

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE MESTRADO EM AGRONOMIA

ADRIANE THEODORO SANTOS ALFARO

MODELO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO LÍQUIDA E SUA APLICAÇÃO NA  
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

PONTA GROSSA

2009

ADRIANE THEODORO SANTOS ALFARO

MODELO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO LÍQUIDA E SUA APLICAÇÃO NA  
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Dissertação apresentada para obtenção do título  
de Mestre em Agronomia na Universidade  
Estadual de Ponta Grossa, Área de concentração  
de Agricultura

Orientador: Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova  
Coorientador: Prof. Dr. André Belmont Pereira

PONTA GROSSA

2009

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Processos Técnicos BICEN/UEPG

A385m      Alfaro, Adriane Theodoro Santos  
Modelo de estimativa da radiação líquida e sua aplicação na  
determinação da evapotranspiração potencial. / Adriane Theodoro  
Santos Alfaro. Ponta Grossa, 2009.  
78 f.  
Dissertação ( Mestrado em Agronomia - Área de Concentração  
: Agricultura ) - Universidade Estadual de Ponta Grossa.  
Orientador : Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova  
Coorientador : Prof. Dr. André Belmont Pereira

1. Balanço global de radiação. 2. Razão de Bowen.  
3. Radiação global. I. Villa Nova, Nilson Augusto. II. Pereira,  
André Belmont. III.T.

CDD: 630.216



SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
Coordenação de Colegiado de Curso de Mestrado em Agronomia

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: "MODELO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO LÍQUIDA E SUA APLICAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL".

Nome: Adriane Theodoro Santos Alfaro

Co-Orientador: Nilson Augusto Villa Nova

Aprovação pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova

  
Prof. Dr. Luiz Roberto Angelucci

  
Dr. Jadir Aparecido Rosa

Data da Realização: 24 de julho de 2009.

“Paciência e perseverança têm o efeito mágico de fazer as dificuldades desaparecerem e os obstáculos sumirem.

(John Quincy Adams)

Ao meu esposo Jean e  
Ao meu filho Anderson  
OFEREÇO

Ao Professor Ph.D André Belmont Pereira  
pelo inigualável exemplo e grandiosa  
dedicação e estímulo à minha formação  
profissional e, inclusive, espiritual.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À DEUS, que proporcionou-me paz de espírito em momentos difíceis, dando-me forças para concluir mais uma etapa em minha vida.

Aos meus familiares pelo constante apoio, carinho e pelo estímulo a minha formação humana.

Ao meu orientador, Professor Ph.D Nilson Augusto Villa Nova, pela oportunidade que tive de conviver, com seu espírito científico, alegre, humano e energia contagiante.

Ao professor Ph.D Luiz Roberto Angelocci pela aula inesquecível de agrometeorologia ministrada em junho de 2007 na ESALQ.

À coordenação do Curso de Pós Graduação em Agricultura da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela competência demonstrada durante este período de estudo.

Ao Prof. Dr. Gerson Kniphoff da Cruz, do Curso de Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa pelo profissionalismo, competência e humanismo que me recebeu em seu laboratório.

Aos Professores do Curso de Pós Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Agricultura da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela contribuição na minha formação profissional.

A professora MSc. Cristiane Ansbach Pereira pelo apoio, amizade, respeito e admirável exemplo de dedicação à pesquisa e à docência.

Aos professores Ph.D Jadir Aparecido Rosa e Luiz Roberto Angelocci que compuseram a banca de avaliação pela presença, sugestões e ensinamentos globais à respeito do assunto em estudo.

Aos colegas e amigos que conquistei durante o mestrado, pela troca de experiências e conhecimentos acerca dos vários campos multidisciplinares da agronomia. Em especial a Dacio Antonio Benassi, Daiane Trojan, Geisa Bandil, José Alfredo Baptista dos Santos, Julius Blum, Mireile Dalzotto, Paulo Rogério Borszowski, Suzana Churka Blum e a Doutoranda Priscila Niesing pelas valiosas discussões, apoio e motivação nas atividades de estudo além de momentos inesquecíveis de confraternização que só pós graduandos compreendem.

Edilaine do Rocio dos Santos pelo apoio e serenidade durante a realização deste trabalho.

Ao Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais - CESCAGE, Instituição na qual sou lotada como professora no Curso de Agronomia pelo apoio e colaboração para a realização deste trabalho.

À professora Msc. Jeanete Terezinha de Souza, Coordenadora de Educação Superior do Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais – CESCAGE, pela oportunidade de participar do grupo que se encontra sob sua responsabilidade.

Ao setor de Ciências Agrárias, ao curso de Pós Graduação em Agricultura e a Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela oportunidade da realização deste curso.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- ESALQ, Universidade de São Paulo pelo apoio e por todas as facilidades oferecidas durante o transcorrer do Curso.

Ao Programa de Apoio à Pós Graduação (PROAP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro nas apresentações de trabalhos em Encontros e Congressos e viagens que se fizeram necessárias para a conclusão deste.

A todos aqueles que anonimamente acreditaram, incentivaram, torceram e participaram durante alguma fase do trabalho e contribuíram, para a realização do mesmo e hoje são parte responsável por esta realização, com certeza sentem-se felizes por mim, e este momento é com certeza mais nosso que meu ...



## RESUMO

ALFARO, Adriane Theodoro Santos. **MODELO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO LÍQUIDA E SUA APLICAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL, 2009**. Dissertação. (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual De Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná.

O presente trabalho teve por objetivo propor e aferir um modelo físico matemático para estimar a radiação líquida e sua aplicação na determinação da evapotranspiração potencial. Para tanto foram utilizados dados climáticos coletados da Estação Meteorologia do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”-ESALQ – da Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba, SP, Brasil, em função da radiação global ( $Q_g$ ), da umidade relativa do ar (UR) e temperatura média diária (T). A metodologia proposta permite determinar a radiação líquida em função de dados mais facilmente disponíveis, sendo relevante nas diversas atividades humanas diárias e, portanto, de suma importância em projetos de engenharia que visam o aproveitamento da energia solar nas suas mais variadas formas. O desempenho do modelo proposto foi verificado através da análise dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e dos índices de concordância de Willmott (d) aplicados aos dados estimados e observados. Os valores estimados pela metodologia proposta foram confrontados com os valores medidos por um saldo radiômetro e os resultados revelaram que a metodologia proposta mostrou-se eficiente para a estimativa da radiação líquida com rapidez e simplicidade. O conjunto de dados foi submetido a uma análise de regressão linear simples, obtendo-se bom ajuste entre os valores medidos e estimados. A utilização da radiação líquida estimada mostrou-se eficiente na estimativa da evapotranspiração pelos métodos de Penman-Monteith, Priestley-Taylor ajustado e Penman modificado, com bom ajustamento quando comparado com os valores medidos para um período de 89 dias, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variando de 0,910 a 0,940. A metodologia proposta tem aplicabilidade quando as variáveis meteorológicas necessárias para estimar evapotranspiração potencial nem sempre se encontram disponíveis, particularmente as relacionadas à solução do termo aerodinâmico (velocidade do vento e déficit de pressão do vapor d'água no ar); desta forma, tornam-se importantes os métodos para estimar a evapotranspiração potencial em função de elementos climáticos que podem ser obtidos de maneira mais prática. A correlação satisfatória verificada com o saldo radiômetro torna o método de uso potencial na região em estudo, pois o conhecimento da evapotranspiração ou do fluxo convectivo de calor latente contribui para uma utilização mais racional da água em uma determinada cultura em que as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico. Assim, para as condições climáticas da localidade analisada, foi possível estimar com boa precisão o valor da radiação líquida, fundamentada na teoria proposta gerando valores equivalentes aqueles obtidos pela metodologia clássica para Piracicaba, SP.

**Palavras chaves:** balanço global de radiação, Razão de Bowen, radiação global.

## ABSTRACT

This study aimed to assess and develop a physical mathematical model to estimate the net radiation. For this we used weather data collected from the meteorological station of the Department of Physics and Meteorology of the Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz" - ESALQ - University of São Paulo - USP, Piracicaba, Brazil, according to the global radiation ( $Q_g$ ) relative humidity (UR) and average daily temperature (T). The proposed methodology let us to determine the net radiation based on data more easily accessible and relevant to various daily human activities and therefore of great importance in engineering projects aimed at harnessing solar energy in its many forms. The performance of the model estimate of net radiation and its application in determining the potential evapotranspiration was verified by analyzing the coefficients of determination ( $R^2$ ) and agreement index of Willmott (d) applied to the observed and estimated data. The values estimated by the proposed method were compared with values measured by a net radiometer and the results showed that the proposed methodology was efficient for the estimation of net radiation with speed and simplicity. The data set was subjected to a simple linear regression analysis, obtaining a good adjustment between measured and estimated values. The use of estimated net radiation was efficient in the estimation of evapotranspiration by the methods of Penman Monteith, Priestley Taylor adjusted and Penman modified by the proposed model with a good adjustment when compared with the values measured for a period of 89 days, with determination coefficient ( $R^2$ ) ranging from 0.910 to 0.940. The proposed methodology is applicable when the meteorological variables needed to estimate potential evapotranspiration when not always are available, particularly those related to the solution of the aerodynamic term (wind velocity and vapor pressure deficit in the air), thus the methods are important to estimate the ETo based on climatic elements that can be obtained in a practice way. The satisfactory correlation found with the net radiometer makes the method of potential use in the region under study because the knowledge of evapotranspiration or latent heat flux contributes to a more rational use of water in crops in critical stages of growth and reproductive when water is a limited factors. Thus, for the climate of the town looked, it was possible to estimate with good precision the value of the net radiation, based on the theory proposed generating equivalent values those obtained by classical methodology for Piracicaba, SP.

**Keywords:** net radiation balance, ratio Bowen, global radiation

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Valores de radiação líquida medida por saldo radiômetro ( $R_{n_{med}}$ ) e estimada pela metodologia proposta ( $R_{n_{est}}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996..... 50
- Tabela 2. Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith a partir da radiação líquida medida ( $ET_{oPM-R_{n_{med}}}$ ) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta ( $ET_{oPM-R_{n_{est}}}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996..... 55
- Tabela 3. Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Priestley-Taylor ajustado a partir da radiação líquida medida ( $ET_{oPTa-R_{n_{med}}}$ ) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta ( $ET_{oPTa-R_{n_{est}}}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996..... 59
- Tabela 4. Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman simplificado a partir da radiação líquida medida ( $ET_{oPs-R_{n_{med}}}$ ) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta ( $ET_{oPs-R_{n_{est}}}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996..... 63

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema da área experimental contendo uma estação meteorológica automática, lisímetros e dois tanques de evaporação (modelo Classe A)... 33
- Figura 2. Estação meteorológica automática (EMA)..... 34
- Figura 3. Relação entre a radiação líquida medida por saldo radiômetro e estimada pela metodologia proposta em Piracicaba, SP, considerando-se uma série independente de dados. 1996..... 54
- Figura 4. Relação entre a evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith (EToPM), Priestley-Taylor ajustado (EToPTa) e Penman simplificado (EToPs) a partir da radiação líquida medida (ETo-Rnmed) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (ETo-Rnest) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996..... 68

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Índice do desempenho do método em estudo .....	49
----------------------------------------------------------	----

## LISTA DE ABREVIATURAS

$\alpha$	Albedo ou poder refletor da superfície gramada
	Calor latente de vaporização, utilizou-se um valor constante de $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ para
$\lambda$	quantificá-lo sob a temperatura de $20^\circ \text{ C}$ .
$\gamma$	Coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );
$\omega$	Fator de ponderação para radiação líquida.
$\lambda E$	Fluxo de calor latente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );
$\rho$	Massa específica do ar atmosférico ( $\text{kg m}^{-3}$ );
$\beta$	Razão de Bowen
$\varepsilon$	Razão entre o peso molecular do vapor d'água e do ar atmosférico seco
A	Armazenamento de energia
BOC	Balanço de ondas curtas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )
BOL	Balanço de ondas longas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )
C	Índice de desempenho do método em estudo
Ca	Condutância aerodinâmica de transporte turbulento de calor sensível ( $\text{m s}^{-1}$ ).
Cp	Calor específico do ar a pressão constante ( $1,013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );
Cv	Condutância aerodinâmica de transporte turbulento de vapor d'água ( $\text{m s}^{-1}$ );
Cwa	Clima subtropical úmido
D	Índice de concordância de Wilmott
E	evapotranspiração da superfície úmida durante o período de brilho solar ( $\text{mm dia}^{-1}$ );
	Pressão parcial exercida pelo vapor d'água na atmosfera à temperatura média do ar
ea	(kPa);
EMA	Estação meteorológica automática
(es – ea)	Déficit de pressão de saturação de vapor d'água (kPa);
Es	Pressão de saturação de vapor d'água à temperatura média do ar (kPa);
Es'	pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do bulbo úmido (kPa).
ETo	Evapotranspiração potencial
EToPM	Evapotranspiração de referência ou potencial ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); determinada pelo método de Penman Monteith

EToPs	Evapotranspiração de referência ou potencial ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) determinada pelo método de Penman simplificado
EToPTa	Evapotranspiração de referência ou potencial ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); determinada pelo método de Priestley-Taylor ajustado
FAO	Food and Agriculture Organization
G	Fluxo de calor sensível no solo durante o período diurno ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );
H	Fluxo de calor sensível para o ar atmosférico ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );
IAF	Índice de área foliar.
M	Massa molar
M	Metro
$\text{M}^2$	Metro quadrado
mm	Milímetro
$\text{M s}^{-1}$	Metro por segundo
N	Fotoperíodo
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celcius
Oi	Média dos valores observados do índice de concordância
Oi	Valor observado do índice de concordância
P	Pressão atmosférica média local ( 95, 310 kPa );
Pi	Valor estimado do índice de concordância
Qatm	Radiação termal ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )
Qg	Densidade de fluxo de radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ); irradiância global
Qs	Emissão terrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )
R	Constante universal dos gases ( $8\,3145 \times 10^{-3} \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ):
$\text{R}^2$	Coeficiente de determinação
Ra	Resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e vapor d'água ( $\text{s.m}^{-1}$ )
Rc	Resistência do dossel ( $\text{s. m}^{-1}$ ); resistência da cobertura vegetal (estomática)
Rn	Saldo de radiação na superfície vegetada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ); Radiação líquida
S	Tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água à temperatura média diária do ar ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
S*	Tangente à curva de pressão de saturação de vapor em função da média das temperaturas de bulbo seco e úmido, Tsu. ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
T	Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );

Tv	Temperatura virtual do ar (K).
UR	Umidade relativa do ar
WGr	Oeste



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	16
<b>2. OBJETIVOS</b>	18
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b>	19
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b>	32
4.1. Localização da área experimental	32
4.2. Caracterização da área experimental	32
4.3. Dados meteorológicos	34
4.4. Teoria do método de estimativa da radiação líquida	35
4.5. Estimativa da evapotranspiração	41
4.5.1 Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO/91	41
4.5.2 Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Priestley-Taylor ajustado	46
4.5.3 Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman simplificado	47
4.6. Análise estatística	47
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	50
<b>6. CONCLUSÃO</b>	69
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	70
<b>8. ANEXOS</b>	75

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação líquida, também denominada de balanço de energia radiante, vem a ser o saldo de radiação sobre a superfície de um corpo, 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; Ritchfield, 1974; Pereira, 1998). A radiação líquida, 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 Villa Nueva (1987) e diversos foram os estudos desenvolvidos por pesquisadores estrangeiros e nacionais voltados ao monitoramento da radiação líquida, 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 como sendo uma composição entre o fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície do solo, descontada 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).

Esse balanço de energia pode ser obtido experimentalmente ou por modelos teóricos ou empíricos. A exatidão desses cálculos, do balanço de energia depende da precisão da medição ou da estimativa dessas propriedades. Para estimar a radiação líquida é freqüente o uso da associação das equações de Angstrom e Prescott, para o balanço de ondas curtas e de Brunt, para o balanço de ondas longas, procedimento este recomendado pela FAO (Pereira; Sentelhas; Villa Nova, 1998).

A estimativa da radiação líquida e, conseqüentemente, da evapotranspiração, é fundamental para aplicações em recursos hídricos e modelagens climáticas. É desejável que se tenha um método que estime evapotranspiração com boa precisão, e a partir de dados meteorológicos fáceis de serem obtidos. Usualmente o valor de evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>) é medido em lisímetro (disponível em Centros de Pesquisa) ou calculado pelos vários métodos, dentre eles os de Penman Monteith parametrizado pela FAO, pelo clássico método de Penman (1948) simplificado por Villa Nova (2006a) ou Priestley-Taylor ajustado Villa

Nova e Pereira (2006). Nos exemplos citados faz-se necessário conhecer o balanço de energia radiante sobre o gramado (radiação líquida) na região em estudo.

Em agrometeorologia, o estudo da evapotranspiração potencial contribui para o planejamento racional da irrigação em áreas agricultáveis e, junto com outros parâmetros meteorológicos, fornece subsídios à regionalização das áreas mais adequadas ao desenvolvimento de determinadas espécies vegetais. A determinação do consumo hídrico das culturas é de suma importância para que a aplicação da água seja feita de maneira racional e sustentável, não ocasionando prejuízos ao ambiente ao longo do tempo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Propor um modelo de estimativa de radiação líquida de gramado em função de elementos meteorológicos medidos em estação meteorológica automática, testando seu desempenho por comparação com medidas diretas por saldos-radiômetro;

### **2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

Verificar a aplicabilidade das estimativas da radiação líquida no desempenho de métodos de estimativas da evapotranspiração potencial.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

Considerando a ausência de outros fatores limitantes, a produção vegetal e animal dependem diretamente da disponibilidade de energia solar. Albert Szent-Györgyi, ganhador do Prêmio Nobel em 1937 escreveu “ O que guia a vida é ... um pequeno fluxo, mantido pela luz do Sol”. Com essa simples sentença ele resumiu uma das grandes maravilhas da evolução – a fotossíntese. Durante esse processo, a energia radiante do Sol é capturada e usada para formar os açúcares dos quais toda a vida, na Terra. A radiação solar fornece para a Biosfera terrestre a energia necessária para sustentar as cadeias tróficas e manter a dinâmica da atmosfera terrestre pelas características climáticas do planeta (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2007).

Pereira e Villa Nova (2002) evidenciam, ainda, que a energia utilizada no metabolismo de plantas e de animais, nos processos de aquecimento do ar e do solo, de transferência da água na forma de vapor da superfície para a atmosfera, provém da radiação solar e pelo fato da radiação solar desencadear todo o processo meteorológico e afetar todos os outros elementos meteorológicos torna-se primordial o seu entendimento.

A radiação solar é a maior fonte de energia para o planeta e é capaz de transformar grandes quantidades de água líquida em vapor d'água. A quantidade potencial dessa energia que alcança a superfície é determinada pela latitude do local e época do ano, devido às diferentes posições do Sol. Quando se estudam os efeitos da radiação solar na evapotranspiração, deve-se considerar que nem toda a energia disponível é usada para vaporizar a água, pois, parte dela é usada para aquecer a atmosfera e o perfil do solo de acordo com Couto et al. (2002) apud Syperreck (2006). (2002).

Segundo Souza, Escobedo, Tornero (1999), a energia radiante disponível para o aquecimento do ar, do solo, fotossíntese e para a evapotranspiração na superfície é a radiação líquida, obtida pela diferença entre o saldo da radiação de ondas curtas e o saldo de radiação de ondas longas.

A radiação líquida é a soma algébrica de todos os fluxos de entrada e saída de radiação de onda curta e longa num sistema, sendo fundamental para quantificar o balanço de energia na superfície da Terra. A partição da radiação líquida em evapotranspiração, bem como em outros componentes do balanço de energia está intimamente associada às mudanças no uso da terra e a disponibilidade de água no sistema. A maioria, dos modelos de evapotranspiração requer a radiação líquida como parâmetro de entrada fundamental, sendo sua estimativa precisa essencial para o manejo dos recursos hídricos em escala regional (RYU et al., 2008).

Constitui uma das medidas primárias a ser usada em cálculos de balanço de energia onde se computa evapotranspiração e a densidade de fluxo de calor sensível através do método da razão de Bowen. É também usada para verificar o aporte de energia pelo método da correlação turbulenta, sendo de fundamental importância para previsão de geadas, monitoramento da poluição atmosférica, em estudos de balanço de água e outros (FRITSCHEN e FRITSCHEN, 2007).

Representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre. Essa energia é a diferença entre os fluxos totais da radiação incidente e a emitida e/ou refletida por uma superfície, medida, normalmente, em plano horizontal. Ao longo do dia, nas horas de brilho solar, o saldo de radiação em uma superfície qualquer tende a ser positivo, pois os fluxos incidentes (global e atmosférico) são superiores às frações refletidas e emitidas. Por outro lado, durante a noite, é comum que esses valores sejam negativos, pois o fluxo incidente passa a ser apenas atmosférico e a energia emitida pela superfície, superior a este, resultando em um saldo de radiação negativo (GEIGER, 1961; MONTEITH E UNSWORTH, 1990; PEZZOPANE et al., 1995, GALVANI, 2001).

A radiação líquida pode ser medida através da técnica de sensoriamento remoto por satélite a partir de variáveis biofísicas em superfícies com rugosidades contrastantes com o uso do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). (Ryu et al., 2008, Justice et al., 1998, Justice et al., 2002, Masuoka et al., 1998). Ataíde (2006) evidencia em seu trabalho que o sensoriamento remoto por satélites, embora seja uma das ferramentas mais promissoras para estimativas de vários parâmetros à superfície como temperaturas do ar e da superfície, albedo, saldo de radiação e até evapotranspiração, entre outros, sem a necessidade do pesquisador ir ao local de estudo ou de se ter estações de medida em superfície nessas áreas, não satisfaz totalmente as necessidades agroecológicas, pois necessitam de observações feitas em superfície para implementação nos modelos existentes, como comprovado também por RYU et al.(2008).

O equipamento mais comum para avaliação direta da radiação líquida em estações meteorológicas automáticas é o saldo-radiômetro. Trata-se de um dispositivo composto por um único instrumento, podendo apresentar cúpulas protetoras de polietileno (Q-7.1, REBS), ou não (NR-Lite, Kipp e Zonen, 2000 e CNR1, Kipp e Zonen, 2000). São usados em diversos trabalhos para avaliar a evapotranspiração potencial medida e/ou estimada, em várias escalas de tempo, em função da radiação líquida medida por diferentes instrumentos (GAVILÁN ; BERENGENA; ALLEN, 2007).

O saldo radiômetro de cúpula de polietileno apresenta desvantagens como: (1) diferentes transmissividades para diferentes comprimentos de onda do espectro de radiação; (2) degradação durante períodos curtos de tempo de exposição (menos de 3 meses), exigindo freqüente substituição; (3) dano da cúpula, causada principalmente por aves e possível entrada de água no corpo do saldo-radiômetro, afetando assim a calibração do sistema (FIELD et al., 1992; HALLDIN; LINDROTH, 1992).

Os saldos radiômetros sem cúpula NR-Lite (Kipp & Zonen) foram desenvolvidos a fim de reduzir e simplificar a manutenção do equipamento. Diferem dos que possuem cúpula por terem os sensores (pilha termoelétrica) substituídos, com revestimento preto de teflon. Na atualidade o saldo radiômetro sem cúpula é o único comercialmente disponível. Embora o fabricante afirme que este instrumento é menos preciso do que os saldos radiômetros de cúpula normalmente utilizados, principalmente devido à sua perda de precisão em altas velocidades do vento, experimentos de campo para avaliação da precisão das estimativas de evapotranspiração de referência a partir de ambos os tipos de saldo radiômetro são necessárias (GAVILÁN; BERENGENA; ALLEN, 2007).

Cunha et al., (2008) comparando saldo radiômetros Q-7.1, REBS, NR-Lite, Kipp e Zonen, 2000 e CNR1, Kipp e Zonen, 2000) concluíram que, desde que sejam regularmente calibrados (segundo as recomendações dos fabricantes) as medidas de ambos ficariam adequadas para a estimativa da evapotranspiração potencial diária pela equação de Penman-Monteith, sendo a necessidade de calibração apropriada sob condições de campo também apontada como fundamental por FRITSCHEN e FRITSCHEN (2007).

Devido ao exposto, os saldos-radiômetro têm sua utilização freqüentemente restrita à área de pesquisa que possuam estações meteorológicas automáticas (ZANETTI et al., 2008).

Atualmente, com o desenvolvimento e difusão da microeletrônica, as estações meteorológicas automáticas passaram a ser disseminadas largamente em todo o território nacional. Embora possuam sensores para a medida direta da radiação solar global, nem sempre contam com sensores para medidas de constantes físicas importantes ou mesmo de sensores para medidas de rotina da radiação líquida. Isto ocasiona a indisponibilidade de informações meteorológicas locais para fins de estudos agroecológicos, radiométricos e de previsão de safras agrícolas fundamentadas no método da zona agroecológica descrito por DOORENBOS e KASSAM (1979).

Para condições de superfície plana, como nas estações meteorológicas, a radiação líquida pode ser estimada a partir da associação das equações de Angstrom-Prescott, para o balanço de ondas curtas, e de Brunt, para o balanço de ondas longas, sendo esse procedimento

recomendado pela FAO, quando o objetivo é a estimativa da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith a partir de dados de estações meteorológicas convencionais (Allen et al., 1998; Pereira e Villa Nova, 2002). Para tal estimativa são necessários dados de razão de insolação, de pressão parcial de vapor d'água e de temperatura do ar SENTELHAS e NASCIMENTO (2003).

Pereira, Sentelhas, Villa Nova (1998), ao proporem modelos de estimativa da radiação líquida como uma função de elementos climáticos disponíveis em estações meteorológicas convencionais e automatizadas que não dispõem de sensores para tal medida utilizaram dados de radiação líquida, temperatura e umidade relativa do ar, insolação efetiva e irradiância solar global. Os modelos propostos foram testados em comparação com medidas radiométricas, obtidas por saldos-radiômetro instalados na região de Piracicaba/SP, revelando que a radiação líquida 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, adotando-se a equação de Brunt-Penman quando se trata de observações realizadas em uma estação meteorológica convencional; os valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variaram de 0,6353 e 0,8031. Quando a radiação líquida foi expressa por equações de estimativa que consideram a irradiância solar global em lugar da razão de insolação e quando o monitoramento dos elementos climáticos se deu através de uma estação meteorológica automatizada os valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variaram de 0,9099 e 0,9688 quando os valores estimados foram testados através de medidas radiométrica, obtidas de saldo radiômetros (EMA). Esse trabalho revelou, também, que em estudos de cunho mais prático, a radiação líquida pode ser estimada exclusivamente em função da irradiância solar global, sendo que a relação entre a radiação líquida e a irradiância solar global pode ser representada por aproximadamente 57,4% da radiação global para as condições experimentais desse trabalho e que a escolha por um ou outro modelo de estimativa de radiação líquida fica restrita à natureza da estação meteorológica, bem como à disponibilidade dos elementos de clima locais.

Sentelhas e Nascimento (2003) estabeleceram a variação sazonal da relação entre a radiação líquida ( $R_n$ ) em uma superfície padrão (gramada) e irradiância solar global ( $Q_g$ ), considerando-se tanto os valores diurnos como os diários, para Piracicaba, SP, e testaram essas relações como método de estimativa de tais variáveis. Observaram que a relação entre radiação líquida diária e radiação global variou consideravelmente ao longo do ano, de 0,473 no inverno a 0,595 no verão, indicando o efeito tanto da nebulosidade como o coeficiente de reflexão da superfície. A relação entre radiação líquida e irradiância solar global também oscilou bastante, com os valores mais elevados, entre 0,564 e 0,635. Essa relação mostrou-se



ser menos dependente das condições de umidade regional e mais dependente do fotoperíodo, o qual também afetou a relação de radiação líquida e irradiância solar global em base diária, que variou de 1,065 em fevereiro a 1,202 em julho. Os referidos autores obtiveram resultados bastante expressivos da relação entre a radiação líquida e a irradiância solar global com o coeficiente de determinação de 0,944, o índice de concordância de 0,944, e o erro absoluto médio da ordem de  $0,74 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , com uma tendência de subestimativas da ordem de 3,63%.

Pezzopane e Pedro Júnior (2003), buscando determinar as relações entre radiação global, radiação líquida e fluxo de calor latente, sensível e calor no solo em videira, cv. “Niagara Rosada”, conduzida em espaldeira, em Jundiaí, SP, concluiu que é possível estimar a radiação líquida a partir da radiação global de forma satisfatória, obtendo um coeficiente de determinação associado à relação de dependência entre  $R_n$  e  $Q_g$  da ordem de 0,85. Pezzopane (2003) obteve resultados semelhantes mediante mesmo estudo de análise de regressão linear simples, tendo encontrado um coeficientes de determinação acima de 0,90 para a cultura de alfafa, o que confirma a viabilidade de utilização da equação de estimativa da radiação líquida a partir de dados de radiação global para a referida espécie.

Zanetti et al. (2006), interessados em métodos de estimativa que utilizem dados mais facilmente acessíveis, propuseram equações de estimativa da radiação líquida diária de gramado, em função das temperaturas máximas e mínimas do ar e de radiação solar global para Campos de Goytacazes/RJ e Viçosa/MG, obtendo valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,7217 e 0,9802 em Goytacazes, e 0,8806 e 0,9517 em Viçosa, para radiação líquida, quando os valores estimados foram testados através da radiação líquida calculada (ALLEN et al., 1998).

Azevedo; Silva; Silva (2003) determinaram relações entre a radiação solar global, saldo de radiação e fluxo de calor no solo caracterizando a partição do saldo de radiação nos fluxos de calor latente em videira conduzida em espaldeira, sob condições de estresse hídrico, e constataram que o calor latente representou 44% do  $R_n$  e o calor sensível 48%. Em um dia chuvoso, o calor latente representou 86% da radiação líquida e o calor sensível, 21%. Em um dia ensolarado, após um período de chuvas, calor latente e o calor sensível foram, respectivamente, 68% e 29% da radiação líquida. O fluxo de calor no solo ( $G$ ) foi, em média, 5,7% e 1,3% da radiação líquida para as ruas mantidas capinadas e com cobertura, respectivamente.

Ometto (1968), usando dados de radiação medida com piranômetro Eppley, determinou para Piracicaba, SP as relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação para duas épocas distintas. O mesmo autor na década de 90 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 (OMETTO, 1991).

Sentelhas et al. (1998) verificaram para as condições climáticas de Piracicaba, SP sobre gramado, uma relação de 0,57, ou seja, a radiação líquida representa em termos energéticos 57% da componente da radiação global.

Azevedo et al. (1997) concluíram, em estudos de balanço de energia e estimativa de evapotranspiração potencial da cultura da videira, na região de Petrolina (PE), que é possível estimar a radiação líquida em função apenas da radiação solar global incidente com excelente precisão.

Marin (2003) visando determinar a evapotranspiração de um cafezal adensado Mundo Novo Apuatã (2500 plantas/ha), irrigado por gotejamento e sua partição em transpiração e evapotranspiração da entrelinha em Piracicaba/SP, observou que a radiação líquida apresentou uma boa relação entre transpiração, tanto medida por fluxo de seiva quanto estimada pelo modelo de Penman-Monteith e o saldo de radiação. Relações similares foram verificadas em macieira, noqueira e outras culturas perenes de espécies lenhosas (VALANCOGNE et al., 2000). O autor verificou que a radiação líquida correspondeu a 49% da irradiância global e destaca, porém, que essa relação não pode ser extrapolada para qualquer cafezal, mas apenas para aqueles cultivados sob condições ambientais semelhantes ao desse estudo, bem como considerando-se cultura com o mesmo porte, para a mesma época do ano e mesmo tipo de cobertura vegetal sobre o solo. Relacionando-se a radiação líquida do cafezal à radiação líquida de gramado encontrou-se relação próxima a 1:1.

A radiação líquida de uma superfície vegetada varia temporal e espacialmente, sendo considerada como uma variável fundamental na modelagem dos fluxos de propriedades físicas (massa e energia) na camada limite planetária. Sobre a magnitude da radiação líquida interferem diversos fatores relacionados com os componentes de ondas curtas e ondas longas. Dentre estes, destacam-se latitude, altitude, época do ano, cobertura de nuvens, composição espectral da radiação incidente, propriedades espectrais da vegetação, grau de cobertura do solo pela vegetação, disponibilidade hídrica no solo e temperatura da superfície e da atmosfera (CUNHA et al., 1993).

Com o objetivo de demonstrar a variabilidade temporal da radiação líquida em solo nu, Leitão et al. (2000) desenvolveram um método experimental, em Mossoró/RN, para avaliar o comportamento do balanço de radiação, em períodos representativos das quatro estações do ano. Observaram, então, que durante a primavera os fluxos componentes da radiação líquida foram maiores em relação às outras estações, com exceção da radiação atmosférica, a qual foi máxima no outono. Nos períodos de inverno, verão e outono, a média da radiação global incidente à superfície do solo, comparada a da primavera, apresentou redução de 14%, 10 e 16%, respectivamente. Analisando a radiação líquida, verificaram que esta se manteve no outono praticamente igual ao da primavera, apenas 0,8% menor, ao passo que no inverno e no verão sofreu redução de 6% e 33%, respectivamente. Já o albedo médio diário apresentou valor máximo no verão (21,7%) e mínimo no outono (16,6%).

Em estudos micrometeorológicos e agrônômicos a radiação líquida possibilita a determinação do fluxo do calor no solo, tendo em vista que a medida direta do fluxo de calor sensível no solo é de difícil obtenção com elevada precisão, dada as múltiplas fontes de erros decorrentes da calibração dos sensores empregados para avaliar a temperatura do solo, umidade do solo, as medidas de fluxo na placa do sensor em associação com as condições de heterogeneidade do perfil do solo (GAVILÁN; BERENGENA; ALLEN, 2007).

A estimativa da variação espacial da radiação líquida, e conseqüentemente da evapotranspiração, é fundamental para muitas aplicações em recursos hídricos e modelagem climática. A evaporação é uma variável chave não somente em determinações do balanço hídrico, mas também para estimar as interações entre solo, planta e atmosfera (ATAÍDE, 2006).

Em agrometeorologia o estudo da evapotranspiração contribui para o planejamento racional da irrigação em áreas cultiváveis e, juntamente com outros parâmetros meteorológicos, fornece também subsídios básicos à regionalização das áreas mais adequadas ao desenvolvimento de determinadas espécies vegetais. A determinação do consumo hídrico das culturas é de fundamental importância para que a aplicação da água seja feita de maneira racional. Nesse contexto, faz-se necessário um estudo apurado da evapotranspiração na análise da demanda hídrica de regiões onde o crescimento e desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente a produtividade, são limitadas pelo fator hídrico. Em regiões tropicais, a evapotranspiração chega a consumir 80% da radiação solar disponível (PEREIRA, 2006).

A irrigação em espécies vegetais de interesse econômico, em geral, não é feita de forma sustentável, acarretando uso excessivo da água na irrigação, o que ocasiona prejuízos ao ambiente no decorrer do tempo e redução na produção da matéria verde. O consumo

desnecessário de energia elétrica e de água, lixiviação dos nutrientes e a maior compactação do solo, são alguns exemplos do uso indiscriminado de água que repercutem na diminuição da produtividade (PEREIRA,2006).

A quantificação da irrigação é realizada fazendo-se o balanço hídrico da camada do solo ocupada pelo sistema radicular da espécie vegetal de interesse, o qual tem, na “evapotranspiração” e na precipitação pluviométrica, seus principais componentes, motivo pelo qual tem constituído uma área de pesquisa que tem atraído a atenção de muitos cientistas envolvidos com estudos relacionados ao manejo da irrigação e à agrometeorologia no mundo inteiro (MENDONÇA et al., 2003).

“Evapotranspiração potencial” foi o termo utilizado por Thornthwaite no início da década de 40 do século passado, para expressar não apenas as perdas por evaporação superfícies de água livre e do solo, mas também das perdas pela transpiração das plantas na biosfera. Os conceitos de evaporação e transpiração se diferenciam pela definição da superfície evaporante. A evaporação contabiliza as perdas de água superfícies de água livre (lagos, rios) e do solo enquanto que a transpiração é a análise das perdas de água para a atmosfera através da transpiração de plantas e animais. A medição separada da transpiração e da evaporação é bastante complexa, portanto o termo referente à evapotranspiração (ou calor latente) na equação de balanço hídrico representa o processo combinado desses dois fenômenos físicos. Esse processo de evapotranspiração é controlado pelo balanço de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas (VILLA NOVA, 1996).

O termo evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi aperfeiçoado em diversas oportunidades, foi definido por Doorenbos; Pruitt (1977) como aquela que ocorre em uma extensa superfície vegetada, em crescimento ativo e cobrindo totalmente o terreno, estando este em bem suprido de umidade, ou seja, em nenhum instante a demanda atmosférica é restringida por falta de água no solo. Para Penman (1956), a vegetação deve ser baixa e de altura uniforme (0,08 a 0,15m). A grama foi prontamente tomada como padrão pois esta é a cobertura utilizada nos postos meteorológicos. Assim definida a evapotranspiração de referência é um elemento climatológico fundamental, que corresponde ao processo oposto da chuva (Thornthwaite, 1946) sendo expressa na mesma unidade de medida (mm). A comparação entre chuva e a evapotranspiração de referência resulta no balanço hídrico climatológico, indicando excessos e deficiências de umidade ao longo do ano ou da estação de crescimento das culturas. Condições realmente potenciais ocorrem 1 a 2 dias após uma chuva generalizada, onde toda a região está umedecida e as contribuições advectivas são

minimizadas, independente do tamanho da área vegetada. Essa condição não ocorre em regiões áridas e semi-áridas, e também nos meses de estiagem em regiões com chuvas sazonais.

Penman (1956) argumenta que, quando a cobertura do solo é completa, a evapotranspiração potencial é condicionada principalmente pelos elementos meteorológicos, dentre eles a radiação líquida é um dos principais elementos meteorológicos. Quando a radiação líquida é recebida por um dossel, sob condições normais de suprimento de água, parte é transformada em evaporação, parte em calor sensível para o ar atmosférico, parte em fluxo de calor sensível no solo e parte em armazenamento de energia, de acordo com o princípio da conservação da energia (PEREIRA, VILLA NOVA, SEDYAMA, 1997). Assim, a radiação líquida é a que exerce maior influência na taxa de evapotranspiração dos cultivos.

No entanto, Villa Nova (1987) ressalta que de maneira geral, quanto maior a disponibilidade de energia solar, de temperatura do ar e de velocidade do vento e quanto menor a umidade relativa do ar, maior deverá ser a demanda evaporativa da atmosfera, ocasionando aumento na taxa de evapotranspiração, quando a umidade do solo não for fator restritivo. Em regiões onde ocorrem advecções fortes, a importância da radiação líquida decresce, e a advecção ou transferência de calor sensível das áreas circunvizinhas poderá contribuir no processo evapotranspirativo com energia até maior que aquela disponível à área considerada, aumentando, dessa forma, a importância da velocidade do vento e da umidade relativa do ar na evapotranspiração (SILVA, FOLEGATTI, VILLA NOVA, 2005a)

A escolha de um método para a estimativa da evapotranspiração depende de uma série de fatores. Um deles é a disponibilidade de dados meteorológicos exigidos em cada método, sendo que Allen et al.(1998), após rigorosas avaliações, recomendam que o método de Penman-Monteith modificado, introduzido pela FAO, é o que apresenta melhores estimativas nos diferentes tipos de climas testados, sendo por isso, desde então, recomendado como o método padrão para a estimativa da evapotranspiração potencial (VANZELA e HERNANDEZ, 2007).

É desejável que se tenha um método que estime a evapotranspiração potencial com boa precisão e a partir de dados meteorológicos fáceis de serem obtidos, pois a demanda potencial é utilizada para calcular o consumo de água das plantas, de modo a garantir a sustentabilidade da agricultura irrigada em dada região. O planejamento da irrigação e a tomada de decisão em escala regional são feitos com base nos cálculos de estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc), a qual depende, entre outros fatores, de elementos

meteorológicos locais que governam a demanda evaporativa da atmosfera (VILLA NOVA e PEREIRA, 2006).

Como geralmente os métodos que fazem uso de valores médios diários de temperatura, umidade relativa do ar e vento não retratam bem a realidade física do processo de perda d'água e podem mascarar o real comportamento diurno dessas variáveis climáticas, Villa Nova e Pereira (2006) desenvolveram o método ajustado em relação ao método de Priestley-Taylor para estimar a evapotranspiração potencial em base diurna durante o período de luz, visando a quantificar apenas os valores diurnos da evapotranspiração, os quais são bem mais representativos do processo de transferência de vapor d'água para a atmosfera em um dado agroecossistema, comparados às taxas de transferência observadas em períodos de 24 horas. Estudos de regressão revelaram que o método proposto apresentou excelentes resultados quando comparado com o método de Penman-Monteith, constatando-se que há concordância bastante consistente entre ambos os métodos, o que se confirma estatisticamente pelo valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,961 e pela dispersão extremamente pequena dos pares ordenados ao redor da linha 1:1, fato que evidencia a viabilidade de recomendação do método de Priestley-Taylor ajustado quando não se dispõe de maior número de elementos meteorológicos disponíveis para avaliar a demanda potencial em determinada localidade. Sob as condições climáticas da região de coleta dos dados experimentais, o critério de ajuste da evapotranspiração de referência estimada pelo método do balanço de energia proposto (EToPTa) realizou estimativas praticamente iguais às aquelas obtidas pelo método clássico de Penman-Monteith, com a vantagem de simplificar o cálculo da evapotranspiração potencial e de prescindir do conhecimento da velocidade de vento, utilizando de maneira simples o balanço de energia radiante, a temperatura e a umidade relativa média diária do ar.

Villa Nova et al. (2006), buscando elaborar, com base no método de Penman, um modelo bastante simplificado para o cálculo da evapotranspiração diurna, que prescinde de dados de velocidade do vento e umidade relativa do ar, sem perda de precisão, ampliou bastante a sua possibilidade de aplicação. A comparação entre os valores da evapotranspiração potencial diário-diurnos, medidos em lisímetros de pesagem de alta precisão e os valores estimados tanto pela metodologia em estudo como pelo critério de cálculo proposto por Penman-Monteith, indicou elevada concordância entre valores observados e calculados, evidenciado pela análise estatística de regressão linear o que revela a viabilidade da metodologia proposta para o local em estudo, cuja precisão é confirmada pelos elevados coeficientes de determinação (superior a 0,92) e também por uma pequena dispersão dos dados em torno da linha de 45°. Em um gráfico tipo 1:1. Ao comparar os dois métodos

com o método de Penman e medidas lisimétricas, foi possível observar que os erros-padrão foram, respectivamente, 0, 247 mm dia<sup>-1</sup> e de 0, 4367 mm dia<sup>-1</sup>. O método de Penman-Simplificado foi, portanto, uma alternativa viável para estimar a evapotranspiração potencial, sob as condições meteorológicas de Piracicaba, SP.

Chiew, Kamaladasa, Malano (1995) compararam a evapotranspiração potencial estimada usando os métodos de Penman-Monteith, métodos da FAO-24 e Tanque Classe A com dados de dezesseis localidades da Austrália. Observaram que os dados obtidos com o método de Penman FAO-24 levam a valores geralmente, 20 a 40% maior que o de Penman-Monteith. A estimativa diária da evapotranspiração potencial pelo método da radiação FAO-24 e Penman-Monteith foi similar. Santiago et al. (2002) observaram em seu experimento com evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman – Monteith (FAO – 56) em escala mensal e decendial, que mesmo com as dificuldades de mensuração lisimétrica da evapotranspiração potencial a desempenho da parametrização proposta pelo FAO para a equação de Penman – Monteith pode ser considerada adequada para estimativas mensais e decendiais.

Estudos realizados por Tanner et al., (1987), Nie et al., (1992), Malek (1993), Azevedo (1999) e Silva (2000) apud Silva et al. (2005a) mostram que os valores estimados de evapotranspiração estimada pelo sistema automático de razão de Bowen apresentam boa correlação, quando comparados aos valores medidos por lisímetro. E quando Silva et al., (2005a) compararam a evapotranspiração do capim Tanzânia estimada pelo método de razão de Bowen com a medida por lisímetro de pesagem, obtiveram razoável correlação com as medidas feitas em lisímetros de pesagem.

Cunha e Bergamaschi (1994) estudando o balanço de energia empregando o método da Razão de Bowen, na cultura da alfafa, cv. *Crioula*, em condições diferenciadas de demanda evaporativa da atmosfera no Sul do Brasil observaram que em média, a radiação líquida foi consumida de maior escala em fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível para o ar atmosférico (H) e fluxo de calor sensível no solo (S), respectivamente.

A radiação líquida, uma das variáveis requeridas pelo método de Penman-Monteith (FAO 56) e por outras equações mais simples, como Priestley-Taylor ajustado (EToPTa) ou o método de Penman simplificado (EToPs) pode ser medida por equipamentos de alto custo (saldo radiômetros), o que restringe sua utilização à área de pesquisa que possuam estações meteorológicas automáticas (ZANETTI et al., 2008).

Atualmente, com o desenvolvimento e difusão da microeletrônica, as estações meteorológicas automáticas passaram a ser disseminadas e embora possuam sensores para a

medida direta da radiação solar global, nem sempre contam com sensores para medidas de constantes físicas importantes ou sensores para as medidas radiométricas de radiação líquida, o que ocasiona a indisponibilidade de dados importantes, especialmente para estudos agroecológicos, radiométricos e de previsão de safras agrícolas fundamentada no método da zona agroecológica (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Na tentativa de contornar esses problemas, é comum encontrar equações para estimar o valor da radiação líquida e da evapotranspiração de referência a partir de variáveis que podem ser obtidas de formas mais prática (SAMANI, 2000).

Ataíde (2006) destaca a importância das medidas de saldo de radiação em ambientes vegetados para caracterizar as disponibilidades térmicas e hídricas, fundamentais no entendimento das reações genótipo-ambiente, que determinam a produção e a produtividade da vegetação, corroborando com Galvani (2001), que menciona que para estudos de micro meteorologia, a radiação líquida, constitui-se em elemento fundamental, quando considerada, como um dos componentes do balanço de energia.

Vanzela e Hernandez (2007), visando avaliar o desempenho de diferentes variáveis climáticas na determinação da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO na região de Ilha Solteira, SP, obteve resultados que demonstram que a construção de modelos lineares, evidenciando a forte influência desse parâmetro climático no processo de evapotranspiração potencial, podendo ser utilizada para a estimativa da evapotranspiração potencial padrão.

Modelos têm sido desenvolvidos para evidenciar onde estes podem ser utilizados como procedimento de rotina para dar suporte ao planejamento da irrigação devido as suas bases físicas e biológicas, o modelo de Penman-Monteith FAO56 o método mais frequentemente empregado para estimar o consumo de água em pomares (PEREIRA, 2006).

O procedimento de cálculo FAO-56 requer dados climáticos locais, incluindo velocidade de vento e umidade relativa do ar, sendo que estas variáveis nem sempre disponíveis em estações meteorológicas padrões. McANENEY e ITIER (2006), apud PEREIRA et al., (2007) questionaram se o esforço extra envolvido na caracterização precisa de todas as variáveis de entrada no modelo de Penman-Monteith é sempre justificado como uma ferramenta de irrigação operacional. Os primeiros autores sugerem que uma alternativa viável com menor número de variáveis de entrada e que apresente bom nível de precisão pudesse ser obtida através do uso da fórmula de Priestley-Taylor, a qual requer somente conhecimento da radiação líquida diária e a temperatura média diária do ar. A equação de Priestley-Taylor, apresenta bons resultados em pomares de espécies arbóreas desde que haja



uma estreita relação de dependência entre consumo de água da árvore e radiação solar incidente.

Vasta é a literatura que quantifica os fluxos de radiação pelo método da razão de Bowen – balanço de energia em diversas regiões do país e do mundo. A relação entre o fluxo de calor sensível e de calor latente de evapotranspiração foi introduzido por Bowen (1926) e é amplamente utilizada, especialmente em agrometeorologia. Sua aplicação vai desde a determinação do balanço energético em áreas ou culturas de interesse, passando pela determinação da perda de água e de coeficientes de cultura até o estudo de relações hídricas em plantas e barragens, outra utilidade do método é estimar a demanda hídrica de uma determinada cultura em razão do microclima no qual ela está inserida PEREIRA (2006b).

Segundo Todd; Evertt; Howell (2000), o método da razão de Bowen, também conhecido como método do balanço de energia (BREB - Bowen Ratio Energy Balance) é um método micrometeorológico freqüentemente utilizado para estimar o fluxo de calor latente devido a sua acurácia, baixo custo, simplicidade de operação e aplicação em diferentes tipos de ecossistemas. Pode ser utilizado para quantificar o uso de água, para calcular coeficientes de evapotranspiração de diferentes tipos de cultura, investigar relações entre plantas e água e ainda prever modelos de uso da água para culturas .

Tanner (1960) demonstrou que a evapotranspiração estimada através do método do balanço de energia - razão de Bowen apresentou boa correlação com o método de evapotranspiração por lisímetros. Galvani (2001) e Cunha (2001) utilizaram o método para estimativas de fluxos de calor latente em cultivos de pimentão (cultivo protegido) e pepineiro (natural e protegido). Teixeira et al. (1999) estimaram a evapotranspiração para uma cultura de videira em Petrolina/PE e Teixeira (2001) usou o mesmo princípio da razão de Bowen para estimar os componentes do balanço de energia em uma cultura de banana também em Petrolina/PE.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

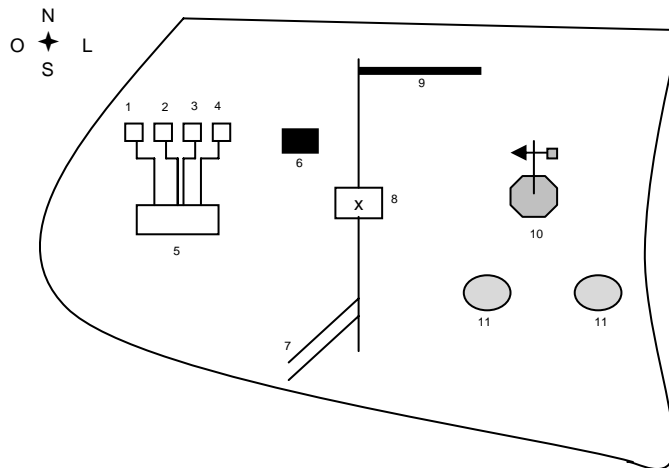
### 4.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Engenharia Rural, localizada na Fazenda Areão, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo situada no município de Piracicaba, SP, a uma altitude de 546 m acima do nível do mar, com as coordenadas geográficas de 22°42’30” S e 47°30’00” WGr.

### 4.2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

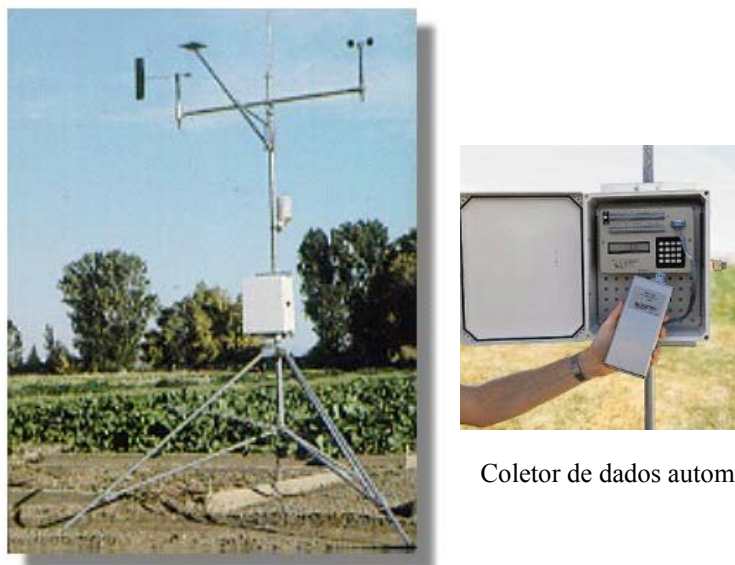
Segundo a classificação climática de William Köppen, o clima na região de Piracicaba é do tipo Cwa, isto é, clima subtropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio inferior a 18°. Os dados climáticos médios da região apresentam as seguintes médias anuais: precipitação 1.259 mm, temperatura do ar 21,4°C, umidade relativa do ar 74% e velocidade do vento de 2,2 m/s (PEREIRA, 1998).

O solo do local do experimento é classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), série Luiz de Queiroz, com declividade média de 2,3%. No local do experimento, toda a área encontra-se vegetada com grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge) com altura uniforme entre 8 e 12 cm, mantida por meio de cortes periódicos. As dimensões do local experimental foram de 35 x 90 m perfazendo uma área total de 3.150 m<sup>2</sup>. Detalhes da localização e do formato da área podem ser observados na Figura 1. Na parte central do experimento instalou-se uma estação automática da marca Campbell Científica Inc., Uma – USA – para monitoramento dos elementos meteorológicos locais (Figura 2).



- 01 – Lisímetro de drenagem;
- 02 – Lisímetro de drenagem;
- 03 – Lisímetro de lençol freático constante;
- 04 – Lisímetro de lençol freático constante;
- 05 – Caixa de observação;
- 06 – Lisímetro de pesagem;
- 07 – Adutora;
- 08 – Cabeçal de controle;
- 09 – Linha secundária de gotejadores;
- 10 – Estação meteorológica automática;
- 11 – Tanque Classe A

**Figura 1.** Esquema da área experimental contendo uma estação meteorológica automática, três tipos de lisímetros e dois tanques de evaporação (modelo Classe A).



Coletor de dados automático

**Figura 2.** Estação meteorológica automática (EMA).

#### 4.3 – DADOS METEOROLÓGICOS

Os elementos meteorológicos utilizados neste trabalho foram coletados por uma estação meteorológica automática (EMA) instalada na área experimental, durante o período compreendido entre 01 de agosto de 1996 a 09 de dezembro de 1996 (PEREIRA, 1998).

A partir dos dados originais, procurou-se eliminar os dias cujos valores de precipitação pluviométrica fossem superior a 1,0 mm, bem como os dias em que foram realizados trabalhos de manutenção na área experimental, a fim de não interferir nas medidas feitas pelos sensores. Desta maneira, mediram-se os seguintes elementos meteorológicos: radiação líquida, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, fluxo de calor no solo e evapotranspiração de referência para os períodos médios de radiação líquida positiva, aqui designados como período de luz. A base de dados utilizada consta de uma série de 89 observações diárias.

A EMA foi equipada com seguintes sensores:

- temperatura do ar e umidade do ar a 2 m de altura (modelo: HMP35C Temperature/RH Probe, exatidão: temperatura  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , umidade relativa =  $\pm 3\%$ );
- radiação solar global a 3 m de altura (modelo: LI 200X Pyranometer – Licor Inc.)
- radiação líquida a 1 m de altura da cobertura vegetal (modelo: Q7.1 Net radiometer – REBS; espectro: 0,25 a 60  $\mu\text{m}$ );
- velocidade do vento a 2 m de altura (modelo: 014A Wind Speed Sensor – Met One Instruments; limiar de medida =  $0,45 \text{ m s}^{-1}$ );

- direção do vento a 2 m de altura (modelo: 024A Wind Direction Sensor – Met One Instruments; limiar de medida =  $0,45 \text{ m s}^{-1}$ ; exatidão de  $\pm 5^\circ$ );
- precipitação a 1,5 m de altura (modelo: TE525 Tipping Bucket Rain Gauge – Weather Bureau; precisão = 0,1 mm);
- densidade de fluxo de calor no solo, medido a 2 cm de profundidade na área evaporante do lisímetro de célula de carga (modelo: HFT-3 Soil Heat Flux Plate – REBS).

Todos os sensores encontravam-se conectados a um datalogger modelo CR 10 da Campbell Scientific, com armazenamento dos dados médios a cada 30 minutos, a partir das leituras feitas a cada segundo.

#### 4.4 – TEORIA DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO LÍQUIDA

A teoria clássica relativa à partição do balanço de energia radiante nos diferentes processos naturais pressupõe que a radiação líquida ( $R_n$ ) recebida de um dossel, sob condições suficientes de suprimento de água, deverá ser transformada parte em mudança de fase da matéria ou evaporação ( $\lambda E$ ), parte em calor sensível para o ar atmosférico ( $H$ ), parte em fluxo de calor sensível no solo ( $G$ ) e parte em armazenamento de energia ( $A$ ). De acordo com o princípio da conservação da energia (PEREIRA et al., 1997), tem-se que:

$$R_n - G = \lambda E + H + A \quad (1)$$

Ao fim de um ciclo diurno, pode-se assumir que  $A$  é desprezível, bem como considerar que  $\lambda E$  e  $H$  retornam da superfície para a atmosfera na forma de transpiração e calor sensível (aquecimento do ar úmido). Foi, então, denominada de razão de Bowen (BOWEN, 1926) a relação entre  $H$  e  $\lambda E$ , sendo definida por:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (2)$$

Assim, substituindo-se (2) em (1) obtém-se:

$$R_n - G = \lambda E (1 + \beta) \quad (3)$$

Com a incidência da radiação líquida sobre uma superfície vegetada e assumindo-se que sua temperatura correspondente a  $T'$  é igual a temperatura do ar ( $T_a$ ), e dado o fato de que

os ganhos de calor sensível devido às variações de armazenamento pertinentes aos fluxos turbulentos de calor latente ( $\lambda E$ ) e calor sensível ( $H$ ) são negligíveis,  $\lambda$  e  $H$  podem ser expressos pelas seguintes equações:

$$\lambda E = \rho \frac{0,622 (es - ea)}{P} \lambda C_v \quad (4)$$

$$H = \rho C_p (T_a - T') C_a \quad (5)$$

onde:

$\lambda E$  – fluxo de calor latente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

$(es - ea)$  – déficit de pressão de saturação de vapor d'água (kPa);

$P$  – pressão atmosférica local (kPa);

$\rho$  - massa específica do ar atmosférico ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$C_v$  – condutância aerodinâmica de transporte turbulento de vapor d'água ( $\text{m s}^{-1}$ );

$\lambda$  – calor latente de vaporização ( $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ );

$H$  – fluxo de calor sensível para o ar atmosférico ( $\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

$C_p$  – calor específico do ar úmido à pressão constante ( $\text{MJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ );

$C_a$  – condutância aerodinâmica de transporte turbulento de calor sensível ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Para definir  $\omega$  no modelo proposto, assumiu-se que para uma folha com bom suprimento hídrico,  $\lambda E$  e  $H$  são igualmente condicionados pelo transporte turbulento de ar úmido em função da diferença de temperatura entre o ar atmosférico e a folha ( $T_a - T'$ ) e o déficit de pressão de saturação do ar ( $es - ea$ ). Ao substituir-se (4) e (5) em (2), a similaridade entre as resistências da cobertura vegetal (estomática,  $R_c$ ) e do ar (aerodinâmica,  $R_a$ ) permite-nos propor a seguinte relação denominada de Razão de Bowen ( $\beta$ ):

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{\rho C_p (T_a - T') C_a}{\rho \frac{0,622 (es - ea) \lambda C_v}{P}} \quad (6)$$

Supondo  $C_a = C_v$  e considerando  $\gamma$  como sendo o coeficiente psicrométrico dado por:

$$\gamma = \frac{C_p P}{0,622 \lambda} \quad (7)$$

E substituindo-se (7) em (6), teremos:

$$\beta = \frac{\gamma (Ta - T')}{(es - ea)} \quad (8)$$

Considerando-se a equação psicrométrica clássica definida por:

$$ea = es' - \gamma (Ta - T') \quad (9)$$

onde:

ea – pressão parcial exercida pelo vapor d'água na atmosfera à temperatura média do ar (kPa);

es' – pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do bulbo úmido (kPa).

E substituindo-se (9) em (8) e cancelando-se os termos idênticos, teremos:

$$\beta = \frac{\lambda (Ta - T')}{es - es' + \gamma (Ta - T')} = \frac{1}{\frac{(es - es')}{\gamma (Ta - T')} + 1} \quad (10)$$

O valor de S corresponde à tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água à temperatura média diária do ar (kPa °C<sup>-1</sup>), sendo obtida pela seguinte expressão:

$$S = \frac{es - es'}{(Ta - T')} \quad (11)$$

Substituindo-se (11) em (10), teremos:

$$\beta = \frac{1}{\frac{S}{\gamma} + 1} = \frac{\gamma}{S + \gamma} \quad (12)$$

Penman (1948) definiu um fator de ajuste para radiação líquida ( $\omega$ ), dado por:

$$\omega = \frac{S}{S + \gamma} \quad (13)$$

Com a expressão  $\frac{\gamma}{S + \gamma} = 1 - \omega$  a qual foi substituída em (12), esta resulta em uma

nova concepção para o parâmetro  $\beta$ , sendo definido por:

$$\beta = 1 - \omega \quad (14)$$

Substituindo-se (14) em (3) e considerando-se o calor latente de vaporização  $\lambda$  correspondente a 2,45 MJ kg<sup>-1</sup>, teremos:

$$E = \frac{(Rn - G)}{\lambda(2 - \omega)} \quad (15)$$

Durante os processos de evaporação, transpiração, bem como de evapotranspiração no transcorrer de todo período diurno os valores médios diários de temperatura do ar ( $T_a$ ) foram considerados para definir o valor de  $\omega$ , o qual pode ser visto no anexo 1 para diferentes altitudes locais (VILLA NOVA e PEREIRA, 2006b).

Assim  $\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  e substituindo-o em (15), E será dado por:

$$E = 0,408 \frac{(Rn - G)}{(2 - \omega)} \quad (16)$$

onde:

E – evapotranspiração da superfície úmida durante o período de brilho solar (mm dia<sup>-1</sup>);

G – fluxo de calor sensível no solo durante o período diurno (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

Rn – saldo de radiação na superfície vegetada (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

$\omega$  - fator de ponderação para radiação líquida.

A radiação líquida ( $Rn$ ) pode ser expressa matematicamente pela soma algébrica de dois balanços parciais de radiação: o balanço de ondas curtas ( $BOC$ ) e o balanço de ondas longas ( $BOL$ ). Portanto,

$$Rn = BOC - BOL \quad (16)$$

$$BOC = Qg(1 - \alpha) \quad (17)$$

Em que:

$Qg$  = densidade de fluxo de radiação solar global (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

$\alpha$  = albedo ou poder refletor da superfície gramada, assumindo valor médio correspondente a 0,23 (PEREIRA et al., 1997).

$BOL$  é a contabilização entre o fluxo de radiação de origem atmosférica (radiação termal,  $Q_{atm}$ ) e a emissão terrestre (radiação termal,  $Q_s$ ). Como  $Q_{atm}$  é uma fração de  $Q_s$ , a



qual varia com as condições atmosféricas locais, pode-se afirmar que BOL sempre assumirá valor negativo em qualquer instante  $t$  de um ciclo de 24 horas. Assim, tem-se que:

$$BOL = Q_{atm} - Q_s \quad (18)$$

BOL é a emissão efetiva terrestre expressa em MJ m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>, e representa o total de radiação de onda longa que a superfície da Terra emitiu e não recebeu de volta. É a radiação de onda longa emitida pela superfície e contra-irradiada na direção da Terra que aquece o ar atmosférico, causando variações no regime vigente de H (fluxo de calor sensível para o ar atmosférico). Assim, pode-se asseverar com boa aproximação que BOL converte-se em H. Logo, BOL = H. Portanto, pode-se escrever que:

$$Rn = BOC - H \quad (19)$$

$$H = BOC - Rn \quad (20)$$

Substituindo-se a equação (14) em (3), tem-se que:

$$Rn - G = \lambda E [1 + (1 - \omega)] \quad (21)$$

Simplificando-se,

$$Rn - G = \lambda E (2 - \omega) \quad (22)$$

Logo,

$$\lambda E = \frac{Rn - G}{(2 - \omega)} \quad (23)$$

A partir da expressão 14, 15 e 20 tem-se,

$$1 - \omega = \frac{H}{\lambda E} = \frac{(BOC - Rn)}{\frac{(Rn - G)}{(2 - \omega)}} \quad (24)$$

Assim,

$$1 - \omega = \frac{BOC - Rn}{Rn - G} (2 - \omega)$$

Sendo G desprezível, obtém-se:

$$1 - \omega = \frac{BOC}{Rn} - \frac{Rn}{Rn} (2 - \omega)$$

$$\frac{BOC}{Rn} - 1(2 - \omega) = 1 - \omega$$

$$\frac{BOC}{Rn} - 1 = \frac{(1 - \omega)}{(2 - \omega)}$$

$$\frac{BOC}{Rn} = \frac{(1 - \omega)}{(2 - \omega)} + 1$$

$$\frac{BOC}{Rn} = \frac{(1 - \omega + 2 - \omega)}{(2 - \omega)}$$

$$\frac{BOC}{Rn} = \frac{(3 - 2 \omega)}{(2 - \omega)}$$

$$\frac{Rn}{BOC} = \frac{(2 - \omega)}{(3 - 2 \omega)}$$

$$Rn = BOC \cdot \frac{(2 - \omega)}{(3 - 2 \omega)}$$

$$Rn = Qg (1 - \alpha) \frac{(2 - \omega^*)}{(3 - 2 \omega^*)} \quad (25)$$

No qual  $\omega$  é um fator de ponderação dependente da temperatura úmida do ar e do coeficiente psicrométrico, o qual pode ser calculado por Wilson e Rouse (1972) e Veswanadham et al. (1991) apud Villa Nova et al. (2002) para temperaturas de bulbo úmido variando de 0 a 32°C. Esse fator é usualmente determinado pela temperatura média do ar. Porém, Monteith (1965) sugere que o referido parâmetro seja obtido em função da média entre as temperaturas do bulbo seco e úmido monitorados por um psicrômetro.

Villa Nova et al. (2002) propuseram um fator de ajuste para  $\omega$  sendo extremamente dependente da altitude local, da temperatura e umidade relativa média do ar.

Assim,  $\omega^*$  é um fator de ponderação para o efeito de radiação solar sobre a evapotranspiração, o qual depende da altitude local, da temperatura média do ar, da umidade relativa média do ar e do coeficiente psicrométrico, podendo ser obtido através da seguinte expressão:

$$\omega^* = \frac{S^*}{S^* + \gamma^*} \quad (26)$$

onde,

$S^*$  = tangente à curva de pressão de saturação de vapor em função da média das temperaturas de bulbo seco e úmido (Tsu).

$\gamma^*$  = coeficiente psicrométrico ajustado em função da média das temperaturas do psicrômetro.

Os valores tabulares de Tsu e de  $S^*$  calculados por Villa Nova et al. (2002) foram utilizados no cálculo de  $\omega^*$  em função da altitude local, da temperatura média do ar e da umidade relativa média do ar para locais de altitude variando entre zero e 1000m (anexo 2), bem como entre 1000 e 2000m (anexo 3) para o período e local estudados.

#### 4.5 – ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

4.5.1 – Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO/91 (PEREIRA, 1998):

A estimativa da evapotranspiração de referência utilizando o modelo de Penman-Monteith (EToPM) foi realizada para o período diário de luz (radiação líquida positiva) através da equação:

$$EToPM = \frac{S \cdot (Rn - G) + N \cdot \rho \cdot Cp \cdot \frac{(es - ea)}{Ra}}{[S + \gamma \cdot (1 + \frac{Rc}{Ra})] \cdot \lambda} \quad (27)$$

onde:

EToPM – evapotranspiração de referência ou potencial (mm dia<sup>-1</sup>);

$\lambda$  - calor latente de vaporização (2,45 MJ kg<sup>-1</sup>);

Rn - radiação líquida (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

G - fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

$\rho$  - massa específica do ar atmosférico (kg m<sup>-3</sup>);

Cp - calor específico do ar a pressão constante (1,013 x10<sup>-3</sup> MJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>);

es - pressão de saturação de vapor d'água à temperatura média do ar (kPa);

ea - pressão atual de vapor d'água na atmosfera à temperatura média do ar (kPa);

Rc – resistência do dossel (s. m<sup>-1</sup>);

Ra – resistência aerodinâmica (s. m<sup>-1</sup>);

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>);

S – declividade da curva de pressão de vapor à temperatura média diária do ar (kPa °C<sup>-1</sup>);

N – fotoperíodo (s):

#### 4.5.1.1 – Calor latente de evaporação ( $\lambda$ )

O calor latente de evaporação é a quantidade de energia necessária para evaporar a massa unitária de água estando esta à temperatura T, sendo uma função linear da sua temperatura:

$$\lambda = 2,501 - (2,36 \times 10^{-3}) \cdot T \quad (28)$$

onde:

$\lambda$  – calor latente de evaporação (MJ kg<sup>-1</sup>);

T – temperatura do ar (°C);

Como  $\lambda$  é uma função fraca da temperatura, utilizou-se um valor constante de 2,45 MJ kg<sup>-1</sup> para quantificá-lo sob a temperatura de 20° C.

#### 4.5.1.2 – Massa específica do ar atmosférico ( $\rho$ ):

A massa específica do ar atmosférico foi calculada por meio da equação dos gases ideais:

$$\rho = \frac{P \cdot M}{T_v \cdot R} \quad (29)$$

onde:

$\rho$  - massa específica do ar atmosférico (kg m<sup>-3</sup>);

P – pressão atmosférica média local ( 95, 310 kPa );

R – constante universal dos gases (8 3145 x 10<sup>-3</sup> kJ kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>);

T<sub>v</sub> – temperatura virtual do ar (K).

M – massa molar

SMITH (1991) propõe que a temperatura virtual do ar seja estimada pela expressão:

$$T_v = T + 275 \quad (30)$$

onde:

T – temperatura média do ar no período (°C);

Sustituindo-se os valores de P, M, R e  $T_v$ , na equação (29), obterem a equação:

$$\rho = \frac{332,091}{T + 275} \quad (31)$$

#### 4.5.1.3 – Pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do ar ( $e_s$ )

A pressão de saturação de vapor d'água em função da temperatura do ar, foi estimada pela equação de Tétens:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right) \quad (32)$$

onde:

$e_s$  – pressão de saturação do vapor d'água (kPa);

T – temperatura média diária diurna do ar (°C).

#### 4.5.1.4 – Pressão atual do vapor da água ( $e_a$ )

A pressão atual de vapor d'água foi calculada, conhecendo-se a pressão de saturação de vapor d'água e a umidade relativa do ar, pela equação:

$$e_a = e_s \cdot \frac{UR}{100} \quad (33)$$

onde:

$e_a$  – pressão atual do vapor d'água (kPa);

UR – umidade relativa do ar diária diurna (%).

#### 4.5.1.5 – Coeficiente psicrométrico ( $\gamma$ )

Para psicrômetros sem ventilação forçada a equação que permite o cálculo do coeficiente psicrométrico é a seguinte:

$$\gamma = 10^{-3} \frac{C_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} \quad (34)$$

em que:

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>);

$C_p$  - calor específico do ar a pressão constante (1,013 x10<sup>-3</sup> MJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>);

$\varepsilon$  - razão entre o peso molecular do vapor d'água e do ar atmosférico seco ( $\varepsilon = 0,622$ );

$\lambda$  - calor latente de evaporação (2,45 MJ kg<sup>-1</sup>);

Aplicando-se os valores de  $C_p$ ,  $P$ ,  $\varepsilon$  e  $\lambda$  na equação (34), obtem-se:

$$\gamma = 0,063 \text{ (kPa °C}^{-1}\text{)}$$

#### 4.5.1.6 – Declividade da curva de pressão de vapor d'água (S)

O valor da declividade da curva de pressão de vapor d'água à temperatura do ar foi calculado pela seguinte equação:

$$S = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (35)$$

onde:

$S$  – declividade da curva de pressão de vapor à temperatura do ar (kPa °C<sup>-1</sup>);

$T$  – temperatura do ar (°C);

$e_s$  - pressão de saturação de vapor d'água à temperatura média do ar (kPa).

#### 4.5.1.7 – Radiação líquida (Rn)

Foram utilizados dados de radiação líquida obtidos por dois procedimentos:

a) medidos em radiômetro líquido (Mod. Q7. 1 REBS; spectro:25A60  $\mu\text{m}$ ) colocado a 1 m de altura da superfície vegetal.

b) estimados pela metodologia proposta.

#### 4.5.1.8 – Resistência aerodinâmica (Ra)

Para a estimativa da resistência aerodinâmica, ALLEN et al. (1989) recomendam a utilização da seguinte equação, para períodos de pelo menos 1 dia.

$$Ra = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{K^2 \cdot U_z} \quad (36)$$

onde:

Ra – resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e vapor d'água ( $s \cdot m^{-1}$ );

$z_m$  – altura de medida da velocidade do vento (m);

$z_h$  – altura em que é feita a medida da temperatura e umidade relativa do ar (m);

$d$  – deslocamento do plano zero do perfil do vento (m);

$z_{om}$  – comprimento de rugosidade equivalente para transferência de momentum (m);

$z_{oh}$  – comprimento de rugosidade equivalente para transferência de calor sensível e latente (m);

$k$  – constante de Von Karman ( $k = 0,41$ );

$U_z$  – velocidade do vento medida a altura  $z$  ( $m \cdot s^{-1}$ ).

Monteith (1981) recomenda o cálculo de  $d$ ,  $z_{om}$ ,  $z_{oh}$ , por meio das equações:

$$d = \frac{2}{3} \cdot hc \quad (37)$$

$$z_{om} = 0,123 \cdot hc \quad (38)$$

ou

$$z_{oh} = 0,0123 \cdot hc \quad (39)$$

Padronizando-se a medida da velocidade do vento ( $z_m$ ), temperatura e umidade relativa do ar ( $z_h$ ) à altura de 2,0 m e assumindo-se altura da cultura  $hc = 0,12$  m, conforme sugestões de Allen et al. (1989) e Smith (1991) nas equações (37), (38), (39) e aplicando-os na (36) chega-se a uma equação simplificada para a estimativa da resistência aerodinâmica, para um gramado:

$$Ra = \frac{208}{U_z} \quad (40)$$

Sendo  $U_2$  a velocidade do vento medido a 2 m acima da superfície gramada.

#### 4.5.1.9 – Resistência da cobertura vegetal ( $R_c$ )

A resistência do dossel de uma cultura, em condições de desenvolvimento ativo e sob condições ótimas de umidade do solo, foi estimada por meio da resistência estomática mínima de uma folha e do índice de área foliar da vegetação, conforme sugestão de Allen et al.(1989) por meio da seguinte equação:

$$R_c = \frac{R_i}{0,5 \cdot IAF} \quad (41)$$

em que:

$R_c$  – resistência da cobertura vegetal ( $s \text{ m}^{-1}$ );

$R_i$  – resistência estomática mínima para uma folha ( $s \text{ m}^{-1}$ );

IAF – índice de área foliar.

Assumindo-se o valor de  $R_i = 100 \text{ s m}^{-1}$ , conforme recomendação de MONTEITH (1981) e SHARMA (1983), e adotando-se a equação proposta por ALLEN et al (1989) para a estimativa do IAF para  $h_c = 0,12\text{m}$ , teremos:

$$IAF = 24 \cdot h_c \quad (42)$$

Obtem-se o valor da resistência do dossel padronizado para a cultura de referência, conforme sugerido por SMITH (1991):

$$R_c = 69 \text{ s m}^{-1} \quad (43)$$

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo de Penman-Monteith em relação à resistência do dossel, utilizou-se o valor de  $R_c = 69 \text{ s m}^{-1}$  (SMITH, 1991) durante o período de luz solar.

#### 4.5.2 – Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Priestley-Taylor ajustado

Segundo Villa Nova e Pereira (2006) e Villa Nova et al.(2007), a equação que define o cálculo da evapotranspiração de referência ou potencial obtida pelo ajuste do método de



Priestley-Taylor às condições climáticas de uma determinada localidade (EToPTa) é expressa por:

$$EToPTa = 0,423.\omega^*.(Rn - G) \quad (45)$$

em que:

EToPTa – evapotranspiração de referência ou potencial (mm dia<sup>-1</sup>);

$\omega^*$ , Rn e G já foram definidos anteriormente.

#### 4.5.3 – Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman simplificado

Segundo Villa Nova et al., (2006), a equação que define o cálculo da evapotranspiração de referência ou potencial obtida pelo método de Penman simplificado, é a seguinte:

$$EToPs = 0,408 \frac{(Rn - G)}{(2 - \omega)} \quad (46)$$

em que:

EToPs – evapotranspiração de referência ou potencial (mm dia<sup>-1</sup>);

$\omega$ , Rn e G já foram definidos anteriormente.

#### 4.6 - Análise Estatística

Os valores calculados de radiação líquida (Rn) obtidos por intermédio da metodologia proposta foram correlacionados com os valores medidos em saldo radiômetro (modelo: Q7.1 Net radiometer – REBS; espectro: 0,25 a 60  $\mu$ m) e estimados pelos modelos de Penman-Monteith (EToPM), de Priestley-Taylor (EToPTa), e pelo modelo de Penman simplificado (EToPs) para os dias selecionados. Assim, para a avaliação da resposta da metodologia proposta foi realizada através de regressões lineares simples. Um modelo de regressão que reproduz exatamente a magnitude das observações, pode produzir uma distribuição de pontos sobre uma reta, de forma que a declividade (b) é 1 (um) e o intercepto (a) é 0 (zero).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido através da análise de regressão, descreve a proporção da variação total explicada pelo método de regressão. O valor de  $R^2$  varia entre 0 (zero) e 1 (um), quanto mais próximo de 1 (um) melhor a desempenho do modelo de regressão.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) tem sido largamente utilizado como índice de correlação. No entanto, ( $R^2$ ) não deve ser utilizado individualmente em uma análise de desempenho, devido ao fato que o  $R^2$ , muitas vezes, não estar relacionado com o tamanho da diferença entre o valor padrão e o valor previsto por modelos de estimativa ou outros mecanismos de medida padrão (WILMOTT ; WICKS, 1980).

Wilmott et al., (1985), elaboraram o seguinte índice **d** de concordância, para a avaliação do desempenho de modelos de estimativas, podendo ser utilizado também na análise de funcionamento de dispositivos de mensuração.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (47)$$

em que:

$P_i$  – valor estimado (ou previstos – isto é, modelo de estimativa ou outros dispositivos)

$O_i$  – valor observado (padrão)

$O$  – média dos valores observados (padrão)

O valor do índice **d** é mais sensível a erros sistemáticos e não sistemáticos de modelos, e reflete uma tendência quando combinado com a análise de  $R^2$ . Seu valor pode variar de 0 (zero), para total discordância entre o modelo e a realidade, a 1 (um) para total concordância. Outros indicadores da desempenho das medidas de dispersão entre os valores estimados e observados foram considerados neste estudo.

Neste trabalho foi considerado ainda um novo índice **c** proposto por Camargo e Sentelhas (1995) para indicar o desempenho do método em estudo, reunindo os índices de precisão **R** e de exatidão **d**, sendo definido pelo produto entre estes dois índices. O critério de interpretação do desempenho de modelos de estimativa associado ao índice **c** proposto pelos referidos autores podem ser visualizados no seguinte quadro:

**Quadro 1.** Índice do desempenho do método em estudo

Valores de c	desempenho
$> 0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

**Fonte:** PEREIRA (1997).

Todos os cálculos estatísticos foram realizados com o auxílio do software Microsoft Office Excel.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 - VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Os valores diários da radiação líquida estimada pela metodologia proposta e medida pelo saldo radiômetro, expressos em  $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ , para Piracicaba, Estado de São Paulo, encontra-se na tabela 1.

**Tabela 1** – Valores de radiação líquida medida por saldo radiômetro ( $R_{n_{med}}$ ) e estimada pela metodologia proposta ( $R_{n_{est}}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996.

Data	T °C	UR %	* $\omega$	Qg MJ m <sup>-2</sup> . dia <sup>-1</sup>	$\alpha$	R <sub>n<sub>est</sub></sub> MJ m <sup>-2</sup> . dia <sup>-1</sup>	R <sub>n<sub>med</sub></sub> MJ m <sup>-2</sup> . dia <sup>-1</sup>
01/08/96	17,15	67,50	0,642	15,30	0,23	9,32	8,55
02/08/96	15,47	61,23	0,615	16,55	0,23	9,97	9,46
03/08/96	15,62	68,16	0,621	15,30	0,23	9,24	9,29
04/08/96	17,22	63,17	0,639	16,13	0,23	9,82	9,72
05/08/96	17,63	59,41	0,640	15,80	0,23	9,62	9,03
06/08/96	17,34	60,46	0,634	15,26	0,23	9,27	8,75
07/08/96	18,76	59,90	0,659	14,63	0,23	8,98	8,48
08/08/96	20,19	62,17	0,674	14,25	0,23	8,81	8,46
09/08/96	22,25	54,77	0,691	12,29	0,23	7,66	7,19
11/08/96	17,33	83,50	0,653	10,28	0,23	6,30	6,80
12/08/96	18,08	83,93	0,663	13,75	0,23	8,46	8,38
13/08/96	19,99	80,16	0,684	15,26	0,23	9,47	9,92
15/08/96	17,81	80,17	0,658	13,25	0,23	8,13	8,69
16/08/96	14,64	64,60	0,605	18,89	0,23	11,34	10,21
17/08/96	16,20	70,13	0,631	17,51	0,23	10,62	10,74
18/08/96	17,15	67,12	0,641	17,93	0,23	10,92	10,85
19/08/96	17,85	65,41	0,648	17,64	0,23	10,78	11,16
21/08/96	19,57	59,28	0,659	17,68	0,23	10,85	10,92
22/08/96	20,64	56,07	0,674	16,89	0,23	10,44	10,12

**Tabela 1** – Valores de radiação líquida medida por saldo radiômetro ( $Rn_{med}$ ) e estimada pela metodologia proposta ( $Rn_{est}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>T</b> °C	<b>UR</b> %	<b>*<math>\omega</math></b>	<b>Qg</b> MJ m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Rn<sub>est</sub></b> MJ m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	<b>Rn<sub>med</sub></b> MJ m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>
23/08/96	20,87	59,24	0,677	16,39	0,23	10,14	10,52
24/08/96	20,52	61,00	0,680	18,81	0,23	11,66	11,39
25/08/96	20,92	56,68	0,677	18,52	0,23	11,46	11,26
26/08/96	22,75	54,90	0,695	18,31	0,23	11,43	11,12
27/08/96	24,06	56,46	0,724	17,05	0,23	10,80	10,36
28/08/96	21,95	70,75	0,699	16,01	0,23	10,01	9,41
29/08/96	20,89	72,03	0,686	15,42	0,23	9,59	9,24
30/08/96	22,80	68,28	0,705	16,89	0,23	10,59	10,39
31/08/96	24,34	58,67	0,716	19,06	0,23	12,02	11,29
02/09/96	20,21	70,65	0,679	19,69	0,23	12,20	11,54
04/09/96	19,70	80,25	0,680	13,63	0,23	8,45	7,94
07/09/96	19,10	74,88	0,671	20,15	0,23	12,44	13,00
12/09/96	17,68	79,75	0,656	14,42	0,23	8,84	9,28
13/09/96	19,68	78,92	0,679	18,14	0,23	11,24	12,42
14/09/96	20,73	76,95	0,691	19,14	0,23	11,93	13,35
15/09/96	21,02	74,73	0,692	20,57	0,23	12,82	13,57
17/09/96	18,86	80,86	0,671	14,42	0,23	8,90	9,85
18/09/96	17,50	73,07	0,649	21,82	0,23	13,34	12,70
19/09/96	19,93	69,02	0,675	19,81	0,23	12,25	13,84
20/09/96	21,14	66,94	0,687	18,89	0,23	11,75	13,29
22/09/96	23,89	55,51	0,709	19,19	0,23	12,06	13,14
23/09/96	24,64	59,83	0,719	17,93	0,23	11,32	12,48
24/09/96	23,44	68,71	0,712	16,89	0,23	10,63	11,25
26/09/96	22,18	74,25	0,703	19,77	0,23	12,39	13,75
27/09/96	22,83	69,19	0,706	19,52	0,23	12,25	13,42
28/09/96	20,23	82,86	0,688	8,23	0,23	5,12	4,79
29/09/96	22,32	75,83	0,706	16,68	0,23	10,46	11,68

**Tabela 1** – Valores de radiação líquida medida por saldo radiômetro ( $Rn_{med}$ ) e estimada pela metodologia proposta ( $Rn_{est}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>T</b> °C	<b>UR</b> %	<b>*<math>\omega</math></b>	<b>Qg</b> MJ m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Rn<sub>est</sub></b> MJ m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	<b>Rn<sub>med</sub></b> MJ m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>
30/09/96	22,34	71,78	0,703	18,77	0,23	11,76	13,96
01/10/96	20,43	68,96	0,680	19,06	0,23	11,81	12,07
04/10/96	21,10	79,22	0,695	21,19	0,23	13,23	15,20
07/10/96	20,39	84,70	0,690	19,56	0,23	12,18	12,53
08/10/96	20,41	77,07	0,686	15,76	0,23	9,79	12,01
09/10/96	22,32	74,09	0,704	20,06	0,23	12,58	14,27
15/10/96	19,35	74,71	0,680	18,77	0,23	11,63	10,67
16/10/96	19,96	74,90	0,680	22,40	0,23	13,89	14,38
17/10/96	22,73	75,50	0,711	22,32	0,23	14,04	15,82
18/10/96	25,05	70,38	0,732	21,19	0,23	13,47	14,79
19/10/96	24,99	69,87	0,731	16,93	0,23	10,76	12,02
21/10/96	21,30	83,15	0,699	12,50	0,23	7,82	8,19
22/10/96	22,81	77,65	0,712	21,44	0,23	13,49	15,31
23/10/96	24,37	77,31	0,729	19,14	0,23	12,15	14,75
24/10/96	21,70	71,17	0,697	21,57	0,23	13,47	12,40
28/10/96	22,21	78,56	0,707	18,56	0,23	11,65	12,92
29/10/96	23,31	66,92	0,711	22,45	0,23	14,12	15,25
30/10/96	24,47	63,97	0,721	20,69	0,23	13,08	14,95
31/10/96	25,80	61,40	0,733	22,03	0,23	14,01	15,81
04/11/96	22,23	82,68	0,711	17,56	0,23	11,04	11,72
05/11/96	21,82	69,79	0,697	25,08	0,23	15,67	17,03
06/11/96	23,17	70,07	0,712	23,03	0,23	14,49	17,58
07/11/96	25,03	71,28	0,732	22,95	0,23	14,59	18,08
08/11/96	26,34	64,50	0,740	19,44	0,23	12,41	15,72
09/11/96	25,68	60,95	0,732	23,28	0,23	14,80	18,40
10/11/96	25,59	55,87	0,728	23,32	0,23	14,80	17,22
11/11/96	25,15	69,15	0,731	19,14	0,23	12,16	14,70
12/11/96	24,15	76,35	0,726	13,17	0,23	8,34	9,30

22/11/96	19,04	83,72	0,674	9,86	0,23	6,10	5,56
23/11/96	20,40	76,25	0,686	20,15	0,23	12,52	14,82
24/11/96	21,48	72,05	0,695	23,03	0,23	14,37	17,07
25/11/96	22,46	70,52	0,704	23,95	0,23	15,01	17,16
26/11/96	21,50	68,59	0,693	25,79	0,23	16,08	16,27
27/11/96	21,68	64,75	0,692	25,16	0,23	15,68	17,01
28/11/96	22,81	61,48	0,703	24,45	0,23	15,32	17,51
29/11/96	22,71	65,05	0,704	20,69	0,23	12,97	14,97
30/11/96	21,12	82,70	0,698	8,23	0,23	5,15	5,31
05/12/96	24,60	78,20	0,728	22,95	0,23	14,56	17,20
06/12/96	24,98	79,64	0,737	20,69	0,23	13,19	16,35
08/12/96	23,82	87,89	0,728	15,68	0,23	9,94	11,54
09/12/96	25,89	64,36	0,768	24,54	0,23	15,90	18,55

Pela análise de regressão linear simples aplicada a estes dados, constata-se que os dados medidos e os valores estimado de radiação líquida estão altamente correlacionados, demonstrando que mais de 90% das variações obtidas são explicadas pela equação de ajuste obtida para a região em estudo, considerando como variável independente a radiação líquida estimada ( $Rn_{est}$ ) calculada pela metodologia proposta.

Assim, a equação de regressão para avaliação da radiação líquida estimada para o local estudado foi à seguinte:

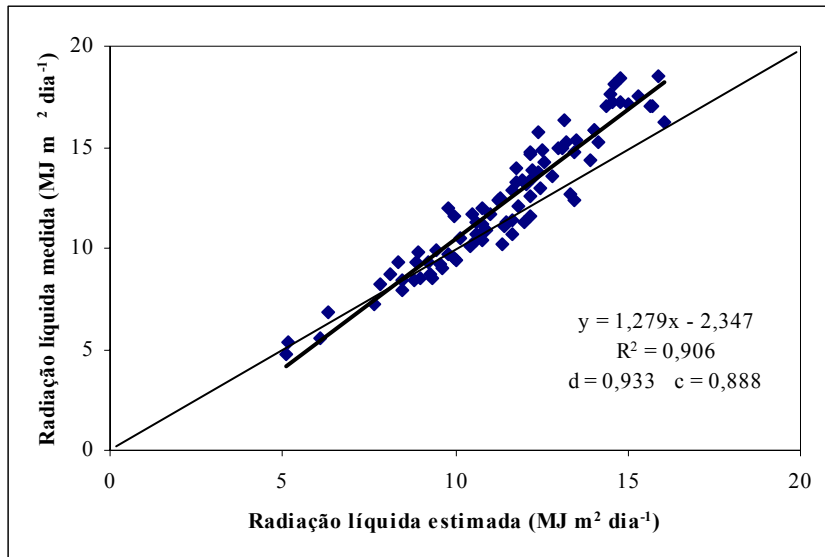
$$Rn_{est} = 1,279 \cdot Rn_{med} - 2,347$$

O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e o coeficiente de correlação ( $r$ ) traz informações sobre o grau de precisão da análise e que nada revelam sobre a sua exatidão, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de concordância de Willmott ( $d$ ), obtendo-se para Piracicaba o valor de  $d$  da ordem de 0,933.

O índice de desempenho  $c$ , dado pelo produto entre  $r$  e  $d$ , preconizado por Camargo e Sentelhas (1995), assumiu, para a localidade estudada, o valor de 0,888, evidenciando, portanto, ótimo desempenho, conforme o critério de desempenho de modelos apresentado pelos introdutores desse índice.

A desempenho deste modelo, na localidade analisada, pode ser melhor observada na figura 3, onde se verifica que tanto a precisão (dada pela reta de tendência) como a exatidão (visualizada pela dispersão dos dados ao redor da reta 1:1) das estimativas foram muito boas,

apresentando valores de  $c$  superiores a 0,80, excedendo, portanto, o valor de  $d$ , considerados satisfatórios, cujo limite inferior recomendado por ROBINSON e HUBBARD (1990) é da ordem de 0,75.



**Figura 3.** Relação entre a radiação líquida medida por saldo radiômetro e estimada pela metodologia proposta em Piracicaba, SP, considerando-se uma série independente de dados. 1996.

## 5.2 - VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DAS ESTIMATIVAS DA RADIAÇÃO LÍQUIDA NO DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVAS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.

Os valores diários da evapotranspiração de referência obtida pelos métodos de Penman Monteith, Priestley-Taylor ajustado e Penman simplificado a partir da radiação líquida medida e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta, expressos em  $\text{mm dia}^{-1}$ , para as condições climáticas de Piracicaba, Estado de São Paulo, encontram-se nas tabelas 2 a 4, respectivamente.



**Tabela 2** – Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith a partir da radiação líquida medida (EToPM-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (EToPM-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996.

Data	DJ	Rn	G	T	UR	U	°C	°C	h	EToPM	EToPM
		MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	°C	%	M s <sup>-1</sup>				Rn <sub>est</sub> mm dia <sup>-1</sup>	Rn <sub>med</sub> mm dia <sup>-1</sup>
01/08/96	214	9,32	-0,08	17,15	67,50	2,86	17,38	81,95	10,93	2,56	2,41
02/08/96	215	9,97	0,01	15,47	61,23	1,43	17,11	82,09	10,94	2,64	2,53
03/08/96	216	9,24	0,10	15,62	68,16	1,42	16,83	82,22	10,96	2,39	2,40
04/08/96	217	9,82	0,41	17,22	63,17	1,86	16,55	82,36	10,98	2,63	2,61
05/08/96	218	9,62	0,11	17,63	59,41	1,85	16,26	82,50	11,00	2,73	2,60
06/08/96	219	9,27	0,10	17,34	60,46	1,62	15,96	82,65	11,02	2,61	2,49
07/08/96	220	8,98	0,81	18,76	59,90	1,54	15,67	82,79	11,04	2,46	2,34
08/08/96	221	8,81	0,81	20,19	62,17	1,60	15,36	82,94	11,06	2,48	2,40
09/08/96	222	7,66	0,59	22,25	54,77	2,63	15,06	83,09	11,08	2,67	2,56
11/08/96	224	6,30	0,63	17,33	83,50	2,21	14,43	83,39	11,12	1,51	1,62
12/08/96	225	8,46	0,76	18,08	83,93	1,66	14,11	83,54	11,14	2,01	1,99
13/08/96	226	9,47	0,87	19,99	80,16	1,68	13,78	83,70	11,16	2,38	2,49
15/08/96	228	8,13	0,58	17,81	80,17	2,19	13,12	84,01	11,20	2,00	2,12
16/08/96	229	11,34	0,43	14,64	64,60	4,11	12,79	84,17	11,22	2,71	2,51
17/08/96	230	10,62	0,79	16,20	70,13	1,73	12,45	84,33	11,24	2,57	2,59
18/08/96	231	10,92	0,80	17,15	67,12	1,66	12,10	84,50	11,27	2,74	2,72
19/08/96	232	10,78	0,78	17,85	65,41	2,24	11,75	84,66	11,29	2,79	2,88
21/08/96	234	10,85	0,82	19,57	59,28	2,22	11,05	84,99	11,33	3,04	3,06
22/08/96	235	10,44	0,88	20,64	56,07	1,73	10,69	85,16	11,35	3,01	2,94
23/08/96	236	10,14	0,86	20,87	59,24	2,05	10,33	85,32	11,38	2,95	3,04
24/08/96	237	11,66	0,82	20,52	61,00	2,60	9,97	85,49	11,40	3,30	3,24
25/08/96	238	11,46	0,87	20,92	56,68	2,08	9,60	85,66	11,42	3,32	3,27
26/08/96	239	11,43	0,89	22,75	54,90	2,51	9,23	85,83	11,44	3,55	3,47
27/08/96	240	10,80	0,87	24,06	56,46	2,16	8,86	86,00	11,47	3,42	3,30
28/08/96	241	10,01	0,84	21,95	70,75	3,16	8,48	86,17	11,49	2,84	2,70
29/08/96	242	9,59	0,62	20,89	72,03	3,39	8,10	86,35	11,51	2,69	2,62
30/08/96	243	10,59	0,81	22,80	68,28	2,01	7,72	86,52	11,54	3,05	3,00

**Tabela 2** – Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith a partir da radiação líquida medida ( $ET_{oPM}-Rn_{med}$ ) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta ( $ET_{oPM}-Rn_{est}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>DJ</b>	<b>Rn</b> MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	<b>G</b> MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	<b>T</b> °C	<b>UR</b> %	<b>U</b> m s <sup>-1</sup>	<b>° ° °</b>	<b>H</b> ° ° °	<b>N</b> h	<b>ET<sub>oPM</sub></b> Rn <sub>est</sub> mm dia <sup>-1</sup>	<b>ET<sub>oPM</sub></b> Rn <sub>med</sub> mm dia <sup>-1</sup>
31/08/96	244	12,02	0,57	24,34	58,67	3,06	7,34	86,70	11,56	3,89	3,72
02/09/96	246	12,20	0,70	20,21	70,65	1,86	6,57	87,05	11,61	3,25	3,09
04/09/96	248	8,45	0,53	19,70	80,25	1,70	5,79	87,40	11,65	2,20	2,08
07/09/96	251	12,44	0,88	19,10	74,88	2,35	4,61	87,93	11,72	3,09	3,21
12/09/96	256	8,84	0,55	17,68	79,75	3,35	2,62	88,83	11,84	2,15	2,24
13/09/96	257	11,24	1,06	19,68	78,92	1,95	2,22	89,01	11,87	2,76	3,04
14/09/96	258	11,93	0,97	20,73	76,95	1,95	1,81	89,19	11,89	3,05	3,40
15/09/96	259	12,82	0,89	21,02	74,73	1,62	1,41	89,37	11,92	3,37	3,55
17/09/96	261	8,90	0,38	18,86	80,86	3,58	0,61	89,73	11,96	2,24	2,44
18/09/96	262	13,34	0,46	17,50	73,07	3,93	0,20	89,91	11,99	3,19	3,07
19/09/96	263	12,25	0,82	19,93	69,02	2,00	-0,20	90,09	12,01	3,25	3,63
20/09/96	264	11,75	0,92	21,14	66,94	6,60	-0,61	90,27	12,04	3,39	3,66
22/09/96	266	12,06	0,79	23,89	55,51	2,02	-1,41	90,63	12,08	3,79	4,07
23/09/96	267	11,32	0,83	24,64	59,83	2,14	-1,81	90,81	12,11	3,58	3,88
24/09/96	268	10,63	0,65	23,44	68,71	2,06	-2,22	90,99	12,13	3,17	3,32
26/09/96	270	12,39	0,56	22,18	74,25	2,98	-3,02	91,35	12,18	3,41	3,73
27/09/96	271	12,25	0,53	22,83	69,19	3,32	-3,42	91,53	12,20	3,59	3,86
28/09/96	272	5,12	0,04	20,23	82,86	2,83	-3,82	91,71	12,23	1,55	1,47
29/09/96	273	10,46	0,61	22,32	75,83	1,83	-4,22	91,89	12,25	2,92	3,23
30/09/96	274	11,76	0,59	22,34	71,78	2,30	-4,61	92,07	12,28	3,34	3,87
01/10/96	275	11,81	0,46	20,43	68,96	3,44	-5,01	92,25	12,30	3,31	3,36
04/10/96	278	13,23	0,85	21,10	79,22	2,42	-6,18	92,78	12,37	3,37	3,83
07/10/96	281	12,18	0,64	20,39	84,70	3,24	-7,34	93,30	12,44	2,92	3,00
08/10/96	282	9,79	0,64	20,41	77,07	3,38	-7,72	93,48	12,46	2,61	3,09
09/10/96	283	12,58	0,79	22,32	74,09	2,38	-8,10	93,65	12,49	3,44	3,85
15/10/96	289	11,63	0,47	19,35	74,71	3,38	-10,33	94,68	12,62	3,03	2,83
16/10/96	290	13,89	0,94	19,96	74,90	2,25	-10,69	94,84	12,65	3,52	3,63

**Tabela 2** – Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith a partir da radiação líquida medida (EToPM-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (EToPM-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>DJ</b>	<b>Rn</b> MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	<b>G</b> MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	<b>T</b> °C	<b>UR</b> %	<b>U</b> m s <sup>-1</sup>	<b>o ° °</b>	<b>H</b> o ° °	<b>N</b> h	<b>EToPM</b> Rn <sub>est</sub> mm dia <sup>-1</sup>	<b>EToPM</b> Rn <sub>med</sub> mm dia <sup>-1</sup>
17/10/96	291	14,04	1,07	22,73	75,50	1,63	-11,05	95,01	12,67	3,77	4,23
18/10/96	292	13,47	1,14	25,05	70,38	2,11	-11,40	95,18	12,69	3,89	4,23
19/10/96	293	10,76	0,81	24,99	69,87	2,37	-11,75	95,34	12,71	3,30	3,62
21/10/96	295	7,82	0,28	21,30	83,15	3,33	-12,45	95,67	12,76	2,16	2,24
22/10/96	296	13,49	1,08	22,81	77,65	1,52	-12,79	95,83	12,78	3,60	4,08
23/10/96	297	12,15	1,08	24,37	77,31	2,03	-13,12	95,99	12,80	3,36	4,03
24/10/96	298	13,47	0,52	21,70	71,17	2,83	-13,45	96,14	12,82	3,75	3,50
28/10/96	302	11,65	0,72	22,21	78,56	2,19	-14,74	96,76	12,90	3,15	3,46
29/10/96	303	14,12	0,88	23,31	66,92	1,51	-15,06	96,91	12,92	4,04	4,34
30/10/96	304	13,08	0,90	24,47	63,97	1,86	-15,36	97,06	12,94	3,93	4,43
31/10/96	305	14,01	0,90	25,80	61,40	2,23	-15,67	97,21	12,96	4,39	4,86
04/11/96	309	11,04	0,63	22,23	82,68	2,85	-16,83	97,78	13,04	2,91	3,06
05/11/96	310	15,67	0,88	21,82	69,79	3,22	-17,11	97,91	13,06	4,23	4,54
06/11/96	311	14,49	1,06	23,17	70,07	1,96	-17,38	98,05	13,07	4,04	4,82
07/11/96	312	14,59	1,03	25,03	71,28	2,11	-17,65	98,18	13,09	4,20	5,12
08/11/96	313	12,41	0,84	26,34	64,50	2,34	-17,91	98,31	13,11	3,98	4,85
09/11/96	314	14,80	0,87	25,68	60,95	2,51	-18,17	98,44	13,13	4,65	5,58
10/11/96	315	14,80	0,78	25,59	55,87	2,41	-18,42	98,57	13,14	4,79	5,42
11/11/96	316	12,16	0,77	25,15	69,15	2,78	-18,67	98,69	13,16	3,76	4,39
12/11/96	317	8,34	0,44	24,15	76,35	1,83	-18,91	98,82	13,18	2,55	2,80
22/11/96	327	6,10	0,04	19,04	83,72	4,25	-21,01	99,89	13,32	1,73	1,63
23/11/96	328	12,52	0,71	20,40	76,25	2,40	-21,18	99,98	13,33	3,28	3,82
24/11/96	329	14,37	0,81	21,48	72,05	1,68	-21,35	100,07	13,34	3,90	4,58
25/11/96	330	15,01	0,86	22,46	70,52	2,03	-21,52	100,16	13,35	4,16	4,70
26/11/96	331	16,08	0,67	21,50	68,59	3,25	-21,67	100,24	13,37	4,39	4,43
27/11/96	332	15,68	0,74	21,68	64,75	3,47	-21,83	100,32	13,38	4,43	4,72
28/11/96	333	15,32	0,79	22,81	61,48	2,76	-21,97	100,40	13,39	4,54	5,06

**Tabela 2** – Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith a partir da radiação líquida medida (EToPM-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (EToPM-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>DJ</b>	<b>Rn</b> MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	<b>G</b> MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	<b>T</b> °C	<b>UR</b> %	<b>U</b> m s <sup>-1</sup>	° ° °	<b>H</b> ° ° °	<b>N</b> h	<b>EToPM</b> Rn <sub>est</sub> mm dia <sup>-1</sup>	<b>EToPM</b> Rn <sub>med</sub> mm dia <sup>-1</sup>
29/11/96	334	12,97	0,69	22,71	65,05	1,52	-22,11	100,47	13,40	3,79	4,31
30/11/96	335	5,15	0,11	21,12	82,70	1,55	-22,24	100,54	13,41	1,55	1,60
05/12/96	340	14,56	0,61	25,15	78,00	2,61	-22,80	100,84	13,44	4,15	4,82
06/12/96	341	13,19	0,21	25,95	82,00	2,57	-22,89	100,89	13,45	3,86	4,67
08/12/96	343	9,94	0,73	24,70	89,00	1,49	-23,05	100,97	13,46	2,69	3,12
09/12/96	344	15,90	0,99	25,60	59,00	1,69	-23,12	101,01	13,47	4,87	5,59

**Tabela 3 -** Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Priestley-Taylor ajustado a partir da radiação líquida medida (EToPTa-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (EToPTa-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996.

<b>Data</b>	<b>*<math>\omega</math></b> (kPa °C <sup>-1</sup> )	<b>RN</b> (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	<b>G</b> (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	<b>EToPTa-Rn<sub>est</sub></b> (mm. dia <sup>-1</sup> )	<b>EToPTa-Rn<sub>med</sub></b> (mm. dia <sup>-1</sup> )
01/08/96	0,642	9,32	-0,08	2,55	2,34
02/08/96	0,615	9,97	0,01	2,59	2,46
03/08/96	0,621	9,24	0,10	2,40	2,41
04/08/96	0,639	9,82	0,41	2,54	2,52
05/08/96	0,640	9,62	0,11	2,57	2,41
06/08/96	0,634	9,27	0,10	2,46	2,32
07/08/96	0,659	8,98	0,81	2,28	2,14
08/08/96	0,674	8,81	0,81	2,28	2,18
09/08/96	0,691	7,66	0,59	2,07	1,93
11/08/96	0,653	6,30	0,63	1,57	1,70
12/08/96	0,663	8,46	0,76	2,16	2,14
13/08/96	0,684	9,47	0,87	2,49	2,62
15/08/96	0,658	8,13	0,58	2,10	2,26
16/08/96	0,605	11,34	0,43	2,79	2,50
17/08/96	0,631	10,62	0,79	2,62	2,66
18/08/96	0,641	10,92	0,80	2,74	2,72
19/08/96	0,648	10,78	0,78	2,74	2,85
21/08/96	0,659	10,85	0,82	2,80	2,82
22/08/96	0,674	10,44	0,88	2,72	2,63
23/08/96	0,677	10,14	0,86	2,66	2,77
24/08/96	0,680	11,66	0,82	3,12	3,04
25/08/96	0,677	11,46	0,87	3,03	2,98
26/08/96	0,695	11,43	0,89	3,10	3,01
27/08/96	0,724	10,80	0,87	3,04	2,91
28/08/96	0,699	10,01	0,84	2,71	2,53
29/08/96	0,686	9,59	0,62	2,60	2,50
30/08/96	0,705	10,59	0,81	2,92	2,86

**Tabela 3 -** Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Priestley-Taylor ajustado a partir da radiação líquida medida (EToPTa-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (EToPTa-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>*<math>\omega</math></b> (kPa °C <sup>-1</sup> )	<b>RN</b> (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	<b>G</b> (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	<b>EToPTa-Rn<sub>est</sub></b> (mm. dia <sup>-1</sup> )	<b>EToPTa-Rn<sub>med</sub></b> (mm. dia <sup>-1</sup> )
31/08/96	0,716	12,02	0,57	3,47	3,25
02/09/96	0,679	12,20	0,70	3,30	3,11
04/09/96	0,680	8,45	0,53	2,28	2,13
07/09/96	0,671	12,44	0,88	3,28	3,44
12/09/96	0,656	8,84	0,55	2,30	2,42
13/09/96	0,679	11,24	1,06	2,92	3,26
14/09/96	0,691	11,93	0,97	3,20	3,62
15/09/96	0,692	12,82	0,89	3,49	3,71
17/09/96	0,671	8,90	0,38	2,42	2,69
18/09/96	0,649	13,34	0,46	3,53	3,36
19/09/96	0,675	12,25	0,82	3,26	3,72
20/09/96	0,687	11,75	0,92	3,15	3,59
22/09/96	0,709	12,06	0,79	3,38	3,70
23/09/96	0,719	11,32	0,83	3,19	3,54
24/09/96	0,712	10,63	0,65	3,00	3,19
26/09/96	0,703	12,39	0,56	3,52	3,92
27/09/96	0,706	12,25	0,53	3,50	3,85
28/09/96	0,688	5,12	0,04	1,48	1,38
29/09/96	0,706	10,46	0,61	2,94	3,31
30/09/96	0,703	11,76	0,59	3,32	3,98
01/10/96	0,680	11,81	0,46	3,27	3,34
04/10/96	0,695	13,23	0,85	3,64	4,22
07/10/96	0,690	12,18	0,64	3,37	3,47
08/10/96	0,686	9,79	0,64	2,66	3,30
09/10/96	0,704	12,58	0,79	3,51	4,01
15/10/96	0,680	11,63	0,47	3,21	2,93
16/10/96	0,680	13,89	0,94	3,72	3,87

**Tabela 3 -** Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Priestley-Taylor ajustado a partir da radiação líquida medida (EToPTa-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (EToPTa-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>*ω</b> (kPa °C <sup>-1</sup> )	<b>RN</b> (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	<b>G</b> (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	<b>EToPTa-Rn<sub>est</sub></b> (mm. dia <sup>-1</sup> )	<b>EToPTa-Rn<sub>med</sub></b> (mm. dia <sup>-1</sup> )
17/10/96	0,711	14,04	1,07	3,90	4,44
18/10/96	0,732	13,47	1,14	3,82	4,23
19/10/96	0,731	10,76	0,81	3,08	3,47
21/10/96	0,699	7,82	0,28	2,23	2,34
22/10/96	0,712	13,49	1,08	3,74	4,29
23/10/96	0,729	12,15	1,08	3,41	4,22
24/10/96	0,697	13,47	0,52	3,82	3,50
28/10/96	0,707	11,65	0,72	3,27	3,65
29/10/96	0,711	14,12	0,88	3,98	4,32
30/10/96	0,721	13,08	0,90	3,71	4,29
31/10/96	0,733	14,01	0,90	4,06	4,62
04/11/96	0,711	11,04	0,63	3,13	3,34
05/11/96	0,697	15,67	0,88	4,36	4,76
06/11/96	0,712	14,49	1,06	4,05	4,98
07/11/96	0,732	14,59	1,03	4,20	5,28
08/11/96	0,740	12,41	0,84	3,62	4,66
09/11/96	0,732	14,80	0,87	4,31	5,43
10/11/96	0,728	14,80	0,78	4,32	5,06
11/11/96	0,731	12,16	0,77	3,52	4,31
12/11/96	0,726	8,34	0,44	2,43	2,72
22/11/96	0,674	6,10	0,04	1,73	1,57
23/11/96	0,686	12,52	0,71	3,43	4,09
24/11/96	0,695	14,37	0,81	3,99	4,78
25/11/96	0,704	15,01	0,86	4,21	4,85
26/11/96	0,693	16,08	0,67	4,52	4,57
27/11/96	0,692	15,68	0,74	4,37	4,76
28/11/96	0,703	15,32	0,79	4,32	4,97

**Tabela 3** - Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Priestley-Taylor ajustado a partir da radiação líquida medida (EToPTa-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (EToPTa-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996.

<b>Data</b>	<b>*<math>\omega</math></b> (kPa °C <sup>-1</sup> )	<b>RN</b> (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	<b>G</b> (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	<b>EToPTa-Rn<sub>est</sub></b> (mm. dia <sup>-1</sup> )	<b>EToPTa-Rn<sub>med</sub></b> (mm. dia <sup>-1</sup> )
29/11/96	0,704	12,97	0,69	3,66	4,25
30/11/96	0,698	5,15	0,11	1,49	1,54
05/12/96	0,728	14,56	0,61	4,29	5,11
06/12/96	0,737	13,19	0,21	4,05	5,03
08/12/96	0,728	9,94	0,73	2,84	3,33
09/12/96	0,768	15,90	0,99	4,84	5,70



**Tabela 4 -** Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman simplificado a partir da radiação líquida medida (EToPs-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (EToPs-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996.

<b>Data</b>	<b>*<math>\omega</math></b>	<b>RN</b>	<b>G</b>	<b>EToPs</b>	<b>EToPs</b>
	<b>(kPa °C<sup>-1</sup>)</b>	<b>(MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>(MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Rn<sub>est</sub> mm dia<sup>-1</sup></b>	<b>Rn<sub>med</sub> mm dia<sup>-1</sup></b>
01/08/96	0,642	9,32	-0,08	2,82	2,59
02/08/96	0,615	9,97	0,01	2,94	2,78
03/08/96	0,621	9,24	0,10	2,70	2,72
04/08/96	0,639	9,82	0,41	2,82	2,79
05/08/96	0,640	9,62	0,11	2,85	2,68
06/08/96	0,634	9,27	0,10	2,74	2,58
07/08/96	0,659	8,98	0,81	2,49	2,33
08/08/96	0,674	8,81	0,81	2,46	2,35
09/08/96	0,691	7,66	0,59	2,20	2,06
11/08/96	0,653	6,30	0,63	1,72	1,87
12/08/96	0,663	8,46	0,76	2,35	2,33
13/08/96	0,684	9,47	0,87	2,67	2,81
15/08/96	0,658	8,13	0,58	2,30	2,47
16/08/96	0,605	11,34	0,43	3,19	2,86
17/08/96	0,631	10,62	0,79	2,93	2,97
18/08/96	0,641	10,92	0,80	3,04	3,02
19/08/96	0,648	10,78	0,78	3,02	3,13
21/08/96	0,659	10,85	0,82	3,05	3,07
22/08/96	0,674	10,44	0,88	2,94	2,84
23/08/96	0,677	10,14	0,86	2,86	2,98
24/08/96	0,680	11,66	0,82	3,35	3,27
25/08/96	0,677	11,46	0,87	3,27	3,20
26/08/96	0,695	11,43	0,89	3,29	3,20
27/08/96	0,724	10,80	0,87	3,17	3,03
28/08/96	0,699	10,01	0,84	2,88	2,69
29/08/96	0,686	9,59	0,62	2,78	2,68

**Tabela 4 -** Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman simplificado a partir da radiação líquida medida ( $EToPs-Rn_{med}$ ) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta ( $EToPs-Rn_{est}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>*<math>\omega</math></b>	<b>RN</b>	<b>G</b>	<b>EToPs</b>	<b>EToPs</b>
	<b>(kPa °C<sup>-1</sup>)</b>	<b>(MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>(MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Rn<sub>est</sub> mm dia<sup>-1</sup></b>	<b>Rn<sub>med</sub> mm dia<sup>-1</sup></b>
30/08/96	0,705	10,59	0,81	3,08	3,02
31/08/96	0,716	12,02	0,57	3,64	3,41
02/09/96	0,679	12,20	0,70	3,55	3,35
04/09/96	0,680	8,45	0,53	2,45	2,29
07/09/96	0,671	12,44	0,88	3,55	3,72
12/09/96	0,656	8,84	0,55	2,52	2,65
13/09/96	0,679	11,24	1,06	3,14	3,51
14/09/96	0,691	11,93	0,97	3,41	3,86
15/09/96	0,692	12,82	0,89	3,72	3,96
17/09/96	0,671	8,90	0,38	2,62	2,91
18/09/96	0,649	13,34	0,46	3,89	3,70
19/09/96	0,675	12,25	0,82	3,52	4,01
20/09/96	0,687	11,75	0,92	3,36	3,84
22/09/96	0,709	12,06	0,79	3,56	3,90
23/09/96	0,719	11,32	0,83	3,34	3,71
24/09/96	0,712	10,63	0,65	3,16	3,36
26/09/96	0,703	12,39	0,56	3,72	4,15
27/09/96	0,706	12,25	0,53	3,69	4,06
28/09/96	0,688	5,12	0,04	1,58	1,48
29/09/96	0,706	10,46	0,61	3,11	3,49
30/09/96	0,703	11,76	0,59	3,51	4,21
01/10/96	0,680	11,81	0,46	3,51	3,59
04/10/96	0,695	13,23	0,85	3,87	4,49
07/10/96	0,690	12,18	0,64	3,59	3,70
08/10/96	0,686	9,79	0,64	2,84	3,53
09/10/96	0,704	12,58	0,79	3,71	4,24

**Tabela 4 -** Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman simplificado a partir da radiação líquida medida ( $EToPs-Rn_{med}$ ) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta ( $EToPs-Rn_{est}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>*<math>\omega</math></b>	<b>RN</b>	<b>G</b>	<b>EToPs</b>	<b>EToPs</b>
	<b>(kPa °C<sup>-1</sup>)</b>	<b>(MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>(MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Rn<sub>est</sub> mm dia<sup>-1</sup></b>	<b>Rn<sub>med</sub> mm dia<sup>-1</sup></b>
15/10/96	0,680	11,63	0,47	3,45	3,15
16/10/96	0,680	13,89	0,94	4,00	4,15
17/10/96	0,711	14,04	1,07	4,11	4,67
18/10/96	0,732	13,47	1,14	3,97	4,39
19/10/96	0,731	10,76	0,81	3,20	3,60
21/10/96	0,699	7,82	0,28	2,36	2,48
22/10/96	0,712	13,49	1,08	3,93	4,51
23/10/96	0,729	12,15	1,08	3,55	4,39
24/10/96	0,697	13,47	0,52	4,06	3,72
28/10/96	0,707	11,65	0,72	3,45	3,85
29/10/96	0,711	14,12	0,88	4,19	4,55
30/10/96	0,721	13,08	0,90	3,89	4,48
31/10/96	0,733	14,01	0,90	4,22	4,80
04/11/96	0,711	11,04	0,63	3,30	3,51
05/11/96	0,697	15,67	0,88	4,63	5,06
06/11/96	0,712	14,49	1,06	4,26	5,23
07/11/96	0,732	14,59	1,03	4,36	5,49
08/11/96	0,740	12,41	0,84	3,75	4,82
09/11/96	0,732	14,80	0,87	4,48	5,64
10/11/96	0,728	14,80	0,78	4,50	5,27
11/11/96	0,731	12,16	0,77	3,66	4,48
12/11/96	0,726	8,34	0,44	2,53	2,84
22/11/96	0,674	6,10	0,04	1,86	1,70
23/11/96	0,686	12,52	0,71	3,67	4,38
24/11/96	0,695	14,37	0,81	4,24	5,08
25/11/96	0,704	15,01	0,86	4,46	5,13

**Tabela 4 -** Valores de evapotranspiração obtida pelo método de Penman simplificado a partir da radiação líquida medida ( $EToPs-Rn_{med}$ ) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta ( $EToPs-Rn_{est}$ ) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996. (continuação)

<b>Data</b>	<b>*<math>\omega</math></b>	<b>RN</b>	<b>G</b>	<b>EToPs</b>	<b>EToPs</b>
	<b>(kPa °C<sup>-1</sup>)</b>	<b>(MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>(MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Rn<sub>est</sub> mm dia<sup>-1</sup></b>	<b>Rn<sub>med</sub> mm dia<sup>-1</sup></b>
26/11/96	0,693	16,08	0,67	4,81	4,87
27/11/96	0,692	15,68	0,74	4,66	5,08
28/11/96	0,703	15,32	0,79	4,57	5,26
29/11/96	0,704	12,97	0,69	3,87	4,50
30/11/96	0,698	5,15	0,11	1,58	1,63
05/12/96	0,728	14,56	0,61	4,47	5,32
06/12/96	0,737	13,19	0,21	4,19	5,21
08/12/96	0,728	9,94	0,73	2,96	3,47
09/12/96	0,768	15,90	0,99	4,94	5,82

Pela análise de regressão linear simples aplicada a estes dados, constata-se que os valores da evapotranspiração com valores medidos e os valores estimado estão altamente correlacionados, demonstrando que mais de 90% das variações obtidas são explicadas pela equação de ajuste obtida para a região em estudo, considerando como variável independente a evapotranspiração de referência obtida pelo métodos de Penman Monteith, Priestley-Taylor ajustado e Penman simplificado a partir da radiação líquida estimada pela metodologia proposta.

Assim, as equações de regressão para avaliação da aplicabilidade das estimativas da radiação líquida no desempenho de métodos de estimativas da evapotranspiração de referência para cada um dos métodos estudados foram as seguintes:

- Penman Monteith:  $EToPMRn_{est} = 1,2404 \cdot EToPMRn_{med} - 0,5566$
- Priestley-Taylor ajustado:  $EToPTaRn_{est} = 1,3082 \cdot EToPTaRn_{med} - 0,7165$
- Penman simplificado:  $EToPsRn_{est} = 1,3014 \cdot EToPsRn_{med} - 0,7451$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) considerando-se a mesma ordem de apresentação dos modelos propostos foram: 0,940, 0,9211, 0,909, para 89 observações.

Relevando que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e de correlação ( $r$ ) apenas trazem informações sobre o grau de precisão da análise e que nada revelam sobre a sua exatidão,

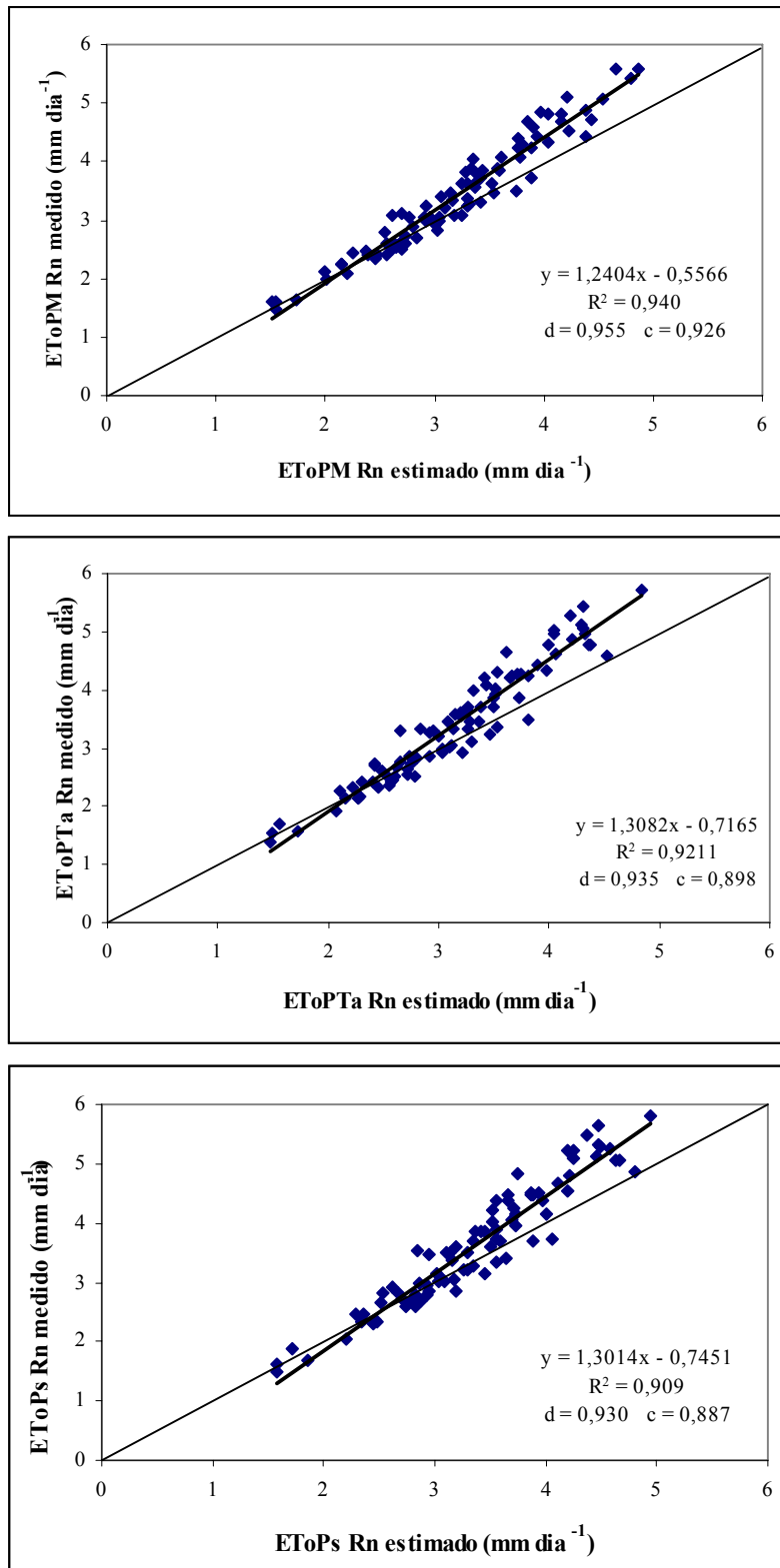
procedeu-se ao cálculo do coeficiente de concordância de Willmott ( $d$ ), obtendo-se para os métodos de Penman Monteith, Priestley-Taylor ajustado e Penman simplificado, os seguintes valores de  $d$ , respectivamente: 0,955, 0,935, 0,930.

Os índices de desempenho  $c$ , dado pelo produto entre  $r$  e  $d$ , preconizado por Camargo e Sentelhas (1995), assumiram, para os métodos estudados, os valores, respectivos de 0,926, 0,898 e 0,887, evidenciando, portanto, ótimo desempenho, conforme o critério de desempenho de modelos apresentado pelos introdutores desse índice.

A figura 4, composta por dados da tabela 2 a 4 estabelece o confronto entre os valores da evapotranspiração obtida pelo métodos de Penman Monteith, Priestley-Taylor ajustado e Penman simplifica a partir da radiação líquida medida ( $ET_o-Rn_{med}$ ) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta ( $ET_o-Rn_{est}$ ) geraram valores estimados extremamente próximos aos calculados para as condições climáticas de Piracicaba, SP, tendo em vista que a dispersão dos dados em torno da linha 1:1 foi claramente reduzida. Isto se confirma mediante obtenção dos valores de  $d$  e  $c$ . Tais valores reforçam a viabilidade de utilização da metodologia proposta no referido local, cabendo aqui sugerir que estes estudos devam ser continuados em muitas outras regiões do Brasil. Estudos desenvolvidos neste sentido são extremamente importantes, pois grande parte da pesquisa agrometeorológica (evaporação, evapotranspiração, secagem, potenciais de produção, etc.) se apóiam na determinação da radiação líquida, fonte de todos os processos físicos e biológicos ocorrentes na biosfera.

Acredita-se que estudos conduzidos neste sentido, em muito poderiam contribuir para o desenvolvimento de metodologias mais simples para estimativa da radiação líquida em dada região.

É fato que a comprovação da teoria idealizada neste estudo e sua aplicabilidade na obtenção de estimativas da evapotranspiração de referência constitui em contribuição a ser dada aos pesquisadores que têm a sua atenção voltada ao planejamento da irrigação em pesquisas futuras, visando maximizar a produtividade agrícola e assegurar a sustentabilidade da agricultura irrigada sob diversas condições climáticas locais.



**Figura 4.** Relação entre a evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith (ET0PM), Priestley-Taylor ajustado (ET0PTa) e Penman simplificado (ET0Ps) a partir da radiação líquida medida (ET0-Rn<sub>med</sub>) e da radiação líquida estimada pela metodologia proposta (ET0-Rn<sub>est</sub>) sob as condições climáticas de Piracicaba, SP. 1996.

## 6. CONCLUSÃO

Tomando como base os resultados obtidos pela metodologia proposta neste trabalho, pode-se concluir que:

- a) A estimativa da radiação líquida diurna de gramado fundamentada na teoria proposta gerou valores equivalentes àqueles obtidos pela medida de saldo radiômetros para Piracicaba, SP;
- b) A metodologia proposta permite a obtenção da evapotranspiração potencial obtida por métodos consagrados (Penman Monteith , Priestley-Taylor ajustado e Penman simplificado) com rapidez e simplicidade, sendo, portanto, indispensáveis no planejamento de projetos de engenharia que visem o aproveitamento da energia solar em suas mais variadas formas.

## REFERENCIAS

ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L., BURMAN, R.D. Operation estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.81, p.650-662, 1989.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper número 56. FAO, Rome, Italy, 300p. 1998. .

ATAÍDE, K.R.P. **Determinação da radiação líquida e da radiação global com produtos do sensor MODIS Terra Água**. 2006, Campina Grande, PB, 80p. Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia) – Universidade Federal de Campina Grande. 2006.

AZEVEDO, P. V.; TEIXEIRA, A.H de C.; SILVA, B.B. da.; SOARES, J.M.; SARAIVA, F.A.M. Avaliação da refletância e do saldo de radiação sobre o cultivo de videira europeia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.1-7, 1997.

AZEVEDO, P. V. ; SILVA, B. B. d. e SILVA, V. P. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil, **Agricultural Water Management**, v.58, p.241-254,2003.

BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conductions and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v.27, p.779-87, 1926.

CAMARGO, A.P. SENTELHAS, P.C. Avaliação de modelos para a estimativa da evapotranspiração potencial mensal, em base diária para Campinas e Ribeirão Preto, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7, **Anais...** Campina Grande, 1995.

CHIEW, F.H.S.; KAMALADASA, N.N.; MALANO, H.M. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.28, n.1, p.9-21, 1995.

CUNHA, G.R.; PAULA, J.R.F.; BERGAMASCHI, H.; SAIBRO, J.C.; BERLATO, M.A. Balanço de radiação em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, n.1, p. 1-10, 1993.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p.9-16, 1994.

CUNHA, A.R.; VOLPE, A.C.; ESCOBEDO, J.F. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) com saldo de radiação medido por diferentes sensores. **Agronomia Tropical**, v. 58, p. 81-84. 2008.

DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. Yield response to water. FAO **Irrigation and Drainage Paper**, n. 33. FAO, Rome, Italy, 1979. 193p.

DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 24. FAO, Rome, Italy, 1977. 179p.



FIELD, R.T.; FRITSCHEN, L.J.; KANEMASU, E.T.; SMITH, E.A.; STEWART, J.B.; VERMA, S.B.; KUSTAS, W.P. Calibration, comparison, and correction of net radiation instruments used during FIFE. **Journal of Geophysical Research**. v. 97, p. 18681–18695, 1992.

FRITSCHEN, L.J.; FRITSCHEN, C.L. Calibration of shielded net radiometers. **Agronomy Journal**; Madison, v.99, p. 297-303, 2007.

GALVANI, E. **Avaliação agrometeorológica do cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) em ambientes protegido e a campo, em ciclos de outono-inverno e primavera-verão**. Botucatu. 2001. 124 p. Tese (doutorado) Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual Paulista. 2001.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J.F.; PEREIRA, A.R. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, v.60, n. 2, 2001.

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J.; ALLEN, R.G.; Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: Impacto n Penman-Monteith reference ET estimates in semiarid regions. **Agricultural water management**, v. 89,p. 275-286. 2007.

LEITÃO, M. M.V. B. R., MOURA, M. S. B.M.; SALDANHA, T. R. F. C.; SOBRINHO, J. E. S.; OLIVEIRA, G.M.O. Balanço de Radiação sobre um solo descoberto para quatro períodos do ano. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.15, p 59-66.2000.

MARIN, F.R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 118 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.275-279, 2003.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment: Rothamsted Experimental Station. **Harpden**. Herts, v.19, n.3, p.205-34, 1965.

MONTEITH, J. L. Climatic variation and the growth of crop. Q. J. R. **Meteorol. Soc.** v.107. p 749-754, 1981.

OMETTO, J. C. **Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação**. 1968, Piracicaba, USP, 64 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1968.

OMETTO, J. C. **Registros e estimativas dos parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba**, SP. Piracicaba, Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1991. 76 p.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society of London**. London, v.193, p.120-45, 1948.

PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. Neth. **Journal of Agricultural Science**, v.4, p.9-29. 1956.

PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A., SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpiração)**. Piracicaba, FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, A. B.; SENTELHAS, P. C.; VILLA NOVA, N. A. Estimativa do Balanço de Energia Radiante Em Função de Elementos Climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria - RS, v. 6, n. 2, p. 201-206, 1998.

PEREIRA, A. C. DE. **Desempenho do modelo de Penman Monteith e de dois evapotranspirômetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em relação a um lisímetro de pesagem**.1998. 79 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.1998.

PEREIRA, A. B., VILLA NOVA, N. A. Parâmetros fisiológicos e produtividade da batateira (*Solanum tuberosum* L.) submetida a três níveis de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.22, n.1, p.127-134. 2002.

PEREIRA, A. B., SHOCK, C.C., FEIBERT, E. B. G., FLOCK, R.J., LIMA, L., FERNANDES, N. **Monitoramento da irrigação por meio da tensão da água do solo – guia prático**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2006. 20p.

PEREIRA, L. de C. **Caracterização do Balanço de Energia no Vale do Curaçá - Bahia**.2006. 80 p. Tese (mestrado) - Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2006.

PEREIRA, A. R. ; GREEN, S. ; VILLA NOVA, N. A. Relationships between single tree canopy and grass net radiations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, p. 45-49, 2007.

PEZZOPANE, J. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J. Balanço de energia em vinhedo de “Niágara Rosada”. **Bragantia**, Campinas, v.62, no. 1, p. 155-161. 2003.

PEZZOPANE, J. R. M.; JUNIOR, P.; JOSÉ, M.; GALLO, P. B. Radiação solar e saldo de radiação em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana 'Prata Anã. **Bragantia**, vol.64, n.3, p.485-497. 2005.

RAVEN, P. H.; EVERT R. F.; EICHHORN S. E. **Biologia Vegetal**. 7a. ed. Editora Guanabara Koogan S. A., Rio de Janeiro, 2007.

RYU, Y.; KANG, S.; MOON, S; KIM, J. Evaluation of land surface radiation balance derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) over complex terrain and heterogeneour landscape on clear sky days. **Agricultural and florest meteorology**, v 48, p. 1538 – 1552, 2008.

SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 126, n. 4, p. 265-267, 2000.

SANTIAGO, A. V.; PEREIRA, A. R.; FOLEGATTI, M. V.; MAGGIOTO, S. R. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 10, n. 1, p. 57-66, 2002.

SENTELHAS, P. C.; NASCIMENTO, A. L. C. Variação sazonal entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, no. 1, p. 71 – 77. 2003.

SHARMA R.K. **A Text Book of Hydrology & Water Resources**. J.C. Kapur, 2ed. Nova Delhi, 403p., 1983.

SILVA, L. D. B. da ; FOLEGATTI, M. V. ; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005a.

SILVA, V. P. R.; FILHO, A. F. B.; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 14, 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: SBA, 2005b. CD Rom.

SMITH, M. (Ed.) **Guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.

SOUZA, J. L; ESCOBEDO, J. F. e TORNERO, M. T. T. Albedo e estimativas do saldo de radiação em feijão-vagem sob cobertura de plástico e ambiente externo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.10, p.1763-1774, 1999.

TANNER, C. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 24 no. 1 p 1- 9, 1960.

TEIXEIRA, A. H. DE; AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, B. B. DA; SOARES, J. M. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da videira na região de Petrolina, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, p.327-330, 1999.

TEIXEIRA, A. H. DE; Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, no.01, p. 28-32, 2001.

THORNTHWAITE, C.W. The **moisture factor in climate**. **Transactions of the American Geographical Union**. Washington, v.27, p.41-48, 1946.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55-94. 1948.

TODD, R. W.; EVETT, S. R. E HOWELL, T. A. The bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p. 335 – 348, 2000.

VALANCOGNE, C.; FERREIRA, M. I.; SILVESTRE, J.; ANGELOCCI, L. R. Influence of orchard and vineyard characteristics on maximal plant transpiration. **Acta Horticulturae**, v. 537, p. 61-68, 2000.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T. Desempenho da estimativa da evapotranspiração de referência em Ilha Solteira - SP. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2007, Bonito, MS.

VILLA NOVA, N. A.; PEREIRA, A. R.; BARBIERI, V. Evapotranspiration as a Function Of Leaf Area Index And Class a Pan Evaporation. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, no. 2, p. 35-37, 1996.

VILLA NOVA, N. A.; PEREIRA, A. B.; GALVANI, E. Desenvolvimento de um Radiômetro Evaporimétrico para Estimar a Densidade de Fluxo de Radiação Solar Global. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 69-75, 1997.

VILLA NOVA, N. A.; PEREIRA, A. B.; PEREIRA, A. R. Ajustes de S e W da equação de Penman em função da média entre as temperaturas seca e úmida do ar. **Irriga**, Botucatu - SP, v. 7, n. 3, p. 241-253, 2002.

VILLA NOVA, N. A.; MIRANDA, J. H.; PEREIRA, A. B.; OLIVEIRA, K. Estimation of the potential evapotranspiration by a simplified Penman method. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 713-721, 2006a.

VILLA NOVA, N. A. ; PEREIRA, A. B. **Ajuste do método de Priestley-Taylor às condições climáticas locais**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP, v. 26, n. 2, p. 395-405, 2006b.

VILLA NOVA, N. A. ; PEREIRA, A. B. ; SHOCK, C. C. Estimation of reference evapotranspiration by an energy balance approach. **Biosystems Engineering**, v. 96, p. 605-615, 2007.

WILLMOTT, C. J., WICKS, D. E. An empirical method for the spacial interpolation of monthly precipitation within. California. **Physical Geography**, v. 1, p. 59-73, 1980.

WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v.5, p.589-606, 1985.

ZANETTI, S. S.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; POSSE, R. P.; MELO JÚNIOR, J. C. F. DE. Estimaco do saldo de radiao e da evapotranspirao de referncia, em funo das temperaturas mxima e mnima do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.12, n.1, p.134-139. 2006.

ZANETTI, S. S.; SOUSA, E. F.; CARVALHO, D. F.; BERNARDO, S. Estimaco da evapotranspirao de referncia no estado do Rio de Janeiro usando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, vol.12, n.2, 2008.

# ANEXOS

**ANEXO 1** – Valores de  $\omega$  em função da temperatura média do período diurno ( $^{\circ}\text{C}$ ) e altitude local (m).

Temperatura/Altitude	0	500	1000	2000	3000
2	0.43	0.45	0.46	0.49	0.52
4	0.46	0.48	0.49	0.52	0.55
6	0.49	0.51	0.52	0.55	0.58
8	0.52	0.54	0.55	0.58	0.61
10	0.55	0.57	0.58	0.61	0.64
12	0.58	0.60	0.61	0.64	0.66
14	0.61	0.62	0.64	0.66	0.69
16	0.64	0.65	0.66	0.69	0.71
18	0.66	0.67	0.69	0.71	0.73
20	0.69	0.70	0.71	0.73	0.75
22	0.71	0.72	0.73	0.75	0.77
24	0.73	0.74	0.75	0.77	0.79
26	0.75	0.76	0.77	0.79	0.81
28	0.77	0.78	0.79	0.81	0.82
30	0.78	0.79	0.80	0.82	0.84
32	0.80	0.81	0.82	0.84	0.85
34	0.82	0.82	0.83	0.85	0.86
36	0.83	0.84	0.85	0.86	0.88
38	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88
40	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89

**Fonte:** VILLA NOVA et al. (2006).

**ANEXO 2 - Valores de  $\omega^*$  em função dos valores médios diários observados de temperatura**

<b>Altitudes de 0 a 1000 metros</b>									
Umidade Relativa (%)									
T (°C)	45	50	55	60	65	70	75	80	85
10	0,532	0,535	0,539	0,542	0,545	0,548	0,551	0,554	0,557
11	0,546	0,549	0,552	0,556	0,559	0,562	0,565	0,568	0,571
12	0,560	0,563	0,566	0,569	0,573	0,576	0,579	0,582	0,585
13	0,573	0,576	0,580	0,583	0,586	0,589	0,593	0,596	0,599
14	0,586	0,589	0,593	0,596	0,599	0,603	0,606	0,609	0,613
15	0,599	0,602	0,606	0,609	0,612	0,616	0,619	0,622	0,626
16	0,612	0,615	0,618	0,622	0,625	0,629	0,632	0,635	0,639
17	0,624	0,628	0,631	0,634	0,638	0,641	0,645	0,648	0,651
18	0,636	0,640	0,643	0,647	0,650	0,653	0,657	0,660	0,663
19	0,648	0,652	0,655	0,659	0,662	0,665	0,669	0,672	0,675
20	0,660	0,663	0,667	0,670	0,674	0,677	0,680	0,684	0,687
21	0,671	0,675	0,678	0,682	0,685	0,688	0,692	0,695	0,698
22	0,682	0,686	0,689	0,693	0,696	0,699	0,703	0,706	0,709
23	0,693	0,697	0,700	0,704	0,707	0,710	0,714	0,717	0,720
24	0,704	0,707	0,711	0,714	0,717	0,721	0,724	0,727	0,730
25	0,714	0,717	0,721	0,724	0,728	0,731	0,734	0,737	0,740
26	0,724	0,727	0,731	0,734	0,737	0,741	0,744	0,747	0,750
27	0,734	0,737	0,740	0,744	0,747	0,750	0,753	0,756	0,760
28	0,743	0,746	0,750	0,753	0,756	0,759	0,762	0,766	0,769
29	0,752	0,756	0,759	0,762	0,765	0,768	0,771	0,774	0,777
30	0,761	0,764	0,768	0,771	0,774	0,777	0,780	0,783	0,786

(T°C) e umidade relativa do ar (UR%).

**Fonte:** VILLA NOVA e PEREIRA (2006).

**ANEXO 3.** Valores de  $\omega^*$  em função dos valores médios diários observados de temperatura (T°C) e umidade relativa do ar (UR%).

<b>altitudes de 1000 a 2000 metros</b>									
Umidade Relativa (%)									
T (°C)	45	50	55	60	65	70	75	80	85
10	0,569	0,572	0,575	0,578	0,582	0,585	0,588	0,591	0,594
11	0,582	0,585	0,589	0,592	0,595	0,599	0,602	0,605	0,608
12	0,595	0,599	0,602	0,605	0,609	0,612	0,615	0,619	0,622
13	0,608	0,612	0,615	0,619	0,622	0,625	0,629	0,632	0,635
14	0,621	0,625	0,628	0,631	0,635	0,638	0,641	0,645	0,648
15	0,634	0,637	0,641	0,644	0,647	0,651	0,654	0,657	0,661
16	0,646	0,649	0,653	0,656	0,660	0,663	0,666	0,670	0,673
17	0,658	0,661	0,665	0,668	0,672	0,675	0,678	0,682	0,685
18	0,670	0,673	0,677	0,680	0,683	0,687	0,690	0,693	0,697
19	0,681	0,685	0,688	0,691	0,695	0,698	0,701	0,705	0,708
20	0,692	0,696	0,699	0,702	0,706	0,709	0,712	0,716	0,719
21	0,703	0,706	0,710	0,713	0,717	0,720	0,723	0,726	0,729
22	0,714	0,717	0,720	0,724	0,727	0,730	0,733	0,737	0,740
23	0,724	0,727	0,731	0,734	0,737	0,740	0,743	0,747	0,750
24	0,734	0,737	0,740	0,744	0,747	0,750	0,753	0,756	0,759
25	0,743	0,747	0,750	0,753	0,756	0,759	0,763	0,766	0,769
26	0,753	0,756	0,759	0,762	0,766	0,769	0,772	0,775	0,778
27	0,762	0,765	0,768	0,771	0,774	0,777	0,780	0,783	0,786
28	0,771	0,774	0,777	0,780	0,783	0,786	0,789	0,792	0,795
29	0,779	0,782	0,785	0,788	0,791	0,794	0,797	0,800	0,803
30	0,787	0,790	0,793	0,796	0,799	0,802	0,805	0,808	0,810

Fonte: VILLA NOVA e PEREIRA (2006).