

AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (PAR) EM SÃO PAULO, SP*

Emerson Galvani**

RESUMO:

No presente trabalho são apresentadas as relações entre a irradiância fotossinteticamente ativa (RFA ou PAR) e a irradiância solar global (Rglo) observadas na cidade de São Paulo (SP). Os valores encontrados para a relação PAR/Global estão dentro do intervalo apresentado na literatura. Os modelos lineares propostos podem ser utilizados em estimativas da PAR em localidades com características climáticas semelhantes às de São Paulo (SP). Sugere-se que a atenuação da PAR em São Paulo (44,6%) quando comparada a de Botucatu (48,0%), para toda a série de dados, pode ser um efeito das diferentes concentrações de poluentes nas duas localidades, sendo, contudo, uma questão não conclusiva. Para o período com umidade relativa do ar reduzida e coeficiente de transmissividade atmosférica (kt) elevado observa-se melhora no coeficiente de determinação, contudo, a relação PAR/Global permanece dentro dos intervalos obtidos para outras condições de kt.

PALAVRAS-CHAVE:

Radiação fotossinteticamente ativa; Radiação solar global; Transmissividade atmosférica.

ABSTRACT:

The study presents relationships obtained between photosynthetic active radiation (PAR) and global radiation observed in São Paulo city with frequency of five minutes. Values obtained for PAR/Global ratio are similar of those present by literature. Therefore, linear models proposed here can be used for PAR estimation in regions with similar climate to that of São Paulo. Data analysis showed greater PAR attenuation in São Paulo than that observed in Botucatu, what can be partially explained by differences in atmospheric pollutants concentrations over the two sites. This assumption must be though verified.

KEY WORDS:

Photosynthetically active radiation; Solar global radiation; Atmospheric transmissibility.

INTRODUÇÃO

A importância atribuída ao intervalo espectral denominado PAR ou RFA (Photosynthetically Active Radiation ou Radiação Fotossinteticamente Ativa), limitada entre 0,4 μ m e 0,7 μ m de comprimento de onda, vem da sua função exercida no metabolismo vegetal pela quantidade de radiação solar potencialmente disponível para os processos fotossintéticos. Os primeiros estudos referentes

a esta componente da radiação solar foram realizados por Szeics, (1966), MacCree, (1972) e MacCree (1973). Responsável por ativar o processo de fotossíntese, a PAR representa a maior parte da energia luminosa que é convertida em energia química, podendo assim ser armazenada e remobilizada para as atividades metabólicas celulares. A radiação ultravioleta também contribui para a ocorrência do processo de fotossíntese, porém de forma

*Parte deste trabalho foi apresentado no Workshop Internacional sobre Clima e Recursos Naturais dos países de língua portuguesa: Parcerias na área do Clima e Meio Ambiente (WSCRA08) ocorrido na Ilha do Sal, Cabo Verde, em março de 2008.

**Professor Doutor do Departamento de Geografia da FFLCH/USP. E-mail: egalvani@usp.br

pouco significativa, pois representa cerca de 3 a 5% da radiação solar global (ASSUNÇÃO; ESCOBEDO, 2000).

Em cálculos de eficiência fotossintética, a fração PAR é frequentemente considerada constante em relação à radiação solar global. Szeics (1974) estimou a fração PAR como sendo da ordem de 50% da radiação solar global. Contudo, diferentes resultados foram obtidos por outros autores, com razões que variaram entre 44% e 69% (BRITTON; DODD, 1976; ASSIS; MENDES, 1989; PAPAIOANNOU *et al.*, 1996, GOMES; ESCOBEDO, 2003 e GALVANI; DECHANDT, 2003). Diversos pesquisadores propuseram, com base em séries de dados obtidos em intervalos de tempo e regiões diferentes do globo, equações distintas para a estimativa da PAR a partir da radiação solar global, encontrando variações sazonais da relação PAR/global, fundamentalmente relacionadas às condições atmosféricas, como índices de umidade e nebulosidade, ou mesmo, à presença de aerossóis na atmosfera (ALADOS *et al.*, 2000, ALADOS; ALADOS-ARBOLEDAS, 1999, GOMES *et al.*, 2003).

No Brasil, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos no sentido de se caracterizar a radiação fotossinteticamente ativa em diferentes regiões do país. Entretanto, pouco se tem estudado sob condições de poluição atmosférica, como é o caso da cidade de São Paulo, assunto de grande relevância, principalmente, quanto a aspectos relativos ao meio ambiente associado a regiões urbanas.

Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivos: a) avaliar a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e suas relações com a radiação solar global na cidade de São Paulo, em função das condições atmosféricas locais e; b) correlacionar a PAR com a radiação solar global na escala instantânea e propor uma alternativa para sua estimativa em função da radiação solar global nas diferentes estações do ano, assim como, distintos intervalos de cobertura de céu (nublado, parcialmente nublado e limpo) e, c) Comparar os valores obtidos nas condições atmosféricas da cidade de São Paulo, SP, com aqueles obtidos na cidade de Botucatu, SP considerado como ambiente rural.

MATERIAL E MÉTODOS

O monitoramento das irradiâncias global e fotossinteticamente ativa (PAR) foi realizado no período de 01 de maio de 2003 a 29 de fevereiro de 2004. A radiação solar global foi monitorada na estação meteorológica do Laboratório de Climatologia e Biogeografia, LCB, do departamento de Geografia da Universidade de São Paulo (latitude: 23,4°S; Longitude: 46,7°W; Altitude: 742 m acima do NMM) utilizando um saldo radiômetro modelo CNR1 (Figura 1), com faixa espectral entre 0,3 a 2,8 mm. Para monitoramento da radiação solar fotossinteticamente ativa, utilizou-se um sensor quântico LI-COR com faixa espectral entre 0,4 e 0,7 mm instalado na plataforma micrometeorológica do Instituto de Astronomia e Geofísica da USP (IAG/USP).



Figura 1: Saldo Radiômetro modelo CNR1 (esquerda) e sensor quântico LI-COR (direita).

Fonte da figura a esquerda: www.kippzonen.com

Fonte da figura a direita: Gomes, 2003.

Para a conversão de unidades dos sinais gerados pelos sensores quânticos, de mE/J para $W\ m^{-2}$, utilizou-se o fator de conversão de energia de $4,6\ mE\ J^{-1}$, recomendado pelo manual da LI-COR. O coeficiente de transmissividade

$$k_t = \frac{I_G}{I_o}$$

A irradiância no topo da atmosfera (I_o) foi calculada instantaneamente conforme Iqbal

$$I_o = I_{sc} E_o (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega)$$

Onde I_{sc} representa a constante solar equivalente a $1367\ W\ m^{-2}$, E_o é o fator de correção da excentricidade da órbita da terra, δ é a declinação solar; ϕ é a latitude local e ω é o ângulo horário. Os valores de kt foram agrupados e classificados nos seguintes intervalos:

$kt < 0,30$ – cobertura de céu nublado;

$0,30 < kt < 0,65$ – cobertura de céu parcialmente nublado;

$kt > 0,65$ – cobertura de céu limpo.

O banco de dados foi revisado buscando-se eliminar possíveis erros na coleta, armazenamento ou na transferência dos dados. Os valores negativos e os zeros absolutos foram excluídos. As relações entre as variáveis foram obtidas por meio de regressão linear simples, sendo que o coeficiente angular da reta de regressão representa a razão entre a PAR e a global.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Estudo de caso

A Figura 01 apresenta as curvas de irradiância solar no topo da atmosfera (I_o), global e PAR para um dia com céu limpo (17/05/

(kt) foi obtido pela relação entre a irradiância solar global (I_G) e a do topo da atmosfera (I_o), como segue abaixo:

equação 01.

(1980), pela equação:

equação 02.

2003). Para esse dia específico, a energia incidente no topo da atmosfera e integrada do nascer ao ocaso do sol totalizou $24,49\ MJ\ m^{-2}$. Ao interagir com a atmosfera, os processos de absorção, reflexão e difusão reduzem o nível de energia a uma fração daquela incidente no topo da atmosfera. Essa redução depende da maior ou menor concentração dos constituintes atmosféricos. O exemplo do dia 17 de maio de 2003 mostra uma redução de 32% da energia incidente no topo, ou seja, a transmissividade neste dia foi de 68% ($16,83\ MJ\ m^{-2}$). Do total incidente em superfície, a radiação na região espectral do visível (PAR) também apresenta redução, totalizando $8,20\ MJ\ m^{-2}$, o que representa 49% da global incidente e 33% da radiação recebida no topo da atmosfera. Nesse dia, em especial, 1/3 da energia solar recebida no topo da atmosfera seria efetivamente passível de ser utilizada em processos fotossintéticos e de produção de biomassa pelos vegetais.

A Figura 02 apresenta as mesmas informações da Figura 01, mas para um dia com céu parcialmente nublado (17/05/2003). Pela forma da curva, percebe-se que até aproximadamente 11h30min o céu deveria estar limpo e após este horário, haveria presença de nebulosidade com picos nos níveis de irradiância global e PAR. A curva de I_o não sofre a interferência da nebulosidade por sua estimativa

considerar a ausência da atmosfera. A transmissividade atmosférica (I_g/I_0) para esse dia foi de 52%. Cerca de 50% da global correspondeu ao espectro da PAR (PAR/global). Para esse dia, $\frac{1}{4}$ da radiação solar incidente no topo da atmosfera correspondeu a PAR. Neste

dia, a biomassa produzida pelos vegetais (sem considerar outros efeitos como água no solo e temperatura do ar) seria relativamente menor que a do exemplo da figura 1, uma vez que a PAR integrada equivaleu a $6,49 \text{ MJ m}^{-2}$.

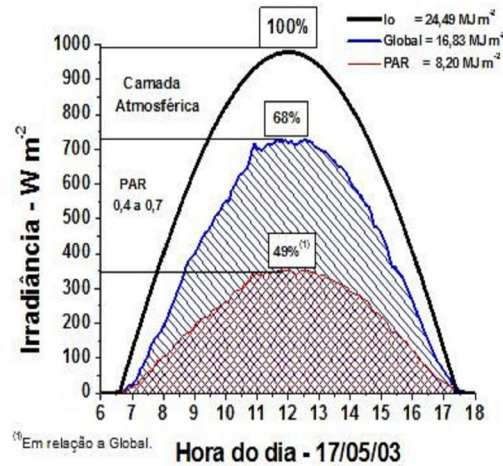


Figura 01: Variação da irradiação solar no topo da atmosfera (I_0), global e PAR em superfície em um dia com céu limpo. São Paulo, SP, 17/05/03. (Fonte: GALVANI, DECHANDT, 2003).

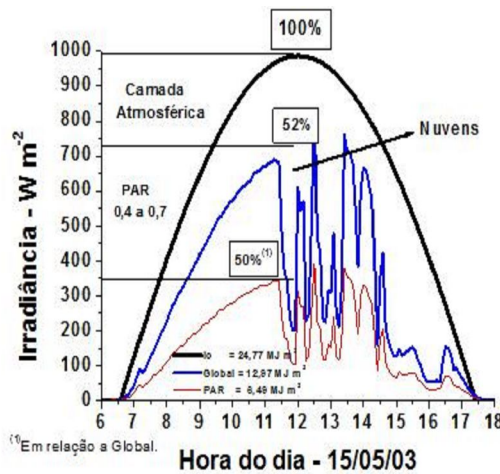


Figura 02: Variação da irradiação solar no topo da atmosfera (I_0), global e PAR em superfície em um dia com céu parcialmente nublado. São Paulo, SP, 15/05/03. (Fonte: GALVANI, DECHANDT, 2003).

2. Modelos Sazonais de estimativa da PAR

A Figura 3 apresenta a relação linear entre a irradiância PAR e a global para todo o período analisado (01/05/2003 a 29/02/2004). Percebe-se que a PAR representou 44,6% do total da irradiância global incidente em superfície. Em Botucatu (SP), localizada em área menos urbanizada que São Paulo Gomes e Escobedo (2003) trabalhando com valores integrados em escala horária e com todos os tipos de cobertura de céu obtiveram uma relação de 48% entre a PAR e global. Ainda nesta mesma localidade e com a mesma base de dados, Gomes *et al.* (2003), trabalhando em escala diária obtiveram os mesmos 48% para a relação PAR/Global. Esta diferença entre as duas localidades pode estar associada a dois fatores: em primeiro lugar, a uma maior atenuação da PAR na RMSP devido à alta concentração de poluentes na atmosfera e em segundo, a uma diferença na constante de calibração dos sensores quânticos, que necessitam pelo menos de uma re-calibração a cada seis meses de uso. Oliveira *et al.* (2002) comparando os valores de irradiâncias nestas duas cidades com altitudes e latitudes semelhantes, para dias limpos no mês de julho, observaram valores menores em São Paulo: uma redução de 24% na radiação solar global e 45% na radiação solar direta. Ainda estes autores descrevem adicionalmente e com bastante propriedade as características geográficas e climáticas das duas localidades.

A figura 4 apresenta a relação entre a PAR e global para as diferentes estações do ano. A relação PAR/Global variou ao longo das estações de um mínimo de 42,9%, para a

estação do verão a um máximo de 45,7%, para a estação da primavera.

Papanioannou *et al.* (1996), trabalhando em Atenas (Grécia), com dados integrados a cada hora, obtiveram as seguintes relações para as estações do ano:

Todo o período: $PAR=0,436*Global$ (MJ m⁻² dia⁻¹)
 Outono: $PAR=0,433*Global$ (MJ m⁻² h⁻¹)
 Inverno: $PAR=0,419*Global$ (MJ m⁻² h⁻¹)
 Primavera: $PAR=0,432*Global$ (MJ m⁻² h⁻¹)
 Verão: $PAR=0,446*Global$ (MJ m⁻² h⁻¹)

Estes autores apresentam ainda uma vasta revisão sobre a relação PAR/Global, indicando os resultados de pesquisas para localidades distintas do globo, pelos quais mostra que a esta relação pode ser alterada em função da escala de medidas utilizadas (instantânea, horária ou diária), do tipo de cobertura do céu (limpo, parcialmente nublado e nublado) e do período do ano (sazonalidade). Cabe ainda destacar que o limite de comprimento de onda utilizado para definir o espectro da PAR pode variar de 295 a 700 nm dependendo do tipo de sensor ou do filtro utilizado o que eventualmente pode resultar em variações na relação PAR/Global.

Os resultados para a localidade de São Paulo, SP indicam as seguintes relações:

Todo o período: $PAR=0,446*Global$ (W m⁻²) R²=0,97
 Outono: $PAR=0,451*Global$ (W m⁻²) R² =0,98
 Inverno: $PAR=0,448*Global$ (W m⁻²) R² =0,98
 Primavera: $PAR=0,457*Global$ (W m⁻²) R² =0,97
 Verão: $PAR=0,429*Global$ (W m⁻²) R² =0,97

Estatisticamente os valores obtidos por Papanioannou *et al.* (1996) em Atenas são iguais aos obtidos na escala sazonal para a cidade de São Paulo, SP.

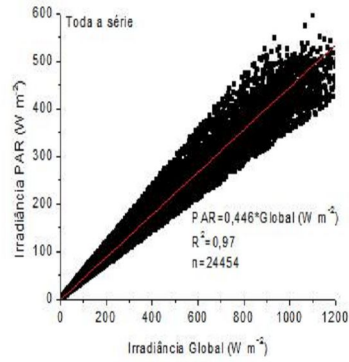


Figura 3: Relação linear entre irradiância global e PAR para todo o período observado (01/05/2003 a 29/02/2004). Fonte: Estação meteorológica LCB, departamento de Geografia e Estação Meteorológica IAG/USP.

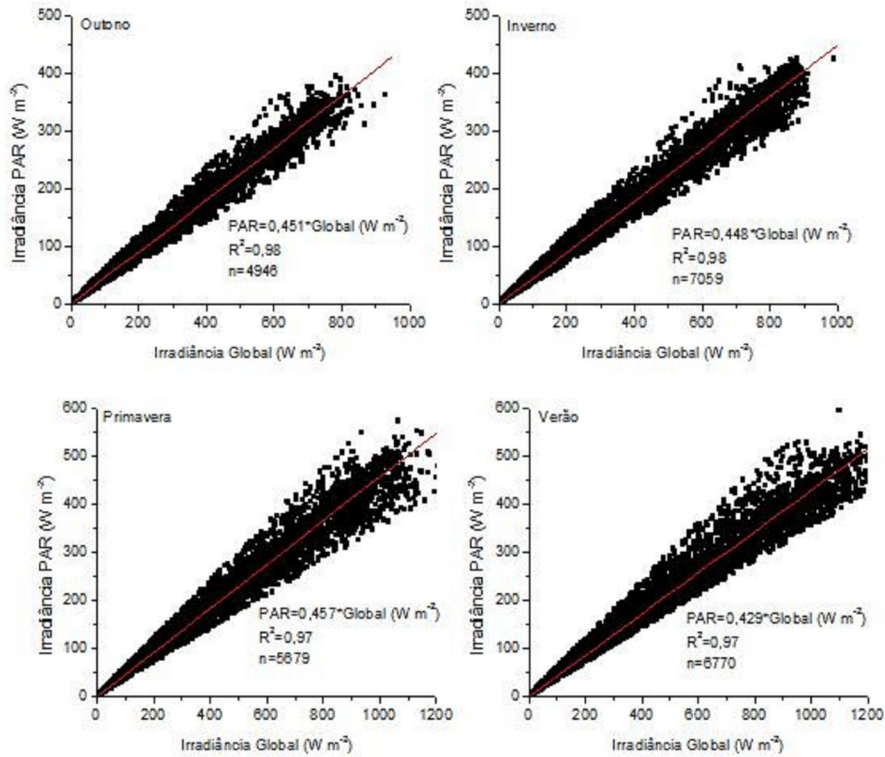


Figura 4. Relação linear entre irradiância global e PAR para as estações outono, inverno, primavera e verão. Fonte de dados: Estação meteorológica LCB, Departamento de Geografia - USP e Estação Meteorológica do IAG/USP.

3. Modelos de estimativa de PAR para diferentes kt

Objetivando evidenciar o efeito da cobertura de nuvens na relação PAR/Global, efetuou-se o cálculo dos modelos lineares com os intervalos de kt conforme descrito no item material e métodos. Os modelos de estimativa da PAR em função de radiação solar global podem ser descritos como:

$$\begin{aligned} \text{Kt} < 0,30 & - \text{cobertura de céu nublado:} \\ \text{PAR} &= 0,476 * \text{Global} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad R^2 = 0,96 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0,30 < \text{Kt} < 0,65 & - \text{cobertura de céu} \\ & \text{parcialmente nublado:} \\ \text{PAR} &= 0,459 * \text{Global} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad R^2 = 0,94 \\ \text{Kt} > 0,65 & - \text{cobertura de céu limpo:} \\ \text{PAR} &= 0,440 * \text{Global} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad R^2 = 0,91 \end{aligned}$$

Papanioannou et al. (1996) em condições de céu encoberto, obteve 44,4% para a relação PAR/Global e 42,8% em condição de céu limpo.

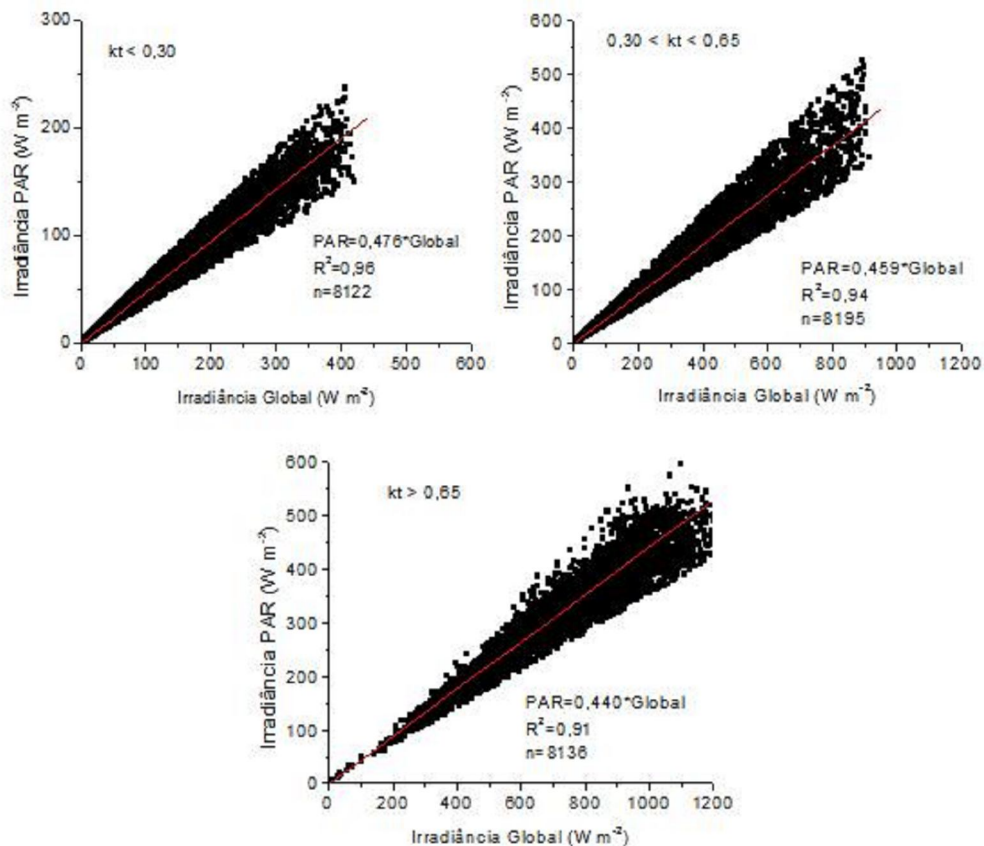


Figura 5. Relação linear entre irradiância global e PAR para os intervalos de kt (nublado, parcialmente nublado e limpo). Fonte de dados: Estação meteorológica LCB, Departamento de Geografia/USP e Estação Meteorológica do IAG/USP.

4. Modelos de estimativa de PAR para umidade relativa do ar inferior a 40% e $k_t > 0,75$ (período seco)

Ao isolar o intervalo de dados referentes a condições de umidade relativa e k_t representantes de um período sem chuvas, isto é, $UmidRel < 40\%$ e $k_t > 0,75$, obtêm-se os resultados apresentados na figura 6. A variação de PAR/Global apresenta linearidade com coeficiente de determinação da ordem de 0,996 e relação PAR/Global de 0,455, ou seja, 45,5% da radiação solar global compreende o espectro da PAR. O aumento do coeficiente de determinação para os dias com essas

características atmosféricas pode estar relacionado a uma melhor *performance* os instrumentos de medida, assim como uma relação PAR/Global mais constante dado a ausência de nebulosidade e reduzida concentração de vapor d'água na atmosfera.

A radiação solar global mostrou ter uma ótima correlação com PAR, no qual torna possível estimá-la através dos modelos lineares sugeridos pela literatura mundial sobre este assunto, respeitando o critério de semelhança geográfica, física e de ocupação de solo, bem como das características climáticas regionais e locais das distintas áreas.

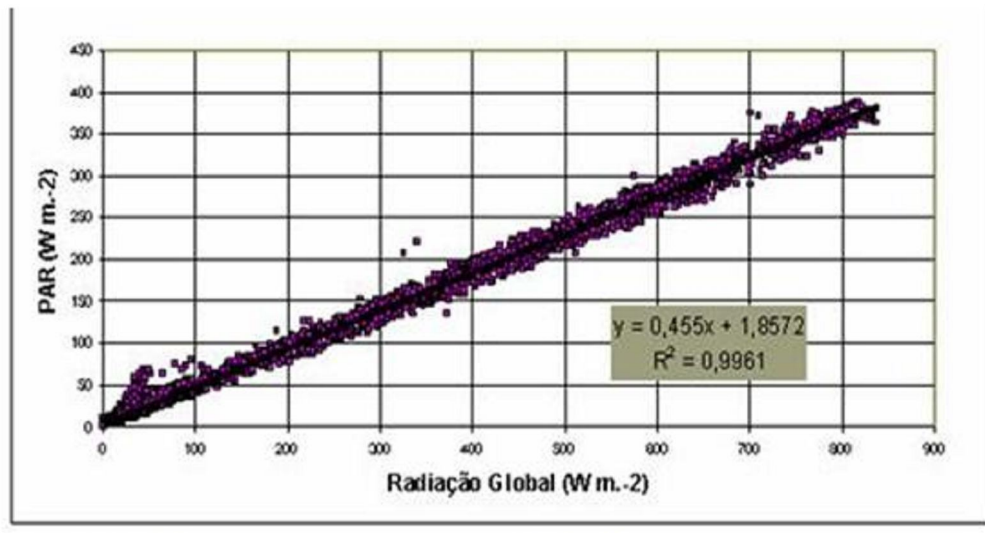


Figura 6: Relação linear entre irradiância global e PAR para dois períodos de estiagem observados (01/07/2003 a 9/07/2003 e 19/08/2003 a 24/08/2003), em São Paulo. Fonte dos dados: Estação Climatológica Automática, LCB, Dep. De Geografia, USP. (Elaborado por Hans Christoph Guillaumon Dechandt, 2006)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o conjunto de dados de irradiância PAR e global utilizado neste trabalho, considerando as condições climáticas da região de São Paulo (SP), pode-se inferir as seguintes considerações:

- Os valores da relação PAR/Global encontram-se de acordo com aqueles apresentados na literatura, permitindo a utilização dos modelos lineares propostos para estimativa da PAR em localidades com características climáticas semelhantes, onde não existem observações da PAR;

- Ainda não é possível afirmar com certeza que a atenuação da PAR em São Paulo (44,6%) em relação à obtida em Botucatu (48,0%), para toda a série de dados, é um efeito das diferentes concentrações de poluentes nestas localidades.

- Para o período com umidade relativa do ar reduzida e kt elevado observa-se melhora no coeficiente de determinação, contudo, a relação PAR/Global permanece dentro dos intervalos obtidos para outras condições de kt.

Bibliografia

ALADOS, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modeling. *Agricultural and Forest meteorology*, v. 93, 1999, p.27-38.

ALADOS, I., OLMO, F.J., FOYO-MORENO, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.102, 2000, p.39-50.

ASSIS, F.N., MENDEZ, M.E. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.24, 1989, p. 797-800.

ASSUNÇÃO, H.F., ESCOBEDO, J.F. Avaliação preliminar da radiação solar ultravioleta sobre a superfície. In: Congresso Ibérico e Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, 10, 2000, São Paulo, SP. Editado em CD-ROM.

BRITTON, C.M.; DODD, J.D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Agricultural Meteorology*, v. 17, 1976, p. 1-7.

GALVANI, E., DECHANDT, H.C.G. Avaliação preliminar da radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) na região metropolitana de São Paulo. IN: SEMINÁRIO DE PESQUISA EM GEOGRAFIA - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA, CD-ROM.... São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Departamento de Geografia, USP. 2003.

GOMES, E.N., ESCOBEDO, J.F. Estimativa horária da radiação fotossinteticamente ativa global, direta e difusa. . In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 13, 2003, Santa Maria, RS. Editado em CD-ROM.

GOMES, E.N., ESCOBEDO, J.F., ANGELA. R. Estimativa diária da radiação fotossinteticamente ativa global, direta e difusa. . In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 13, 2003, Santa Maria, RS. Editado em CD-ROM.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 1980, 390p.

MACCREE, K.J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, v.10, 1972, p.443-53.

McCREE, K.J. The measurement of photosynthetically active radiation. *Solar Energy*, v. 15, 1973, p. 83-87.

OLIVEIRA, A.P., SOARES, J., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J., CODATO, G., GALVANI, E. Diurnal Evolution of Surface Radiation Budget Components in the Cities of São Paulo and Botucatu. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 9, 2002, Caxambu, CD-ROM... Caxambu: Sociedade Brasileira de Engenharia Térmica, 2002.

PAPAIIOANNOU, G., NIKOLIDAKIS, G., ASIMAKOPOULOS, D., RETAILS, D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.81, 1996, p.287-298.

SZEICZ, G. Field measurements of energy in the 0.4-0.7 micron range. Light as an Ecological Factor. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1966.

SZEICZ, G. Solar radiation for plant growth. *Journal Applied Ecology*, v.11, 1974, p.617-36.

Agradecimentos: O autor agradece ao técnico do laboratório de Climatologia e Biogeografia do Departamento de Geografia na pessoa de Rogério Rozolen Alves, assim como ao técnico do laboratório de Micrometeorologia do IAG-USP o Sr. Antonio Jaschke Machado pela presteza

no fornecimento dos dados. Agradece ainda ao Geógrafo Hans Christoph Guillaumon Dechandt pela organização no banco de dados quando ainda atuava como bolsista de iniciação científica do programa PIBIC/CNPq.

Trabalho enviado em fevereiro de 2009

Trabalho aceito em março de 2009

