, como no verão, menor é a fração K_{IV}^h , enquanto que no inverno, quando a atmosférica é seca, a fração K_{IV}^h é maior na superfície da terrestre. Nos processos de interação das radiações UV, PAR e IV, com o vapor d'água, nuvens e aerossóis, em qualquer tipo de cobertura de céu, o crescimento da K_{IV}^h é proporcional ao decréscimo das K_{UV}^h e K_{PAR}^h , e vice-versa.

Análise com regressão polinomial mostraram que as variações das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h , K_{IV}^h , da figura 4 estão fracamente correlacionadas com as variações de K_T^h . Para ajustar uma função simples, optou-se em utilizar nas correlações frações médias \bar{K}_{UV}^h , \bar{K}_{PAR}^h e \bar{K}_{IV}^h para cada intervalo centesimal de K_T^h . Esta técnica foi utilizada por diversos pesquisadores para as frações difusa K_d^h e direta K_D^h , relacionadas com intervalos centesimais de K_T^h (Orgill & Hollands.,1977; Erbs et al., 1982., Bártoli et al., 1982). A figura 5 mostra as correlações das \bar{K}_{UV}^h , \bar{K}_{PAR}^h e \bar{K}_{IV}^h em função de K_T^h . As equações de estimativa horárias com os coeficientes de determinação (R^2) estão apresentadas na tabela 3.

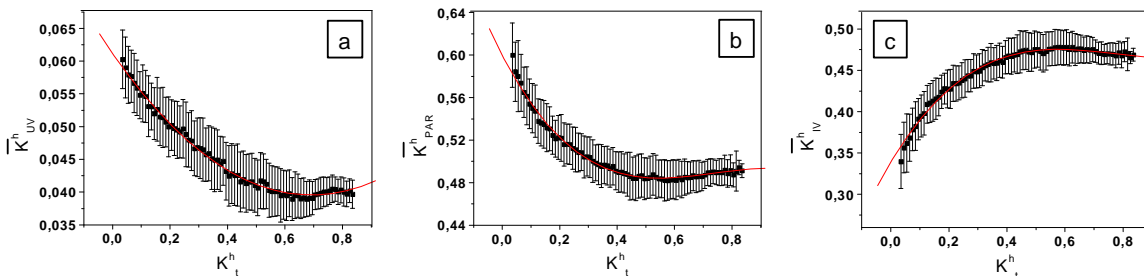


Figura 5: Estimativa das Frações médias: (a) \bar{K}_{UV}^h ; (b) \bar{K}_{PAR}^h e (c) \bar{K}_{IV}^h , em função de intervalos centesimais de K_T^h .

| Equações de Estimativa Horária | R^2 |
|--|---------|
| $\bar{K}_{UV}^h = 0,06119 - 0,06323(K_T^h) + 0,04727(K_T^h)^2 - 0,00151(K_T^h)^3$ | 0,99182 |
| $\bar{K}_{PAR}^h = 0,59975 - 0,52412(K_T^h) + 0,76022(K_T^h)^2 - 0,34354(K_T^h)^3$ | 0,98489 |
| $\bar{K}_{IV}^h = 0,33897 + 0,5881(K_T^h) - 0,80989(K_T^h)^2 + 0,34719(K_T^h)^3$ | 0,9876 |

Tabela 3: Equações de estimativa para as frações \bar{K}_{UV}^h , \bar{K}_{PAR}^h e \bar{K}_{IV}^h em função de K_T^h , e coeficientes de determinação.

Os elevados valores dos coeficientes de determinação: $R_{uv}^2=0,9959$; $R_{par}^2=0,9889$ e $R_{iv}^2=0,9981$, mostram que as variações das \bar{K}_{UV}^h , \bar{K}_{PAR}^h e \bar{K}_{IV}^h estão bem relacionadas com as variações de K_T^h .

O resultado é positivo estatisticamente para todas as frações e melhor na seqüência para \bar{K}_{UV}^h , \bar{K}_{PAR}^h e \bar{K}_{IV}^h , respectivamente. O ajuste da equação de terceiro grau justifica-se ao fato que as evoluções \bar{K}_{UV}^h e \bar{K}_{PAR}^h , que decresciam ou a \bar{K}_{IV}^h que crescia, tendendo a uma região de estabilidade em função de K_T^h , ($\bar{K}_{UV}^h=0,0395$; $\bar{K}_{PAR}^h=0,485$; $\bar{K}_{IV}^h=0,476$), na

cobertura de céu aberto, as frações \overline{K}_{UV}^h e \overline{K}_{PAR}^h começaram lentamente a crescer ou \overline{K}_{IV}^h a decrescer, respectivamente. A causa dessa singularidade pode ser entendida por meio das variações sazonais, somente para condição de céu aberto, das frações no verão e inverno, como mostrada na figura 6.

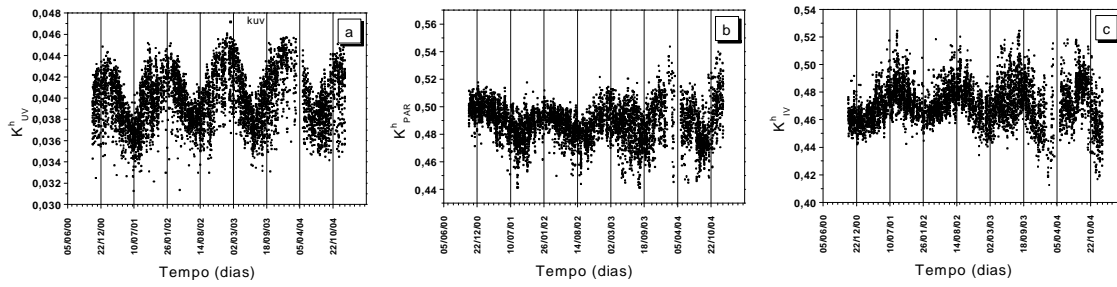


Figura 6: Evolução das frações \overline{K}_{UV}^h , \overline{K}_{PAR}^h e \overline{K}_{IV}^h em função do tempo para $K_T^h > 0,65$

No verão, a grande maioria das frações UV e PAR são maiores que as frações $\overline{K}_{UV}^h=0,0395$ e $\overline{K}_{PAR}^h=0,485$ e no inverno, a grande maioria das frações UV e PAR são menores. A fração IV evolui sazonalmente com uma defasagem de 180° em relação às evoluções das frações UV e PAR, é mínima no verão e máxima no inverno. No verão, a grande maioria da fração IV possui valores inferiores a fração média $\overline{K}_{IV}^h=0,476$ e no inverno, a grande maioria da fração IV possui valores superiores. Computadas as frações UV, PAR e IV, maiores e menores que as frações de equilíbrio da figura 6, temos que o crescimento das frações médias \overline{K}_{UV}^h e \overline{K}_{PAR}^h é devido a maior quantidade de frações UV e PAR superiores as frações de equilíbrio $\overline{K}_{UV}^h=0,0395$ e $\overline{K}_{PAR}^h=0,485$, proporcionando a elevação da curva para cima, enquanto que o decréscimo da fração \overline{K}_{IV}^h é inverso das frações \overline{K}_{UV}^h e \overline{K}_{PAR}^h , e é devido a maior quantidade da fração IV inferior a fração de equilíbrio $\overline{K}_{IV}^h=0,476$, que proporcionou a elevação a curva para baixo.

Os desvios das frações médias \overline{K}_{UV}^h , \overline{K}_{PAR}^h e \overline{K}_{IV}^h também decrescem em função dos intervalos crescente de K_T^h entre 0,1 a 0,85. São maiores para condições de céu nublado e menores na cobertura de céu aberto. Os resultados foram melhores em ordem decrescente: \overline{K}_{PAR}^h variou de 5,0% a 2,0% ; \overline{K}_{IV}^h de 9,8% a 2,5% e \overline{K}_{UV}^h de 11,5% a 4,5%.

Equações de Estimativas das frações Diárias.

A figura 7 mostra a correlação das frações K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d em função de K_t^d . Para a modelagem da fração diária, optou-se também pelo ajuste através das frações médias em intervalo centesimal de K_t^d , mesmo levando se em conta o menor número de pontos. A figura 8 mostra as correlações da \overline{K}_{UV}^d , \overline{K}_{PAR}^d e \overline{K}_{IV}^d em função de K_T^d e na tabela 4 são apresentados as equações de estimativas e os coeficientes de determinação (R^2).

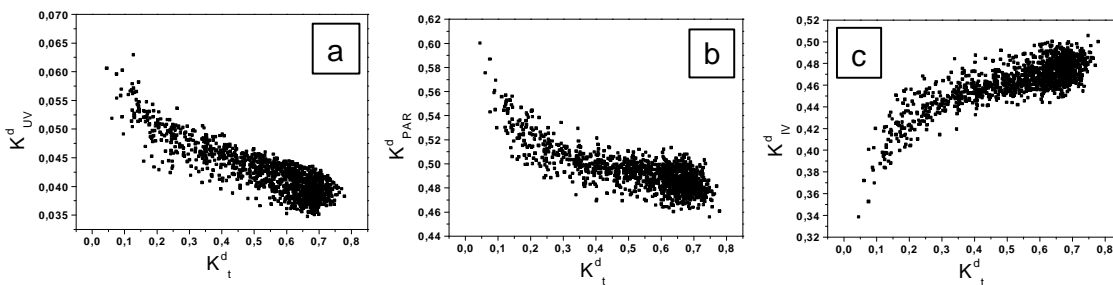


Figura 7: Correlação das frações K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d em função de K_t^d

Similarmente, as frações médias horárias, as frações \overline{K}_{UV}^d e \overline{K}_{PAR}^d decrescem e \overline{K}_{IV}^d evolui inversamente a \overline{K}_{UV}^d e \overline{K}_{PAR}^d , cresce no sentido do aumento de K_t^d .

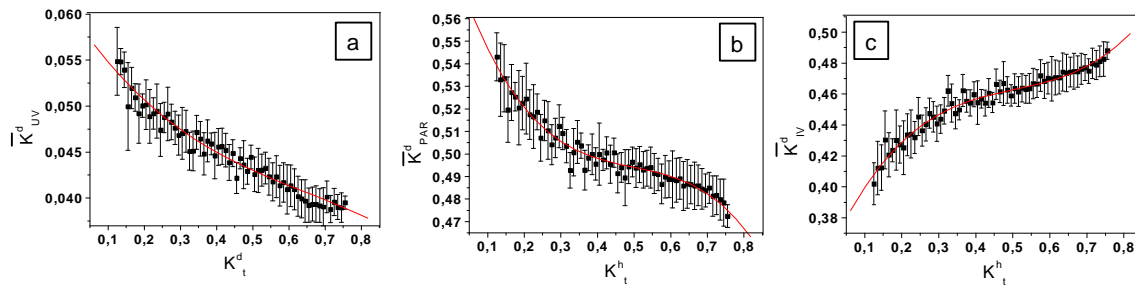


Figura 8: Equações de Estimativa das Frações médias: (a) \bar{K}_{UV}^d ; (b) \bar{K}_{PAR}^d e (c) \bar{K}_{IV}^d , em função de intervalos de K_t^d .

Os coeficientes de determinação $R_{uv}^2 = 0,9725$; $R_{par}^2 = 0,9768$ e $R_{iv}^2 = 0,9864$, próximos de 1, foram considerados positivos estatisticamente e mostram que as variações médias das \bar{K}_{IV}^d , \bar{K}_{PAR}^d e \bar{K}_{UV}^d estão bem relacionadas com a variação de K_t^d .

| | |
|--|---------|
| $\bar{K}_{UV}^d = 0,06006 - 0,05908(K_t^d) + 0,06743(K_t^d)^2 - 0,03478(K_t^d)^3$ | 0,9648 |
| $\bar{K}_{PAR}^d = 0,58751 - 0,49564(K_t^d) + 0,92802(K_t^d)^2 - 0,62078(K_t^d)^3$ | 0,94764 |
| $\bar{K}_{IV}^d = 0,35462 + 0,54052(K_t^d) - 0,96993(K_t^d)^2 + 0,64212(K_t^d)^3$ | 0,9599 |

Tabela 4: Equações de estimativa diária para as frações UV, PAR e IV, em função de K_t , e coeficientes de determinação.

Os ajustes das equações diárias foram pouco inferiores aos das equações horárias, e melhores na mesma seqüência para as frações diárias IV, UV e PAR. Os desvios das médias percentuais das três frações também dependem do tipo de cobertura de céu, sendo maiores para cobertura nebulosa e menores para céu aberto. Os intervalos de variação foram maiores na ordem para UV, PAR e IV. Para a fração UV, o desvio da media da cobertura nebulosa para cobertura de céu aberto, variou no intervalo de 9,7% a 2,0%; PAR de 3,3% a 1,0%; e IV de 4,5% a 1,5%.

Validação das Equações de Estimativa Horária e Diária.

Na tabela 5 são apresentados os indicativos estatísticos MBE, RMSE, “d” de ajustamento da validação das equações das tabelas 3 e 4, onde foi comparada a estimativa horária e diária, com as medidas.

| | Modelo | MBE | RMSE | MBE(%) | RMSE(%) | d |
|---------|-------------------|---------|--------|---------|---------|--------|
| Horária | \bar{K}_{UV}^h | 0,0014 | 0,0041 | 3,2263 | 9,7350 | 0,8736 |
| | \bar{K}_{PAR}^h | -0,0081 | 0,0234 | -1,6021 | 4,6283 | 0,7860 |
| | \bar{K}_{IV}^h | 0,0067 | 0,0249 | 1,4875 | 5,5120 | 0,8276 |
| Diária | \bar{K}_{UV}^d | 0,0020 | 0,0031 | 4,7881 | 7,5054 | 0,8551 |
| | \bar{K}_{PAR}^d | -0,0057 | 0,0123 | -1,1446 | 2,4688 | 0,8081 |
| | \bar{K}_{IV}^d | 0,0037 | 0,0131 | 0,8142 | 2,8429 | 0,8586 |

Tabela 5: indicativos estatísticos MBE, RMSE, “d” de ajustamento da validação das equações das tabelas 3 e 4

Os sinais negativos do indicativo MBE mostram que a estimativa horária das frações UV e PAR subestima a medida, enquanto, o sinal positivo do MBE para IV indica que superestima a medida. O indicativo estatístico MBE horário para PAR=- 1,6%, IV= 1,5%, e UV= -3,2% foram considerados bom estatisticamente, pois mostra que a estimativa, sub ou superestima na mesma ordem de grandeza do erro experimental. Na estimativa diária os sinais negativos do indicativo MBE para as frações UV e PAR subestima a medida, enquanto que o sinal positivo de IV indica que superestima a medida. O indicativo estatístico MBE diário foi pouco melhor que o horário, com percentuais de IV=-0,8%, PAR=-1,1% e UV= 4,8%. O indicativo RMSE inferior a 10,0% mostra que as equações estimam a medida com baixa dispersão, onde o desempenho foi melhor para a estimativa diária com RMSE da PAR= 2,5%, IV= 2,8% e UV= 7,5%, que é pouco inferiores aos RMSE horários PAR=4,6%, IV=5,5% e UV=9,7%. O coeficiente “d” para estimativa horária e diária são superiores a 0,80 e mostram que o ajuste é estatisticamente positivo, com melhor desempenho para as estimativas da UV, IV e PAR. Entre as duas partições, o resultado é pouco melhor para a estimativa diária com o coeficiente d maior que da estimativa horária. As equações de estimativas propostas neste trabalho deve ser utilizadas com cautela em locais com condições climáticas muito diferenciadas do clima de Botucatu. Muitos pesquisadores tem mostrado por meio de diferentes equações de estimativas para as frações ultravioleta K_{UV} , fotossintética K_{PAR} , direta total K_D e difusa total K_d que as variações de K_t , que é um indicador geral dos processos de dispersão e absorção que interferem na transmissão da radiação na atmosfera, não é suficientes para explicar as variação das frações na superfície terrestre. Outros parâmetros como ângulo de elevação, perfil vertical de ozônio e concentração de aerossóis deve ser levado em consideração na modelagem. Assim as equações de estimativas devem ser utilizadas em locais cujo clima é parecido com Botucatu.

CONCLUSÕES

As frações das radiações UV, PAR e IV, horária e diária, na superfície terrestre dependem de fatores climáticos como nebulosidade e das concentrações de vapor d'água e aerossóis da camada atmosférica. Sazonalmente, as frações das radiações G e IV evoluem em fase, ambas são menores no verão e maiores no inverno. As frações das radiações UV e PAR evoluem também em fase, porém defasados de 180° das frações G e IV, ambas apresentam máximos no verão e mínimas no inverno. As correlações, horária e diária, geraram equações de estimativas polinomial de terceiro grau, com coeficientes de determinação elevados e próximos de 1. O melhor ajuste foi na seqüência para as frações UV, IV e PAR. Na validação, os indicadores estatísticos MBE, RMSE e "d" obtidos da comparação entre medida e estimativa das frações médias UV, IV e PAR foram: MBE inferior a 5,0%, RMSE inferior a 10,0% e "d" superior a 0,80, e mostram que as equações de regressão podem ser usadas nas estimativas horária e diária das frações UV, PAR e IV, à partir da radiação global, com boa precisão e exatidão estatística, com vantagem para as equações diárias.

REFERÊNCIAS

- ALADOS I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.93, p.27-38, 1999.
- BARTOLI, B., CUOMO, V., AMATO, U. Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata. *Solar Energy*, v.28, p.307-11, 1982.
- ERBS, D.G., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, v.28, p.293-302, 1982.
- HAY, J.E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy*, v.33, n.4, p.301-307, 1979.
- IQBAL, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - I, Monthly average daily horizontal radiation. *Solar Energy*, v.1, p.81-86, 1979a.
- IQBAL, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - II, Monthly average hourly horizontal radiation. *Solar Energy*, v.22, p.87-90, 1979b.
- JACOVIDES, C. P., HADJIOANNOU, L., PASHIARDIS, S., STEFANOPOULOS, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. *Solar Energy*, v.56, n.6, p.565-72, 1996.
- LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.3, n.4, p.1-19, 1960.
- MARTÍNEZ-LOZANO, J.A., CASANOVAS, A.J. and UTRILLAS, M.P. Comparison of global UV (290 -385 nm) and global irradiation measured during the warm season in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology*, v.14, p.93-102, 1994.
- ORGILL, J. F., HOLLANDS, K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, v.19, n.3, p.357-359, 1977.
- REINDL, D. T., BECKMAN, W. A., DUFFIE, J. A. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, v.45, n.1, p.1-7, 1990.
- TIRIS, M., TIRIS, Ç., TÜRE, I.E. Correlations of monthly-average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze, Turkey. *Energy Conversion* v.37, n. 9, p. 1417-1421, 1995.
- VIGNOLIA, F., McDANIELS, D. K. Beam-global correlations in the pacific northwest. *Solar Energy*, v.36, p.409-18, 1986.

ABSTRACT This work presents equations to estimate the hourly and daily solar radiation fractions ultraviolet (KUV), photosynthetically active (KPAR), and infrared (KIV) as function of clearness index infinitesimal intervals (Kt). It's also presented the equation's validation using the statistical indicators MBE, RMSE and "d" of Willmott. The correlations of the fractions KUV, KPAR and KIV, as function of the Kt, generated equations of third degree, with high determination coefficients: hourly ($R^2_{UV}=0,9959$; $R^2_{PAR} = 0,9889$ and $R^2_{IV} = 0,9981$) and daily ($R^2_{UV} = 0,9785$; $R^2_{PAR} = 0,9768$ and $R^2_{IV} = 0,9864$). The statistical indicators of the validation were: MBE less than 5.0%; RMSE less than 10.0% and "d" of Willmott higher than 0.80. This results showed that the hourly and daily fractions KUV, KPAR and KIV could be estimated as function of Kt, with accurately and accuracy.

Keywords: global solar radiation, IV, PAR and UV solar radiation, Estimation of the IV, PAR and UV radiation.