

RADIAÇÕES SOLARES UV, PAR E IV: I-ESTIMATIVA EM FUNÇÃO DA GLOBAL

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 são apresentadas equações de estimativa, horária e diária, para as radiações, ultravioleta (UV), fotossintética (PAR) e infravermelha (IV) em função global total (G), medida entre os anos de 2001 a 2005 em Botucatu, SP, Brasil. As radiações UV, PAR e IV foram correlacionadas com a radiação global, com coeficientes de determinação r^2 em torno de 0,99. As equações de estimativas quantificaram as frações das radiações UV, PAR e IV no espectro global como: $UV/G=4,2\%$; $PAR/G=49,0\%$ e $IV/G=46,8\%$. Na validação das equações obteve-se os indicativos estatísticos: MBE inferior a 5,0% para UV; inferior a 2,0% para PAR e inferior a 3,0% para IV. O RMSE variou até um máximo de 10,63%, com melhor desempenho para as equações diária. O coeficiente “d” de Willmott, superior a 0,9879, mostrou bom índice de ajustamento entre estimativa e medida. O desempenho das equações entre as radiações foi melhor na seqüência: PAR, IV e UV.

Palavras Chave: radiação solar global, radiação UV, PAR e IV, Estimativa das radiações UV, PAR e IV.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das radiações solares ultravioleta-UV (0,29 a 0,385 μ m), fotossintética-PAR (0,385-0,7 μ m) e infravermelha-IV (0,7 – 3,0 μ m), por meio de séries temporal e espacial, ou modelos de estimativa, é importante em muitas áreas científicas e tecnológicas. As séries e o modelo de estimativas das radiações permitem conhecer a disponibilidade energética diurna e anual em função do tempo e da radiação global, que normalmente é medida de rotina em redes meteorológicas.

O Brasil, país com grande potencial agrícola e florestal, atualmente encontra-se em pleno desenvolvimento tecnológico na área das fontes renováveis de energia como: conversão de energia solar térmica e fotovoltaica, biomassa e biodiesel, entre outras, e no entanto ainda não possui uma rede solarimétrica que permite gerar informações sobre radiações solares em toda extensão continental. O monitoramento de radiações solares é restrito basicamente às Universidades (Sousa et al., 2005; Tiba et al., 2005; Soares, et. Al., 2004; Oliveira et al., 2002 e Cavalcanti, 1991), que medem uma ou no máximo duas dessas radiações de rotina em locais distantes, o que inviabiliza o estudo variacional das radiações G, UV PAR e IV, até mesmo para uma única região.

Com esse propósito, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu / SP / Brasil, monitora simultaneamente as radiações: global, ultravioleta, fotossintética e a infravermelha de ondas curta, desde o ano 2000. Assim, objetivou-se neste trabalho, o desenvolvimento e a validação de equações de estimativa horária e diária, para as radiações UV, PAR e IV em função da radiação G, para condições de cobertura de céu em um único intervalo de variação de K_T ($0 < K_T < 1$).

MATERIAIS E MÉTODOS

Clima

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), com verão quente e úmido e inverno 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.

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.

A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm 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.

Instrumentação.

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 cosseno e a temperatura dos detectores da radiação global (Eppley PSP), radiômetro ultravioleta (CUV-3 da Kipp-Zonen) e do piranômetro infravermelho da (Eppley) estão apresentados na tabela 1.

| | Global | Ultravioleta | Infravermelho |
|------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
| Marca | Eppley | Kipp & Zonen | Eppley |
| Fator de Calibração | ±7,45µV/Wm ⁻² | 312µV/Wm ⁻² | ±8,12µV/Wm ⁻² |
| Range Espectral | 295-2800nm | 290-400nm | 695-2800nm |
| Tempo de resposta | 1s | 5ms | 2s |
| Linearidade | ±0,5% (de 0 a 2800 W/m ²) | < 1% | ±1% (de 0 a 700W/m ²) |
| Co-seno | ±1% (0<Z<70°) ±3% (70°≤Z<80°) | <±10% | ±5% |
| Resposta a temperatura | ±1% de -20°C a 40 °C | <±0,1/K | ±1% de -20°C a 40°C |

Tabela 1: Características operacionais dos radiômetros solares.

Na aquisição dos dados é utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias de 300 leituras ou 5 minutos. Diariamente os dados armazenados no módulo de memória SM192 da Campbell são transferidos para o PC através de uma interface SC532 e do software PC208w da Campbell. Inicialmente, os dados passam por um controle de qualidade, eliminando-se os valores expúrios, que causariam ausência de correlação. Numa segunda etapa, os dados são processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das radiações horárias, diárias e mensais.

As radiações UV, PAR e IV e global, integradas na hora ou no dia, são representadas pelo símbolo H_x^y , onde H indica integração da radiação x , no intervalo de tempo y (hora, dia). Portanto as radiações UV, PAR, IV e global integradas na hora são representadas por H_{UV}^h , H_{PAR}^h , H_{IV}^h e H_G^h , e integradas no dia H_{UV}^d , H_{PAR}^d , H_{IV}^d e H_G^d , respectivamente. As radiações H_{UV} , H_{PAR} , H_{IV} e H_G foram correlacionadas por meio de regressão linear simples passando pela origem.

Indicativos Estatísticos.

Os indicativos estatísticos *MBE* (Mean Bias Error), *RMSE* (Root Mean Square Error), e “d” de Willmott empregados na avaliação da performance das equações de estimativa horária e diária.

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

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

Onde: P_i representa os valores estimados, O_i os valores medidos, N o número de observações, $|P_i|$ o valor absoluto da diferença $P_i - \overline{O_i}$, e $|O_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \overline{O_i}$.

O indicativo *MBE* representa o desvio das médias e provê informações quanto à performance do modelo a longo prazo. O *RMSE* é a raiz quadrada do erro quadrático médio e informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo. Em geral, quanto menores os valores obtidos para *RMSE*, melhor performance dos modelos. O índice de ajustamento “d” variando de 0 a 1 representam o total desajustamento e ajustamento, entre a estimativa e a medida (Willmott 1981). A utilização dos indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e índice de ajustamento “d”, em conjunto é a alternativa adequada para validação de modelos estatísticos porque permite análise simultânea do desvio da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação as medidas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Base de Dados de radiações diária e horária

A base de dados das radiações utilizada na geração e validação das equações de estimativas das radiações UV, PAR e IV, compreendem os anos de 2001 a 2004. Os anos (2001 a 2004) foram usados na modelagem e o ultimo (2005) na validação. Na tabela 2 e 3 é apresentada uma estatística para cada radiação horária e diária por ano, quanto ao número de horas úteis, energia acumulada, energia média horária e diária, com desvios percentuais. O número de horas refere-se às horas em que as quatro radiações foram medidas simultaneamente e sem problemas de visão dos radiômetros solares no campo experimental.

Foram eliminados os dias em que ocorreram paralisações de pelo menos um dos radiômetros devido a problemas elétricos. No ano de 2001 foi eliminado 1 dia, 15 dias em 2002, 6 dias em 2003, 80 dias em 2004 e 37 dias em 2005. Foram eliminadas as horas do início do dia, das 5:30h as 7:30h e no final das 17:30h as 19:30h, devido ao horizonte, que é limitado por encostas e com presença de reservas florestais. No ano de 2001 foi eliminado 1431horas, 1441horas em 2002, 1420 horas em 2003, 1771horas em 2004 e 1459 horas em 2005.

| Ano | Radiação | Horas | Soma MJ/m ² | Média MJ/m ² | Desvio (%) | Mínimo MJ/m ² | Máximo MJ/m ² | Varição MJ/m ² |
|------|----------|-------|---------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 2001 | G | 3265 | 6263,8 | 1,92 | 51,32 | 0,02 | 4,13 | 4,12 |
| | UV | 3265 | 258,1 | 0,08 | 51,02 | 0,00 | 0,17 | 0,17 |
| | PAR | 3265 | 3081,5 | 0,94 | 50,95 | 0,00 | 2,05 | 2,05 |
| | IV | 3265 | 2924,1 | 0,90 | 51,94 | 0,00 | 1,97 | 1,97 |
| 2002 | G | 3153 | 5875,4 | 1,86 | 51,04 | 0,01 | 4,14 | 4,13 |
| | UV | 3153 | 244,8 | 0,08 | 50,74 | 0,00 | 0,18 | 0,18 |
| | PAR | 3153 | 2873,4 | 0,91 | 51,09 | 0,01 | 2,03 | 2,02 |
| | IV | 3153 | 2757,2 | 0,87 | 51,29 | 0,00 | 1,97 | 1,97 |
| 2003 | G | 3273 | 6107,9 | 1,87 | 51,27 | 0,02 | 4,05 | 4,03 |
| | UV | 3273 | 258,2 | 0,08 | 51,41 | 0,00 | 0,18 | 0,18 |
| | PAR | 3273 | 2993,2 | 0,91 | 51,57 | 0,01 | 2,04 | 2,02 |
| | IV | 3273 | 2856,5 | 0,87 | 51,32 | 0,00 | 1,88 | 1,88 |
| 2004 | GI | 2878 | 5125,7 | 1,78 | 55,14 | 0,01 | 4,12 | 4,11 |
| | UV | 2878 | 216,3 | 0,08 | 54,64 | 0,00 | 0,17 | 0,17 |
| | PAR | 2878 | 2553,8 | 0,89 | 56,14 | 0,00 | 2,18 | 2,17 |
| | IV | 2878 | 2355,6 | 0,82 | 55,04 | 0,00 | 1,86 | 1,86 |

Tabela 2: Estatística das radiações G, UV, PAR e IV horária no período de 2001 a 2004

A energia horária acumulada em cada ano é proporcional ao número de horas e foram maiores na ordem dos anos 2001, 2003, 2002 e 2004, respectivamente. A energia média horária, relação entre a energia acumulada e número de horas, foi maior na seqüência 2001, 2003, 2002 e 2004. A energia média horária da radiação global: 1,92MJ/m² em 2001; 1,86MJ/m² em 2002, 1,87 MJ/m² em 2003, 1,78MJ/m² em 2004, foi igual a soma das radiações médias horárias UV + PAR + IV. O desvio da média horária, em porcentagem, difere entre os anos e entre as radiações. Os maiores desvios foram maiores na seqüência dos anos de 2004, 2003, 2001 e 2002. Entre as radiações, o maior desvio da média foi da radiação PAR que variou 5,2%, de 50,95%(2001) a 56,14%(2004), seguido das radiações G com 4,1%, entre 51,04%(2002) a 55,14%(2004); IV com 3,75%, entre 51,29%(2002) a 55,04%(2004), e UV com 3,9%, entre 50,74%(2002) a 54,64%(2004).

A energia acumulada diária por ano é proporcional ao número de dias, e foram maiores na ordem dos anos 2001, 2003, 2002, e 2004, respectivamente.

O intervalo de variação, diferença entre a maior e menor energia horária, variou nos anos e entre as radiações. O maior intervalo foi no ano de 2002, seguido dos anos de 2001, 2004, 2003 respectivamente. Entre as radiações, o maior intervalo foi da radiação UV, que variou em 1,7%, de 0,17 MJ/m²(2001) a 0,18MJ/m²(2002), seguido das radiações G com 2,4%, de 4,03MJ/m²(2003) a 4,13MJ/m²(2002); IV com 5,9%, de 1,86MJ/m²(2004) a 1,97MJ/m²(2001) e PAR com 6,9%, de 2,02MJ/m²(2003) a 2,17MJ/m²(2004).

A energia média diária, relação entre a energia acumulada e o número de dias, foi maior na mesma seqüência dos anos, e igual a soma das radiações médias diárias UV + PAR + IV. O desvio da radiação média em porcentagem, variou entre os anos e radiações. Os maiores desvios foram na seqüência dos anos de 2004, 2003, 2001, 2002. Entre as radiações, o maior desvio da média foi da radiação IV que variou 6,17%, de 34,65%(2002) a 40,82%(2004), seguido das radiações G em 5,86%, de 34,01%(2002) a 39,87%(2004); a PAR de 5,74%, de 33,71%(2002) a 39,45%(2004) e a UV em 3,51%, de 34,65%(2002) a 38,16%(2004).

| ano | Radiação | Dias | Soma MJ/m ² | Média MJ/m ² | Desvio (%) | Mínimo MJ/m ² | Máximo MJ/m ² | Variação MJ/m ² |
|------|----------|------|------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 2001 | G | 364 | 6727,3 | 18,48 | 34,67 | 1,34 | 41,90 | 40,56 |
| | UV | 364 | 275,6 | 0,76 | 33,99 | 0,07 | 1,46 | 1,39 |
| | PAR | 364 | 3308,2 | 9,09 | 34,13 | 0,77 | 19,78 | 19,01 |
| | IV | 364 | 3145,1 | 8,64 | 35,62 | 0,50 | 20,65 | 20,15 |
| 2002 | G | 350 | 6173,2 | 17,64 | 34,01 | 1,10 | 31,21 | 30,11 |
| | UV | 350 | 257,5 | 0,74 | 33,47 | 0,04 | 1,29 | 1,25 |
| | PAR | 350 | 3017,0 | 8,62 | 33,71 | 0,52 | 15,26 | 14,75 |
| | IV | 350 | 2898,8 | 8,28 | 34,65 | 0,54 | 14,66 | 14,12 |
| 2003 | G | 359 | 6398,3 | 17,82 | 34,93 | 2,17 | 30,82 | 28,65 |
| | UV | 359 | 270,7 | 0,75 | 34,21 | 0,11 | 1,28 | 1,17 |
| | PAR | 359 | 3131,5 | 8,72 | 34,51 | 1,17 | 14,98 | 13,81 |
| | IV | 359 | 2996,1 | 8,35 | 35,72 | 0,87 | 14,64 | 13,77 |
| 2004 | G | 286 | 4817,8 | 16,85 | 39,87 | 1,05 | 31,43 | 30,38 |
| | UV | 286 | 201,6 | 0,70 | 38,16 | 0,06 | 1,29 | 1,23 |
| | PAR | 286 | 2373,2 | 8,30 | 39,45 | 0,63 | 15,73 | 15,10 |
| | IV | 286 | 2243,1 | 7,84 | 40,82 | 0,35 | 14,43 | 14,08 |

Tabela 3: Estatística das radiações G, UV, PAR e IV diária no período de 2001 a 2004.

O intervalo de variação das energias diárias, diferença entre a maior e menor energia diária, variou entre os anos e as radiações. O maior intervalo foi no ano de 2001, seguido dos anos de 2004, 2002 e 2003. Entre as radiações, o maior intervalo foi da radiação IV que variou 31,6% de 13,77MJ/m²(2003) a 20,15MJ/m²(2001), seguido das radiações G com 29,3%, de 28,65MJ/m²(2003) a 40,56 MJ/m²(2001); a PAR com 27,35%, de 13,81MJ/m²(2003) a 19,01MJ/m²(2001), e a UV com 15,8% de 1,17MJ/m²(2003) a 1,39MJ/m²(2001).

Equações de Estimativa Horária.

A figura 1 mostra as correlações das radiações horárias UV, PAR e IV função radiação horária G.

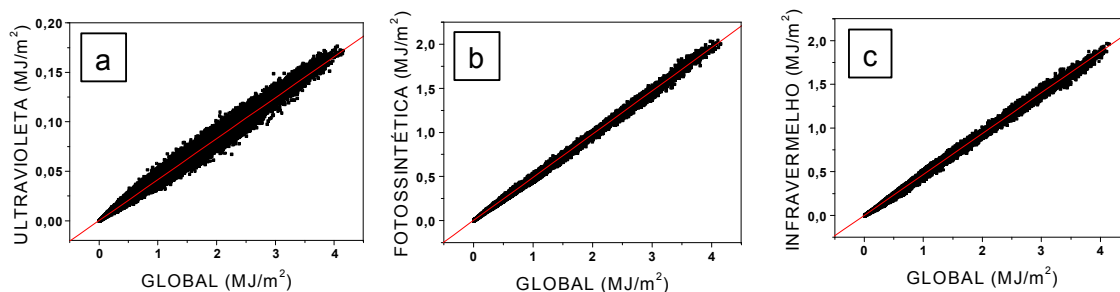


Figura 1: Correlações horárias das radiações: a) UV, b) PAR e c) IV em função de global.

A dispersão das correlações é maior na seqüência para as radiações UV, IV e PAR, e conseqüentemente o melhor ajuste é na ordem inversa: PAR, IV e UV, com coeficientes de determinação $R^2_{par}=0,9980$; $R^2_{iv}=0,9974$ e $R^2_{uv}=0,9825$, respectivamente. Os coeficientes de determinação próximos de 1 mostram ótima correlação entre as radiações UV, PAR e IV, com a G. Para a radiação PAR, o coeficientes de determinação é da mesma ordem de grandeza encontrada por Papaioannou et al., (1993, 1996) e superior aos de Karalis (1989).

As equações de estimativa linear e seus coeficientes de correlação estão na tabela 4.

| Intervalo | Equações de Estimativa | R ² |
|-------------------------|----------------------------|----------------|
| $0 \leq K_t^h \leq 1,0$ | $H_{UV}^h = 0,04146H_G^h$ | 0,9794 |
| | $H_{IV}^h = 0,49057H_G^h$ | 0,9968 |
| | $H_{PAR}^h = 0,46797H_G^h$ | 0,9978 |

Tabela 4: Equações horárias para as radiações UV, PAR e IV, em função da Global e coeficientes de determinação.

Os coeficientes angulares :

$H_{UV}^h / H_G^h = (0,042 \pm 3,11E-5)$; $H_{PAR}^h / H_G^h = (0,490 \pm 1,2E-4)$ e $H_{IV}^h / H_G^h = (0,468 \pm 1,38E-4)$ quantificam as frações horárias das radiações solares UV, PAR e em relação a radiação global. Percentualmente, as frações UV em 4,2%, da PAR em 49,0% e IV em 46,8% representam valores médios dos intervalos de variação das frações. Mais precisamente, a fração UV variou no intervalo de 3,0% a 6,9%, a PAR de 43,0% a 63,0%, e a IV de 23,0% a 53,0%.

Para a UV, a fração média de 4,2%, comparado com outros estudos que utilizaram a regressão linear passando pela origem, é maior que 3,1% para Valencia (Martinez-Lozano et al., 1999); 4,0% para Córdoba (Pedrós et al., 2000), ambas na Espanha; que os 3,8% para Makkah na Arábia Saudita (Koghaly y Al-Bar., 1992), e 4,0% para Granada (Foyo-Moreno et al., 1999). É igual a 4,2% de Córdoba, e menor que os 5,0% de Valencia (Cañada., 2003) e 7,7% para Kwangju na Korea do Sul (Ogunjobi & Kim, 2004), respectivamente. Para a PAR, a fração média de 49,0% é superior as frações média de 43,2% para Atenas (Papoioannou et al., 1996), e de 43,9% para Tibet Plateau (Zhang et al., 2000).

Equações de Estimativa Diária

A figura 2 mostra as correlações entre as radiações diárias UV, PAR e IV, com a radiação global. As equações de estimativa linear passando pela origem e os coeficientes de determinação R^2 estão apresentados na tabela 5. A dispersão das correlações, também foi maior na seqüência: UV, IV e PAR, e conseqüentemente, o ajuste foi na seqüência inversa, melhor para PAR, IV e UV respectivamente. Os coeficientes de determinação $R_{par}^2=0,9976$; $R_{iv}^2=0,9967$ e $R_{uv}^2=0,9795$ elevados e próximos de 1 mostram que as radiações UV e PAR, estão muito melhores relacionadas com G que a radiação IV.

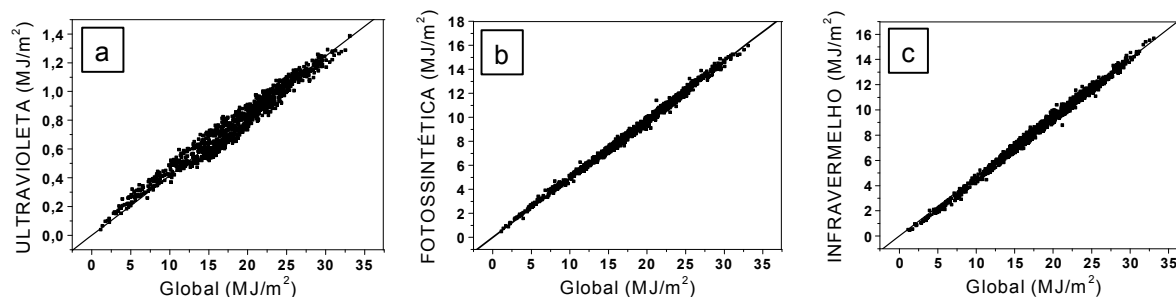


Figura 2: Correlações diárias das radiações: a) UV, b) PAR e c) IV em função da radiação Global.

Os coeficientes angulares das equações de estimativa diária $H_{UV}^d / H_G^d = (0,042 \pm 1,3E-5)$; $H_{PAR}^d / H_G^d = (0,490 \pm 3,9E-4)$; $H_{IV}^d / H_G^d = (0,468 \pm 3,4E-4)$ são iguais aos das equações de estimativa horária e representam as frações médias diária percentuais das radiações UV= 4,2%, PAR= 49,0% e IV= 46,8%. Mais precisamente, a fração UV variou no intervalo de 3,25% a 6,25%, a PAR de 44,0% a 59,0% e a IV de 33,0% a 55,0%.

Para a UV, a fração média de 4,2%, comparado com outros trabalhos, é maior que os 3,0% para Valencia (Martinez-Lozano et al ., 1999) e na mesma ordem de grandeza das frações de outros locais como 3,4% para região Urbana do Cairo (Robba 2004); 5% para Potsdam na Alemanha (Fiester & Grasnick 1992); 4,7% para Dhahran na (Elhadiy et al., 1990); 4,62% para o Kuwait (Al-Aruri et al ., 1988); 5,5% para Corvalis em Oregon (Rao et al ., 1984); 4,8% em Almeria, 4,6% em Madrid e 3,98 para Córdoba (Ramirez Santiago et al., 2000). Para a PAR, a fração média de 49,0%, é superior as frações de outros pesquisadores 45,7% (Rao et al., 1984); 47% (Stanhill & Fuchs., 1977), 44,0% (Howell et al., 1983), 47,0% (Blackburn & Proctor., 1983), 43,9% (Zhang et al ., 2000), 47,3% (Papaionnou et al 1993) e 41,8% (Jacovides et al ., 2004), e menor que os 51,0% (Szeics, 1974).

| Intervalo | Equações de Estimativa | R^2 |
|-------------------------|----------------------------|--------|
| $0 \leq K_T^d \leq 1,0$ | $H_{UV}^d = 0,04155H_G^d$ | 0,9204 |
| | $H_{PAR}^d = 0,48935H_G^d$ | 0,9904 |
| | $H_{IV}^d = 0,46928H_G^d$ | 0,9870 |

Tabela 5: Equações diárias para as radiações UV, PAR e IV, em função de G e coeficientes de determinação.

Validação das Equações de Estimativas Horária e Diária

Os indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e coeficiente “d” de ajustamento, obtidos na validação das equações horária e diária, estão apresentadas na tabela 6. O indicativo estatístico *MBE* horário e diário variou entre 1,15% a -4,8% para H_{UV} ; de 0,2 a -1,62% para H_{PAR} e de -0,2% a 2,45% para H_{IV} . No geral, o resultado foi considerado bom estatisticamente, pois mostra que as equações de estimativas sub-ou-superestimam na mesma ordem de grandeza do erro experimental da medida.

Uma análise comparativa das energias médias com os desvios das radiações G, UV PAR e IV dos anos de 2001 a 2004 e as energias médias de 2005 (tabela 6) mostra que as energias médias horária de 2005: $G = 1,80MJ/m^2$, $UV = 0,07MJ/m^2$, $PAR = 0,90MJ/m^2$ e $IV = 0,83MJ/m^2$ e as energias médias diárias de 2005: $G = 17,07MJ/m^2$, $UV = 0,69MJ/m^2$, $PAR = 8,50MJ/m^2$ e $IV =$

7,88MJ/m², utilizadas na validação, encontra-se dentro do intervalo da variação estatística dos anos de 2001 a 2004. Na base horária de 2001 a 2004 as energias médias horárias variaram nos intervalos: 0,89MJ/m² < G < 2,83MJ/m², 0,04MJ/m² < UV < 0,122MJ/m², 0,44MJ/m² < PAR < 1,40MJ/m² e 0,42MJ/m² < IV < 1,32MJ/m². Para a base diária de 2001 a 2004 as energias médias diárias variaram nos intervalos: 11,41MJ/m² < G < 24,1MJ/m², 0,48MJ/m² < UV < 1,0MJ/m², 5,63MJ/m² < PAR < 11,77MJ/m² e 5,26 MJ/m² < IV < 11,34MJ/m². Assim a base de dados das radiações G, UV PAR e IV usada nas validações das equações de estimativas é estatisticamente igual a base de dados usado na geração das equações de estimativas, portanto, os resultados na validação expressarão o desempenho real das equações de estimativa sem dependência das variações climáticas.

| ano | Radiação | Horas | Acumulado MJ/m ² | media MJ/m ² | Sd (MJ/m ²) | Sd (%) | Min MJ/m ² | Max MJ/m ² | Varição MJ/m ² |
|-------------|----------|-------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 2001 a 2004 | G | 12569 | 23372,7 | 1,86 | 0,97 | 52,14 | 0,01 | 4,14 | 4,13 |
| | UV | 12569 | 977,3 | 0,08 | 0,04 | 51,89 | 0,00 | 0,18 | 0,18 |
| | PAR | 12569 | 11501,9 | 0,92 | 0,48 | 52,35 | 0,00 | 2,18 | 2,17 |
| | IV | 12569 | 10893,5 | 0,87 | 0,45 | 52,38 | 0,00 | 1,97 | 1,97 |
| 2005 | G | 3214 | 5785,2 | 1,80 | 0,93 | 51,83 | 0,02 | 4,00 | 3,98 |
| | UV | 3214 | 233,5 | 0,07 | 0,04 | 51,87 | 0,00 | 0,17 | 0,17 |
| | PAR | 3214 | 2894,9 | 0,90 | 0,48 | 53,31 | 0,01 | 2,27 | 2,26 |
| | IV | 3214 | 2656,9 | 0,83 | 0,42 | 50,93 | 0,00 | 1,79 | 1,79 |
| ano | Radiação | dias | Acumulado MJ/m ² | media MJ/m ² | Sd (MJ/m ²) | Sd (%) | Min MJ/m ² | Max MJ/m ² | Varição MJ/m ² |
| 2001 a 2004 | G | 1359 | 24116,6 | 17,75 | 6,34 | 35,74 | 1,05 | 41,90 | 40,85 |
| | UV | 1359 | 1005,4 | 0,74 | 0,26 | 34,83 | 0,04 | 1,46 | 1,42 |
| | PAR | 1359 | 11829,8 | 8,70 | 3,07 | 35,32 | 0,52 | 19,78 | 19,27 |
| | IV | 1359 | 11282,9 | 8,30 | 3,04 | 36,57 | 0,35 | 20,65 | 20,30 |
| 2005 | G | 328 | 5598,9 | 17,07 | 17,07 | 33,01 | 2,92 | 29,75 | 26,83 |
| | UV | 328 | 226,2 | 0,69 | 0,69 | 32,47 | 0,15 | 1,22 | 1,07 |
| | PAR | 328 | 2788,7 | 8,50 | 8,50 | 32,99 | 1,56 | 15,11 | 13,55 |
| | IV | 328 | 2583,9 | 7,88 | 7,88 | 33,50 | 1,21 | 13,78 | 12,57 |

Tabela 6: Estatística das radiações G, UV, PAR e IV horária e diária para os anos de 2001 a 2004 e para o ano de 2005.

Na tabela 7 é apresentado os indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e *d* de Willmott da comparação entre as estimativas horária e diária e as medidas.

| Intervalo | Radiação | MBE(%) | RMSE(%) | d |
|-------------------------|----------|--------|---------|--------|
| $0 \leq K_T^h \leq 1,0$ | UV | -1,67 | 9,94 | 0,9933 |
| | PAR | -0,70 | 4,46 | 0,9987 |
| | IV | 0,90 | 5,27 | 0,9983 |
| $0 \leq K_T^d \leq 1,0$ | UV | -0,66 | 8,39 | 0,9879 |
| | PAR | -0,57 | 2,96 | 0,9986 |
| | IV | 0,69 | 3,73 | 0,9978 |

Tabela 7: Indicativos estatísticos *MBE* (%), *RMSE* (%), e *d* da validação das equações de estimativa das radiações horária e diária UV, PAR e IV, em função de G.

Validação das Equações de Estimativas Horária e Diária

O indicativo *MBE* mostra por meio do sinal negativo, que H_{UV} e H_{PAR} subestimam a medida, enquanto o *MBE* com sinal positivo, indica que H_{IV} superestima a medida. Na estimativas horária, H_{UV}^h e H_{PAR}^h subestimam em -1,67% e -0,7% e H_{IV}^h superestima em 0,90%, enquanto que na diária H_{UV}^d e H_{PAR}^d subestimam em -0,66% e -0,67% e H_{IV}^d superestima em 0,69%. O indicativo *MBE* foi melhor para a estimativa diária. No geral, o resultado para o indicativo estatístico *MBE* inferiores a $\pm 5,0\%$, é muito bom comparado aos *MBE* das validações de modelos estatísticos com outras radiações.

O indicativo estatístico $RMSE$ nas validações das equações de estimativas horária e diária, variou até um máximo de 10,0%. Entre as partições, a diária foi mais eficiente. Em função das radiações, o melhor desempenho foi da H_{PAR} com $RMSE$ de 2,94% para H_{PAR}^d e 4,46% para H_{PAR}^h . O resultado obtido para o indicativo $RMSE$, foi considerado positivo estatisticamente, tendo em vista que são comparáveis aos citados na literatura para diferentes validações de modelos de estimativas em diferentes locais e com outras radiações. Os coeficientes “d” de Willmott superior a 0,9879 são elevados e mostram bom nível de ajustamento da estimativa em relação à medida, nas partições horária e diária. O resultado para os coeficientes “d” de ajuste para a estimativa horária foram superiores aos da diária. Entre as radiações, o melhor desempenho foi na seqüência para PAR, UV e IV, respectivamente.

CONCLUSÕES

Para a base de dados de 4 anos das radiações G, UV, PAR e IV em análise podemos concluir que: na condição total de cobertura de céu ($0 < K_T < 1$), com índices de claridade médio de $\bar{K}_T^h = 50,7\%$ e $\bar{K}_T^d = 56,6\%$ respectivamente, as correlações horária e diária, das radiações UV, PAR e IV e a radiação G, geraram equações de estimativa lineares simples, com coeficientes de determinação elevados e próximo de 1. As equações de estimativas horárias, com R^2 mais elevados, mostraram que as radiações UV, PAR e IV estão melhores correlacionadas a radiação G, que as equações de estimativa diária. E entre as radiações, nas duas partições, as correlações são mais precisas na ordem decrescente PAR, IV e UV. Os coeficientes angulares das equações de estimativa horária e diária foram iguais e quantificam as frações percentuais das radiações UV, PAR e IV da radiação global, como 4,2%; 49,0% e 46,8%, respectivamente, e mostram ainda que as equações de estimativas horária e diária podem ser utilizadas, indistintamente da partição, nos cálculos da energia solar integrada na hora ou dia. A validação, por meio dos indicativos estatísticos MBE , $RMSE$ e “d”, mostrou que o desempenho das equações de estimativa é muito bom estatisticamente, tanto na precisão, baixos valores dos indicativos MBE e $RMSE$, quanto na exatidão, elevados índice de ajustamento “d”. A eficiência da estimativa na validação foi maior para as equações de estimativa diária, que apresentaram menores indicativos MBE e $RMSE$ e maior índice de ajustamento “d”. Entre as radiações, nas duas partições, o resultado foi melhor na seqüência para as estimativas das radiações PAR, IV e UV.

REFERENCIAS

- AL-AURIM, S., AL-JAMAL, K., SHABAN, N. An assessment of global ultraviolet solar radiation in the range (0.290-0.385 μm) in Kuwait. *Solar Energy*, v. 41, p.159-162, 1988.
- BLACKBURN, W.J., PROCTOR, J.T.A. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Sol. Energy*, v.31, p.233-4, 1983.
- CAÑADA, J. PEDROS, G. BOSCA, J.V. Relationships between UV (0.290-0.385 μm) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy*, v. 28, p.199-217, 2003.
- CAVALCANTI, E.S.C. Analysis of experimental solar radiation for Rio de Janeiro, Brazil. *Solar Energy*, v.47, p.231-235, 1991.
- ELHADIDY, M.A., ABDEL-NABI, D.Y. and KRUSS, P.D. Ultraviolet solar radiation at Dhahram (Saudi Arabia). *Solar Energy*, v.44, p.315-319, 1990.
- FIESTER, U. GRASNICK, K.H. Solar UV radiation measurements at Potsdam, *Solar Energy*, v. 49, n. 6, p. 541-548, 1992.
- FOYO-MORENO, I., VIDA, J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (295-385nm). *J. Appl. Meteorol.* v. 38, P. 1020-1026, 1999.
- HOWELL, T.A., MEEK, D.W., HATFIELD, J.L. Relationship of photosynthetically active radiation to shortwave radiation in the San Joaquin Valley. *Agric. Meteorol.*, v.28, p.157-75, 1983.
- JACOVIDES, C.P., TIMVIOS, F.S., PAPAIOANNOU, G., ASIMAKOPOULOS, D.N., THEOFILOU, C.M. Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 121, p.135-140, 2004.
- KARALIS, J. D., Characteristics of direct photosynthetically radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.48, p.225-34.
- KHOGALI, A. AND AL-BAR, O.F. 1992. ‘A study of solar ultraviolet radiation at Makkah solar station’, *Solar Energy*, 48, 79.
- MARTINEZ-LOZANO, J.A., TENA, F. and UTRILLAS, M.P. RATIO OF UV TO GLOBAL BROAD BAND IRRADIATION IN VALENCIA, SPAIN, *Int. J. Climatol.* V.19, p. 903-911, 1999.
- MARTÍNEZ-LOZANO, J.A., CASANOVAS, A.J. and UTRILLAS, M.P. Comparison of global UV (290 -385 nm) and global irradiation measured the warm season in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology*, v.14, p.93-102, 1994.
- OLIVEIRA, A.P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J., SOARES, J. Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy*, v.71, p.59-73, 2002.
- OGUNJOBI, K.O., KIM, Y.J. 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*, v. 71, p. 193-214, 2004.
- PAPAIOANNOU, G., NIKOLIDAKIS, G., ASIMAKOPOULOS, D.N., RETALIS, D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agric. For. Meteorol.*, v.81, p.287-98, 1996.
- PAPAIOANNOU, G., PAPANIKOLAOU, N., RETALIS, D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Theor. Appl. Clim.*, v.48, p.23-7, 1993.
- PEDRÓS, G., MARTINEZ, M. P., LOPEZ, A. Modelización de la dependência entre la radiation ultravioleta horária y la radiación total horária para Córdoba. Espanha. Congresso Ibérico de Energia Solar, 9. Córdoba, 27 a 29 de março de 2000.
- ROBAA, S.M. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy*, v.77, p.251-259, 2004.

- SANTIAGOSA, L.R. LÓPEZ, L.M. ORTÍN, S.C.M. GÁLVEZ, B.J. aplicación de técnicas de aprendizaje automático a la determinación de la radiación ultravioleta diaria (295-385nm) a partir de la radiación global. In IX Congreso Ibérico de Energía Solar, y III Jornadas Técnicas sobre Biomassa. Córdoba, 27 al 29 de marzo de 2000.
- SOARES, J., OLIVEIRA, A.P., BOZNAR, M.Z., MLAKAR, P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy*, v.79, p.201-204, 2004.
- SOUZA, J.L., NICÁCIO, R.M., MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*, v.30, p.1203-1220, 2005.
- STANHILL, G., FUCHS, M. The relative flux density of photosynthetically radiation. *J. of Appl. Ecol.*, v.14, p.317-22, 1977.
- SZEICZ, G. Solar radiation for plant growth. *J. Appl. Ecol.*, v.11, p.617-36, 1974.
- TIBA, C. AGUIAR, R., FRAIDENRAICH, N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy*, v.30, p.957-966, 2005.
- ZHANG, X., ZHANG, Y., ZHOUB, Y. Masuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during april-october. *Agric. Meteorol.*, v.102, p.207-12

ABSTRACT: This work presents equations to estimate the hourly and daily solar radiation components ultraviolet (UV), photosynthetically active (PAR), and infrared (IV) from the total global (G) radiation measures carried out from 2001 to 2005, in Botucatu, SP, Brazil. The UV, PAR and IV radiations were correlated with the global radiation, with R^2 near 0.99. The equations showed the following results to UV, PAR and IV fractions of the global spectrum: $UV/G = 4.2\%$; $PAR/G = 49.0\%$ and $IV/G = 46.8\%$. The statistical indicators of validation were: MBE less than 5.0% for UV; less than 2.0% for PAR, and less then at 3,0% for IV. RMSE varied until a maximum of 10.63%, with better results for the daily equations. The " d " of Willmott's coefficient, superior of 0.9879, showed good adjustment index between the estimate and the measure. The better results for the equations among the radiations followed the sequence: PAR, IV and UV.

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