

Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 201-206, 1998.

Recebido para publicação em 06/02/98. Aprovado em 13/07/98.

ISSN 0104-1347

ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA RADIANTE EM FUNÇÃO DE ELEMENTOS CLIMÁTICOS

ESTIMATE OF THE RADIANT ENERGY BUDGET AS A FUNCTION OF CLIMATIC ELEMENTS

André Belmont Pereira¹, Paulo Cesar Sentelhas² e Nilson Augusto Villa Nova³

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo propor equações de regressão para estimativa da radiação líquida (R_n) como uma função de elementos climáticos disponíveis em estações meteorológicas convencionais e automatizadas que não dispõem de sensores para tal medida. Para tanto, foram utilizados dados de radiação líquida, temperatura e umidade relativa do ar, insolação astronômica efetiva e irradiância solar global coletados das estações de superfície do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ - da Universidade de São Paulo - USP. Os modelos propostos foram testados através de medidas radiométricas precisas, obtidas por saldo-radiômetros instalados na região de Piracicaba, SP, Brasil, apresentando excelentes resultados e revelando que, de uma forma simplificada, a R_n pode ser representada por aproximadamente 57,4% da radiação global para as condições experimentais desse trabalho.

Palavras-chave: radiação líquida, modelos de estimativa, estação meteorológica convencional e automatizada, radiometria solar.

¹ Engº Agrº, Dr., Prof. Adjunto do Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola - UEPG - 84.010-330 Ponta Grossa, PR. E-mail: abelmont@uepg.br

² Engº Agrº, M.Sc., Prof. Assistente do Departamento de Física e Meteorologia - ESALQ/USP - 13.418-900 Piracicaba, SP. E-mail: pcsentel@carpa.ciagri.usp.br

³ Engº Agrº, Dr., Prof. Associado do Departamento de Física e Meteorologia - ESALQ/USP - 13.418-900 Piracicaba, SP. E-mail: navnova@carpa.ciagri.usp.br

SUMMARY

The aim of this study, based on data collected from agrometeorological stations at the Department of Physics and Meteorology at Superior School of Agriculture “Luiz de Queiroz” - ESALQ - from the State University of São Paulo - USP, was to develop and appraise mathematical models for the evaluation of the net radiation as a function of available climatic elements from the conventional and automatic meteorological stations which do not possess sensors for a such measurement. For this, a set of measured data of net radiation, temperature and relative humidity of the air, effective astronomical insolation and global solar radiation flux density has been used. The models were tested through accurate radiometer measurements obtained by net radiometers at Piracicaba, SP, Brazil, presenting excellent results and revealing that, in general way, R_n can be represented by roughly 57,4% of global radiation for the experimental conditions of this work.

Key words: net radiation, estimate models, conventional and automatic meteorological station, solar radiometry.

INTRODUÇÃO

O balanço de energia radiante, também denominado de radiação líquida, vem a ser o saldo de radiação sobre uma superfície, o qual representa a principal fonte de energia aos processos naturais, tais como metabolismo biológico, perda de água por superfícies vegetadas e decomposição orgânica (AZEVEDO et al., 1991; OMETTO et al., 1973; CRITCHFIELD, 1974). O saldo de radiação, como um dos componentes do balanço de energia, constitui-se em elemento fundamental para os estudos de micrometeorologia. Algumas considerações sobre a importância do balanço de energia e a radiação líquida na determinação do fluxo de vapor d'água na atmosfera são feitas por VILLANUEVA (1987) e diversos foram os estudos desenvolvidos por pesquisadores estrangeiros e nacionais voltados ao monitoramento do saldo de radiação, bem como aos aspectos de sua partição nos mais variados sistemas agrícolas.

A radiação líquida pode ser medida por equipamentos normalmente caros para uso rotineiro, que quando usados, assim o são quase que exclusivamente para pesquisas, bem como pode ser calculada através de estimativas utilizando equações que consideram a radiação líquida (R_n) como sendo uma composição entre o fluxo de radiação incidente à superfície do solo, descontado do fluxo de radiação refletida pela superfície (valor positivo), mais o fluxo de radiação de onda longa emitida pela superfície,

descontado do fluxo de origem atmosférica que será contra-irradiado de volta para o sistema (valor negativo).

OMETTO (1968), usando dados de radiação medida com piranômetro de Eppley, determinou para Piracicaba, Estado de São Paulo, as relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação para duas épocas distintas. O mesmo autor (OMETTO, 1991) correlacionou valores medidos de radiação líquida com radiação solar incidente na superfície do solo, supondo a atmosfera ausente, e a razão de insolação, utilizando para tal dois períodos distintos caracterizados por declinações solares positivas e negativas, uma vez que a cobertura de nuvens local foi altamente diferenciada nos períodos; fato que fez com que o autor encontrasse uma expressão específica para representar cada um dos períodos estudados.

Segundo AZEVEDO et al. (1991), o termo de maior dificuldade de determinação na equação do balanço de energia radiante é o termo referente à radiação de ondas longas incidente na superfície do solo, dependente sobretudo do vapor d'água na atmosfera e da cobertura de nuvens, sendo freqüentemente estimada por fórmulas empíricas em função da temperatura e da pressão parcial de vapor. Os referidos autores citam equações propostas por outros pesquisadores (SWINBANK, 1963; IDSO & JACKSON, 1969; BRUTSAERT, 1984; SATTERLUND, 1972) para determinação do fluxo de ondas longas em direção à superfície do solo, sendo todas elas obtidas em condição de céu claro e em função da temperatura absoluta. FUNARI et al. (1985) apresentam um estudo comparativo entre a equação de Brunt-Penman e a formulação proposta por LINACRE (1967), ambas para determinação da radiação efetiva terrestre ou balanço de ondas longas. Neste sentido, OMETTO (1995) propõe uma alternativa à equação de Brunt-Geiger, baseada na proposição de que características locais influenciam o balanço de ondas longas. ROBINSON (1966) salienta que o albedo para ondas longas das bases das nuvens afeta determinantemente o balanço desta faixa espectral, sendo o albedo dependente da espessura das nuvens e esta dependência diferente para os vários tipos de nuvens.

Face ao exposto, o presente estudo tem por objetivo propor modelos de estimativa do balanço geral de energia radiante como uma função de elementos climáticos disponíveis em estações meteorológicas convencionais e automatizadas que não dispõem de sensores para tal medida. Assim, considerando que as características de cobertura de nuvens para as nossas condições são completamente diferentes daquelas existentes na Inglaterra, onde BRUNT (1939) definiu suas equações, bem como da Alemanha, onde GEIGER (1948) as ajustou, vale destacar a necessidade de determinação de coeficientes de regressão mais apropriados para a região em estudo.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos no posto agrometeorológico do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, durante o período de junho de 1996 a julho de 1997, tendo sido utilizadas 259 observações para definição dos modelos de estimativa propostos e 87 para validação. Os elementos meteorológicos avaliados na estação convencional (EMC) foram: temperatura máxima do ar - T_{max} ($^{\circ}C$); temperatura mínima do ar - T_{min} ($^{\circ}C$); umidade relativa média do ar - UR (%) e insolação astronômica efetiva - n (h). A radiação extra-terrestre - Q_o ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e a duração do fotoperíodo - N (h) foram calculados através de equações utilizadas por PEREIRA (1997). A irradiância solar global - Q_g ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) foi definida pela expressão:

$$Q_g = Q_o \left[0,29 \cos j + 0,52 \frac{n}{N} \right] \quad (1)$$

em que Q_o é a densidade de fluxo de radiação incidente no topo da atmosfera ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); φ é a latitude local e $\frac{n}{N}$ é a razão de insolação.

No cálculo da radiação líquida - R_n ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) - mediante a adoção da equação de Brunt-Penman, atribuiu-se o valor de albedo da superfície gramada da ordem de 0,23 (SMITH, 1991). A temperatura média diária do ar foi dada pela média aritmética entre T_{max} e T_{min} e a pressão parcial de vapor e , expressa em KPa, foi definida por $(UR) (e_s) 10^{-2}$ sendo e_s a pressão de saturação de vapor calculada pela equação de Tétens. Assim a clássica equação de Brunt-Penman estabelece que:

$$R_n = Q_g (1 - r) - T^4 \tau \left(0,56 - 0,09 \sqrt{e} \right) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

onde r é o albedo da superfície; e a pressão parcial de vapor (KPa); τ a constante de Stefan-Boltzmann, dada por $5,67(10^{-8})W\ m^{-2}\ K^{-4}$; e T a temperatura absoluta do ar (K).

Os elementos meteorológicos avaliados na estação automatizada foram: irradiância solar global - Q_g ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) - sensor de fotodiodo de silício da marca LICOR; temperatura do ar - T ($^{\circ}C$) e umidade relativa do ar - UR (%) - sensor Vaisalla, cujos valores médios diários foram obtidos pela média aritmética de 96 leituras realizadas a cada 15 minutos. A pressão parcial de vapor e e para o universo de dados da estação automática (EMA) foi expressa em KPa e definida pela expressão já apresentada.

A radiação líquida foi medida através de um saldo radiômetro (Q-7 net radiometer - Campbell Scientific, Inc.) e utilizada para propor equações de regressão linear em função de temperatura do ar, pressão parcial de vapor d'água na atmosfera e razão de insolação, considerando tais elementos climáticos obtidos a partir de uma estação meteorológica convencional. O mesmo estudo de regressão foi

desenvolvido em função de irradiância solar global, temperatura do ar e tensão atual de vapor medidos em uma estação automática, dando ao usuário alternativas de utilização de um ou outro método de estimativa em função da natureza da estação e dos elementos de clima disponíveis em sua região.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentadas as equações de regressão linear do balanço geral de energia radiante ou radiação líquida (Rn) em função dos parâmetros astronômicos: radiação extra-terrestre (Qo) e fotoperíodo (N), bem como dos elementos de clima: temperatura média diária do ar (T), pressão parcial do vapor d'água na atmosfera (e) e insolação astronômica efetiva (n) avaliados em uma estação meteorológica convencional (EMC).

Observa-se, pela análise das equações apresentadas na Tabela 1, bem como pela análise de variância a que foram submetidos os dados de radiação líquida estimados pelos diferentes critérios aqui propostos, que as mesmas não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 1% de probabilidade, no entanto, vale ressaltar que as equações que consideram as variáveis preditoras Qo, T, e, $\frac{n}{N}$ e ainda Qo, T, $\frac{n}{N}$ foram as que apresentaram os mais elevados valores de coeficiente de determinação (r^2) para o universo de dados de 259 observações. Tal constatação para a equação que considera a raiz quadrada da tensão atual de vapor e corrobora com o significado físico da equação de Brunt-Penman, a qual evidencia

Tabela 1. Equações de regressão linear de estimativa da radiação líquida (Rn), expressa em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, em função da radiação extra-terrestre (Qo - $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e dos elementos climáticos disponíveis, monitorados em uma estação meteorológica convencional (EMC).

Variáveis Preditoras	Equação de Regressão	r^2
Qo, T, e, $\frac{n}{N}$	$Rn = Qo [-0,1049 + 0,0082 T + 0,0492 \sqrt{e} + 0,2634 \frac{n}{N}]$	0,8031
Qo, T, $\frac{n}{N}$	$Rn = Qo [-0,0734 + 0,0101 T + 0,2513 \frac{n}{N}]$	0,8014
Qo, $\frac{n}{N}$	$Rn = Qo [0,1578 + 0,2317 \cdot \frac{n}{N}]$	0,6353

T, e, $\frac{n}{N}$ = temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$), pressão parcial do vapor d'água na atmosfera (KPa) e razão de insolação, respectivamente.

que o balanço de radiação de ondas longas é afetado pela temperatura do ar, pelo conteúdo de vapor d'água atmosférico e pela nebulosidade ou cobertura de nuvens, expressa pela razão de insolação. Já para a equação que despreza a contribuição de e na estimativa de R_n , pode-se asseverar que sua confiabilidade está fundamentada nos princípios envolvidos na equação de LINACRE (1967), que propõe que a emissão efetiva terrestre (R_b) possa ser obtida em função da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e da razão de insolação.

Na Tabela 2 são apresentadas as equações de regressão linear da energia líquida disponível para a geração de todos os fenômenos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na biosfera (R_n) em função dos elementos climáticos: irradiância solar global (Q_g), pressão parcial do vapor d'água na atmosfera (e) e temperatura média diária do ar (T), observados em uma estação meteorológica automática (EMA).

Observa-se, pela análise das equações apresentadas na Tabela 2, bem como pela análise de variância com aplicação do teste F aos dados de R_n estimados, que as mesmas não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 1% de probabilidade, sendo oportuno destacar que as equações que levam em consideração as variáveis preditoras Q_g , e , T , bem como Q_g , T foram aquelas que apresentaram os mais elevados valores de coeficientes de determinação (r^2) para o universo de 259 observações. Assim, para fins de pesquisas científicas mais detalhadas sugere-se a utilização de uma das duas primeiras equações apresentadas na referida tabela, podendo ainda ser recomendada a adoção das demais, a nível de projeto, em muitos trabalhos nas áreas de micrometeorologia e irrigação, particularmente na estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To}), através de métodos combinados, como os de Penman, Priestley-Taylor e Penman-Monteith.

Pelos valores dos coeficientes de determinação obtidos, constata-se que, no caso específico das equações propostas a partir de avaliações feitas em estações meteorológicas automatizadas, os dados medidos e os valores calculados de radiação líquida estão altamente correlacionados, demonstrando que mais de 90% das variações observadas de R_n medida são explicadas pelas equações de regressão apresentadas. Para avaliação e validação das referidas equações, uma série independente de 87 dados observados foi tomada para confronto entre valores medidos e estimados em gráfico do tipo 1:1 (Figuras 1 e 2). A dispersão de dados medidos e estimados de radiação líquida em torno da reta 1:1 é muito pequena, particularmente quando se trata de monitoramento ambiental feito por estações meteorológicas automáticas (Figura 2).

A Figura 3 revela a dispersão dos valores estimados a partir da equação de Brunt-Penman,

Tabela 2. Equações de regressão linear de estimativa da radiação líquida (Rn), expressa em MJ m⁻² dia⁻¹, em função dos elementos climáticos disponíveis, monitorados em uma estação meteorológica automática (EMA).

Variáveis	Equação de Regressão	r ²
Preditoras		
Qg, e, T	Rn = -7,1739 + 0,6432 Qg + 4,2579 \sqrt{e} + 0,0047 T	0,9688
Qg, T,	Rn = -5,1814 + 0,5861 Qg + 0,2346 T	0,9578
Qg	Rn = -1,7340 + 0,6649 Qg	0,9288
Qg	Rn = 0,57378 Qg	0,9099

Qg, e, T = irradiância solar global (MJ m⁻² dia⁻¹), pressão parcial de vapor d'água na atmosfera (KPA) e temperatura média diária do ar (°C), respectivamente.

tomados em relação à realidade medida, com valor de r² de 0,70, inferior, portanto, aos valores obtidos por meio das equações de regressão linear. Tal estudo comparativo, tendo como referência a metodologia clássica de Brunt, a qual propõe um modelo de estimativa da emissão efetiva terrestre em condições de países de clima temperado, reforça a viabilidade de utilização dos métodos em estudo não somente no local onde ela foi desenvolvida, como também em muitas outras regiões do Brasil.

CONCLUSÕES

O presente estudo permite as seguintes conclusões:

- A radiação líquida (Rn) pode ser descrita por um modelo que leva em consideração a razão de insolação, a pressão parcial de vapor d'água atmosférico e a temperatura do ar, quando se tratar de observações realizadas em uma estação meteorológica convencional;
- A radiação líquida (Rn) pode ser expressa por equações de estimativa que consideram a irradiância solar global em lugar da razão de insolação, quando o monitoramento dos elementos climáticos se der através de uma estação meteorológica automatizada;
- Em estudos de cunho mais prático, a Rn pode ser estimada exclusivamente em função de Qg, sendo a relação entre ambas $\left(\frac{Rn}{Qg}\right)$ igual a 0,574, para esta localidade especificamente e para este experimento;

d) A escolha por um ou outro modelo de estimativa de Rn fica restrita à natureza da estação meteorológica, bem como à disponibilidade dos elementos de clima locais.

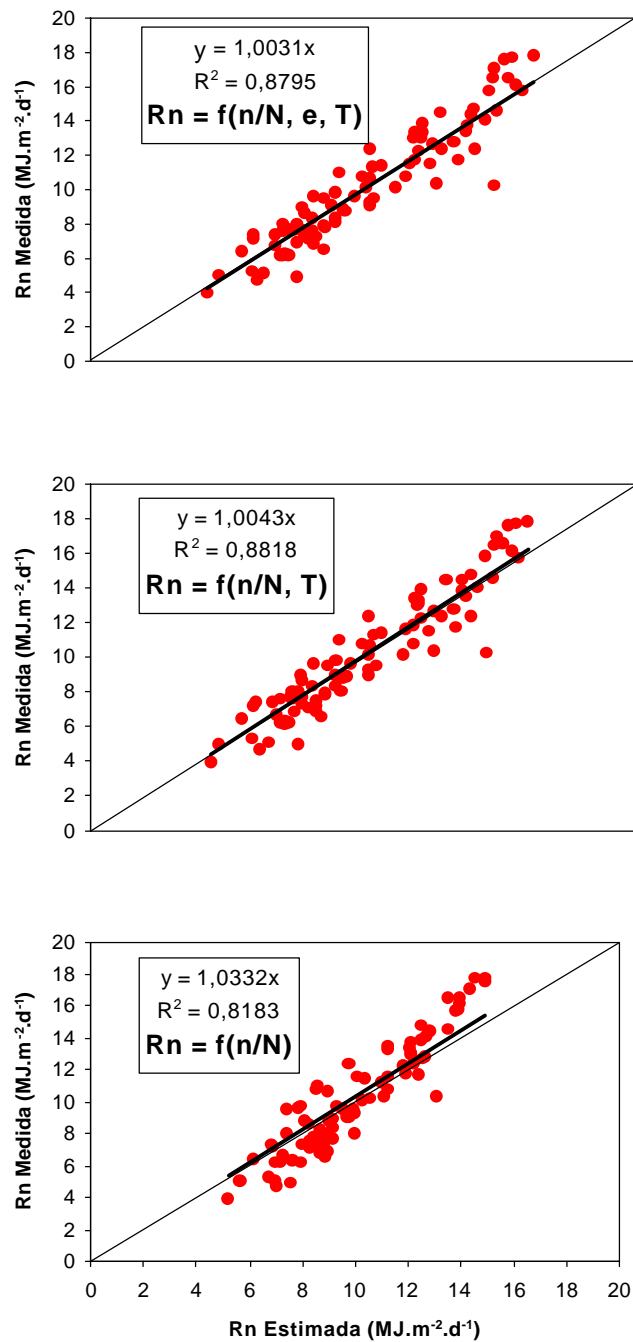


Figura 1. Gráfico do tipo 1:1 entre a radiação líquida medida pelo saldo radiômetro e a estimada em função dos elementos de clima monitorados em uma estação meteorológica convencional (EMC), considerando uma série independente de dados para Piracicaba, SP

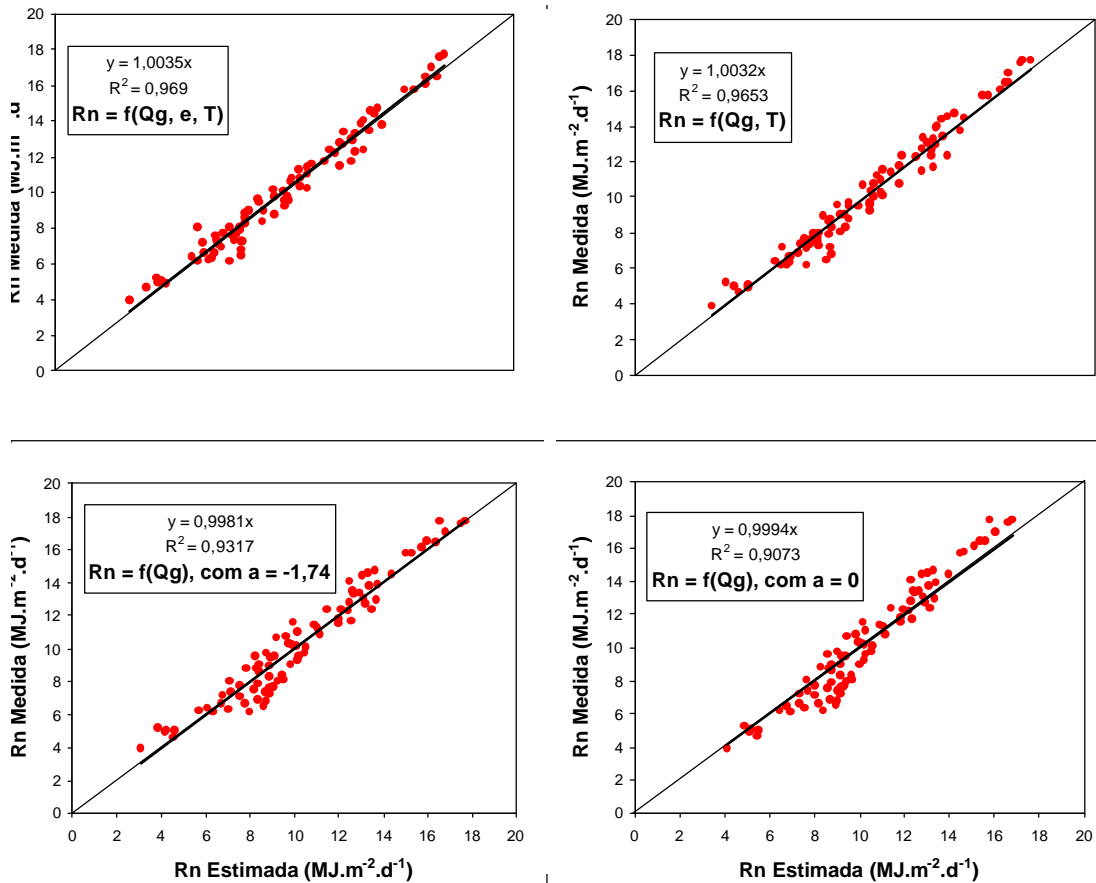


Figura 2. Gráfico do tipo 1:1 entre a radiação líquida medida pelo saldo radiômetro e a estimada em função dos elementos de clima monitorados em uma estação meteorológica automática (EMA), considerando uma série independente de dados para Piracicaba, SP.

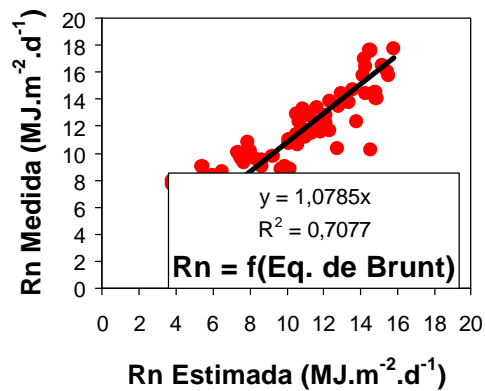


Figura 3. Gráfico do tipo 1:1 entre a radiação líquida medida pelo saldo radiômetro e a estimada pela equação de Brunt-Penman, considerando uma série independente de dados para Piracicaba, SP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, P.V., RAO, T.V.R., LEITÃO, M.M.V.B.R. et al. Avaliação da radiação atmosférica sobre uma área cultivada com algodão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7., 1991, Viçosa. **Resumos...**, Viçosa : Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ Universidade Federal de Viçosa, 1991. 314 p. p. 280-282.
- BRUNT, D. **Physical and dinamical meteorology**. 2. ed., Cambridge : Cambridge University Press, 1939. 49 p.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht : D. Reidel, 1984. 299 p. (Environmental Fluid Mechanics).
- CRITCHFIELD, H.J. **General climatology**. Englewood cliffs : Prentice-Hall, 1974. 447 p.
- FUNARI, F.L., TARIFA, J.L., SIMPSON, J.G.P. Estudo comparativo entre as equações de Brunt-Penman (1949) e a de Linacre (1967) para estimativa da radiação líquida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 4, 1985, Londrina, PR. **Anais...**, Londrina, 1985. 344 p. p. 129-131.
- GEIGER, R. **The climate near to the ground Blen Hill meteorology observatory**. Cambridge : Harvard University, 1948. 482 p.
- IDSO, S.B., JACKSON, R.D. Thermal radiation from atmosfere. **J. Geophys. Res.**, v. 74, n. 23, p. 5397-5407, 1969.
- LINACRE, E.T. Estimating the net-radiation flux. **Agric. Meteor.**, Amsterdam, v. 5, p. 49-63, 1967.
- OMETTO, J.C. **Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação**. Piracicaba : ESALQ/USP, 1968. 64 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1968.
- OMETTO, J.C., PERRIES, A., ITIES, B. **Sur la estimation de la radiation solaire globale et radiation nete**. Versailles : Centre National de Recherche Agronomique, 1973. 11 p.
- OMETTO, J.C. **Registro e estimativas dos parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba**. Piracicaba : FEALQ, 1991. 76 p.

OMETTO , J.P.H.B. **Medidas e estimativas do balanço de ondas longas para a região de Piracicaba, SP.** Piracicaba :ESALQ/USP, 1995. 87 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1995.

PEREIRA, A .B. **Modelo de estimativa do potencial de energia solar à superfície.** Botucatu : UNESP, 1997. 92 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1997.

ROBINSON, N. **Solar radiation.** New York : Elsevier Publ., 1966. 347 p.

SATTERLUND, D.R. **Wildland watershed management.** New York : Ronald Press, 1972. 370 p.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements.** Rome : FAO, 1991, 45 p.

SWINBANK, W.C. Long wave radiation from clear skies. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 89, p. 339-348, 1963.

VILLANUEVA, J.G. **Estudo do coeficiente de transparência do vapor d’água sobre a cultura do feijão.** Piracicaba : ESALQ/USP, 1987. 58 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1987.