

ESTUDO COMPARATIVO DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL POR DIFERENTES MÉTODOS.

M. da S. Amorim Neto¹ e N.A. Villa Nova²

RESUMO - Na estimativa da evapotranspiração potencial (ou de referência), vários métodos são utilizados na prática. Objetivando determinar a consistência de resultados fornecidos pelos métodos de Penman, do Tanque Classe A, da Radiação Solar (recomendados pela FAO, 1979), de Thornthwaite, bastante utilizado para fins climáticos, e do método de Penman modificado por VILLA NOVA e OMETTO (1981), comparam-se os resultados simultâneos destes métodos, com aqueles estimados pelas evaporações dos Tanques Classe A modificado, associados a coeficientes de tanque. Elegeu-se tal método como padrão de comparação porque suas estimativas são baseadas em medidas, que, teoricamente devem integrar melhor os efeitos conjugados do clima no processo evaporativo. As melhores concordâncias dos resultados de estimativa de evapotranspiração potencial calculados por meio de fórmulas com o do Tanque Classe A modificado foram, pela ordem: método da Radiação Solar, Penman simplificado e Penman Convencional, com níveis de significância semelhantes. O método de Thornthwaite discordou acentuadamente, indicando não ser recomendada sua utilização para períodos de cinco dias.

¹ Meteorologista, M.Sc., Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA) - EMBRAPA, BR 428, Km 152, Caixa Postal 23, CEP 56 300 - Petrolina-PE.

² Engº Agrº, Dr. Prof. Adjunto do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP. Caixa Postal 09, CEP 13 400 - Piracicaba-SP.

Estudo comparativo de

FL-04689



31865-1

ABSTRACT - For estimating the potential evapotranspiration (or reference), various methods are used in practical terms. The aim of the present study was to determine the consistency of the results provided by the following methods: Penman, Class A Pan, Solar Radiation (recommended by FAO, 1979), Thornthwaite and Penman Method modified by VILLA NOVA and OMETTO (1981). The results of these methods were compared to those estimated by the evaporations of the modified Class A Pan, associated to Pan coefficients. This method was chosen as standard because its estimations are based in measures which theoretically must integrated best the conjugated effects of the climax in the evaporation process. The best approximations of the potential evapotranspiration estimations determined by formulas with the modified Class A Pan were in the following order: Solar Radiation method; simplified Penman and conventional Penman with similar levels of significancy. The Thornthwaite method looks like unrealistic, that means its utilization for five days period is not indicated.

INTRODUÇÃO

A sempre crescente demanda de alimentos obriga a nação a produzir para consumo interno, ou mesmo para exportação, uma maior quantidade de produtos agrícolas. Para este fim, áreas de cultivo, consideradas como impróprias pela irregularidade da disponibilidade natural de água, começam a ser utilizadas, graças aos recursos de irrigação, de aplicação cada vez mais crescente. Na condução racional de um projeto de irrigação, faz-se necessário sempre determinar a quantidade e a frequência de aplicação de água. Para isto é de grande importância conhecer-se a demanda de água dos diferentes cultivos, demanda esta que é sempre referida ao valor padrão, denominado de "evapotranspiração potencial". Para determinação da evapotranspiração, diferentes métodos são sugeridos (pelo menos mais do que trinta são conhecidos), sendo poucos aqueles cuja aplicação é possível, seja por requererem conhecimento de parâmetros climáticos locais não disponíveis, ou seja pela complexidade de utilização.

Neste trabalho é realizado um estudo de estimativa da evapotranspiração potencial pelos métodos de Penman, Tanque Classe A, Radiação Solar (recomendados pela FAO, 1979), Thornthwaite e ao método de Penman modificado por VILLA NOVA e OMETTO (1981), comparando-se os resultados simultâneos destes métodos, com aqueles estimados pelas evaporações dos Tanques Classe A modificado, associados a coeficientes de tanque. Elegeu-se tal método como padrão de comparação porque suas estimativas são baseadas em medidas que, teoricamente devem integrar melhor os efeitos conjugados do clima no processo evaporativo.

REVISÃO DE LITERATURA

Inúmeros são os métodos climáticos sugeridos para estimativa da perda de água em superfícies cultivadas. Alguns como os métodos elaborados por PENMAN (1948 e 1956), RIJTEMA (1957), McJHOY (1961), JENSEN-HAISE (1963), LINGEN (1967) necessitam, para sua aplicação, dos parâmetros: temperatura do ar, umidade relativa, vento, insolação ou energia, estruturando-se em uma base física racional; e outros que correlacionam empiricamente alguns parâmetros climáticos de simples medida, tais como: os métodos de THORNTHWAITE (1955), MAKKINK (1957), BLANEY - CRIDLIE (1964), entre outros. A escolha de um ou outro método dependerá quase sempre da disponibilidade de dados. Normalmente observa-se também que estes métodos estimam primariamente a "evapotranspiração potencial", tal como foi definida por THORNTHWAITE (1948), ou evapotranspiração de referência (FAO, 1979), obtendo-se o valor específico de evapotranspiração de uma cultura qualquer, através

de um fator corretivo denominado "coeficiente de cultura", o qual depende das condições ideais de umidade do solo e do estágio de desenvolvimento da cultura.

Investigando a confiabilidade das medidas dos métodos citados, um Comitê Técnico da Divisão de Irrigação e Drenagem da Sociedade Americana de Engenharia Civil (Jensen, 1973, citado por BERLATO e MOLION, 1981), realizando comparações entre evapotranspiração medida e estimada constataram-se bons resultados, desde que se observasse o seguinte tempo mínimo de medida:

MÉTODO	PERÍODO DE TEMPO MÍNIMO
Penman	Um dia
Jensen-Haise	Cinco dias
Makkink	Dez dias
Thornthwaite	Mensal
Blaney-Cridlle	Mensal

Para condições do Estado de São Paulo, CAMARGO (1961) testou o método de Thornthwaite, com dados de evapotranspirômetros, considerando racional sua utilização também em período mensal.

Em recente trabalho publicado pela FAO (1979), resultado de observações condensadas de inúmeros experimentos realizados em várias regiões do mundo, recomenda-se como racionais para estimativas de evapotranspiração de referência os métodos de Penman, da Radiação Solar e aquele que utiliza o tanque Classe A padrão.

ENCARNAÇÃO (1980), estimando o coeficiente de cultura para o feijão ao longo do ciclo, verificou que a estimativa da evapotranspiração potencial, através do tanque Classe A, entre outros modelos estudados, fornecem os valores mais próximos dos sugeridos pela FAO (1979).

Outros trabalhos têm sido desenvolvidos para comparar a evaporação e evapotranspiração estimada por métodos empíricos e a medida pelo tanque Classe A. STANHILL (1961), comparando a evapotranspiração potencial calculada por vários métodos que envolvem parâmetros climáticos, obteve os seguintes coeficientes de correlação para períodos mensais e semanais, respectivamente: Penman, 0,96 e 0,76; Thornthwaite, 0,94 e 0,73; Blaney e Cridlle, 0,90 e 0,70; Makkink, 0,95 e 0,75; Tanque Classe A, 0,95 e 0,77; Radiação Solar, 0,91 e 0,77. Por outro lado, CHAPAS e REES (1963), comparando a evaporação medida em tanque Classe A com a estimada por métodos empíricos, observaram que a estimada Thornthwaite é superior à do tanque e que este método também superestima a evapotranspiração. Já o método de Penman estima a evaporação com valores bem coerentes com os do tanque e a evapotranspiração calculada por ele é aproximadamente igual a de uma superfície livre de água.

VILLA NOVA (1967), relacionando valores médios mensais de evaporação potencial estimada pelo método de Penman e medidos pelo tanque Classe A, encontrou um fator de conversão de 0,76.

Na prática da irrigação em culturas, vários são os pesquisadores que têm utilizado o dado de evaporação do tanque Classe A para programar quantidades de água necessárias às culturas.

FUCHS e STANHILL (1963), pesquisando a utilização de evaporação do tanque Classe A para estimar a irrigação necessária à cultura do algodão, durante dois anos em 15 locais, cobrindo uma larga variação de climas, solos e condições de planta, confirmaram a existência de um alto grau de correlação entre a evapotranspiração de campos irrigados e a evaporação do tanque.

GOLDBERG et alii (1966), estudando as necessidades hídricas do amendoim e a evaporação do tanque Classe A, durante a estação de crescimento da cultura, observaram que o tratamento ótimo de irrigação foi o aplicado semanalmente em uma quantidade igual a 90% da evaporação do tanque.

JONES (1980), em estudos realizados no Havaí, mostrou que para períodos mensais: (1) cana-de-açúcar irrigada por aspersão e sulcos, a evapotranspiração potencial é aproximadamente igual à evaporação do tanque Classe A; e, (2) quando irrigada por gotejo, a evapotranspiração potencial pode ser aproximadamente 15% menor que a evaporação do tanque Classe A.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento em questão foi conduzido nas dependências do campo experimental do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Piracicaba, SP.

O tanque Classe A modificado, utilizado neste trabalho, para medidas de evaporação e posterior estimativa da evapotranspiração potencial, constituiu-se de um tanque Classe A padrão (A), um tanque intermediário (I) e um tanque medidor (M) (FIG. A) desenvolvido por Amorim Neto e Villa Nova (1982).

Para medida dos elementos de clima necessários à condução do experimento, montou-se uma estação meteorológica auxiliar, gramada e cercada segundo os padrões, com os seguintes componentes.

- a) Tanque Classe A modificado.
- b) Tanque Classe A padrão.
- c) Anemômetro totalizador marca FUESS.
- d) Termohigrógrafo marca FUESS.
- e) Termômetros de máxima e mínima marca FUESS.

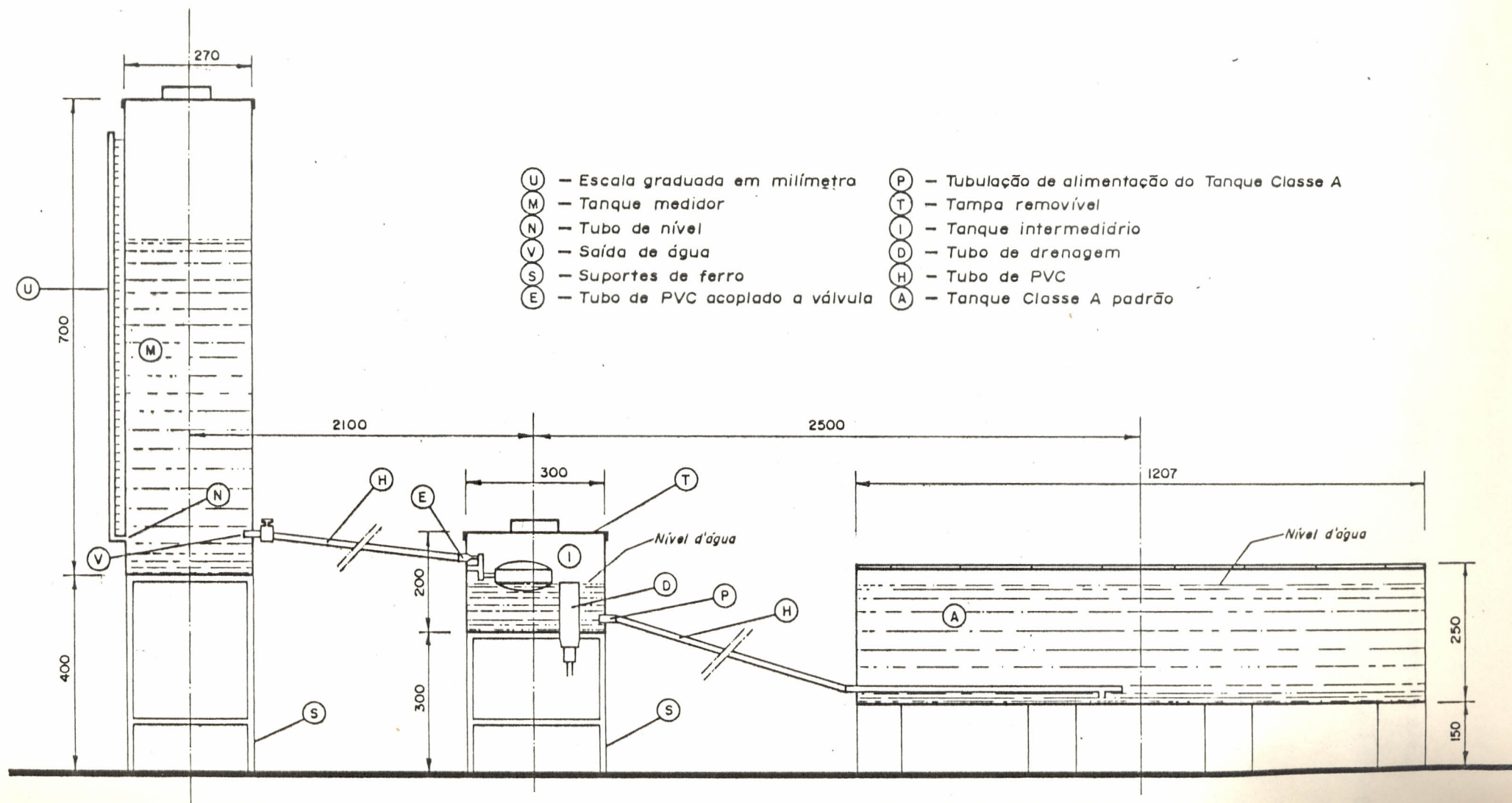


FIG. A — Conjunto evaporimétrico modificado

- f) Evaporímetro de Piche.
- g) Abrigo meteorológico.
- h) Heliógrafo Campbell-Stokes.

Nas estimativas da evapotranspiração potencial (ou de referência) utilizaram-se os seguintes métodos:

1 - Método do Tanque Classe A

De acordo com as normas preconizadas pela FAO (1979) a evapotranspiração potencial ou de referência (ET_o) será expressa em função do Tanque Classe A, por:

$$ET_o = K_p \cdot ECA,$$

onde, ECA = evaporação medida no Tanque Classe A (mm/período);

K_p = "coeficiente de tanque", função da velocidade média do vento, umidade relativa média, e tipo de exposição do tanque (Tabela I do Apêndice).

2 - Método da Radiação Solar

A *estimativa da evapotranspiração de referência pelo método da radiação solar* (ET_{o4}), consiste na resolução das equações:

$$ET_{o4} = c.w. R_s$$

$$R_s = R_A (0,24 + 0,58 \frac{n}{N}),$$

onde, R_s = radiação de onda curta, estimada ao nível do solo (mm/período);

R_A = radiação extra terrestre, função do mês e latitude (Tabela II do Apêndice);

w = fator de ajuste dependente da temperatura média do ar e altitude (Tabela III do Apêndice);

c = fator de ajuste dependente da velocidade e umidade relativa média do vento no período, obtido graficamente (Figura 3 do Apêndice).

Para um melhor ajuste às condições locais, utilizou-se, no método, ao invés da equação original, aquela proposta por OMETTO (1968), determinada para as condições de Piracicaba, SP, ou seja.

$$R_s = R_A (0,26 + 0,51 \frac{n}{N})$$

3 - Método de Penman

Para estimativa da evapotranspiração potencial pelo método de Penman

(ET_{05}), utilizou-se a formulação original proposta pelo autor (PENMAN, 1948):

$$ET_{05} = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} H + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$$

sendo,

$$H = R_A \left(0,24 + 0,58 \frac{n}{N}\right) (1-a) - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{e})(0,1 + 0,9 \frac{n}{N})$$

$$E_a = 0,35 \left(1 + \frac{U}{160}\right) (e_s - e)$$

$\frac{\Delta}{\gamma}$ = fator adimensional dependente da temperatura média do ar no período
(vide Tabela V);

onde os termos significam:

H = balanço de energia radiante (mm/período);

E_a = poder evaporante do ar à sombra (mm/período);

U = velocidade do vento (km/dia);

n/N = razão de insolação média do período;

a = poder refletor ($r = 0,25$);

T_a = temperatura média do ar no período considerado ($^{\circ}K$);

σ = constante de Stefan Boltzman ($0,807 \times 10^{-10}$ cal. cm^{-2} min. $^{-1} o_k^{-4}$);

e = valor médio de pressão de vapor (mm Hg/período);

e_s = tensão de saturação à temperatura T_a (mm Hg).

4 - Método de Penman Simplificado

O método de Penman modificado refere-se a uma simplificação do método original, proposta por VILLA NOVA e OMETTO (1981), que consiste do seguinte conjunto de equações, válidas para as condições de clima semelhante às de Piracicaba, SP:

$$ET_{06} = \frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \left[R_A \left(0,19 + 0,23 \frac{n}{N}\right) \right] + 0,28 E_p, \text{ (mm/período)}$$

válida para o período primavera-verão, e

$$ET_{06} = \frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \left[R_A \left(0,17 + 0,11 \frac{n}{N}\right) \right] + 0,28 E_p, \text{ (mm/período)}$$

válida para o período outono-inverno, sendo E_p a evaporação de Piche ao abrigo (mm/período), e Δ/γ , R_A e n/N , com significado já descrito anteriormente.

Para o presente trabalho foi utilizada uma solução gráfica das equações propostas, demonstrada no Apêndice (Vide Figura 1 e 2).

5 - Método de Thornthwaite

Estimou-se a evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite, utilizando-se das Tabelas interpoladas por CAMARGO (1961) (Vide Tabelas IV.A e IV.B do Apêndice). A evapotranspiração para cada pentada foi calculada em função das relações:

$$ET_{O_7} = 5 ET_O^* \times f ,$$

sendo, ET_{O_7} = evapotranspiração potencial corrigida (mm/5 dias);

ET_O^* = evapotranspiração potencial não corrigida (mm/dia) em função da temperatura média diária e da temperatura média mensal;

f = fator de correção diário para latitude de $22^{\circ}43'S$ (Piracicaba, SP) e para cada mês do ano.

6 - Análise do Desempenho dos Métodos de Estimativa de Evapotranspiração Potencial

Tomando como valor mais próximo do verdadeiro o valor médio de ET_{O_1} e ET_{O_2} ($\overline{ET}_{O_{12}}$), valor "medido" de evapotranspiração potencial, efetuou-se um estudo de regressão linear, tanto para valores diários, como para valores de pentadas, entre as seguintes estimativas:

a) $\overline{ET}_{O_{12}} \times \overline{ET}_{O_3}$

b) $\overline{ET}_{O_{12}} \times \overline{ET}_{O_4}$

c) $\overline{ET}_{O_{12}} \times \overline{ET}_{O_5}$

d) $\overline{ET}_{O_{12}} \times \overline{ET}_{O_6}$

e) $\overline{ET}_{O_{12}} \times \overline{ET}_{O_7}$

RESULTADOS

No quadro I do apêndice são relatados os valores obtidos de evapotranspiração potencial estimada pelos diferentes métodos considerados.

Com a finalidade de testar os diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial, procedeu-se um estudo de regressão linear simples e aplicação do teste F, tomando-se como método padrão a evapotranspiração potencial obtida pelos tanques modificados (média ET_{O_1} e ET_{O_2}) em dois casos a saber:

a) Regressões de $\overline{ET}_{012}$ x diferentes métodos (ET_{03} , ET_{04} , ET_{05} , ET_{06}), para períodos diários. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Quadro E - Regressões de $\overline{ET}_{012}$ x diferentes métodos:

MÉTODO	Regressão	R^2	R	Teste F
TCA padrão	$\overline{ET}_{012} = -0,326 + 1,091 ET_{03}$	0,757	0,870	287,474**
Radiação solar	$\overline{ET}_{012} = -0,187 + 0,808 ET_{04}$	0,645	0,803	203,483**
Penman convencional	$\overline{ET}_{012} = 0,247 + 1,003 ET_{05}$	0,468	0,684	85,581**
Penman modificado	$\overline{ET}_{012} = -0,506 + 1,088 ET_{06}$	0,616	0,785	147,873**

b) Regressões de $\overline{ET}_{012}$ x diferentes métodos (ET_{03} , ET_{04} , ET_{05} , ET_{06}), para períodos de 5 dias. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Quadro F - Regressões de $\overline{ET}_{012}$ x diferentes métodos.

MÉTODO	Regressão	R^2	R	Teste F
TCA padrão	$\overline{ET}_{012} = -0,134 + 0,994 ET_{03}$	0,797	0,893	70,836**
Radiação solar	$\overline{ET}_{012} = -0,342 + 0,875 ET_{04}$	0,872	0,934	123,773**
Penman convencional	$\overline{ET}_{012} = 0,267 + 1,001 ET_{05}$	0,689	0,830	39,988**
Penman modificado	$\overline{ET}_{012} = -0,398 + 1,069 ET_{06}$	0,769	0,877	59,692**
Thornthwaite	$\overline{ET}_{012} = 1,435 + 0,596 ET_{07}$	0,263	0,513	6,426*

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Relativos às Comparações de Estimativa de Evapotranspiração Potencial Obtida pelos Diferentes Métodos

Para estimativa de evapotranspiração potencial (ou de referência), vários métodos são utilizados na prática. Objetivando determinar a consistência de resultados fornecidos pelos métodos de Penman, do Tanque Classe A padrão, da Radiação Solar (recomendados pela FAO, 1979), de Thornthwaite, bastante utilizado para fins climáticos, e do método de Penman modificado por VILLA NOVA e OMETTO (1981), compararam-se os resultados simultâneos destes métodos, com aqueles estimados pelas evaporações dos conjuntos evaporimétricos, associados a coeficientes de tan-

que. Elegu-se tal método como padrão de comparação porque suas estimativas são baseadas em medidas, que, teoricamente devem integrar melhor os efeitos conjugados do clima no processo evaporativo.

No Quadro E, onde se analisam as regressões $\overline{ET}_{012}$ x diferentes métodos para períodos diários, nota-se, como era de se esperar, uma boa correlação $\overline{ET}_{012}$ x Tanque Classe A padrão ($r = 0,87$) seguida pelo método da radiação solar ($r = 0,803$), Penman modificado ($r = 0,785$) e Penman convencional ($r = 0,684$).

Os resultados obtidos, de acordo com o teste F são significativos ao nível de 1%. Na Figura A está demonstrada a dispersão em torno das retas de regressão, observamos que os maiores desvios acontecem para valores muito baixos de evapotranspiração potencial, podendo isto ser explicado pelo grau de sensibilidade das fórmulas em estimar esta evapotranspiração em dias em que seu valor é mínimo.

No Quadro F, onde se analisam as regressões $\overline{ET}_{012}$ x diferentes métodos para períodos de pentadas, observa-se que o valor de $\overline{ET}_{012}$ x Radiação Solar ($r = 0,934$) foi o que apresentou maior grau de correlação, resultado este que vai de encontro ao esperado de que a melhor correlação seria com o tanque Classe A onde obteve-se um $r = 0,893$, devendo atribuir-se isso ao erro experimental ocorrido talvez pelo pequeno número de dados analisado. Os demais resultados obtidos para os métodos restantes apresentaram pela ordem o seguinte grau de correlação: Penman modificado ($r = 0,877$), Penman convencional ($r = 0,830$) e Thornthwaite ($r = 0,513$). De acordo com o teste F, todos os métodos apresentaram-se como significativos ao nível de 1%, exceto o de Thornthwaite (5%). Por estes resultados e pela dispersão dos pontos em torno das retas de regressão (vide Figura B), acreditamos como viável para estimativas de evapotranspiração potencial qualquer um destes métodos, à exceção do método de Thornthwaite, que como demonstra a prática, é utilizado apenas para fins de obtenção de índices climáticos, em estimativas mensais.

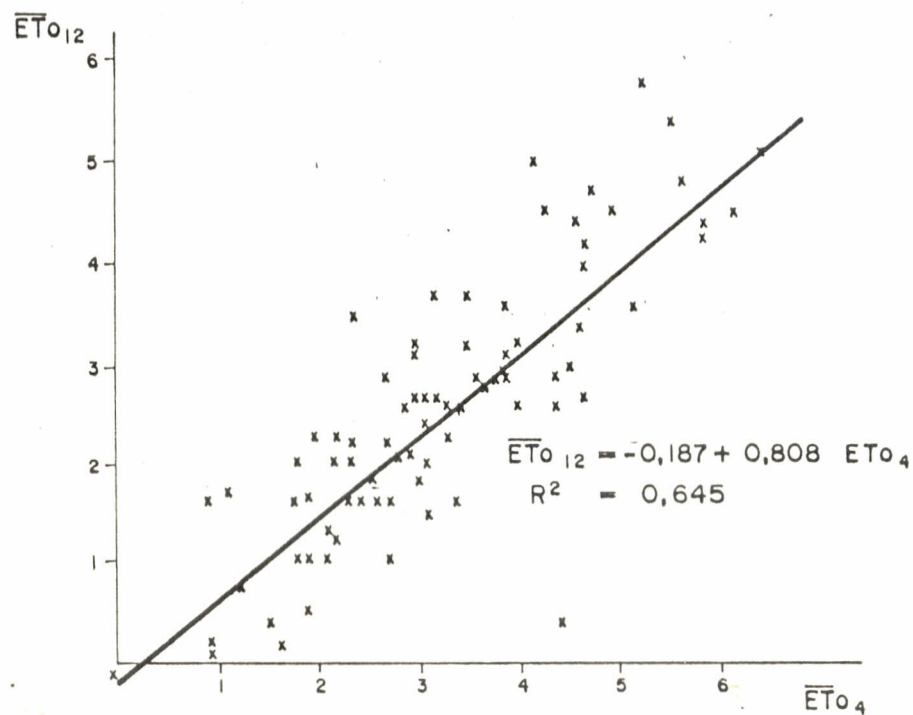
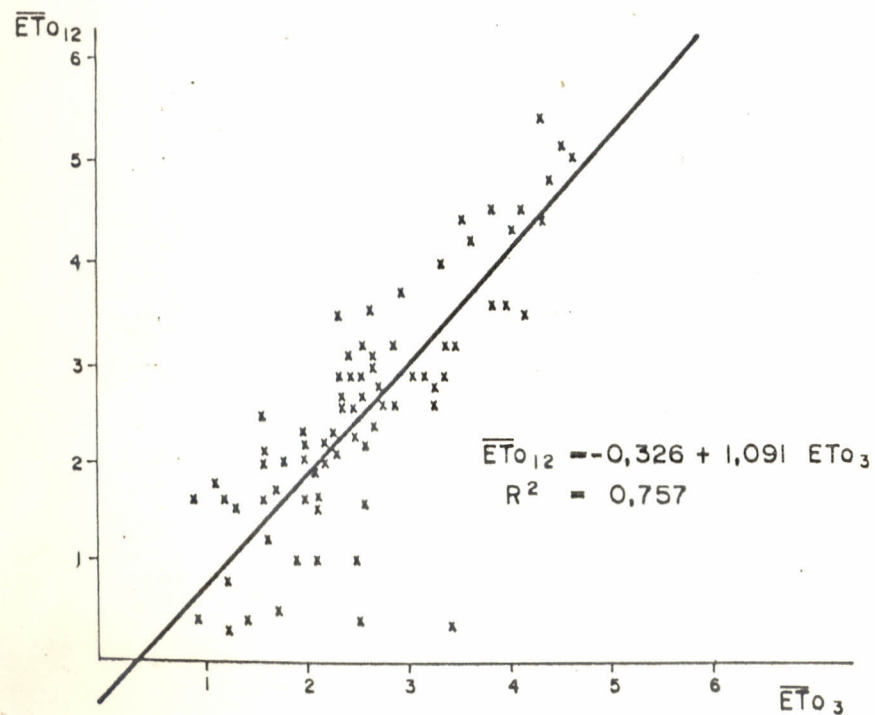
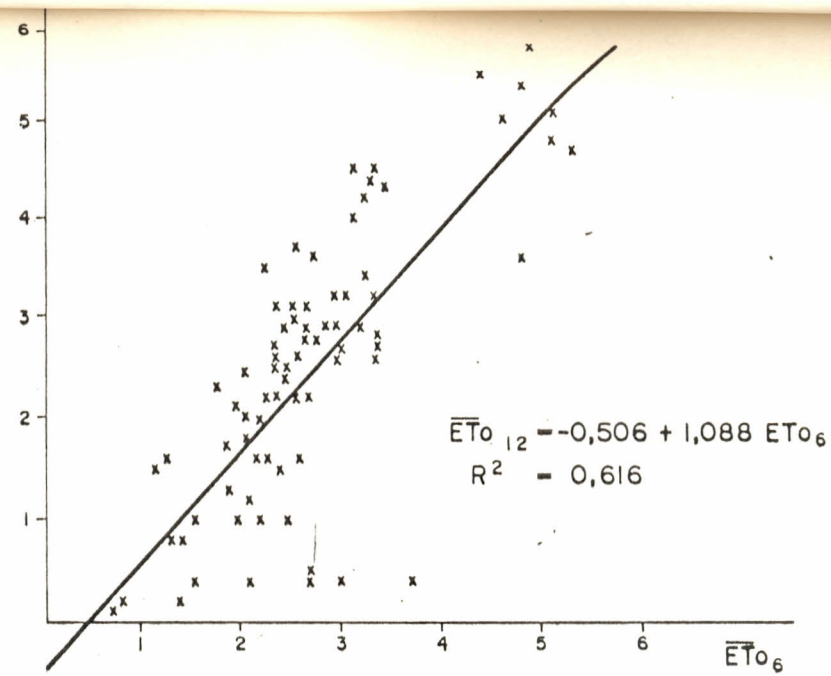
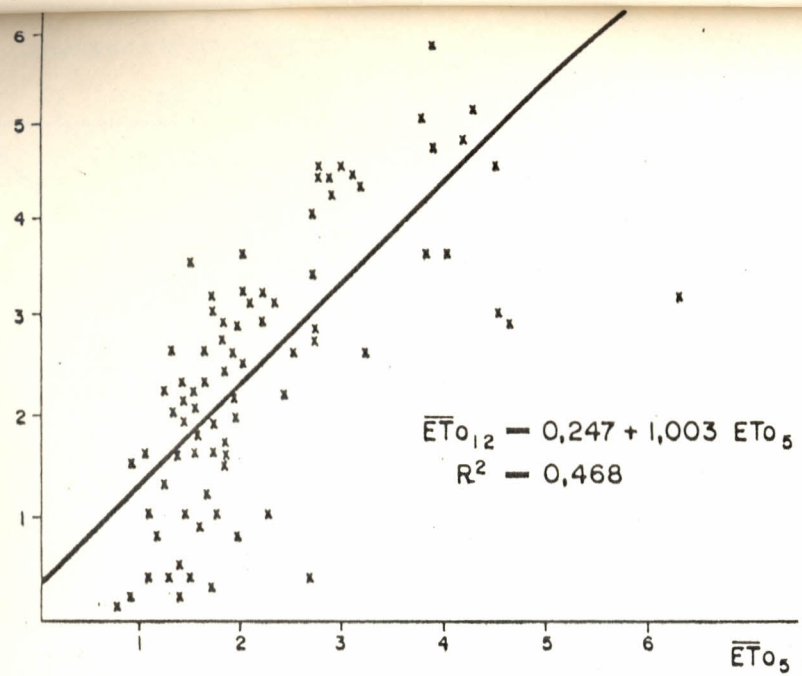
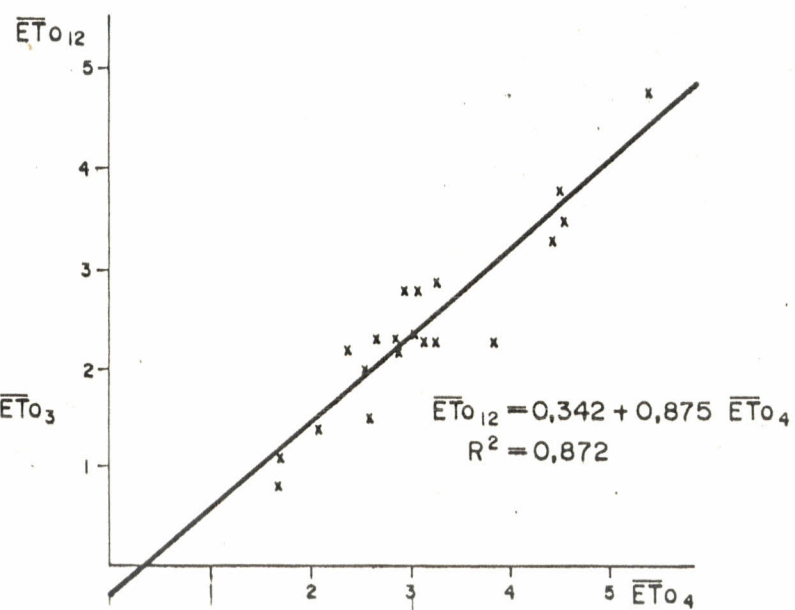
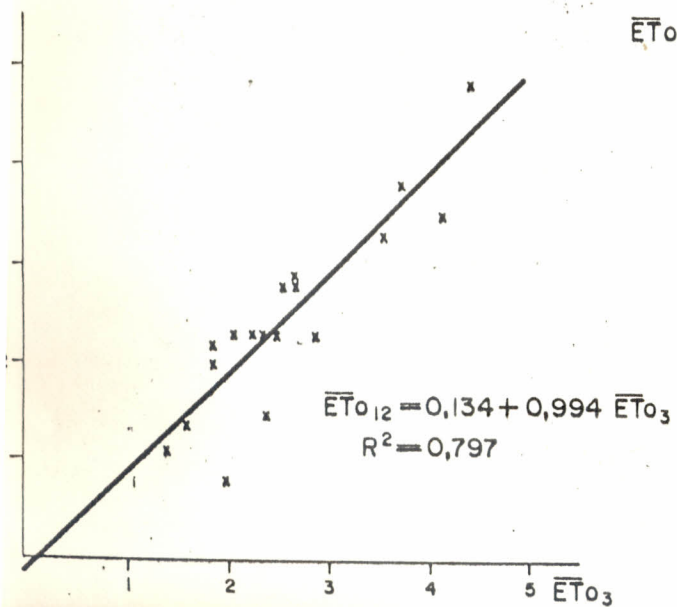
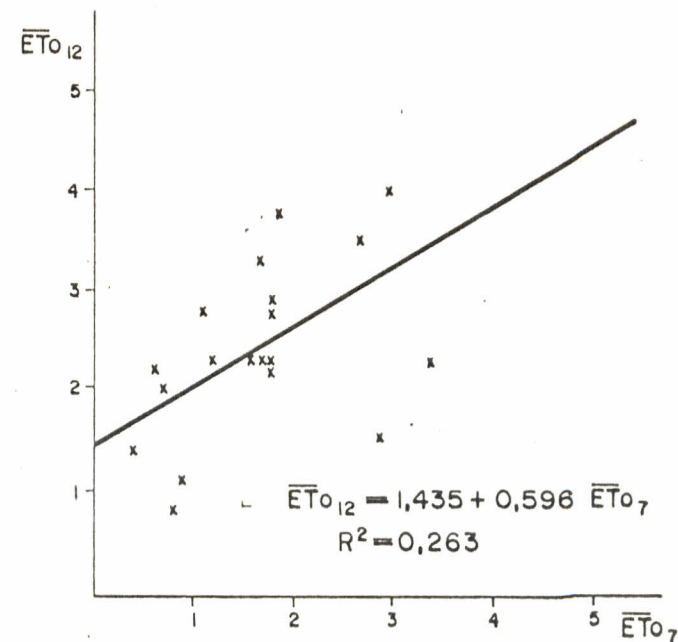
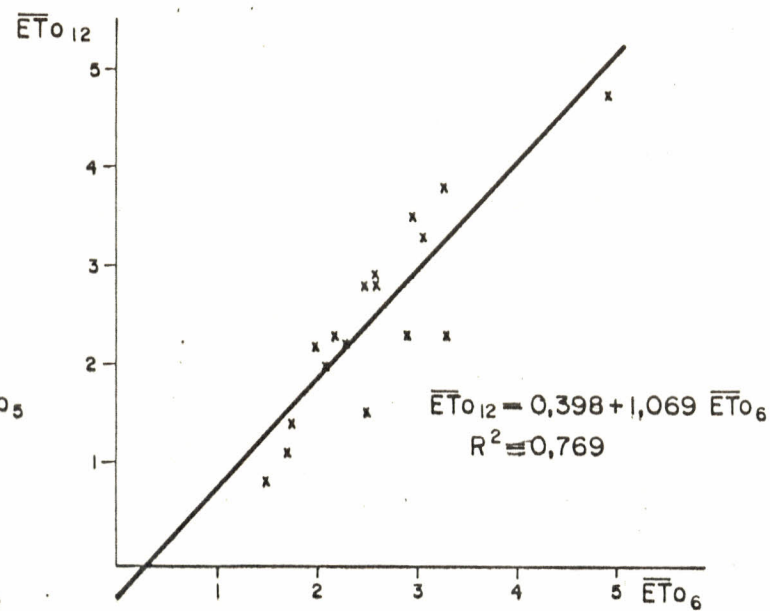
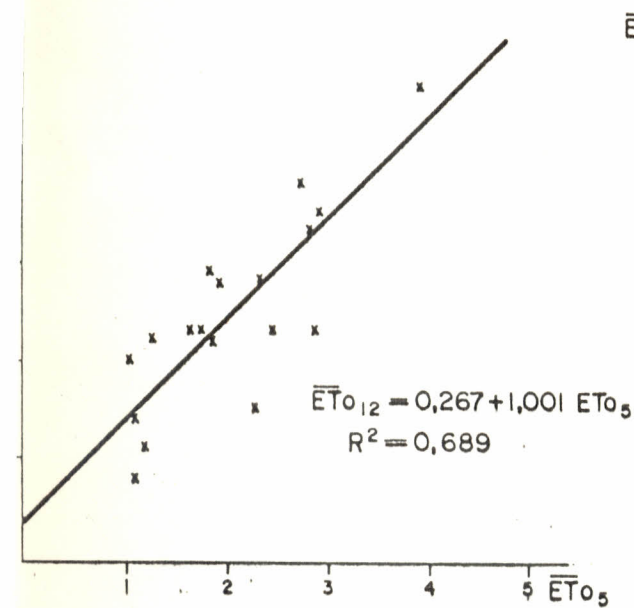


Fig. A - Representação gráfica das regressões, evapotranspiração estimada pelo conjunto evaporimétrico ($\overline{ET}_{012}$) x evaporação estimada pelos diferentes métodos propostos (valores diários).



B - Representação gráfica das regressões, evapotranspiração estimada pelo conjunto evaporimétrico ($\overline{ET}_{0_{12}}$) x evaporação estimada pe-

CONCLUSÕES

O confronto entre métodos de estimativa de evapotranspiração, tendo como padrão o método do Tanque Classe A, operado pelo conjunto evaporimétrico, nos demonstrou que:

- Os diferentes métodos utilizados no trabalho, para estimar evapotranspiração potencial, quando confrontados com o padrão proposto, apresentam menor desvio e melhor correlação para valores de pentadas, do que para valores diários.

- As melhores concordâncias dos resultados de estimativa de evapotranspiração potencial calculados por meio de fórmulas com o do Tanque Classe A modificado foram, pela ordem: método da radiação solar, Penman simplificado e Penman convencional, com níveis de significância semelhantes. O método de Thornthwaite discordou acentuadamente, indicando não ser recomendada sua utilização, para períodos de 5 dias.

REFERÊNCIAS

- AMORIM NETO, M. de S. & VILLA NOVA, N.A. Análise preliminar do desempenho de um sistema de medidas de evaporação para o tanque "Classe A". s.n.t. 31 p. Trabalho apresentado no Iº Simpósio Brasileiro do Trópico Semi-Árido, Olinda, PE., 1982.
- BERLATO, M.A. & MOLION, L.C.B. Evaporação e Evapotranspiração. Boletim Técnico. IPAGRO, nº 7. p. 95, 1981.
- CAMARGO, A.P. de. Contribuição para determinação de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Piracicaba, ESALQ/USP. 49 p. (Tese de Doutorado), 1961.
- CHAPAS, L.C. & REES, A.R. Evaporation and evapotranspiration in Southern Nigeria. Quant. J.R. Met. Soc. p. 313-319, 1963.
- ENCARNAÇÃO, C.R.F. da. Estudo da Demanda de Água do Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) Var. Goiano Precoce. Piracicaba, ESALQ/USP. 62 p. (Dissertação de Mestrado), 1980.
- FAO. Yield Response to Water. J. DOORENBOS e A.H. KASSANS. Irrigation and Drainage, Paper 33. Rome, 1979. p. 193.
- FUCHS, M. & STANHILL, G. The use of Class A pan evaporation data to estimate the irrigation water requirements of the, cotton crop. J. Agric. Res. Israel, 13 (2):63-78, 1963.
- GOLDBERG, S.D.; GORNAT, B. & SADAN, D. Relation between water consumption of plants and Class A pan evaporation during the growing season. Soil Sci. 104(4): 289-296, 1966.
- JENSEN, M.C. & HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. J. Irrig. Drain. Dice. A, Soc. Dice. Engrs. 89(IR4):15-41, 1963.
- JONES, C.A. A review of evapotranspiration studies in irrigated sugar cane in Hawai. Publication of the Experiment Station. Hawai an Sugar Planters Association. 59(9):195-214, 1980.

- OMETTO, J.C. Estudo das relações entre: Radiação Solar Global, Radiação Líquida e Insolação. Piracicaba, ESALQ/USP. 64 p. (Tese de Doutorado), 1968.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. of London, Ser. A, 193:120-145, 1948.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. Neth. J. Agric. Sci. 4(1):9-29, 1956.
- STANHILL, G. A comparison of methods of calculating potential evapotranspiration from climatic data. J. Agric. Res. Israel 11(3/4):159-171, 1961.
- THORNTWHAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review. Nova York, 38:55-94, 1948.
- THORNTWHAITE, C.W. & MATHER, J.R. The water balance. Publ. in Climatology. 8(1) Lab. of Climatology. Certento, N.J., 1955.
- VILLA NOVA, N.A. A estimativa da evaporação potencial no Estado de São Paulo. Piracicaba, ESALQ/USP. 66 p. (Tese de Doutorado), 1967.
- VILLA NOVA, N.A. & OMETTO, J.C. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições climáticas do Estado de São Paulo. Trabalho apresentado no IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA e RECURSOS HÍDRICOS, Fortaleza, 1981.

Tabela I - Coeficiente de tanque (Kp): para Tanque Classe A para diferentes coberturas vegetais e Níveis de Umidade Relativa Média e Vento em 24 horas (FAO, 1979).

APÊNDICE

VENTO km/dia	TANQUE COLOCADO EM ÁREA CULTIVADA COM VEGETAÇÃO BAIXA				TANQUE COLOCADO EM ÁREA NÃO CULTIVADA			
	Tamanho da bordadura (grama) m	Umid.Rel.Média %			Tamanho da bordadura (solo nu) m	Umid.Rel.Média %		
		baixa <40	média 40-70	alta >70		baixa <40	média 40-70	alta >70
Leve <175	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1.000	0,75	0,85	0,85	1.000	0,50	0,60	0,70
Moderado 175 - 425	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
	1.000	0,70	0,80	0,80	1.000	0,45	0,55	0,60
Forte 425-700	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,70	100	0,45	0,50	0,60
	1.000	0,65	0,70	0,75	1.000	0,40	0,45	0,55
Muito Forte >700	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
	1.000	0,55	0,60	0,65	1.000	0,35	0,40	0,45

Tabela II - Valores de R_A (radiação extra terrena) em mm de evaporação equivalente por dia (FAO, 1979).

LATITUDE S	Jan.	Fev.	Mar.	Abbr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
40°	17,9	15,7	12,5	9,2	6,6	5,3	5,9	7,9	11,0	14,2	16,9	18,3
38	17,9	15,8	12,8	9,6	7,1	5,8	6,3	8,3	11,4	14,4	17,0	18,3
36	17,9	16,0	13,2	10,1	7,5	6,3	6,8	8,8	11,7	14,6	17,0	18,2
34	17,8	16,1	13,5	10,5	8,0	6,8	7,2	9,2	12,0	14,9	17,1	18,2
32	17,8	16,2	13,8	10,9	8,5	7,3	7,7	9,6	12,4	15,1	17,2	18,1
30	17,8	16,4	14,0	11,3	8,9	7,8	8,1	10,1	12,7	15,3	17,3	18,1
28	17,7	16,4	14,3	11,6	9,3	8,2	8,6	10,4	13,0	15,4	17,2	17,9
26	17,6	16,4	14,4	12,0	9,7	8,7	9,1	10,9	13,2	15,5	17,2	17,8
24	17,5	16,5	14,6	12,3	10,2	9,1	9,5	11,2	13,4	15,6	17,1	17,7
22	17,4	16,5	14,8	12,6	10,6	9,6	10,0	11,6	13,7	15,7	17,0	17,5
20	17,3	16,5	15,0	13,0	11,0	10,0	10,4	12,0	13,9	15,8	17,0	17,4
18	17,1	16,5	15,1	13,2	11,4	10,4	10,8	12,3	14,1	15,8	16,8	17,1
16	16,9	16,4	15,2	13,5	11,7	10,8	11,2	12,6	14,3	15,8	16,7	16,8
14	16,7	16,4	15,3	13,7	12,1	11,2	11,6	12,9	14,5	15,8	16,5	16,6
12	16,6	16,3	15,4	14,0	12,5	11,6	12,0	13,2	14,7	15,8	16,4	16,5
10	16,4	16,3	15,5	14,2	12,8	12,0	12,4	13,5	14,8	15,9	16,2	16,2
8	16,1	16,1	15,5	14,4	13,1	12,4	12,7	13,7	14,9	15,8	16,0	16,0
6	15,8	16,0	15,6	14,7	13,4	12,8	13,1	14,0	15,0	15,7	15,8	15,7
4	15,5	15,8	15,6	14,9	13,8	13,2	13,4	14,3	15,1	15,6	15,5	15,4
2	15,3	15,7	15,7	15,1	14,1	13,5	13,7	14,5	15,2	15,5	15,3	15,1
0	15,0	15,5	15,7	15,3	14,4	13,9	14,1	14,8	15,3	15,4	15,1	14,8

Tabela III - Valores do fator de ponderação (W) para o efeito da radiação solar ET_o a diferentes temperaturas e altitudes (FAO, 1979).

TEMPERATURA °C	W a altitude (m)				
	0	500	1.000	2.000	3.000
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

Tabela IV-A - Valores de evapotranspiração potencial diária estimados em função da temperatura média diária e temperatura média anual.

TEMPERATURA MÉDIA, DIÁRIA ($^{\circ}\text{C}$)	TEMPERATURA MÉDIA NORMAL ANUAL DA REGIÃO $^{\circ}\text{C}$		
	20,5	21,0	21,5
10,0	0,5	0,5	0,4
10,5	0,6	0,5	0,5
11,0	0,6	0,6	0,6
11,5	0,7	0,7	0,6
12,0	0,7	0,7	0,7
12,5	0,8	0,7	0,7
13,0	0,9	0,9	0,9
13,5	1,0	1,0	0,9
14,0	1,1	1,0	1,0
14,5	1,2	1,1	1,0
15,0	1,3	1,2	1,1
15,5	1,4	1,3	1,3
16,0	1,5	1,4	1,4
16,5	1,6	1,5	1,5
17,0	1,7	1,7	1,6
17,5	1,8	1,7	1,7
18,0	2,0	1,9	1,8
18,5	2,1	2,0	1,9
19,0	2,2	2,1	2,0
19,5	2,3	2,2	2,2
20,0	2,4	2,3	2,3
20,5	2,6	2,5	2,5
21,0	2,7	2,7	2,7
21,5	2,9	2,9	2,8
22,0	3,0	3,0	3,0
22,5	3,5	3,4	3,4
23,0	3,6	3,6	3,6
23,5	3,8	3,7	3,7
24,0	3,9	3,8	3,8

Tabela IV-B - Valores do fator de correção diário $\underline{f}$, para latitude de $22^{\circ}43'$, ao longo do ano.

MESES	FATOR DE AJUSTE (f)
Janeiro	1,116
Fevereiro	1,075
Março	1,016
Abril	0,96
Maio	0,913
Junho	0,890
Julho	0,900
Agosto	0,948
Setembro	1,00
Outubro	1,055
Novembro	1,110
Dezembro	1,132

Tabela V - Valores de Δ/γ entre 1 e 40°C (VILA NOVA, 1967).

t	Δ/γ	t	Δ/γ
1	0,6	21	2,2
2	0,8	22	2,4
3	0,8	23	2,6
4	0,8	24	2,6
5	1,0	25	2,8
6	1,0	26	3,0
7	1,2	27	3,2
8	1,2	28	3,2
9	1,2	29	3,6
10	1,2	30	3,8
11	1,4	31	4,0
12	1,4	32	4,2
13	1,6	33	4,2
14	1,6	34	4,4
15	1,6	35	4,6
16	1,8	36	5,2
17	1,8	37	5,2
18	2,0	38	5,4
19	2,0	39	5,6
20	2,0	40	5,8

Quadro I - Valores de evapotranspiração potencial estimada pelos diferentes métodos considerados: evapotranspiração potencial estimada pelos tanques modificados ($\overline{ET}_{012}$); evapotranspiração potencial estimada pelo método do tanque A padrão (ET_{03}); evapotranspiração estimada pelo método de radiação solar (ET_{04}); evapotranspiração estimada pelo método de Penman convencional (ET_{05}); evapotranspiração estimada pelo método de Penman modificado (ET_{06}) e evapotranspiração estimada pelo método de Thornthwaite (ET_{07}).

Março

DIAS	$\overline{ET}_{012}$	ET_{03}	ET_{04}	ET_{05}	ET_{06}	ET_{07}
21	3,6	4,0	5,2	4,1	4,9	
21	5,4	4,4	5,6	3,7	4,9	
22	5,8	5,5	5,3	4,0	5,0	
23	4,8	4,5	5,7	4,3	5,2	
24	4,5	4,2	6,2	4,6	5,5	
M	4,8	4,5	5,5	5,1	5,1	3,0
25	5,0	4,7	4,2	3,9	4,7	
26	5,1	4,6	6,4	4,4	5,2	
27	0,4	0,9	1,8	1,8	2,7	
28	0,5	1,7	1,9	1,9	2,7	
29	0,4	2,5	3,8	3,1	3,7	
M	2,3	2,9	3,2	3,0	3,4	3,4
30	3,6	3,9	4,7	3,9	4,9	
31	4,7	4,6	4,8	4,0	5,4	
01/04	4,5	4,5	5,0	3,1	3,4	
02/04	4,5	3,9	4,3	2,9	3,2	
03/04	0,4	-	4,4	3,0	3,0	
M	3,5	4,2	4,6	3,1	3,1	2,7

Quadro I - (Continuação).

Abril

DIAS	$\overline{ET}_{O_{12}}$	ET_{O_3}	ET_{O_4}	ET_{O_5}	ET_{O_6}	ET_{O_7}
4	0,4	3,4	3,5	2,7	2,7	
5	3,2	3,5	4,0	2,9	3,4	
6	4,3	4,1	5,9	3,3	3,5	
7	4,4	3,6	5,9	3,2	3,4	
8	4,2	3,7	4,7	3,0	3,3	
M	3,3	3,6	4,5	3,0	3,2	1,7
9	4,4	4,5	4,6	2,9	3,4	
10	4,4	4,4	4,6	3,0	3,4	
11	3,4	3,4	4,6	2,8	3,3	
12	4,0	3,4	4,7	2,8	3,2	
13	2,8	3,3	4,4	2,8	3,4	
M	3,8	3,8	4,6	2,9	3,4	1,9
19	2,6	2,8	4,4	2,6	3,0	
20	-	-	4,5	2,5	3,0	
21	2,7	2,6	4,7	2,8	3,4	
22	2,9	3,2	4,0	2,7	3,2	
23	0,8	1,2	1,9	2,0	2,1	
M	2,3	2,4	3,9	2,6	3,0	1,6
24	1,0	2,1	1,8	1,8	2,2	
25	2,7	2,8	3,2	2,8	2,9	
26	2,6	3,3	4,0	3,3	3,4	
27	1,0	2,5	2,7	2,3	2,5	
28	0,3	1,2	1,8	1,7	2,0	
M	1,5	2,4	2,6	2,4	2,6	2,9
29	1,7	1,9	1,8	1,9	2,1	
30	2,9	3,1	4,4	4,7	2,9	
01/05	2,5	1,6	3,8	1,8	2,4	
02/05	2,2	2,3	3,2	2,0	2,4	
03/05	2,2	-	3,3	2,5	2,7	
M	2,3	2,1	3,3	1,9	2,4	1,6

Quadro I - (Continuação)

Maio						
DIAS	$\overline{ET}_{O_{12}}$	ET_{O_3}	ET_{O_4}	ET_{O_5}	ET_{O_6}	ET_{O_7}
4	2,3	2,3	2,0	1,5	1,8	
5	1,9	2,1	3,0	1,8	2,2	
6	2,5	2,6	3,8	2,1	2,5	
7	2,6	2,5	3,3	2,0	2,6	
8	2,4	2,7	3,1	1,9	2,5	
M	2,3	2,5	2,9	1,9	2,3	1,7
9	2,6	2,9	3,1	1,4	2,6	
10	3,6	2,7	3,9	2,1	2,8	
11	3,1	2,7	3,9	2,1	2,7	
12	2,3	2,5	3,3	1,9	2,6	
13	2,8	2,6	3,9	2,0	2,7	
M	2,9	2,7	3,3	2,0	2,7	1,8
14	2,9	3,4	2,7	2,3	3,2	
15	2,6	2,5	2,9	1,9	2,4	
16	2,0	1,6	1,8	1,6	2,1	
17	3,1	2,7	2,7	2,2	2,6	
18	3,2	2,9	3,0	2,3	3,0	
M	2,8	2,6	3,0	2,1	2,6	1,8
19	2,1	2,3	2,8	2,0	2,4	
20	1,6	2,1	2,4	1,9	2,3	
21	1,6	2,0	2,7	1,8	2,3	
22	3,7	3,0	3,5	2,0	2,6	
23	2,7	2,4	3,0	1,9	2,4	
M	2,3	2,5	2,7	1,9	2,4	1,8
24	3,1	2,5	3,0	1,7	2,4	
25	1,6	2,6	3,4	1,8	2,6	
26	3,0	2,7	4,6	1,8	2,6	
27	1,5	2,1	3,1	1,9	2,4	
28	2,3	2,0	2,2	1,7	2,1	
M	2,3	2,3	3,1	1,8	2,4	1,2
29	2,9	2,4	3,8	1,9	2,5	
30	2,8	2,8	3,7	3,0	2,8	
31	2,9	2,5	3,9	1,9	2,7	
01/06	2,2	2,6	2,4	1,6	2,3	
02/06	3,2	3,4	3,7	2,1	3,1	
M	2,8	2,7	3,1	2,5	2,7	1,1

Quadro I - (Continuação).

Junho

DIAS	$\overline{ET}_{O_{12}}$	ET_{O_3}	ET_{O_4}	ET_{O_5}	ET_{O_6}	ET_{O_7}
3	1,6	1,2	0,9	1,1	1,3	
4	1,8	1,1	3,0	1,6	2,1	
5	1,9	2,0	2,5	1,5	2,2	
6	0,2	-	0,9	0,9	0,8	
7	0,2	1,2	1,6	1,4	1,9	
M	1,1	1,4	1,7	1,3	1,8	0,9
8	1,5	1,3	0,9	1,0	1,2	
9	1,6	1,8	2,4	1,3	2,0	
10	2,2	2,0	2,7	1,3	2,2	
11	2,2	2,2	3,0	1,6	2,6	
12	3,5	2,4	2,4	1,6	2,3	
M	2,2	1,9	2,4	1,4	2,1	0,6
13	0,8	1,2	1,1	1,2	1,4	
14	1,6	2,1	2,6	1,3	2,2	
15	1,0	1,9	2,1	1,5	2,0	
16	0,1	0,1	0,9	0,8	0,7	
17	0,7	1,9	1,5	1,1	1,8	
M	1,8	2,0	1,7	1,2	1,6	0,8
18	1,0	2,1	1,9	1,1	1,8	
19	0,8	1,2	1,2	1,6	1,3	
20	1,3	1,5	2,1	1,3	1,9	
21	2,1	1,6	2,9	1,5	2,0	
22	1,6	1,8	2,3	1,4	2,0	
M	1,4	1,6	2,1	1,2	1,8	0,4
23	2,0	1,8	2,3	1,4	2,0	
24	1,6	1,6	1,8	1,6	2,0	
25	1,7	1,7	1,1	1,4	1,9	
26	2,0	2,2	3,1	1,6	2,4	
27	2,6	2,4	3,4	1,7	2,6	
M	2,0	1,9	2,6	1,2	2,2	1,2
28	1,2	1,6	2,2	1,7	2,1	
29	3,2	2,6	3,5	1,8	2,7	
30	2,9	2,6	3,6	2,0	3,0	
01/07	2,0	2,0	2,2	2,0	2,5	
02/07	1,6	0,9	1,9	1,6	2,2	
M	2,2	1,9	2,9	2,0	2,4	1,8

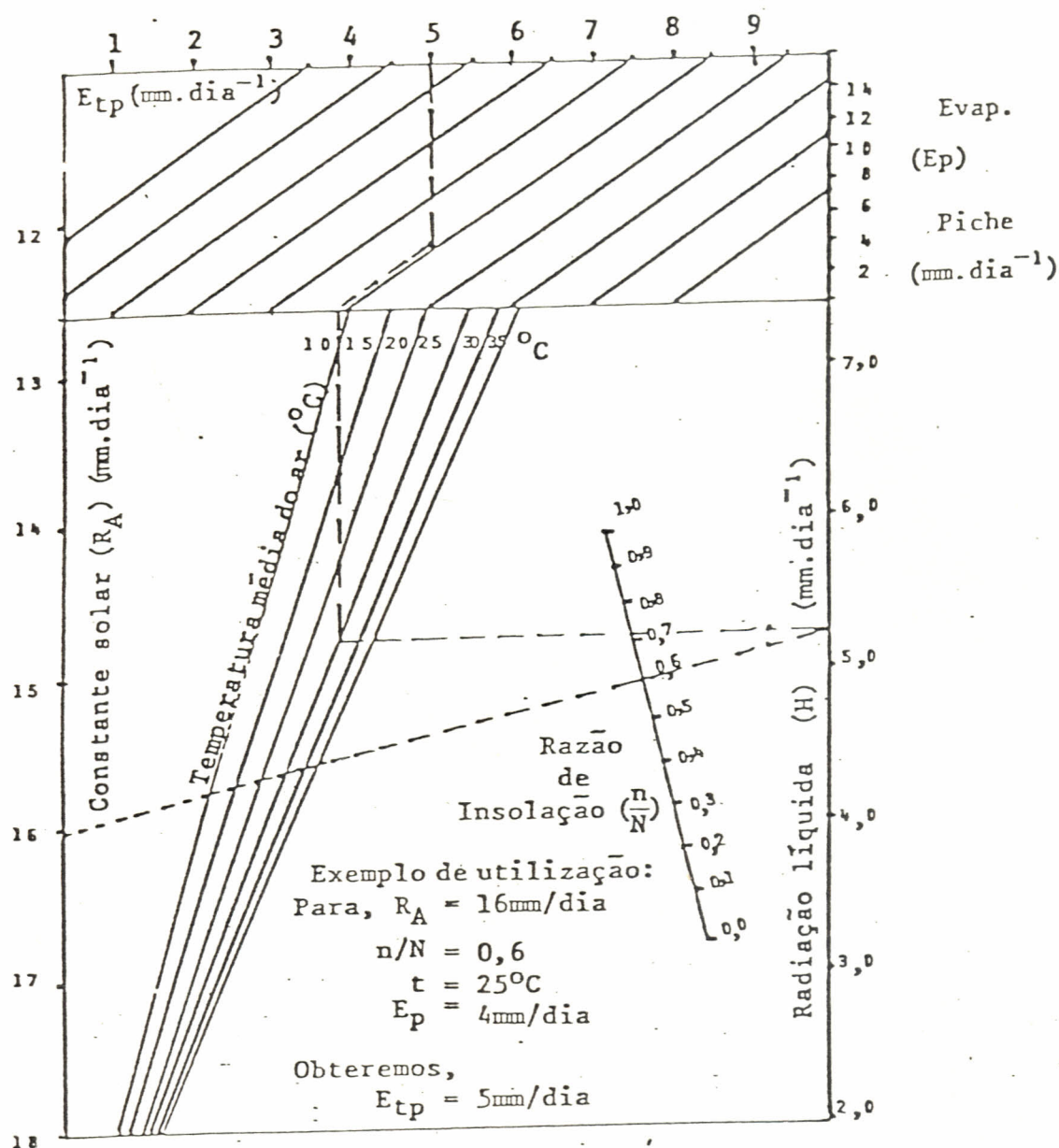


Figura 1. Nomograma para cálculo da Evapotranspiração Potencial pelo método de Penman simplificado

Utilizável no período outubro a março (primavera-verão) entre latitudes 20° a 25° Sul
 [VILLA NOVA e OMETTO (1981)]

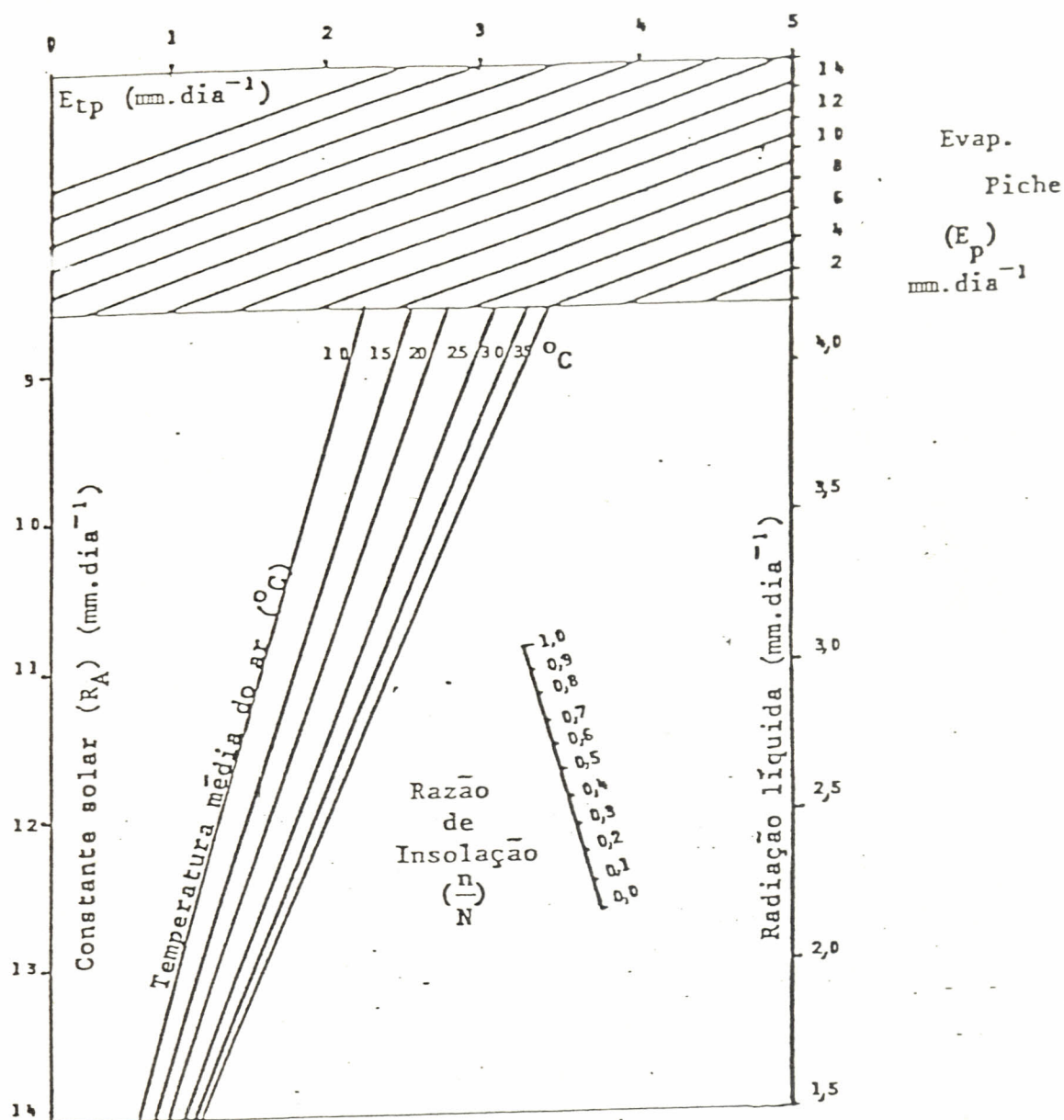


Figura 2. Nomograma para cálculo da Evapotranspiração Potencial pelo método de Penman simplificado

Utilizável no período abril a setembro (ou -
tono-inverno) entre latitudes 20° a 25° Sul
[VILLA NOVA e OMETTO (1981)]

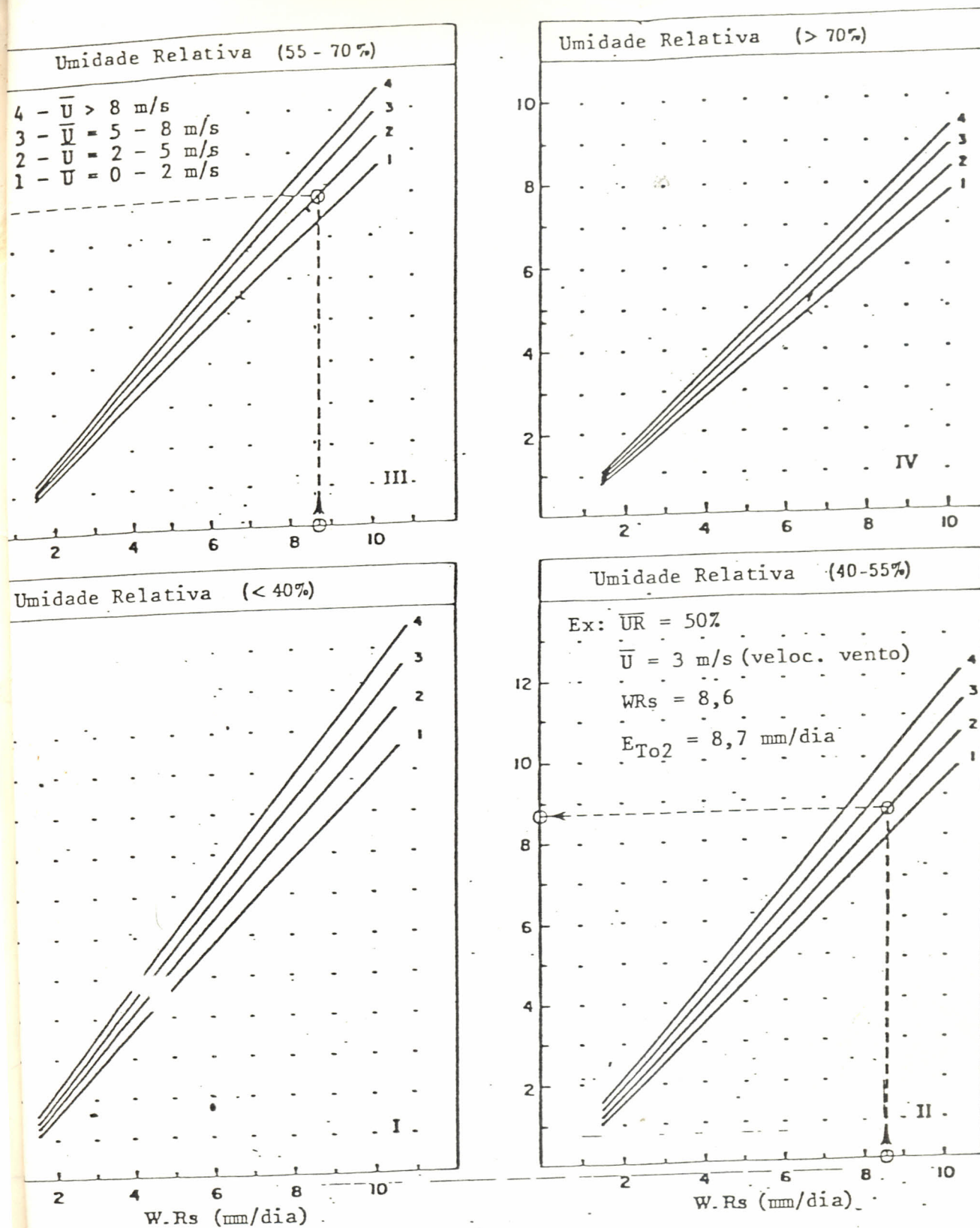


Figura 3. Estimativa de E_{To2} em função do produto wRs para diferentes níveis de Umidade relativa (%) e velocidade média diurna de vento (m/s).