

Variabilidade sazonal da relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global na bacia do rio Doce, Estado de Minas Gerais

Antonio José Steidle Neto^{1*}, Aristides Ribeiro¹, Sérgio Zolnier¹ e Fernando Palha Leite²

¹Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs s/n., 36570-000, Campus Universitário, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. ²Departamento de Planejamento e Pesquisa, Celulose Nipo-Brasileira S.A. (Cenibra), Br 381, Km 172, 35196-000, Belo Oriente, Minas Gerais, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: steidle@gmail.com

RESUMO. O conhecimento da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) é importante para diferentes áreas relacionadas à fisiologia vegetal e ciências agrárias. Modelos de estimativa de RFA a partir da Radiação Global (Rg) são extremamente úteis, visto que a Rg é convencionalmente medida nas estações meteorológicas. Assim, analisou-se a variabilidade sazonal da relação RFA/Rg em cinco áreas localizadas na bacia do rio Doce, Estado de Minas Gerais, considerando-se os períodos secos e chuvosos dos anos de 2001 a 2004. As relações RFA/Rg obtidas para os períodos secos e chuvosos, assim como para todos os dados, apresentaram concordância com as relações determinadas por diversos pesquisadores em diferentes áreas do mundo. Analisando-se os resultados, constatou-se que, de maneira geral, as relações RFA/Rg tendem a ser superiores durante os períodos chuvosos comparativamente aos secos. Por este estudo, pôde-se concluir que existe variação interanual desta relação, demonstrando assim a necessidade de se considerar esta variabilidade para estimar adequadamente a RFA a partir da Rg.

Palavras-chave: relação RFA/Rg, sensores de radiação, precipitação.

ABSTRACT. Seasonal variability of the relationship between the photosynthetically active radiation and the global radiation at the river Doce basin, Minas Gerais State. The knowledge of the Photosynthetically Active Radiation (PAR) is important to different areas of vegetal physiology and agricultural sciences. Estimation models of the PAR based on the Global Radiation (GR) are extremely useful, since the GR is conventionally measured at the meteorological stations. Thus, the seasonal variability of the relationship PAR/GR was analyzed in five areas located at the river Doce basin, Minas Gerais State, Brazil, considering the dry and wet periods of the years 2001 to 2004. The relationships PAR/GR obtained for the dry and wet periods, and also to all data, presented agreement with those ones determined by several researchers in different areas of the world. Results showed that the relationships PAR/GR generally tend to be greater during the wet periods when compared with the dry ones. By this work, it could be concluded that there is interannual variability of this relationship, showing thus, the need to consider this variability to estimate the PAR based on GR appropriately.

Key words: relationship PAR/GR, radiation sensors, precipitation.

Introdução

Medições e estimativas da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) são importantes para diferentes áreas relacionadas à fisiologia vegetal e ciências agrárias, pois estão diretamente associadas à produção de biomassa, à morfologia e ao crescimento das plantas (Carter e Klinka, 1992; Ackerly e Bazzaz, 1995), sendo também essenciais em estudos ecológicos (Brock, 1981). Além disso, medidas de RFA são úteis para o cálculo da área foliar do dossel vegetativo (Pierce e Running, 1988; Martens *et al.*, 1993; Chen, 1996) e para documentar variações temporais na sua arquitetura (Baldochi *et*

al., 1984; Rich *et al.*, 1993). Esta fração da Radiação Global (Rg), compreendida na faixa espectral do visível (0,40 a 0,70 μm), é responsável pela excitação das moléculas de clorofila, fornecendo energia para o processo fotossintético.

Apesar de sua importância, a RFA não é uma variável frequentemente medida nas estações meteorológicas convencionais e automáticas. De acordo com Frisina (2002), medições de RFA podem ser realizadas diretamente por meio de sensores quânticos que medem a radiação solar na faixa espectral do visível ou por espectroradiômetros que medem as distintas faixas espectrais da Rg.

Diversos pesquisadores correlacionaram variáveis meteorológicas na tentativa de estimar, por meio de modelos físico-estatísticos, a RFA de maneira que não fosse necessária a aquisição de sensores quânticos ou espectroradiômetros, pois nem sempre estes são acessíveis, devido ao alto custo, ou possam ser empregados em quaisquer circunstâncias, além da necessidade freqüente de aferição. Neste sentido, foram realizados trabalhos científicos que estimaram a fração RFA com base na Rg. Em busca de uma melhor compreensão dos fatores que interferem neste percentual, outros pesquisadores relacionaram a RFA com a elevação solar, espalhamento de Rayleigh, turbidez atmosférica, nebulosidade, água precipitável, pressão atmosférica, além da Rg. A Tabela 1 reúne alguns dos principais estudos, com as respectivas relações RFA/Rg, realizados em várias partes do mundo.

Tabela 1. Relações RFA/Rg (mol MJ⁻¹) obtidas em estudos científicos para diferentes regiões.

Local	Referências	Relação RFA/Rg *
Nova Zelândia (Lower Wult)	McCree (1966)	2,194 (todos dados)
Israel (Jerusalém)	Goldberg e Klein (1977)	2,057 (todos dados)
Canadá (Ontário)	Blackburn e Proctor (1983)	2,148 (todos dados)
EUA (Califórnia, Five Points)	Howell <i>et al.</i> (1983)	2,009 (todos dados) 2,034 (período chuvoso) 2,027 (período seco)
Suíça (Ultana)	Rodskjer (1983)	2,125 (todos dados)
Espanha (Almeria)	Alados <i>et al.</i> (1996)	1,943 (todos dados) 2,079 (todos dados)
Nigéria (Ilorin)	Udo e Aro (1999)	2,120 (período chuvoso) 2,020 (período seco)
Brasil (Amazonas)	Alvalá e Silva (2000)	2,011 (todos dados)
China (Tibet, Lhasa)	Zhang <i>et al.</i> (2000)	2,006 (todos dados)
Zâmbia (Lusaka)	Finch <i>et al.</i> (2004)	1,992 (todos dados) 2,097 (período chuvoso) 2,014 (período seco)
Cipria (Athlassa)	Jacovides <i>et al.</i> (2004)	1,919 (todos dados)

*Valores convertidos por meio do fator proposto por McCree (1972).

Todavia, os modelos de estimativa de RFA que envolvem muitas variáveis meteorológicas são complexos e, em razão disso, são de pouca adoção. Assim, os modelos mais simples, que utilizam variáveis rotineiramente medidas nas estações meteorológicas, como a Rg, são os mais aceitos.

Devido à importância de se considerar as variações da relação RFA/Rg nas estimativas da radiação fotossinteticamente ativa a partir da radiação global para os períodos secos e chuvosos, este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar a variabilidade sazonal desta relação em áreas da bacia do rio Doce.

Material e Métodos

Os dados necessários à obtenção das relações RFA/Rg foram medidos em cinco localidades situadas na bacia do rio Doce, Estado de Minas Gerais. Essas localidades são caracterizadas pelo

cultivo de eucalipto (*Eucalyptus grandis*), sendo pertencentes à empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A. (Cenibra). A localização e as coordenadas geográficas destas áreas são mostradas na Figura 1 e na Tabela 2, respectivamente.

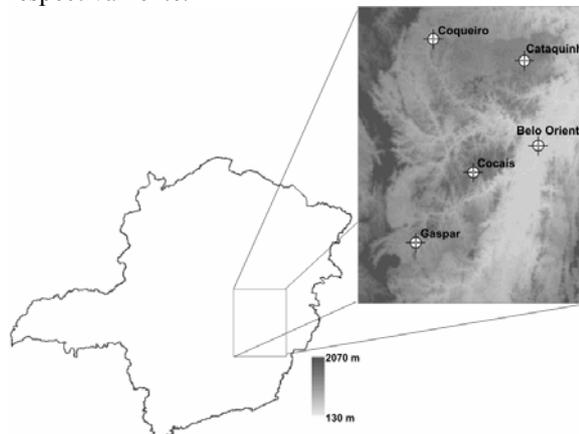


Figura 1. Posição geográfica das áreas estudadas no Estado de Minas Gerais.

A radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global foram medidas por meio de sensores quânticos (modelo PAR LITE, Kipp e Zonen B.V., Delft, Holanda) e piranômetros (modelo SP LITE, Kipp e Zonen B.V., Delft, Holanda), respectivamente. Já a precipitação foi medida utilizando-se pluviômetros (modelo CS700-L, Hydrological Services Pty., Liverpool, Austrália). Estes equipamentos foram instalados em torres de 30 m de altura, de maneira a permanecerem acima da copa das árvores.

Tabela 2. Coordenadas geográficas das localidades onde foram instalados sensores para medição da RFA, Rg e precipitação.

Área	Altitude (m)	Latitude	Longitude
Cocais	1273	19°29'19" Sul	42°51'54" Oeste
Cataquinho	1015	18°42'24" Sul	42°29'25" Oeste
Coqueiro	993	18°33'17" Sul	43°10'03" Oeste
Gaspar	847	19°59'00" Sul	43°18'19" Oeste
Belo Oriente	233	19°17'53" Sul	42°23'26" Oeste

Os sensores foram conectados a sistemas de aquisição de dados (modelo CR10X, Campbell Scientific Inc., Utah, EUA), programados para realizarem 6 leituras por hora, em intervalos de 10 minutos, e armazenarem a média horária. Os valores médios horários de RFA e Rg foram integrados a fim de se obter relações RFA/Rg em escala mensal. Os totais horários de precipitação foram acumulados ao longo de cada mês.

O período de coleta de dados iniciou-se em julho de 2001, terminando em junho de 2004. Na caracterização dos períodos secos, considerou-se os quatro meses ao longo do ano com menor precipitação. Em contraste, os períodos chuvosos foram estabelecidos com base nos quatro meses de precipitação mais elevada.

Para a determinação das relações RFA/Rg foram realizadas análises de regressão lineares do tipo $Y = \alpha X$, onde Y é a variável dependente (RFA), α é a inclinação da reta de regressão e X é a variável independente (Rg).

A avaliação quantitativa dos desvios dos valores de RFA estimados pelos modelos em relação aos valores medidos foi efetuada por meio dos erros estatísticos MBE e SEE, conforme as equações 1 e 2, respectivamente.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (RFA_{est} - RFA_{med})}{n} \quad (1)$$

$$SEE = \frac{\sum_{i=1}^n (RFA_{est} - RFA_{med})^2}{n - 1} \quad (2)$$

Em que,

- MBE - tendência média do erro;
- SEE - erro padrão de estimativa;
- RFA_{est} - radiação fotossinteticamente ativa estimada pelo modelo;
- RFA_{med} - radiação fotossinteticamente ativa medida pelo sensor;
- n - número de dados.

Resultados e discussão

De maneira geral, para as cinco áreas estudadas, considerando-se a precipitação mensal acumulada em quatro meses consecutivos, o período seco de cada ano correspondeu aos meses de maio, junho, julho, agosto e, o período chuvoso, aos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro.

Nas Figuras 2 a 6 são apresentadas as variabilidades da relação RFA/Rg, juntamente com a precipitação total de cada período, nas áreas de Cocais, Cataquinho, Coqueiro, Gaspar e Belo Oriente, ao longo dos períodos secos e chuvosos para os anos de 2001 a 2004. O valor da relação RFA/Rg, em cada período seco e chuvoso, corresponde à média aritmética dos valores mensais associados a estes períodos. As barras de desvio padrão, em torno do valor médio apresentado, mostram a dispersão dos valores da relação RFA/Rg.

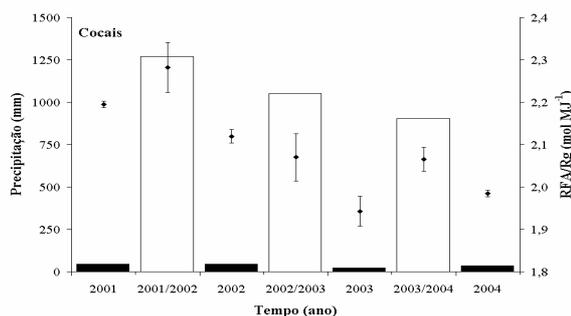


Figura 2. Variabilidade da relação RFA/Rg e precipitação total dos períodos secos (■) e chuvosos (□) em Cocais.

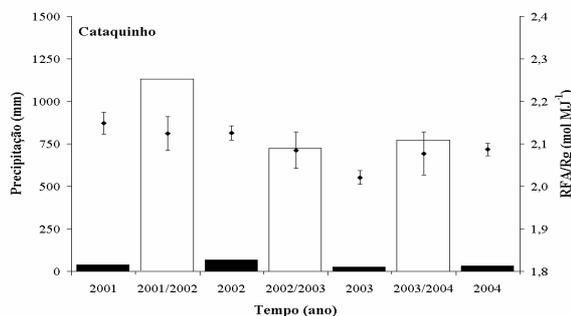


Figura 3. Variabilidade da relação RFA/Rg e precipitação total dos períodos secos (■) e chuvosos (□) em Cataquinho.

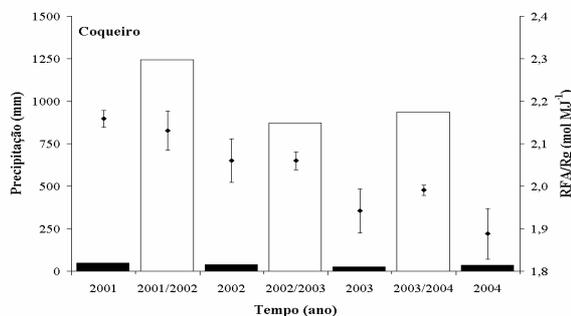


Figura 4. Variabilidade da relação RFA/Rg e precipitação total dos períodos secos (■) e chuvosos (□) em Coqueiro.

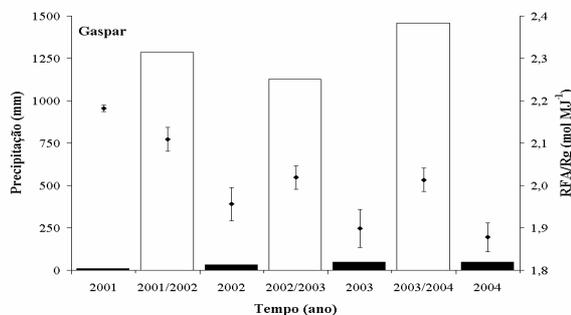


Figura 5. Variabilidade da relação RFA/Rg e precipitação total dos períodos secos (■) e chuvosos (□) em Gaspar.

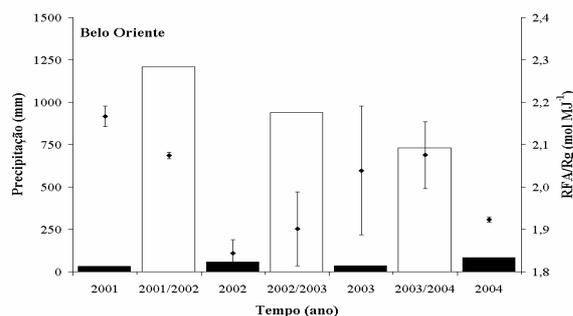


Figura 6. Variabilidade da relação RFA/Rg e precipitação total dos períodos secos (■) e chuvosos (□) em Belo Oriente.

Observando as Figuras 2 a 6 verifica-se, de maneira geral, que as relações RFA/Rg tendem a ser superiores durante os períodos chuvosos comparativamente aos secos, considerando-se não somente os valores médios, mas também as dispersões representadas pelas barras de desvio. Tal fato pode ser explicado em função da maior presença de vapor de água na atmosfera nos períodos chuvosos, sendo este o principal responsável pela absorção da radiação global na faixa espectral do infravermelho e, desta forma, pelo aumento da relação RFA/Rg. Destaca-se ainda nestas figuras, a alta relação durante o período seco do ano de 2001. Provavelmente, a predominância de dias com nebulosidade, associados a uma maior quantidade de água precipitável, e uma menor concentração de aerossóis na atmosfera, como poeira e/ou fuligem, comparativamente aos períodos secos dos anos posteriores, tenham contribuído para este aumento.

De acordo com Rao (1984), as variações da relação RFA/Rg podem ser justificadas com base nas alterações de magnitude e importância dos processos de absorção e espalhamento na atenuação da Rg pelas nuvens nas distintas faixas do espectro. As nuvens atenuam a Rg em comprimentos de onda maiores que 0,7 μm por processos de absorção e espalhamento, atuando como verdadeiros filtros, ao passo que a atenuação pelas nuvens, na faixa do visível, deve-se somente ao espalhamento (De Vault e Ktsaros, 1983).

Outro aspecto importante nas Figuras 2 a 6, é a variabilidade sazonal da relação RFA/Rg ao longo dos anos 2001 a 2004. É possível notar uma nítida tendência de queda nos valores da relação RFA/Rg, demonstrando a provável influência de fenômenos atmosféricos responsáveis por alterações nos regimes anuais de precipitação, temperatura, umidade, dentre outros.

Segundo Souza *et al.* (1999), para uma adequada compreensão das razões pelas quais a relação RFA/Rg varia sazonalmente, é necessário o conhecimento detalhado das condições atmosféricas do local de estudo.

A Tabela 3 apresenta os valores da relação RFA/Rg (α), os coeficientes de determinação (R^2) e os erros estatísticos (MBE e SEE) para os períodos seco e chuvoso, assim como para todos os dados (geral). Os valores de RFA/Rg foram determinados a partir de todos os dados diários dos meses referentes aos respectivos períodos da série 2001-2004.

Tabela 3. Relação RFA/Rg (α), coeficiente de determinação (R^2) e erros estatísticos (MBE e SEE).

Parâmetro	Cocais	Cataquinho	Coqueiro	Gaspar	Belo Oriente
Período 1					
α (mol MJ ⁻¹)	2,048	2,083	2,013	1,961	1,954
R^2	0,971	0,990	0,962	0,956	0,827
MBE	-0,061	-0,044	-0,016	-0,030	0,026
SEE	1,443	0,852	1,510	1,588	3,016
Período 2					
α (mol MJ ⁻¹)	2,136	2,096	2,060	2,043	2,013
R^2	0,975	0,992	0,986	0,993	0,969
MBE	-0,107	0,015	-0,068	-0,113	-0,046
SEE	1,783	1,134	1,218	1,043	2,253
Período 3					
α (mol MJ ⁻¹)	2,091	2,084	2,038	2,014	1,995
R^2	0,976	0,992	0,981	0,983	0,951
MBE	-0,046	-0,042	-0,040	-0,021	0,010
SEE	1,636	1,053	1,404	1,470	2,552

1 - Seco; 2 - Chuvoso; 3 - Geral.

Como se pode constatar na Tabela 3, os valores da relação RFA/Rg para o período seco, período chuvoso e geral estão em concordância com os resultados obtidos, para diferentes áreas do mundo, pelos pesquisadores citados na Tabela 1. Pela literatura, observa-se existir variabilidade espacial desta relação, o que implica que os valores determinados neste estudo têm aplicabilidade somente para as cinco localidades da bacia do rio Doce. Como já era de se esperar, os elevados coeficientes de determinação (superiores a 0,827) demonstraram que os dados de RFA estão bem correlacionados com os de Rg.

Quanto ao MBE, quanto mais próximo este erro for de zero, melhor será a exatidão da estimativa de RFA, sendo que MBE negativo indica subestimação e MBE positivo superestimação. Assim, de acordo com a Tabela 3, na maioria dos casos os modelos subestimaram os valores medidos. Já para o SEE (não assume valores negativos), os maiores erros de estimativa foram proporcionados pelos modelos associados à área de Belo Oriente.

Conclusão

Diante dos resultados, pôde-se concluir que a relação RFA/Rg é susceptível às distintas condições atmosféricas predominantes nos períodos secos e chuvosos, sendo maior durante os meses com precipitação elevada e menor nos meses com alta estiagem, evidenciando existir variabilidade sazonal desta relação. Além disso, constatou-se uma marcante

variabilidade anual no período estudado.

Embora a relação RFA/R_g seja considerada como constante em muitos estudos agroclimáticos, as oscilações observadas neste trabalho mostram que erros consideráveis podem ser cometidos ao assumir a fração RFA como um valor fixo.

Referências

- ACKERLY, D.D.; BAZZAZ, F.A. Seedling crown orientation and interception of diffuse radiation in tropical forest gaps. *Ecology*, New York, v. 76, p. 1134-1146, 1995.
- ALADOS, I. *et al.* Photosynthetically active radiation: measurements and modeling. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 78, p. 121-131, 1996.
- ALVALÁ, R.C.S.; SILVA, F.W.C. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e a irradiância de onda curta em área de policultivo na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. (Editado em CD-ROM).
- BALDOCCHI, D. *et al.* Seasonal variations in the radiation regime within an oak-hickory forest. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 33, p. 177-191, 1984.
- BLACKBURN, W.J.; PROCTOR, J.T.A. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Sol. Energy*, Kidlington, v. 31, p. 233-234, 1983.
- BROCK, T.D. Calculating solar radiation for ecological studies. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 14, p. 1-19, 1981.
- CARTER, R.E.; KLINKA, K. Variation in shade tolerance of Douglas-fir, western hemlock, and western red cedar in coastal British Columbia. *For. Ecol. Manag.*, Amsterdam, v. 55, p. 87-105, 1992.
- CHEN, J.M. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 80, p. 135-163, 1996.
- De VAULT, J.E.; KTSAROS, K.B. Remote determination of cloud liquid water path from bandwidth-limited shortwave measurements. *J. Atm. Sci.*, v. 40, p. 665-685, 1983.
- FINCH, D.A. *et al.* Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 122, p. 229-238, 2004.
- FRISINA, V.A. *Modelagem das radiações global, difusa e fotossinteticamente ativa em ambiente protegido e suas relações com o crescimento e produtividade da cultura de pimentão (Capsicum annuum L.)*. 2002. Tese (Doutorado)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.
- GOLDBERG, B.; KLEIN, W.H. Variation in the spectral distribution of daylight at various geographical locations on the earth's surface. *Sol. Energy*, Kidlington, v. 19, p. 3-13, 1977.
- HOWELL, T.A. *et al.* Relationship of photosynthetically active radiation to shortwave radiation in the San Joaquin Valley. *Agric. Meteorol.*, Amsterdam, v. 28, p. 157-175, 1983.
- JACOVIDES, C.P. *et al.* Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 121, p. 135-140, 2004.
- MARTENS, S.N. *et al.* Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *For. Ecol. Manag.*, Amsterdam, v. 61, p. 91-108, 1993.
- McCREE, K.J. A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorol.*, Amsterdam, v. 3, p. 353-366, 1966.
- McCREE, K.J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, Amsterdam, v. 10, p. 443-453, 1972.
- PIERCE, L.L.; RUNNING, S.W. Rapid estimation of coniferous forest area index using a portable integrating radiometer. *Ecology*, New York, v. 69, p. 1762-1767, 1988.
- RAO, C.R.N. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, Vienna, v. 34, p. 353-364, 1984.
- RICH, P.M. *et al.* Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 65, p. 107-127, 1993.
- RODSKJER, N. Spectral daily insolation at Uppsala Sweden. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, Vienna, v. 33, p. 89-98, 1983.
- SOUZA, W.M. *et al.* Estimativa da irradiação solar fotossinteticamente ativa em Pombal-PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 1999. Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999. (Editado em CD-ROM).
- UDO, S.O.; ARO, T.O. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 97, p. 21-31, 1999.
- ZHANG, X. *et al.* Measuring and modeling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April-October. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 102, p. 207-212, 2000.

Received on December 13, 2005.

Accepted on July 17, 2006.