

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESEMPENHO DO MÉTODO DE PENMAN MODIFICADO  
POR EQUAÇÃO PROPOSTA DE ESTIMATIVA  
DO SALDO DE RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS**

**WILSON ROBERTO DE JESUS**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP  
JULHO - 2000

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESEMPENHO DO MÉTODO DE PENMAN MODIFICADO  
POR EQUAÇÃO PROPOSTA DE ESTIMATIVA  
DO SALDO DE RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS**

**WILSON ROBERTO DE JESUS**

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. DALVA MARTINELLI CURY LUNARDI**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP  
JULHO - 2000

**À Maria Aparecida, minha esposa,  
Ricardo, Roberto e Thiago, meus filhos,  
dedico...**

**Ao meu pai, que por muito pouco tempo não  
pode ver concretizada mais esta etapa  
importante da minha vida.**

## AGRADECIMENTOS

À orientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Dalva Martinelli Cury Lunardi, pelo empenho, dedicação e estímulo.

Ao amigo Jayme Laperuta Filho pelo apoio e colaboração indispensável na execução deste trabalho.

Ao amigo Prof. Dr. Lúcio Benedito Kroll, pela amizade e colaboração constante.

À Hosana Maria Soares Candeias Bis, Simone Bacchin e Eleni Cabral Rocha, na correção e ajustes do texto final.

Aos amigos e funcionários do Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, campus de Botucatu.

Ao Eng<sup>º</sup>. Agr<sup>º</sup>. Antonio Ribeiro da Cunha pelas informações prestadas.

Aos amigos do CINAG – Centro de Informática na Agricultura – FCA : Ulisses Rocha Antuniassi, Fernando José Zanetto Tamburo, Ciro Marcos Silva, Rosilene Domingues Laurenti, Amauri José Matheus Vieira, Ruberval Cesar Campagna, Valdemir

Ramos Domingues, pelo incentivo e colaboração constante no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e funcionários da Central de Aulas, Ermete Nibi Neto e Carlos Eduardo Stocco pela colaboração constante durante o curso.

Ao amigo Jaime Viana no incentivo diário para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas e professores do curso de pós-graduação em Agronomia Área de Concentração em Energia na Agricultura pela amizade e apoio.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	4
3 INTRODUÇÃO.....	7
4 REVISÃO DE LITERATURA .....	9
4.1 Conceitos e Fundamentos da Evapotranspiração .....	9
4.2 Métodos de Estimativa da Evapotranspiração.....	12
4.2.1 Lisimetria.....	18
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
5.1 Caracterização da Região Estudada.....	22
5.2 Período Analisado.....	23
5.3 Estação Lisimétrica.....	23
5.3.1 Lisímetro .....	25
5.3.2 Tanque Controlador da Altura do Nível Freático.....	26
5.3.3 Tanque Medidor.....	27
5.3.4 Cobertura das Caixas .....	28
5.4 Dados Meteorológicos .....	28
5.5 Determinação da Evapotranspiração de Referência (Eto).....	29
5.6 Estimativa da Evapotranspiração.....	31

5.6.1 Método de Penman .....	31
5.6.2 Método de Penman Modificado pela Equação Proposta de Estimativa do Saldo de Radiação de Ondas Longas ( <b>Rb</b> ) .....	33
5.7 Teste Estatístico .....	34
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
6.1 Desempenho do Método de Penman Original no Período Total de Estudo .....	35
6.2 Desempenho do Método de Penman por Estação do Ano.....	39
6.3 Determinação do Desempenho do Método de Penman com a Equação do Balanço de Ondas Longas para as Condições Experimentais no Período Total de Estudo.....	41
6.4 Desempenho do Método de Penman Empregando-se a Equação de Balanço de Ondas Longas Proposta nas Diferentes Estações do Ano.....	44
7 CONCLUSÕES .....	46
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	48



## LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Valôres de <b>b</b> e <b>r</b> <sup>2</sup> obtidos através de regressão linear, entre o método de Penman original, por estação do ano, e os dados lisimétricos .....	41
2 Valôres de <b>b</b> e <b>r</b> <sup>2</sup> obtidos através de regressão linear, entre Eto empregando-se equação de balanço de ondas longas determinada para Botucatu e dados lisimétricos nas estações do ano .....	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Croqui da Estação Lisimétrica.....	24
2 Conjunto evapotranspirométrico; caixa de cimento amianto (A), tanque intermediário (B), tanque medidor (C) e estrutura de cobertura (D).....	25
3 Tanque intermediário.....	26
4 Tanque medidor.....	27
5 Dispersão e ajuste dos valores de Eto obtida pela equação de Penman Original e dados de lisímetro, com valores de <b>c</b> e <b>d</b> de 0.1 e 0.9 respectivamente.....	36
6 Dispersão e ajuste dos valores de Eto obtida pela equação de Penman Original e dados de lisímetro, com valores de <b>c</b> e <b>d</b> de 0.2 e 0.8 respectivamente.....	38
7 Dispersão e ajuste dos valores de Eto obtida pela equação de Penman Original e dados de lisímetro, com valores de <b>c</b> e <b>d</b> de 0.3 e 0.7 respectivamente.....	38
8 Dispersão e ajuste dos valores de Eto estimada com equação proposta de estimativa de <b>Rb</b> para Botucatu, com valores de <b>c</b> e <b>d</b> de 0.1 e 0.9 respectivamente, e Eto medida pelo lisímetro, equação da reta de regressão e <b>r</b> <sup>2</sup> calculados.....	42
9 Dispersão e ajuste dos valores de Eto estimada com equação proposta de estimativa de <b>Rb</b> para Botucatu, com valores de <b>c</b> e <b>d</b> de 0.2 e 0.8 respectivamente, e Eto medida pelo lisímetro, equação da reta de regressão e <b>r</b> <sup>2</sup> calculados.....	43
10 Dispersão e ajuste dos valores de Eto estimada com equação proposta de estimativa de <b>Rb</b> para Botucatu, com valores de <b>c</b> e <b>d</b> de 0.3 e 0.7 respectivamente, e Eto medida pelo lisímetro, equação da reta de regressão e <b>r</b> <sup>2</sup> calculados.....	43

## 1 RESUMO

Comparou-se o desempenho do método de Penman original e Penman modificado com medidas lisimétricas, através de regressão linear. As modificações propostas foram a obtenção de uma equação de estimativa da energia solar de ondas longas **R<sub>b</sub>**, para as condições experimentais.

A nova equação para estimativa de **R<sub>b</sub>** foi obtida de forma residual, através da equação de Penman, sendo a evapotranspiração obtida com os dados lisimétricos. Na equação proposta, assim como na original, foram testados diferentes coeficientes da relação entre nebulosidade e razão de insolação.

Utilizou-se para análise dados dos anos de 1996 e 1997, sendo 339 dados para gerar o modelo de estimativa de **R<sub>b</sub>** e 366 dados independentes para sua validação. Os resultados no período total demonstraram superestimativas do método de Penman original de 34%. Ao adotar-se como coeficientes da relação entre nebulosidade e insolação, **c** e **d** de 0,2 e 0,8, 0,3 e 0,7, houve diminuição das superestimativas sendo **b** igual a 0,33 e 0,28 respectivamente.

A análise por estação do ano apresentou variações no desempenho do método original revelando diminuição de superestimativas no outono e verão quando comparado com o período total sendo o coeficiente angular da regressão linear,  $\mathbf{b} = 0,26$ . Na primavera e inverno  $\mathbf{b} = 0,44$  e  $0,47$  respectivamente. Em todos eles houve melhora na precisão adotando-se os coeficientes da relação entre nebulosidade e razão de insolação diferentes do proposto no trabalho, demonstrando que, os mesmos não representam as condições climáticas locais.

O desempenho do método de Penman utilizando-se a equação proposta para a estimativa de  $\mathbf{Rb}$  foi de diminuição em 13% quando considerou-se  $\mathbf{c}$  e  $\mathbf{d}$  de 0,3 e 0,7, 18% com 0,2 e 0,8 e 23% com 0,1 e 0,9.

A análise do método modificado, por estação do ano, revelou que a mesma se mostrou imprópria na primavera, tendo nas outras estações apresentado uma diminuição de superestimativa surpreendente, sendo os valores de  $\mathbf{c}$  e  $\mathbf{d}$  igual a 0,3 e 0,7 os que melhor representaram as condições locais no verão e no inverno com superestimativa de 5% e 14% respectivamente. No outono a relação entre nebulosidade e razão de insolação de 0,1 e 0,9 apresentou a maior exatidão com  $\mathbf{b}$  de 0,94.

PERFORMANCE OF PENMAN METHOD MODIFIED BY EQUATION PROPOSED IN ORDER TO ESTIMATE NET LONG-WAVE RADIATION. Botucatu, 2000. 67p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Wilson Roberto de Jesus

Adviser: Dalva Martinelli Cury Lunardi

## 2 SUMMARY

We compared the performance of original and modified Penman methods with lysimetric measures by linear regression.

The suggested alterations were to obtain an estimated equation for **R<sub>b</sub>** long waves solar energy under experimental conditions.

This new equation for **R<sub>b</sub>** estimative was attained in residual fashion by Penman equation and evapotranspiration attained by lysimetric data. Different relation coefficient between nebulosity and insolation ratio were tested in both original and proposed ones.

---

Keywords: *Penman method, long-wave radiation*

The experiment was held at the Agronomy College, Department of Natural Resources, 22° 51' latitude, 48° 26' W longitude and 786 m altitude in Botucatu – SP.

Analysis from 1996 and 1997 were used, 339 data for **Rb** estimate model and 336 independent data for validation.

Results on the whole period showed superestimative of 34% original Penman method. When **c** and **d** and 0,2 and 0,8, 0,3 and 0,9 were used as relating coefficients between nebulosity and insolation there was a decrease in superestimatives were **b** is equal to 0,33 and 0,28 respectively.

Season analysis showed performance variation in original method with a superestimative decrease in autumn and summer when compared with the total period and angular coefficient linear regression as **b** = 0,26. During spring and winter **b** = 0,44 and 0,47 respectively. In all of them there was an improvement in precision using relating coefficients between nebulosity and insolation ratio different from the one proposed by the author expressing that they do not show local weather conditions.

Penman method performance with the proposed equation for **Rb** estimative was decreased in 13% when **c** and **d** 0,3 and 0,7, 18% with 0,2 and 0,8 and 23% with 0,1 and 0,9 were considered.

Modified method analysis by season of the year showed inadequacy in spring and in other seasons showed a surprising superestimative decrease values of **c** and **d** equal to 0,3 and 0,7 were the ones which best represented local conditions during summer and winter.

With these coefficients performance during summer was excellent with 0,5% superestimatives and 14% in the winter. In autumn, the relation between nebulosity and insulations ration 0,1 and 0,9 showed the higher accuracy with **b** = 0,94.

### 3 INTRODUÇÃO

Importante elo do ciclo hidrológico da natureza, é a perda de água para a atmosfera, na forma de vapor, quer seja pela evaporação de superfícies líquidas e úmidas ou pela transpiração vegetal. Para solução dos problemas de manejo de água, são necessários dados quantitativos de evaporação e de evapotranspiração, sendo sua medida ou estimativa muito importante para definir o aporte de água necessário aos cultivos.

Vários são os métodos de estimativa e de medida da evapotranspiração, o do balanço de energia é um dos que tem sido utilizado para esse fim. Através da quantidade de energia disponível para o processo da evapotranspiração esse método permite estimar as necessidades de água de uma cultura.

A estimativa diária da evapotranspiração, nem sempre é possível devido ao alto custo, baixa mobilidade e disponibilidade de equipamentos. Recentemente o



desenvolvimento de tecnologia de sistemas de aquisição de dados e de sensores, tornou possível estimar-se de maneira mais fácil a evapotranspiração e também com menor custo.

O método de estimativa da evapotranspiração de referência preconizado por Penman em 1948, tem sido consagrado até hoje pela sua precisão e tem sido o mais utilizado. Tendo em sua equação dois termos, o energético e o aerodinâmico, seu emprego e comparação com valores medidos desse parâmetro tem permitido ajustes para adequá-lo para diversas condições.

A escassez de medidas diretas dos componentes do termo energético dessa equação em climas tropicais tem levado os pesquisadores a importarem de outras regiões climáticas, componentes desse termo para viabilizar sua utilização. Embora em climas tropicais não existam grandes diferenças no comprimento do dia de uma estação para outra como ocorre em latitude maiores, existem grandes variações na nebulosidade e pressão de vapor, elementos climáticos utilizados na estimativa do balanço de ondas longas.

Este trabalho tem como objetivo, utilizando-se do método de Penman original e Penman modificado pela equação proposta de estimativa do saldo de radiação de ondas longas **R<sub>b</sub>**, comparar os dados obtidos por estas equações, com medidas lisimétricas de evapotranspiração no período como um todo, e por estação do ano.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Conceitos e Fundamentos da Evapotranspiração

Thornthwaite & Holzman (1944), utilizaram o termo evapotranspiração para expressar a ocorrência simultânea da evaporação do solo e transpiração de uma superfície vegetada. Gardner (1965) considerou este processo dependente do conteúdo de energia disponível, gradiente de vapor d'água, resistência ao fluxo e da condição do solo e da planta em translocar a água para os locais de evaporação.

A planta sofre um processo natural de crescimento, desde sua germinação até o ponto de maturação, passando por distintas fases de desenvolvimento, e exigências de água, (Pereira (1997)). Pavani (1985) considera imprescindível o seu conhecimento para o dimensionamento e manejo da irrigação.

Thornthwaite (1948), foi o primeiro a usar o termo evapotranspiração potencial (ETp), como sendo a perda de água de uma superfície próxima da capacidade de campo, em crescimento ativo e cobrindo totalmente o solo. Penman (1956), considerou que a evapotranspiração potencial seria a perda de água de uma cultura de altura uniforme na unidade de tempo, sem qualquer restrição hídrica.

Muitos autores a partir da definição da evapotranspiração tem procurado estudar este processo, surgindo diversidade de metodologias e conceitos para sua determinação.

Jensen (1973), utilizou o termo evapotranspiração de referência (Eto) para definir a evapotranspiração máxima que ocorre em uma cultura com características aerodinâmicas e anatômicas semelhantes à maioria, sugerindo a alfafa em fase de desenvolvimento ativo, com altura variando de 30 a 50 cm. Denmead & Shaw (1962) observaram que a evapotranspiração máxima seria função do teor de água no solo, estado de crescimento da planta e das condições climáticas do local.

Segundo Villa Nova (1987), a taxa de evaporação será tanto maior quanto maior for o déficit de saturação entre a camada saturada junto a superfície evaporante e o ar acima desta camada, e quanto menor a resistência a difusão do vapor no trajeto de uma camada para outra. Dessa forma, todos os fatores naturais que incrementem essa diferença serão promotores do processo, destacando os seguintes elementos de clima: radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa. O índice de área foliar é o fator

biológico mais importante nesse processo pois representa o tamanho da superfície transpirante (Villa Nova & Ometto (1976)).

Sendo a água o principal constituinte do protoplasma das células vegetais, ela tem um papel fundamental em todos os processos essenciais para manutenção das atividades celulares. Para que ocorra a fotossíntese é necessário que a quantidade de água na planta seja suficiente para que as folhas túrgidas efetuem trocas gasosas através dos estômatos, sendo o gradiente folha-ar em condições de equilíbrio dinâmico, a maior queda de potencial (Slatyer (1967)). Millar et al. (1971), consideraram o déficit hídrico na folha, função da transpiração, uma falta de condição do sistema em suprir a demanda atmosférica, embora este gradiente de potencial, somado a tendência em equilibrar o estado energético da água, resulte num fluxo dentro da planta.

À medida que a demanda evaporativa da atmosfera leva ao processo de evaporação do solo e transpiração da planta, vão aumentando as forças de retenção da água pelos constituintes do solo e da planta, com intensidades dependentes de suas características, (Fernandes (1990)). Assim, alguns autores discordam quanto ao ponto de maior resistência ao fluxo. Vieira (1984), considerou a resistência da planta predominante até um determinado potencial de água no solo, passando a resistência deste a determinar o processo. Pavani (1985), observou que estando o solo com deficiência de água, a resistência estomática aumenta causando redução na taxa de transpiração e fotossíntese, devido a redução na troca de CO<sub>2</sub>.

Dadas as diferentes condições experimentais impostas e aos múltiplos conceitos que foram surgindo sobre o assunto, Doorenbos & Pruitt (1977), através do boletim 24 da FAO proporcionaram orientação sugerindo critérios práticos sobre manejo de irrigação, recomendando como cultura de referência uma gramínea com altura de 8 a 15 cm, mantendo as demais considerações feitas por (Penman (1956)). Essas recomendações foram testadas durante anos permitindo que fossem aperfeiçoadas e resumidas por (Smith et al. (1991)). Nesta publicação o autor definiu evapotranspiração de referência  $E_{To}$  como sendo a perda de água de uma cultura hipotética com 12cm de altura, crescimento uniforme resistência do dossel de 69 a s/m, albedo 0,23 em pleno desenvolvimento vegetativo.

#### 4.2 Métodos de Estimativa da Evapotranspiração

Várias são as maneiras de se estimar a evapotranspiração de referência, podendo ser divididos em métodos de medida direta e indireta (Burman et al. (1980)). Os de medidas diretas são através de lisímetros e balanço hídrico, e os de medidas indiretas através de evaporímetros e equações empíricas.

Tanner & Pelton (1960) avaliaram os métodos micrometeorológicos como mais vantajosos por permitirem a obtenção de dados horários e por servirem para a calibração de outros métodos. Tanner (1968), classifica os métodos de estimativa da evapotranspiração potencial em micrometeorológicos, do balanço hídrico e os empíricos, tendo os dois primeiros um embasamento físico, sendo por isso mais precisos, necessitando de pessoal técnico especializado além de instrumental que permitam a obtenção de medidas em

pequenos intervalos de tempo.

Sediyama (1987), define 5 métodos para a estimativa de ETo: do balanço de água onde são indicados os lísimetros, das correlações turbulentas, cuja utilização é limitada pela complexidade de equipamentos e sensores utilizados, do balanço de energia, baseado no fato de que uma enorme quantidade de energia é requerida para mudar a água da fase líquida para o estado de vapor, aerodinâmico ou de perfil do vento, que estabelece o fluxo de massa de vapor através do coeficiente de difusidade, ou do coeficiente de transporte e gradientes de vapor d'água no escoamento turbulento e combinado, que associa os conceitos de balanço de energia e transporte de massa (aerodinâmico), onde estão incluídos os métodos de Penman e Penman-Monteith.

A estimativa da evapotranspiração potencial tem levado os pesquisadores a tarefa árdua de calibrar métodos originados em condições distintas daquelas em estudo, propor modificações de vários métodos ou mesmo sugerir a utilização de novas equações, surgindo com isto um número grande de alternativas para estas determinações. Segundo Tanner (1968) a escolha do método mais adequado é função da disponibilidade de dados climáticos, da precisão necessária, conveniência e custo. Para Jensen (1974) os métodos combinados apresentam maior precisão, embora nem sempre os dados climáticos sejam disponíveis.

Dos métodos preconizados pela FAO, o proposto por Penman tem sido mais utilizado, em função de sua precisão de estimativas diárias.

Cuenca & Nicholson (1982) comentaram que a equação de Penman tem sido amplamente utilizada, exatamente por sua consistente base teórica, que combina o balanço de energia e o termo aerodinâmico. Esse termo, segundo os autores, contém uma medida do déficit de pressão de vapor correlacionada por uma função empírica do vento. O balanço de energia, conforme Tanner (1968), soma o fluxo de energia da superfície, incluindo a radiação solar, calor sensível, calor latente, calor do solo e outros fluxos.

Berlato & Molion (1981) afirmaram que os métodos de estimativa de ETo que têm melhor desempenho são aqueles que se fundamentam em princípios físicos inerentes ao processo de evaporação, como o de Penman ou de outros que combinam o balanço de energia com algum parâmetro aerodinâmico.

De acordo com Batchelor (1984), a equação de Penman-FAO tem sido aceita como um método padrão de estimativa de evapotranspiração de referência. Embora teoricamente confiável esta equação torna-se mais empírica quando parâmetros ou variáveis são estimados. Sendo a mesma utilizada para propósitos práticos as incertezas introduzidas por estes fatores empíricos em suas relações não devem ser negligenciados.

Segundo Jensen (1963) e Allen et al. (1989), existe uma estreita relação entre evapotranspiração medida em lisímetro e a estimada pelos métodos de Penman e também com o Tanque Classe A.

Moura (1990) determinou a evapotranspiração máxima para a cultura do milho, através de lisímetros de lençol freático constante, comparando-a com as ETo estimadas pelos métodos da Radiação, Tanque Classe A, Thornthwaite, Penman e Penman-Modificado, concluindo que o método da radiação apresentou a mesma tendência de variação quando comparado com o Tanque Classe A, entretanto com valores superestimados em relação a média dos outros métodos.

Andreatta (1990), determinando a razão entre a ETM de dois cultivares de milho e a ETo estimada por vários métodos, concluiu que a equação de Penman apresentou-se como a mais confiável, pois leva em conta fatores básicos que provocam a perda d'água de uma superfície.

Allen (1986), constatou que a equação de Penman (FAO), estimou 15% acima os valores de (ETo) quando comparado com um lisímetro vegetado com grama em Coshocton (EE.UU.) e em torno de 25% em Davies (EE.UU.), estando a gramínea com porte alto. Embora o mesmo autor considere que este método proporcione estimativas confiáveis, desde que se aplique coeficientes de ajuste em condições de ventos fortes ou muito calmos durante a noite e com valores altos de umidade relativa.

Este método foi publicado pela primeira vez em 1948, citado por Berlato & Molion (1981), tendo sido modificado desde aquela época pelo próprio autor e diversos outros pesquisadores. Penman modificou o termo aerodinâmico e introduziu um fator



F considerando o sistema solo-planta, Doorenbos & Pruitt (1977) revisaram a função do vento e incluíram um fator de ajuste, considerando condições do vento diurno e noturno.

Allen (1986), cita que Monteith (1965) discutiu os conceitos e relações de resistência aerodinâmica e do dossel da cultura, incorporando estes parâmetros na equação original de Penman.

Recentemente Smith et al. (1991), em um encontro com pesquisadores da área, fizeram diversas considerações sobre cada um destes métodos, procurando revisar e atualizar os procedimentos para estimar as necessidades de água das culturas. Nessa oportunidade, embora tenha sido reconhecido o valor histórico do método de Penman e o seu uso universal, o método de Penman-Monteith foi considerado o mais preciso sendo inclusive recomendado como padrão. Saad & Scalopi (1988), utilizando dados relatados por Jensen (1974), para a região de Kimberly, Idaho, comparando o lisímetro de pesagem com vários métodos de estimativa, encontraram melhor desempenho para Penman - Monteith.

Peres (1994) avaliou o modelo de Penman-Monteith no Estado de São Paulo e constatou que este método estimou a Eto de forma consistente e bem correlacionada com os valores medidos em evapotranspirômetros, indicando que o mesmo pode ser utilizado com sucesso na determinação das necessidades de água das culturas.

Segundo Sedyama (1996), é preferível calcular a Eto pelo método de Penman Monteith, quando os dados climáticos são coletados em superfícies com condições semelhantes à cultura hipotética, do que utilizar dados lisimétricos de qualidade duvidosa.

Camargo & Sentelhas (1997), avaliaram o desempenho de vinte métodos de estimativa de evapotranspiração potencial (ETp), em três localidades do Estado de São Paulo, através de dados obtidos em lisímetro conduzidos entre 1954 e 1960. As melhores estimativas de ETp, para as condições do clima sub-tropical úmido do interior do Estado de São Paulo, foram obtidas pelos métodos de Camargo, Thornthwaite, Thornthwaite com índice de calor “T” e Priestley & Taylor. Os métodos de Penman-Monteith, Penman, Hargreaves modificado, Makking e Blaney & Criddle modificado, tiveram bom desempenho e os demais métodos mostraram desempenho inferior.

#### 4.2.1 Lisimetria

Os lisímetros ou evapotranspirômetros são equipamentos constituídos de caixa impermeável, com solo em seu interior, que permitem conhecer todos os termos do balanço hídrico de maneira detalhada.

Thornthwaite (1944), construiu para seus estudos um equipamento que chamou de evapotranspirômetro. Apesar de ter um baixo custo, pode produzir grandes erros

de medida se não for bem operado, além das dificuldades na drenagem, que impedem o bom desenvolvimento das plantas (Mather (1954)).

De acordo com Van Bavel & Harris (1962), tanto os lisímetros quanto os evapotranspirômetros permitem medidas a nível horário quanto mensal, dependendo do equipamento utilizado. Rietchie (1973), Villa Nova (1973) afirmaram que dos métodos de medida existentes o lisímetro é o mais preciso, uma vez que permite a medida da Eto em pequenos intervalos de tempo. Gangopadhyaya et al. (1966) ressaltaram os cuidados na sua instalação que permitam minimizar os efeitos da bordadura como tamanho representativo, condições físicas do solo idênticas a área externa e localização. Gangopadhyaya et al. (1966), afirmaram que em regiões onde as chuvas são frequentes os evapotranspirômetros de menor porte podem ser empregados na determinação da evapotranspiração potencial.

Black et al. (1969) afirmaram que o único equipamento capaz de medir a evapotranspiração com precisão é o lisímetro de pesagem, o mesmo citado por (Van Bavel & Harris (1962)) . Este equipamento é constituída por um bloco de solo, suportado por um mecanismo que acusa a variação de armazenamento de água, função da evapotranspiração, pela diferença de peso (Tanner (1968)).

Para a medida da evapotranspiração potencial são utilizados tanto lisímetros de pesagem como outros tipos como os de drenagem ou os que possuem lençol freático disponível, que servirão posteriormente, como padrão comparativo para as estimativas da evapotranspiração por diferentes métodos. Os lisímetros de pesagem apesar da alta

precisão, quando comparados com os demais equipamentos apresentam dificuldades de instalação e construção requerendo permanente aferições com custo altíssimo, sendo recomendado somente em instituições especializadas (Aboukhaled et al (1982)).

Cury (1985) determinou o consumo hídrico da cultura do repolho (*Brassica oleracea var. capitata L.*) através de evapotranspirômetros com lençol freático constante. A autora afirmou que estes equipamentos, pelos resultados obtidos e facilidade operacional, são viáveis no estudo da demanda hídrica das culturas, bem como para determinação dos coeficientes de cultura e aferição dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.

Outros pesquisadores, Encarnação (1987), Lima et al. (1989), Espinola Sobrinho et al. (1989) também encontraram resultados satisfatórios trabalhando com este mesmo tipo de equipamento.

Camargo (1962), estudando 3 localidades do Estado de São Paulo, utilizando evapotranspirômetros de drenagem, encontrou alta correlação com equações de estimativas da Eto.

Ortolani et al (1966) encontraram uma correlação de 0.95 e 0.84 quando compararam os valores de evapotranspiração obtidos com evapotranspirômetro de drenagem e os métodos de Penman e Thornthwaite, respectivamente, para a região de Ribeirão Preto-SP.

Para Aboukhaled et al (1982), os lisímetros ou evapotranspirômetros de drenagem apresentam limitações quanto a distribuição e movimento de água no seu interior, principalmente quando são feitas as leituras e o abastecimento.

Tendo a evapotranspiração máxima (ET<sub>m</sub>) ou demanda climática ideal que ser obtida em condições potenciais, Doorenbos & Pruitt (1977), os evapotranspirômetros com lençol freático constantes permitem com maior segurança esta determinação visto que não existe nenhum período em que a cultura sofre restrições hídricas Cury & Villa Nova (1989).

Assis (1978), utilizando um evapotranspirômetro de lençol freático constante, cultivado com grama, observou que as condições de umidade do solo foram ótimas para a desenvolvimento vegetal.

Encarnação (1987), estudando a cultura da batata cultivada num evapotranspirômetro com lençol freático de nível constante, observou um ótimo desenvolvimento das plantas e tubérculos, além de apresentar facilidade operacional. A utilização de evapotranspirômetros de lençol freático de nível constante na determinação de demanda de água e calibração de métodos de estimativa da evapotranspiração potencial vem assumindo grande importância tanto pela precisão de estimativas quanto pela possibilidade de se promover adaptações aos modelos, em função da disponibilidade de materiais para sua construção.

Para Aboukhaled et al (1982) os evapotranspirômetros com lençol freático de nível constante são de fácil operação e construção, com medidas diárias aceitáveis.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Caracterização da Região Estudada

Esta pesquisa foi conduzida na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, na área experimental do Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agrônômicas, localizada a 22°51’S de latitude, 48°26’W de longitude e altitude de 786m, no município de Botucatu SP.

O clima local é definido pela classificação de Koeppen como Cwa ou clima temperado quente (mesotérmico), com chuvas no verão e seca no inverno, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C Cunha et al.(1999).

O solo é classificado como latossolo roxo distrófico, textura argilosa, com declividade do terreno de 2%.

### 5.2 Período Analisado

No período de 1996 e 1997 foram utilizados 339 dados para gerar os modelos e 366 outros dados para sua validação .

### 5.3 Estação Lisimétrica

Para medida da evapotranspiração de referência  $E_{To}$ , foram utilizados 5 conjuntos lisimétricos de nível freático, constituído, cada um, por uma caixa de cimento amianto, um tanque intermediário, um tanque medidor e drenagem cujas características, são descritas a seguir e representadas na Figura 1.



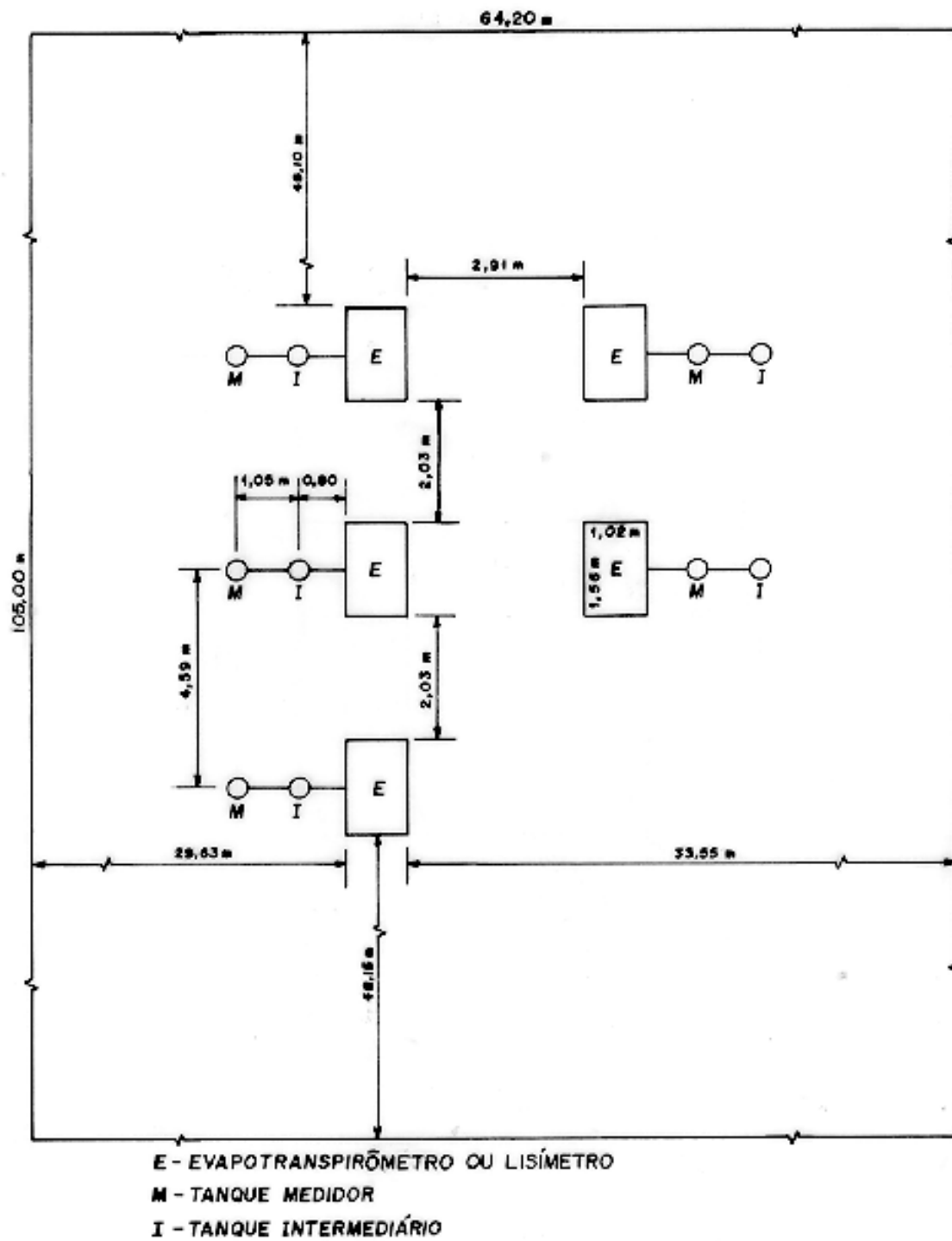


Figura 1.- Croqui da Estação Lisimétrica.

### 5.3.1 Lisímetro

Caixas de cimento amianto de  $1,76 \text{ m}^2$  de área tendo  $0,7 \text{ m}$  de altura, interligada ao tanque intermediário por um tubo de PVC localizado em sua parte inferior, cultivada com grama (*Paspalum notatum Flugge*), estando o nível freático a  $46 \text{ cm}$  da superfície, conforme Figura 2 .

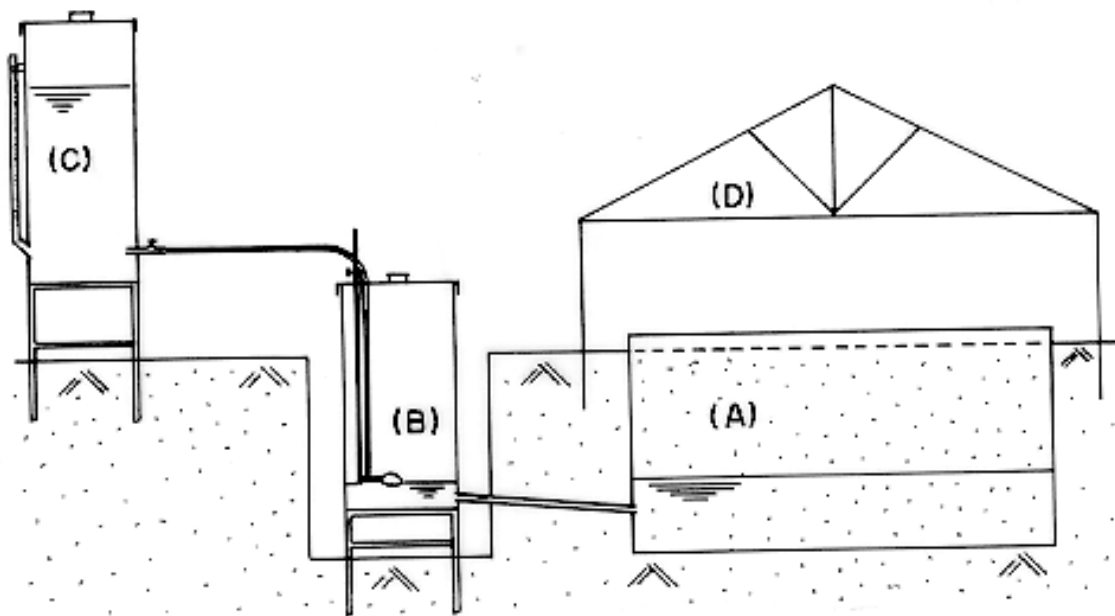


Figura 2.- Conjunto evapotranspirométrico; caixa de cimento amianto (A), tanque intermediário (B), tanque medidor (C) e estrutura de cobertura (D).

### 5.3.2- Tanque Controlador da Altura do Nível Freático

Tanque intermediário construído em chapa de ferro galvanizado nº 22, medindo 0,70 m de altura e 0,30 m de diâmetro, com tampa que permite a passagem de uma mangueira plástica que conduzia a água do tanque medidor e uma haste com bóia fixa na extremidade, que permite a variação da altura do nível freático, conforme Figura 3.

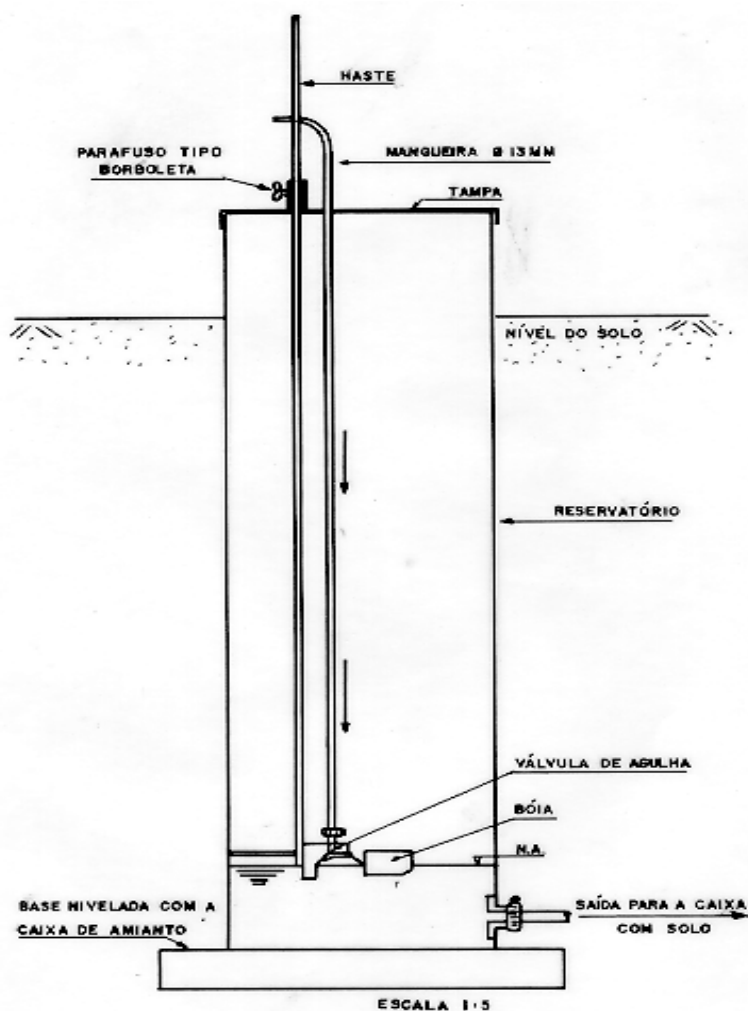


Figura 3.- Tanque intermediário

### 5.3.3 Tanque Medidor

Tanque medidor, construído em chapa de ferro galvanizado nº 22, medindo 0,70 m de altura e 0,27 m de diâmetro, com saída para o tanque intermediário e tomada para bureta, graduada em mm, através da qual eram efetuadas as leituras de evapotranspiração, conforme Figura 4.

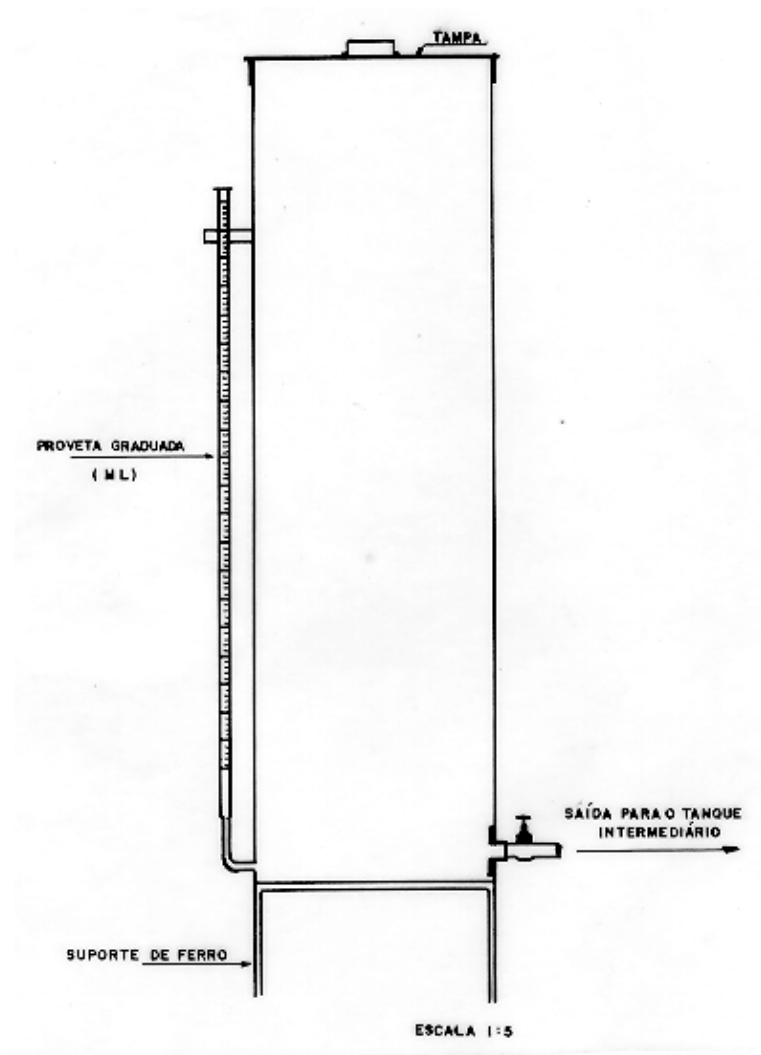


Figura 4.- Tanque medidor

#### 5.3.4 Cobertura das Caixas

Em caso de precipitação pluvial são utilizadas coberturas plásticas com estrutura de madeira que cobre o lisímetro .

#### 5.4 Dados Meteorológicos

Para obtenção dos dados meteorológicos foram efetuadas diariamente leituras as 7:00 e as 18:00 horas, utilizando-se uma estação meteorológica convencional com os seguintes instrumentos de medida:

- tanque Classe A, com 1,2 m de diâmetro, 0,25 metros de profundidade com poço tranquilizador convencional e micrometro de gancho de 0,02 milímetros;
- anemômetro de fabricação Wieh Lambrecht (K.G. Gottingen) tipo 1440, integrador, instalado a 2 metros de altura;
- actinógrafo bimetálico Otta, modelo 44, com rotação regulável para 24 horas ou 7 dias;
- heliógrafo de fabricação Wieh Lambrecht (K.G. Gottingen) para zonas tropicais Norte e Sul entre 0° e 40°, com resolução de 0,1 horas;
- barômetro de mercúrio marca Salmoiraghi, modelo 437, com escala dupla em ectopascal e milibares;
- pluviógrafo marca Otta de registros semanais;

- higrógrafo de cabelo marca Salmoiraghi, modelo 1613, com giro semanal, com precisão de 5%;
- termógrafo marca Salmoiraghi, modelo 1067, com giro semanal;
- termômetros de máxima e mínima, convencionais, sendo de mercúrio em vidro o de máxima, e álcool e vidro o de mínima, marca R.Fuess com resolução de 0,2°C;
- evaporímetro piché de vidro modelo EVM-1 capacidade 30 ml – 20°C.

### 5.5 Determinação da Evapotranspiração de Referência (Eto).

A evapotranspiração de referência foi determinada através das leituras diárias, às 8 horas, do volume de água em mililitros (ml), registrado na proveta acoplada ao tanque medidor. Esse valor diário, permitia a obtenção da Eto em mm, considerando-se que:

$\Delta V_1$  : volume de água evaporada do evapotranspirômetro;

$\Delta h_1$  : altura de água evaporada do evapotranspirômetro ;

$S_1$  : área de secção horizontal do evapotranspirômetro ;

$\Delta V_2$  : volume de água escoado do tanque intermediário para manter o nível freático constante;

$\Delta V_3$  : volume escoado do tanque medidor para manter o nível do tanque intermediário constante;

$\Delta h_3$  : altura da água escoada do tanque medidor;

$S_3$  : área da seção horizontal do tanque medidor;

Admitindo-se que a única perda de água seja por evapotranspiração ,  
toda vez que ocorre esse processo, tem - se:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_3 \quad (1)$$

sendo

$$\Delta V_1 = \Delta V_3 \quad (2)$$

$$\Delta h_1 \cdot S_1 = \Delta h_3 \cdot S_3$$

$$\Delta h_1 = \frac{\Delta h_3 S_3}{S_1} \quad (3)$$

sendo  $S_1 = 1,76 \text{ m}^2$  e  $S_3 = 0,711 \text{ m}^2$  tem-se o seguinte fator ( $f$ ):

$$f = \frac{S_3}{S_1} \cdot 10 = \frac{0,711}{1,76} \cdot 10 = 0,40$$

o número 10 converte a leitura  $\Delta h_3$  em mm. (4)

## 5.6 Estimativa da Evapotranspiração

Para a estimativa de evapotranspiração de referência (**Eto**), foram utilizados o método de Penman original e Penman modificado pela equação proposta de estimativa do saldo de radiação de ondas longas

### 5.6.1 Método de Penman

$$Eto_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Rg(1 - \alpha) - \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Rb + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(U)(ea - ed) \quad (5)$$

em que:  $Eto_p$  = evapotranspiração de referência (mm/dia);

$\Delta$  : tangente a curva de pressão de vapor versus temperatura do ar;

$\gamma$  : constante psicrométrica;

$Rg$  : radiação global medida por actinógrafo (mm/dia);

$\alpha$  : albedo (0,25);

$n/N$  : razão de insolação;

$Rb$  : saldo de irradiação de ondas longas (mm/dia) proposto por Brunt (1934).

$f(U) = 0,36(1 + U/160)$ ;

$U$  : velocidade do vento a 2 m de altura (km/dia).



$ea$  : tensão saturante de vapor (mbar);

$ed$  : tensão atual de vapor (mbar);

$$Rb = \sigma T^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{ed}) (c + dn/N); \quad (6)$$

Foi também analisado o efeito da nebulosidade adotando-se os valores de **c** e **d** de 0,1 e 0,9; 0,2 e 0,8 e de 0,3 e 0,7.

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzman dado por  $1,98 \cdot 10^{-9}$  (mm/dia  $\cdot$  K<sup>4</sup>);

$T$  : temperatura média do dia °C;

$ed$  : tensão atual de vapor (mbar);

$$f(U) = 0,36(1 + U/160); \quad (7)$$

$U$  : velocidade do vento a 2 m de altura (km/dia).

### 5.6.2 Método de Penman Modificado pela Equação Proposta de Estimativa do Saldo de Radiação de Ondas Longas (Rb)

Com o objetivo de proporcionar adequação ao método de Penman através de uma equação de estimativa do saldo de radiação de ondas longas ( **Rb**) para as condições locais, determinou-se diariamente, isolando-se o termo **Rb** na equação de Penman, sendo a  $ET_{oL}$  obtida através dos dados lisimétricos da forma:

$$-Rb = \frac{ET_{oL} - (1-w)f(U)(ea - ed)}{w} - R_s \quad (8)$$

sendo:

$ET_{oL}$  : evapotranspiração medida pelo lisímetro (mm/dia);

$w$  : fator relativo ao efeito da temperatura e altitude;

$f(U)$  : função empírica da velocidade do vento (km/dia);

$ea$  : tensão saturante de vapor (mbar);

$ed$  : tensão atual de vapor (mbar);

$R_s$  : saldo de irradiação de ondas curtas (mm/dia)

Para se determinar as constantes apropriadas para a equação efetuou-se a regressão linear relacionando-se  $\frac{Rb}{\sigma_T^4(c + d \frac{n}{N})}$  como variável dependente e como variável independente  $\sqrt{ed}$  tendo-se adotado para **c** e **d** os valores 0,1 e 0,9; 0,2 e 0,8; 0,3 e 0,7.

À partir do modelo determinado para estimativa de  $R_b$ , procedeu-se à estimativa de  $E_{to}$  em dados independentes utilizando-se a equação (5) conforme já descrito.

### 5.7 Teste Estatístico

As estimativas de  $E_{to}$  obtidas para cada um dos métodos propostos, foram comparadas com a  $E_{to}$  medida nos lisímetros através de análise de regressão passando pela origem, segundo o modelo  $E_{to}PO_i = b E_{to}l_i + c_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , onde  $n = 366$ , utilizando-se para isso o sistema para análise estatística S.A.S. (Statistical Analysis System).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Desempenho do Método de Penman Original no período total de estudo

As Figuras de 5 a 7 representam graficamente a dispersão e ajuste dos dados de Eto obtidos pela equação de estimativa proposta por Penman e medidos por lisímetro eliminando-se os dias com precipitação pluvial. A superestimativa observada foi em torno de 34%, com coeficiente de regressão  $r^2$  em torno de 0,98, quando se considerou os valores de **c** e **d** de 0,1 e 0,9 respectivamente, conforme proposto .

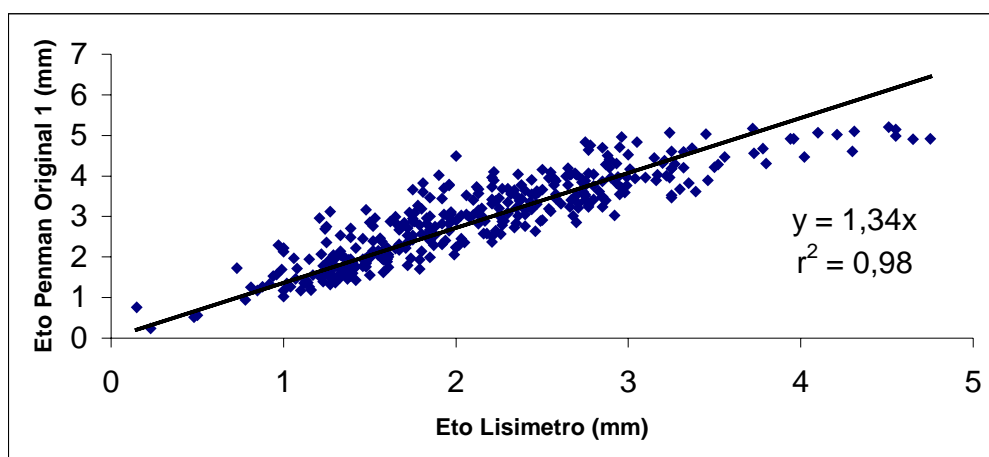


Figura 5. Dispersão e ajuste dos valores de Eto obtida pela equação de Penman Original e dados de lisímetro, com valores de **c** e **d** de 0,1 e 0,9 respectivamente.

Embora dentre os métodos combinados o de Penman tenha sido considerado como o mais preciso, devido sua tendência de superestimativas, várias propostas de adequação foram feitas na tentativa de se averiguar se eram devidas ao termo energético ou ao termo aerodinâmico de sua equação.

Segundo o próprio Penman conforme citado por Tanner & Pelton (1960), ao discutir os erros de seu método com relação a dimensão atribuída ao primeiro e segundo termo da equação, o mesmo considerou que os erros na determinação de **R<sub>n</sub>**, radiação líquida, são as mais importantes, principalmente quando são obtidas através de equações de estimativa, sendo maiores quando a radiação incidente é medida e a emissão de ondas longas é estimada.

Tanner & Pelton (1960) avaliaram as dimensões dos erros nas estimativas de **R<sub>n</sub>**, consideraram que se **R<sub>s</sub>** é estimado através do número de horas de insolação, o erro pode ser da ordem de 20 a 30% e se **R<sub>s</sub>** é medido e **R<sub>b</sub>** é estimado, os erros podem ser ainda maiores.

Para estimativa da emissão de ondas longas Penman propôs a relação de Brunt (1932) sendo as constantes **a** e **b** dadas por Goss & Brooks (1956), enfatizando porém que as mesmas podem variar com a localidade.

Para as constantes **c** e **d** assumiu-se conforme Conrad (1944), completa relação entre a fração de nebulosidade em décimos e razão de insolação  $n/N$ , considerando os valores de **c** e **d** 0,1 e 0,9 respectivamente.

Considerando que esses valores poderiam não ser os mais representativos analisou-se também o comportamento do método empregando-se para **c** e **d** os valores 0,2, 0,8 e 0,3, 0,7, conforme pode ser visto nas Figuras 6 e 7, havendo nos dois casos diminuição das superestimativas de 0,02 .

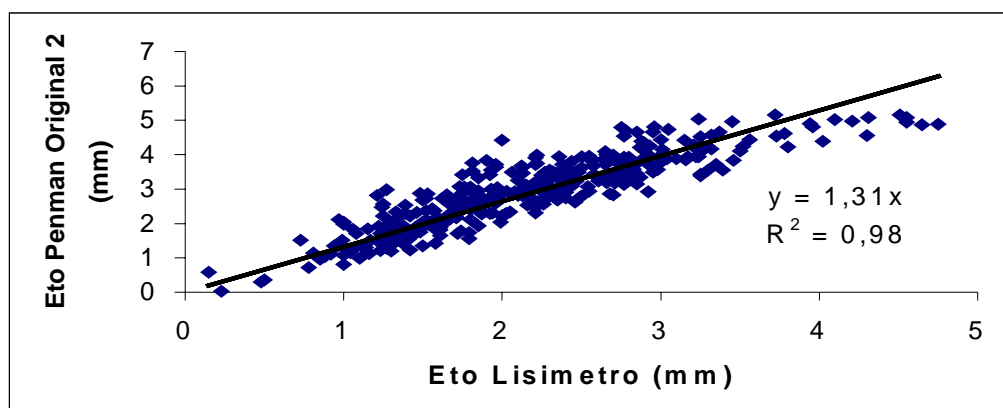


Figura 6. Dispersão e ajuste dos valores de Eto obtida pela equação de Penman Original e dados de lisímetro, com valores de **c** e **d** de 0,2 e 0,8 respectivamente.

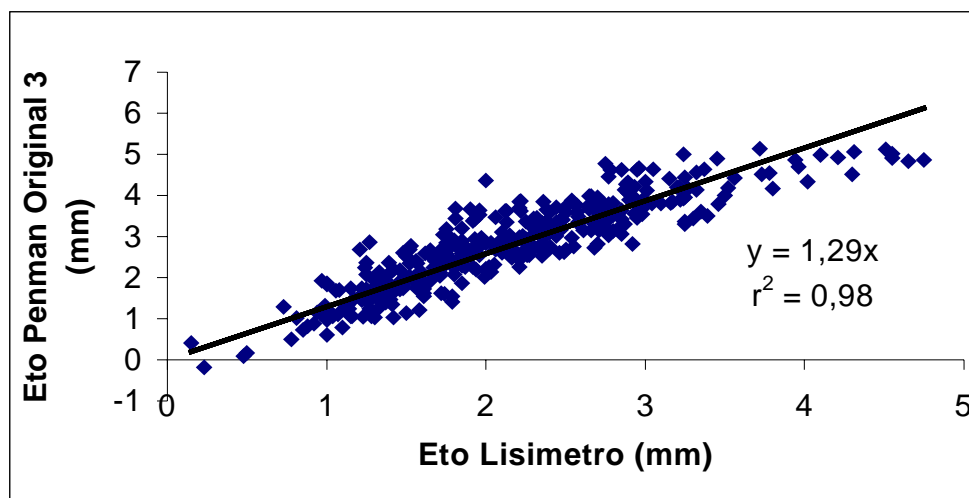


Figura 7. Dispersão e ajuste dos valores de Eto obtida pela equação de Penman Original e dados de lisímetro, com valores de  $c$  e  $d$  de 0,3 e 0,7 respectivamente.

Procurou-se eliminar medidas de superfície inexistentes em estações meteorológicas, admitindo que a pressão saturante de vapor poderia ser obtida pela temperatura do ar estando a superfície seca, a temperatura da mesma pode ser subestimada havendo subestimativas de calor sensível transferido para a atmosfera com superestimativas do método.

Procurando-se avaliar este efeito procedeu-se a análise do comportamento do método por estações do ano.

## 6.2 Desempenho do Método de Penman por Estação do Ano

Tendo nas condições locais variações de temperatura do ar, energia solar e do número de horas de insolação, além de outras variáveis climáticas, com a estação do ano, procurou-se avaliar o desempenho do método de Penman original nestas estações, obtendo-se conforme Quadro 1 uma diminuição na superestimativa de no outono e verão com **b** de 0,26 e um aumento na primavera e no inverno com **b** de 0,47.

A melhora no desempenho no verão pode ser devida à maior frequência no molhamento da superfície do solo permitindo que a condição fosse mais próxima da evapotranspiração de referência onde a temperatura da superfície é mais próxima da temperatura do ar. Todavia, os valores estimados de  $E_{to}$  no verão continuaram a ser maiores que os medidos, podendo ser devidas a subestimativas nas medidas. Embora nesta época o desenvolvimento da grama seja pleno, devido à disponibilidade de energia radiante e água pela presença do lençol freático, a interrupção da capilaridade nos primeiros centímetros de solo pode ter levado a uma diminuição da evaporação do solo.

A semelhança de comportamento entre verão e outono coincidem com a análise do número de horas de insolação **n** em estudos anteriormente desenvolvidos, para a mesma região Jesus (1995), onde os valores de **n** por estação do ano mostraram a seguinte ordem decrescente: inverno, primavera, outono, e verão.



Portanto, tanto o regime de precipitação quanto o tipo de nuvens devem ter influência no comportamento do método.

Isto pode ser evidenciado pela melhora de desempenho ao adotar-se os valores de 0,2, 0,8 e 0,3 , 0,7 para o coeficiente **c** e **d**.

Swinbank (1963), considerou que a importância que é dada ao efeito da variação de pressão de vapor na emissão de ondas pela atmosfera em dias sem nuvens é exagerada. No presente estudo observa-se que considerando-se dias com e sem nuvens esta relação foi mais próxima no período de maior nebulosidade.

Quadro 1. Valôres de **b** e  $r^2$  obtidos através de regressão linear, entre o método de Penman Original , por estação do ano, e os dados lisimétricos.

<b>ESTAÇÃO / METODO</b>	<b><math>r^2</math></b>	<b>b</b>
<b>PRIMAVERA</b>		
<b>ETOP0 1</b>	0,98	1,44
<b>ETOP0 2</b>	0,98	1,41
<b>ETOP0 3</b>	0,98	1,37
<b>VERAO</b>		
<b>ETOP0 1</b>	0,98	1,26
<b>ETOP0 2</b>	0,98	1,23
<b>ETOP0 3</b>	0,98	1,20
<b>OUTONO</b>		
<b>ETOP0 1</b>	0,98	1,26
<b>ETOP0 2</b>	0,98	1,23
<b>ETOP0 3</b>	0,98	1,20
<b>INVERNO</b>		
<b>ETOP0 1</b>	0,98	1,47
<b>ETOP0 2</b>	0,98	1,44
<b>ETOP0 3</b>	0,98	1,40

ETOP01, ETOP02 e ETOP03, Método de Penman com equações de balanço de ondas longas com os coeficientes **c** e **d** 0,1 e 0,9, 0,2 e 0,8 e 0,3 e 0,7 respectivamente.

### 6.3 Determinação do desempenho no Método de Penman com a Equação do Balanço de Ondas Longas para as Condições Experimentais no Período Total de Estudo.

Sendo o Balanço de Ondas Longas função das condições climáticas procurou-se determinar os coeficientes **a**, linear, e **b**, angular, para as condições experimentais

através da regressão linear entre  $\frac{Rb}{\sigma T^4} \left( c + d \frac{n}{N} \right)$  e  $\sqrt{ed}$  tomando-se **c** e **d** igual a 0,1 e 0,9, 0,2 e 0,8 como também 0,3 e 0,7, obtendo a equação:

$$Rb = \sigma T^4 (0.83 - 0.38\sqrt{ed}) (c + dn/N)$$

A fim de que esta equação fosse validada comparou-se os dados de evapotranspiração medida e estimada com o emprego da mesma considerando-se dias com e sem precipitação.

Observa-se através das Figuras 8, 9 e 10, uma diminuição de superestimativa sendo de 13% quando se considerou **c** e **d** 0.3 e 0.7, 18% com 0.2 e 0.8 e 23% com 0.1 e 0.9.

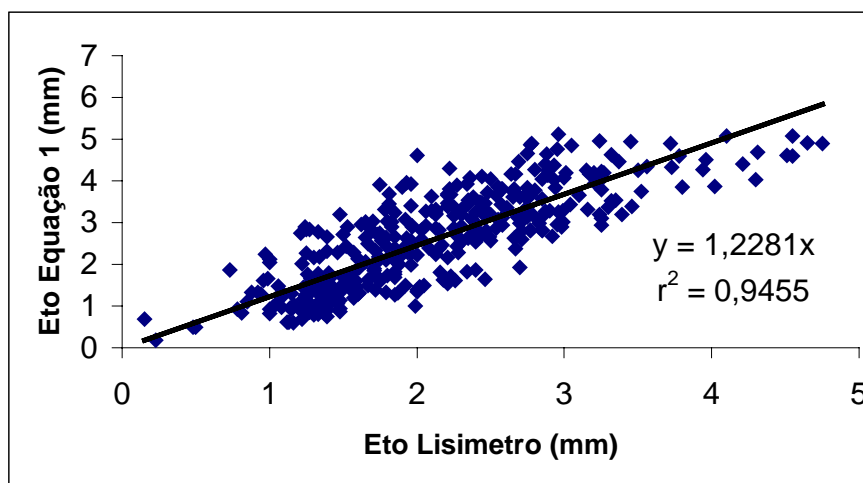


Figura 8.- Dispersão e ajuste dos valores da **Eto** estimada com equação proposta de estimativa de **Rb** para Botucatu, com valores de **c** e **d** de 0,1 e 0,9 respectivamente, e **Eto** medida pelo lisímetro, equação da reta de regressão e  $r^2$  calculados.

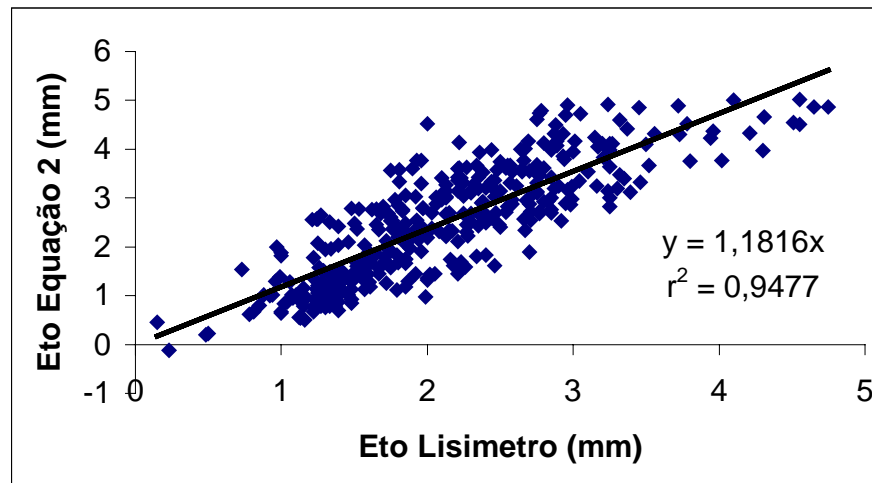


Figura 9. Dispersão e ajustes valores da **Eto** estimada pela equação proposta de estimativa de **Rb** para Botucatu, com valores de **c** e **d** de 0,2 e 0,8 respectivamente, e **Eto** medida pelo lisímetro, equação da reta de regressão e  $r^2$  calculados.

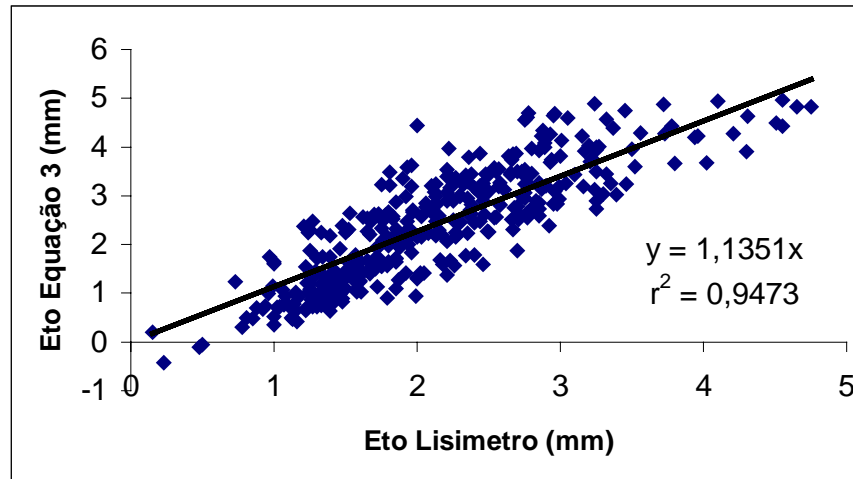


Figura 10. Dispersão e ajuste dos valores da **Eto** estimada pela equação proposta de estimativa de **Rb** para Botucatu, com valores de **c** e **d** de 0,3 e 0,7 respectivamente, e **Eto** medida pelo lisímetro, equação da reta de regressão e  $r^2$  calculados.

#### 6.4 Desempenho do Método de Penman empregando-se a Equação de Balanço de Ondas Longas Proposta nas Diferentes Estações do Ano.

No Quadro 2 é apresentado o desempenho do método de Penman com a equação de estimativa de **R<sub>b</sub>** por estação do ano. O seu emprego mostrou uma maior exatidão no verão com pequena superestimativa, 5%, considerando-se **c** e **d** de 0,3 e 0,7 respectivamente.

No outono ocorreu subestimativas sendo a de maior exatidão, nesta época, a que considerou **c** e **d** igual a 0,1 e 0,9 respectivamente, onde o valor do coeficiente foi igual a 0,94.

No inverno as superestimativas também foram bastante reduzidas quando compara-se o desempenho do método da forma original, Quadro 1, e com o emprego da equação proposta, Quadro 2, onde os valores de **b** caíram de 0,47 para 0,24 com **c** e **d** igual a 0,1 e 0,9, de 0,44 para 0,18 com **c** e **d** igual a 0,2 e 0,8, e de 0,40 para 0,14 com **c** e **d** de 0,3 e 0,7.

Na primavera, todavia houve piora nas superestimativas, mostrando inadequação da equação proposta para esta estação.

Para Martin & Palmer (1964) parece não ser apropriada a estimativa da energia de ondas longas a partir da pressão de vapor para todas as épocas do ano,

principalmente em climas áridos de semi-áridos onde a advecção de calor sensível tem grande efeito sobre a evapotranspiração conforme Fitzpatrick & Stern (1966).

Quadro 2. Valôres de **b** e  $r^2$  obtidos através de regressão linear, , entre Eto empregando-se equação de balanço de ondas longas determinada para Botucatu e dados de lisímetro.

<b>ESTAÇÃO / METODO</b>	<b><math>r^2</math></b>	<b>b</b>
<b>PRIMAVERA</b>		
<b>ETO 1</b>	0.97	1.45
<b>ETO 2</b>	0.98	1.40
<b>ETO 3</b>	0.98	1.36
<b>VERAO</b>		
<b>ETO 1</b>	0.97	1.14
<b>ETO 2</b>	0.98	1.10
<b>ETO 3</b>	0.98	1.05
<b>OUTONO</b>		
<b>ETO 1</b>	0.93	0.94
<b>ETO 2</b>	0.94	0.89
<b>ETO 3</b>	0.94	0.84
<b>INVERNO</b>		
<b>ETO 1</b>	0.94	1.24
<b>ETO 2</b>	0.95	1.18
<b>ETO 3</b>	0.95	1.14

ETOP01, ETOP02 e ETOP03, Método de Penman com equações de balanço de ondas longas com os coeficientes **c** e **d** 0,1 e 0,9, 0,2 e 0,8 e 0,3 e 0,7 respectivamente.

## 7 CONCLUSÕES

Ocorreram superestimativas de 38% empregando-se a equação de Penman conforme proposta pelo autor no período como um todo. Adotando-se os coeficientes da relação entre nebulosidade e razão de insolação de 0,2 e 0,8 ou 0,3 e 0,7 houve diminuição de superestimativas, mostrando-se portanto mais representativos das condições experimentais.

Houve variação de desempenho do método da forma original com a estação do ano sendo em ordem decrescente, nas superestimativas, inverno com aproximadamente 47%, primavera 44%, verão e outono com cerca de 26%.

Na comparação entre a Eto estimada com equação proposta de estimativa de Rb para Botucatu e os valores medidos por lisímetro, observou-se de maneira decrescente superestimativas de 22% com valor de **c** e **d** de 0,1 e 0,9, de 18% e 13%, com valores de **c** e **d** 0,2, 0,8 e 0,3, 0,7 respectivamente. Quando separou-se os dados em estações do ano a superestimativa para a primavera variou de 45% para 36%, no inverno de 24% para 14%, e no verão de 14% para 5%. No outono houve subestimativa de 6% e 16% respectivamente.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS\*

ABOUKHALED, A., ALFARD, A., SMITH, M. Lisimeters. *Irrigation and drainage paper*.

Roma: FAO, 1982. 69p.

ALLEN, R.G. Penman for all seasons. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v. 112, p. 348 - 68, 1986.

ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L., BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.*, v. 81, p. 650-62, 1989.

---

\*UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Faculdade de Ciências Agrônomicas. Normas para a elaboração de dissertações e teses. Botucatu, 1997. 35p.

ANDREATTA, J.A. Determinação da razão entre a evapotranspiração de dois cultivares de milho (*Zea mays L.*) e a evapotranspiração potencial. Botucatu. 1990. 94p. *Dissertação* (Mestrado/ Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronomicas UNESP- Botucatu.

ASSIS, F.N. O uso do evapotranspirômetro no estudo de algumas relações entre evapotranspiração medida e estimada. Piracicaba. 1978. 65 p. *Dissertação* (Mestrado / Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.



BATCHELOR,, C.H. The accuracy of evapotranspiration functions estimated with the FAO modified Penman equation. *Irriga. Science.* v. 4, n. 5, p. 223 - 34, 1984

BERLATO, M.A., MOLION, L.C.B. Evaporação e evapotranspiração. *Bol. Tec. Inst. Pesqui. Agronômicas*, (Porto Alegre), n. 7, p. 1-95, 1981.

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, v. 58:p.389-418, 1932.

BRUNT, D. Physical and dynamical meteorology, Cambridge; **University Press**.,, 1934. 428 p.

BLACK, T.A. , GARDNER, W.R. THURTELL, GY. The prediction of evapotranspiration, drainage and soil storage for a bare soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v33, p. 655-660, 1969.

BLANEY, H.F., CRIDDLE, W.D. Determining Water requeriments in irrigatead areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conservation Service, United States Departamente of Agriculture, 1952. 96 p.

BURMAN, R.D., NIXON, P.R., WRIGHT, J.L., PRUITT, W.D. Water requeriments. In: JENSEN, M.E. (Ed.). Design and operations of form irrigations systems. Michigan: American Society of Agricultural Engineering, 1980. 190 p.

CAMARGO, A.P. Contribuição para determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Bragantia*, v. 21, n. 12, p. 164 - 213. 1962

CAMARGO, A. P., SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranpiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Santa Maria, RS. **Rev. Bras. Agrometeorol.**; v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CONRAD, V. Methods in Climatology. Massachusetts, Harvard University. Press, 1944. 228p.

CUENCA, R.H., NICHOLSON, M. T. Apllication of Penman equation wind funcion. **J. Irrig. and Drain. Eng.**, v. 108, p. 13-23, 1982.

CUNHA, A. R., KLOSOWSKI, E. S., GALVANI, E., ESCOBEDO, J. F., MARTINS, D. Classificação climática para o município de Botucatu-SP, segundo Koppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA UNESP, 1999. p.487-91.

CURY, D.M. Demanda de água na cultura do repolho (*Brassica oleracea var. capitata L.*).

Piracicaba, 1985. 79p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

CURY, D.M., VILLA NOVA, N.A. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) do repolho

(*Brassica oleracea var. capitata L.*). **Científica** (São Paulo), v. 17, n. 1, p. 109 – 19, 1989.

DENMEAD, O.T., SHAW, R.T. Availability of soil water to plants as affected by soil

moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.*, v. 54, p. 385-90, 1962.

DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO,

1977. 194 p. (Riego y drenaje, 24).

EKERN, O.C. Evapotranspiration by Bermuda grass sod (*Cynodon dactylon, L. Pres.*) in

Hawaii. *Agron. J.*, v. 58, p. 387-90, 1966.

ENCARNAÇÃO, C.R.F. Exigências hídricas e coeficientes culturais da batata (*Solanum*

*tuberosum L.*). Piracicaba, 1987. 53p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)

- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

ESPÍNOLA SOBRINHO, J., MEDINA, B.F., MAIA NETO, J.M. Determinação de campo da

evapotranspiração e dos coeficientes do cultivo para caupi e milho. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989, Maceió. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1989. p. 292-305.

FERNANDES, M.A. Necessidades hídricas da cultura de inferno do feijoeiro (*Plhaleosus vulgaris L.*). Botucatu, 1990. 82 p. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

FITZPATRICK, E.A., STERN, W.R. Estimative of potential evaporation using alternative data in Penmans formulae. **Agric. Meteorol.**, v. 3, p. 225-239, 1966.

GANGOPADHYAYA, M., HARBECK, G.E., NORDENSON, T.J. OMAR, M.H.,  
ORYVAEV, V.A. Measurements and estimation of evaporation and evapotranspiration.  
World Meteorological Organization. Geneva, 1966, 121p. (Tech. Note no. 83, WMO-no. 201, TP 105)

GARDNER, W.R. Methods soil Analysis SI. **Am. Soc. Agron.**, n. 9, p. 87-127, 1965.

GOSS, R.J., BROOKS, F.A., Contants for empirical expression for downcoming atmospheric radiation under cloudless sky. **Journal of Meteorology**, v.13, p. 482-488, 1956.

JENSEN, M.E., HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **J. Irrig. Drain. Div.**, v. 89, p. 15-41,1963.

JENSEN, M.E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: American Society of Civil Eng., 1973. 215 p.

JENSEN, M.E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. *Rep. Tech. Com. on Irrig. Water Requirements. Irrig. And Drain. Div.*, ASCE, 1974. 227 p.

JESUS, W.R. Estudo da variabilidade horária do número de horas de insolação no município de Botucatu – SP. Botucatu, 1995. 72p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

LIMA, M.G. Evapotranspiração máxima (ETM) da cultura do feijão macassar (*Vigna unguiculata L. Walp.*) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989, Maceió. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1989. p. 275-82.

LIMA, M.G., COSTA, E.F., CARVALHO, P.A.C. Determinação do consumo de água pela cultura do arroz (*Oryza sativa L.*) cultivar *Metica 1*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989, Maceió. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1989. p. 134-42.

MARTIN, F.L., PALMER, W.C. Statistical estimates of computed water-vapor radiative flux from clear skies at an oceanic location. *J.Appl. Meteor.*, v.3, 780-787, 1964.

MATHER, J. R. The measurements of potencial evapotranspiration. Seabrook N.J. The Johns Hopkins University. Publications in Climatology, v.7, n. 1, 1954. P.7-28.

MILLAR, R.A.; R.E. JENSEN, A. BAVER; E.B. MORUM. Influence of atmosferic and soil environment parameters on the diurnal fluctuations of leaf water status of barley. **Agric. Meteorol.**, n.8, p. 92-105, 1971.

MOURA, M.C.F.L. Determinação do consumo de água para a cultura do milho (*Zea mays* L.) pelo método lisimétrico. Piracicaba, 1990. 92p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MONTEITH, F.L. Radiation and Crops. **Experimental Agriculture**, n.1, p.241-251, 1965

ORTOLANI, A.A., CAMARGO, A.D., VILLA NOVA, N. A. Correlação entre evapotranspiração potencial calculada segundo os métodos de Penman e Thornthwaite e de dados de evapotranspirômetros, na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, v.5, IAC 25 (15), 1966. P. 65-68.

PAVANI, L.C. Evapotranspiração e produtividade em feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) c.v. Goiano Precoce, sobre três níveis de potencial de água no solo. Piracicaba, 1985. 171p. **Dissertação** (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. **Neth J. Agric. Sci.**, v. 4, p. 9-29, 1956.

PEREIRA, A.B. Modelo de estimativa do potencial de energia solar à superfície. Botucatu, 1997. 92p. Tese (Doutorado) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista.

PERES, J.G. Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referência nas condições climáticas do estado de São Paulo. Piracicaba, 1994. 116p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

RIETCHIE, J.T. Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. **Agron. J.**, v. 65, p. 893-7, 1973.

SAAD, J.C.C., SCALOPPI, E.J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração potencial. In: **CONGRESSO NACIONAL DE**

**IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**, 8, 1988, Florianópolis. Anais... Florianópolis:

Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. v. 2, p. 999-1021.

SAS INSTITUTE, Statistical Analysis System Software Rel 6.12 TS020 for Windows,

University of North Carolina, Cary, 1998.

SEDIYAMA, G.C. Necessidade de água para os cultivos. In: **ASSOCIAÇÃO**

**BRASILEIRA DE ENSINO AGRÍCOLA SUPERIOR**. Curso de Engenharia de

Irrigação. Brasília, 1987. 143p. (Curso de Especialização por Tutoria à distância, módulo

4).

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica.

**Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, n.1, p.i-xii, 1996.

SLATYER, R.O. Plant water relationships, New York: Academic Press, 1967. 366 p.

SMITH, M., SEGEREN, A., PEREIRA, A., ALLEN, R. Report on the expert consultation on

procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements.

Roma: FAO, 1991. 45 p.

SWINBANK, W. C., Long wave radiation from clear skies. **Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.**,

89: p. 339-348. 1963.



- TANNER, C.B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Soil Sci. Soc. Amer.**, v. 24, p. 1-9, 1960.
- TANNER, C.B. Evaporation of water from plants and soil. In: KOLOWSKY, T.T. (Ed.) Water deficits and plant growth. New York: **Academic Press**, 1968. cap. 4, p. 73-106.
- TANNER, C.B., PELTON, W.L. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. **J. Geophys. Res.**, v. 65, p. 3391-413, 1960.
- THORNTHWAITE, C.W., HOLZMAN, B. Measurement of evaporation from land and water surface. USDA Technical Bull. N. 817B, p. 4-11, 1944.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a ration classification of climate. **Geogr. Rev.**, v. 38, p. 55-94, 1948.
- VAN BAVEL, S.H.M.; HARRIS, D.C. Evapotranspiration rates from bermuda grass and corn at Raleigh North Carolina. **Agron. J.**, v. 54, n.4, p. 319-22, 1962.
- VIEIRA, H.J. Parâmetros hídricos e de crescimento de duas variedades de feijoeiro (*P. Vulgaris L.*) sob diferentes condições de disponibilidade de água no solo. Piracicaba, 1984. 153p. **Dissertação** (Mestrado em Agrometeorologia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

VILLA NOVA, N. A. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz.

Piracicaba, 1973. 77p. Tese (Livre docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

VILLA NOVA, N. A., OMETTO, J. C. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições climáticas do Estado de São Paulo. In: 4 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSO HÍDRICOS. Fortaleza, Anais..., 1976.

VILLA NOVA, N.A. Estimativa da demanda hídrica das culturas . In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1987. Campinas. Anais ...Campinas: Fundação Cargill. 1987. p. 14-27.