

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

PERFORMANCE EVALUATION OF DIFFERENT POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATING METHODS IN THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

Ângelo Paes de Camargo¹ e Paulo Cesar Sentelhas²

RESUMO

Avaliou-se o desempenho de vinte métodos de estimativa da evapotranspiração potencial (ETp), em três localidades do Estado de São Paulo, através de dados obtidos em lisímetros conduzidos entre 1954 e 1960. Os dados medidos foram correlacionados com os estimados através de regressão linear. A avaliação do desempenho dos métodos foi baseada nos coeficientes de correlação "r", de concordância "d" de Willmott e de um novo índice proposto, de confiança ou desempenho "c", produto dos índices anteriores. 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, todos com índice "c" entre 0,78 e 0,81, indicadores de desempenho muito bom. Os métodos de Penman-Monteith, Penman, Hargreaves modificado, Makking e Blaney & Criddle modificado, tiveram bom desempenho, com índice "c" entre 0,70 e 0,73. Os demais métodos mostraram desempenho bem inferior, com índice "c" entre 0,25 e 0,62.

Palavras-chave: evapotranspiração potencial, evapotranspirômetro, desempenho das equações, índice de concordância "d", índice de confiança "c".

SUMMARY

The performance of twenty potential evapotranspiration (ETp) estimating methods were evaluated in three places of the State of São Paulo, Brazil, through the lysimeters data obtained from 1954 to 1960. The measured data were correlated with the estimated from the methods by the linear

regression. The performance evaluation of the methods were based on correlation coefficient "r", Willmott's agreement coefficient "d" and a new index of performance "c", product of previous coefficients. The best ETp estimatives for the sub-tropical climate conditions of the interior of the State of São Paulo, Brazil, were obtained by the Camargo, Thornthwaite, Thornthwaite using the heat index "T" and Priestley & Taylor methods, all with very good performance with "c" between 0.78 and 0.81. The methods of Penman-Monteith, Penman, Hargreaves modified, Makking and Blaney & Criddle modified had their performance good, with "c" between 0.70 and 0.73. Others methods showed median to very bad performance, with "c" index between 0.25 and 0.62.

Key words: potential evapotranspiration, evapotranspirometer, equations performance, agreement index "d", confidence index "c".

INTRODUÇÃO

Vários são os métodos de estimativa da evapotranspiração potencial (ETp) e a literatura sobre o assunto é bastante vasta, entre eles THORNTHWAITE (1946, 1948), PENMAN (1948), DOORENBOS & PRUITT (1977), CAMARGO & CAMARGO (1983), ROSENBERG et al. (1983), VILLA NOVA & REICHARDT (1989), PEREIRA et al. (1996), entre outros.

Dentre os vários métodos de estimativa da ETp muitos tem grande aceitação enquanto outros são bastante criticados e até desprezados (PEREIRA et al., 1996). Os critérios de rejeição, muitas vezes, não são claros ou acham-se associados à má interpretação do conceito de evapotranspiração potencial

¹ Eng. Agr., Dr., Seção de Climatologia Agrícola, IAC, Caixa Postal 28, Campinas, SP - 13001-970. Bolsista do CNPq. E-mail: remo@cec.iac.br

² Eng. Agr., MsC., Prof. Assistente do Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP, Caixa Postal 9, Piracicaba, SP - 13418-900. E-mail: pcsentel@carpa.ciagri.usp.br.

e ao uso de evapotranspirômetros mal expostos, sem a devida área tampão.

A evapotranspiração potencial é um elemento macrometeorológico, fundamental, como é a precipitação pluvial. Representa a chuva teoricamente necessária para não faltar nem sobrar água no solo. Com o balanço contábil entre esses dois elementos opostos pode-se caracterizar bem o fator umidade do clima e estimar a umidade disponível no solo, através do balanço hídrico climático.

Muitos trabalhos como os de STANHILL (1961), CAMARGO (1962), HASHEMI & HABIBIAN (1979) e mais recentemente de SORIANO & PEREIRA (1993) e SANTOS et al. (1994), em diferentes partes do Brasil e do mundo, vem avaliando o desempenho de diferentes métodos de estimativa da ETp. As conclusões variam muito segundo a condição do autor, o que dificulta ao usuário decidir sobre a conveniência de utilizar determinado método (PEREIRA et al., 1996).

Este trabalho baseia-se em dados de ETp obtidos em evapotranspirômetros conduzidos no período de 1954 a 1960 em região de clima subtropical do Estado de São Paulo, já publicados parcialmente (CAMARGO, 1962). Os dados completos foram utilizados aqui para verificar o desempenho de numerosos métodos de estimativa de ETp, para as condições consideradas, por meio de correlação entre valores medidos e estimados.

MATERIAL E MÉTODOS

Evapotranspirômetros, tipo Ibadan (MATHER, 1954) foram instalados em baterias de três tanques, nas estações experimentais do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo: Campinas, localizada no Planalto Sul (Lat.: 22°54'S; Long.: 47°04'W; Alt.: 670 m); Pindamonhangaba, localizada no Vale do Paraíba (Lat.: 22°58'S; Long.: 45°25'W; Alt.: 570 m); e Ribeirão Preto, situada na região nordeste (Lat.: 21°11'S; Long.: 47°48'W; Alt.: 620 m).

Os tanques, utilizados como evapotranspirômetros, foram classificados em pequenos, médios e grandes, de acordo com as características apresentadas na Tabela 1.

Os evapotranspirômetros foram enchidos com uma mesma mistura de terra, preparada para ficar com textura franca, livre de impurezas, bem uniformes e em condições de proporcionar fácil percolação. O fundo dos tanques foi revestido com brita fina e areia para facilitar a drenagem. Os tan-

Tabela 1. Classificação, área superficial (largura x comprimento ou diâmetro (D)) e profundidade dos evapotranspirômetros e material utilizado na sua fabricação.

Classificação	Área (m ²)	Dimensão (m)	Profundidade (m)	Material
Pequeno	0,25	D = 0,56	0,60	Tambor de 200 l
Médio	0,54	0,73 x 0,73	0,60	Cimento-amianto
Grande	1,28	0,85 x 1,50	0,60	Cimento-amianto

ques e a área externa (área tampão) foram vegetados com grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge). Essa área tampão, com o mínimo de 15 m de cada lado, era irrigada, quando necessário, para mantê-la em condições de umidade próxima de capacidade de campo. Recebiam podas para ficar a uma altura sobre o solo de 5 a 15 cm. A operação dos evapotranspirômetros acha-se descrita em CAMARGO (1962).

Os evapotranspirômetros de cada bateria eram irrigados com a mesma quantidade de água, suficiente para proporcionar pequeno percolado no dia seguinte. As irrigações eram feitas normalmente a cada dois ou mais dias, sempre que não houvesse percolado a recolher. Os dados de irrigação, percolado e de precipitação pluvial foram reunidos por decêndios, calculando-se a evapotranspiração potencial através da seguinte operação:

$$ETp = I + P - D \quad (1)$$

onde ETp é a evapotranspiração potencial; I a irrigação; P a precipitação e D a drenagem, sendo todas as unidades em mm. Os dados foram processados por decêndio, sendo os resultados apresentados na base mensal.

Dos evapotranspirômetros utilizados, Campinas foi a única localidade que recebeu tanques com as três dimensões. Por dificuldades de instalação, Ribeirão Preto ficou sem os tanques pequenos e Pindamonhangaba sem os grandes.

Os dados mensais de ETp obtidos nos evapotranspirômetros de diferentes dimensões foram muito próximos. A Figura 1 mostra a comparação da ETp média mensal obtida nos evapotranspirômetros de diferentes dimensões.

Desse modo, para os estudos de correlação entre dados medidos e estimados foram utilizados apenas dados dos tanques médios. Estes, além de apresentarem, praticamente, os mesmos dados dos tanques grandes, foram os únicos instalados nas três localidades estudadas.

Para estimativa da ETp foram utilizados os seguintes métodos:

- 1) Blaney & Criddle (BLANEY & CRIDDLE, 1950)
- 2) Blaney & Criddle modificado (CAMARGO, 1962)

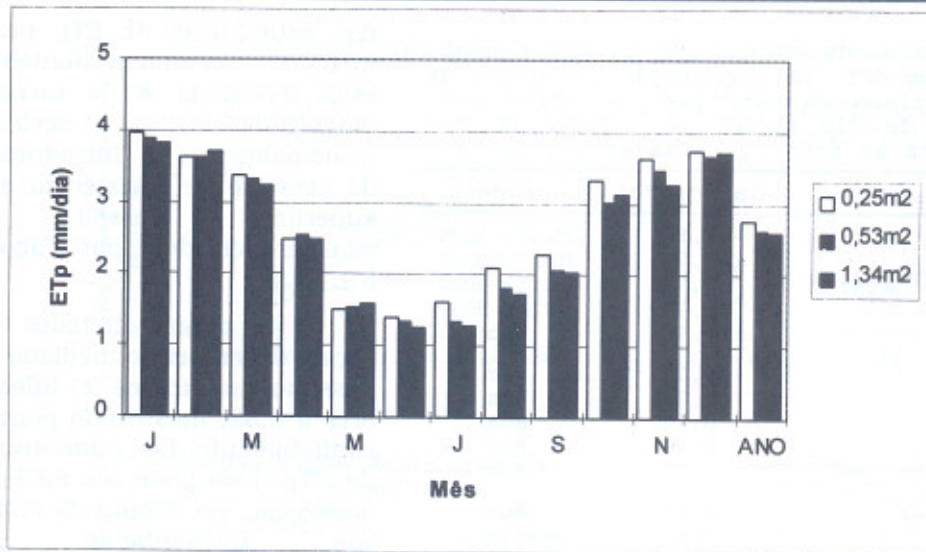


Figura 1. Evapotranspiração potencial (ETp) média mensal (mm/dia) obtida em evapotranspirômetros de diferentes dimensões em Campinas, Pindamonhangaba e Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente essa aproximação é dada por um índice designado de concordância, representado pela letra "d" (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice é dado pela seguinte expressão:

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

onde P_i é o valor estimado, O_i o valor observado e O a média dos valores observados.

Neste trabalho foi utilizado um novo índice "c", proposto pelo primeiro autor em relatório para o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, para indicar o desempenho dos métodos, reunindo os índices de precisão "r" e de exatidão "d", sendo expresso da seguinte forma:

$$c = r * d \quad (3)$$

O critério adotado para interpretar o desempenho dos métodos pelo índice "c", para as médias mensais de ETp, é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da ETp, pelo índice "c".

Valor de "c"	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 traz a média para as três localidades dos índices de desempenho "c" encontrados para cada um dos vinte métodos analisados.

As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram graficamente as correlações entre os dados de ETp esti-

- 3) Camargo (CAMARGO, 1971)
- 4) Hargreaves 74 (HARGREAVES, 1974)
- 5) Hargreaves 76 (HARGREAVES, 1976)
- 6) Hargreaves modificado (SENTELHAS & CAMARGO, 1996)
- 7) Ivanov (CASTRO NETO & SOARES, 1989)
- 8) Jensen & Haise (JENSEN & HAISE, 1963)
- 9) Linacre (LINACRE, 1977)
- 10) Makking (MAKING, 1957)
- 11) Penman (PENMAN, 1948)
- 12) Penman-Monteith (MONTEITH, 1965)
- 13) Penman-VNova&Ometto (VILLA NOVA & OMETTO, 1981)
- 14) Penman-Frère (FRÈRE, 1972)
- 15) Priestley & Taylor (PRIESTLEY & TAYLOR, 1972)
- 16) Radiação Solar (DOORENBOS & PRUITT, 1977)
- 17) Tanner & Pelton (TANNER & PELTON, 1960)
- 18) Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948)
- 19) Thornthwaite índice T (CAMARGO, 1962)
- 20) Turk (TURK, 1955)
- 21) Ivanov (IVANOV, 1957)

Ao correlacionar valores estimados com os medidos, pela regressão linear, foram considerados os seguintes indicadores estatísticos: precisão - coeficiente de correlação "r"; exatidão - índice de Willmott "d"; e de confiança ou desempenho "c".

Tabela 3. Desempenho dos métodos de estimativa da ETp mensal, segundo índice de desempenho "c", em correlação com dados de evapotranspirômetros conduzidos em condições de clima subtropical úmido, do Estado de São Paulo. Os valores de "c" apresentados são médias para as três localidades utilizadas.

Métodos	Índice "c"	Desempenho
1. Camargo	0,81	Muito Bom
2. Thornthwaite	0,79	Muito Bom
3. Thornthwaite índice T, de Camargo	0,79	Muito Bom
4. Priestley & Taylor	0,78	Muito Bom
5. Penman-Monteith	0,73	Bom
6. Penman-Frère	0,71	Bom
7. Penman-VNova&Ometto	0,71	Bom
8. Hargreaves modificado	0,71	Bom
9. Penman	0,70	Bom
10. Makking	0,70	Bom
11. Blaney & Criddle modificado	0,70	Bom
12. Tanner & Pelton	0,62	Mediano
13. Turk	0,62	Mediano
14. Blaney & Criddle	0,59	Sofrível
15. Hargreaves 76	0,58	Sofrível
16. Hargreaves 74	0,58	Sofrível
17. Jensen & Haise	0,58	Sofrível
18. Radiação Solar	0,46	Mau
19. Linacre	0,46	Mau
20. Ivanov	0,25	Péssimo

mados e medidos, incluindo os coeficientes de regressão, de correlação e de concordância e o índice de desempenho, para alguns dos métodos avaliados. No caso do método de Penman, os valores de ETp foram estimados por vários métodos propostos por diferentes autores, dando resultados praticamente idênticos, sendo apresentado, portanto, somente os resultados do método original de Penman e o de Penman-Monteith, padrão FAO.

Observa-se pela Tabela 3 e pelas Figuras 2, 3, 4 e 5 que o desempenho dos diferentes métodos foi bastante variável. Poucos métodos tiveram desempenho muito bom, como é o caso dos métodos de Camargo, Thornthwaite, Thornthwaite índice T e Priestley & Taylor, os quais apresentaram índice "c" variando entre 0,78 e 0,81. O desempenho desses métodos nas localidades analisadas pode ser melhor observado nas Figuras 2 e 3, onde verifica-se que, tanto a precisão como a exatidão das estimativas, foram muito boas, ao redor de 0,80. Com exceção para o método de Priestley & Taylor, a grande vantagem desses métodos é que utilizam somente a temperatura do ar como variável meteorológica independente, sendo assim de fácil utilização.

Sete métodos tiveram desempenho classificado como bom para as condições climáticas do interior do Estado de São Paulo, entre eles os métodos de Penman e Penman-Monteith, com índice "c" entre 0,70 e 0,73 (Tabela 3 e Figura 4). O método de Penman apesar de fisicamente mais correto, apresenta uma tendência de superestimativa da ETp, o que, segundo SEDIYAMA (1996), também tem sido observado em outras regiões do globo. Já

nas estimativas de ETp pelo método Penman-Monteith essa tendência é de menor magnitude devido, principalmente, à introdução do conceito de resistência da superfície (dossel) à transferência de vapor d'água (r).

Os demais métodos tiveram desempenho mediano a péssimo, com índice "c" inferiores a 0,62, mostrando pouca confiabilidade das estimativas de ETp. Isso pode ser melhor observado na Figura 5 onde são apresentados as correlações referentes aos métodos da Radiação Solar e de Ivanov, com índices "c", respectivamente, de 0,46 e 0,25.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que:

1. Apresentam desempenho considerado muito bom, com índice "c" entre 0,78 e 0,81, os métodos de Camargo, Thornthwaite, Thornthwaite índice T e Priestley & Taylor;
2. Com desempenho bom são sete métodos: Penman-Monteith; Penman; Hargreaves modificado; Makking; Blaney & Criddle modificado, todos com índice de desempenho "c" entre 0,70 e 0,73;
3. Apresentam desempenho mediano, com índice "c" igual a 0,62, os métodos de Tanner & Pelton e Turk;
4. Com desempenho sofrível, com índice "c" entre 0,58 e 0,59, vem os métodos de Blaney & Criddle, Hargreaves 74, Hargreaves 76 e Jensen & Haise;
5. Os métodos da Radiação Solar e Linacre mostram mau desempenho, com índice "c" menor que 0,50;
6. O método de Ivanov tem o pior desempenho, com índice "c" de 0,25.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLANEY, H.F., CRIDDLE, W.O. **Determining water requirement in irrigated areas from climatological and irrigation data.**

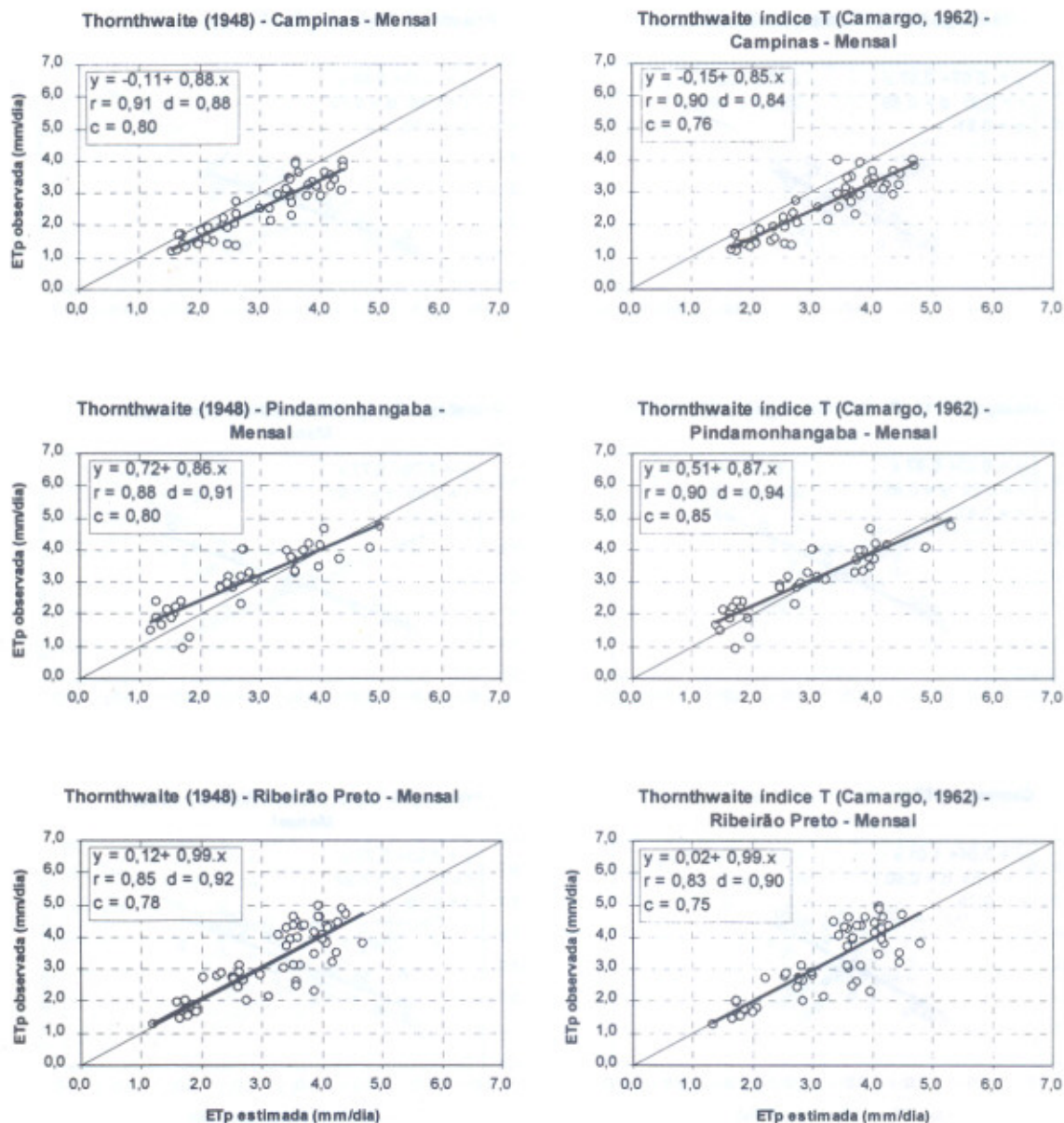


Figura 2. Análise de regressão entre ETp mensal medida e estimada pelos métodos de Thornthwaite e Thornthwaite índice T, para as localidades de Campinas, Pindamonhangaba e Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, no período de 1954 a 1960.

Washington, Soil Conservation Service, 1950, 49 p.

CAMARGO, A.P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v. 21, p. 63-213, 1962.

CAMARGO, A. P. **Balanco hídrico no Estado de São Paulo**. 3ª.ed., Campinas, IAC. 24 p. 1971. (Bol.116).

CAMARGO, A.P., CAMARGO, M.P.B. Teste de uma equação simples para estimativa da evapotranspiração potencial baseada na radiação solar extraterrestre e na temperatur a

do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, Campinas, SP. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/IAC, 1983, p. 229-244.

CASTRO NETO, P., SOARES, A.M. **Métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial**. Lavras, ESAL, 6 p., 1989.

DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1977, 194 p. (Riego y Drenaje, Bol. 24).

FRÈRE, M. **A method for practical application of the estimation of potential**

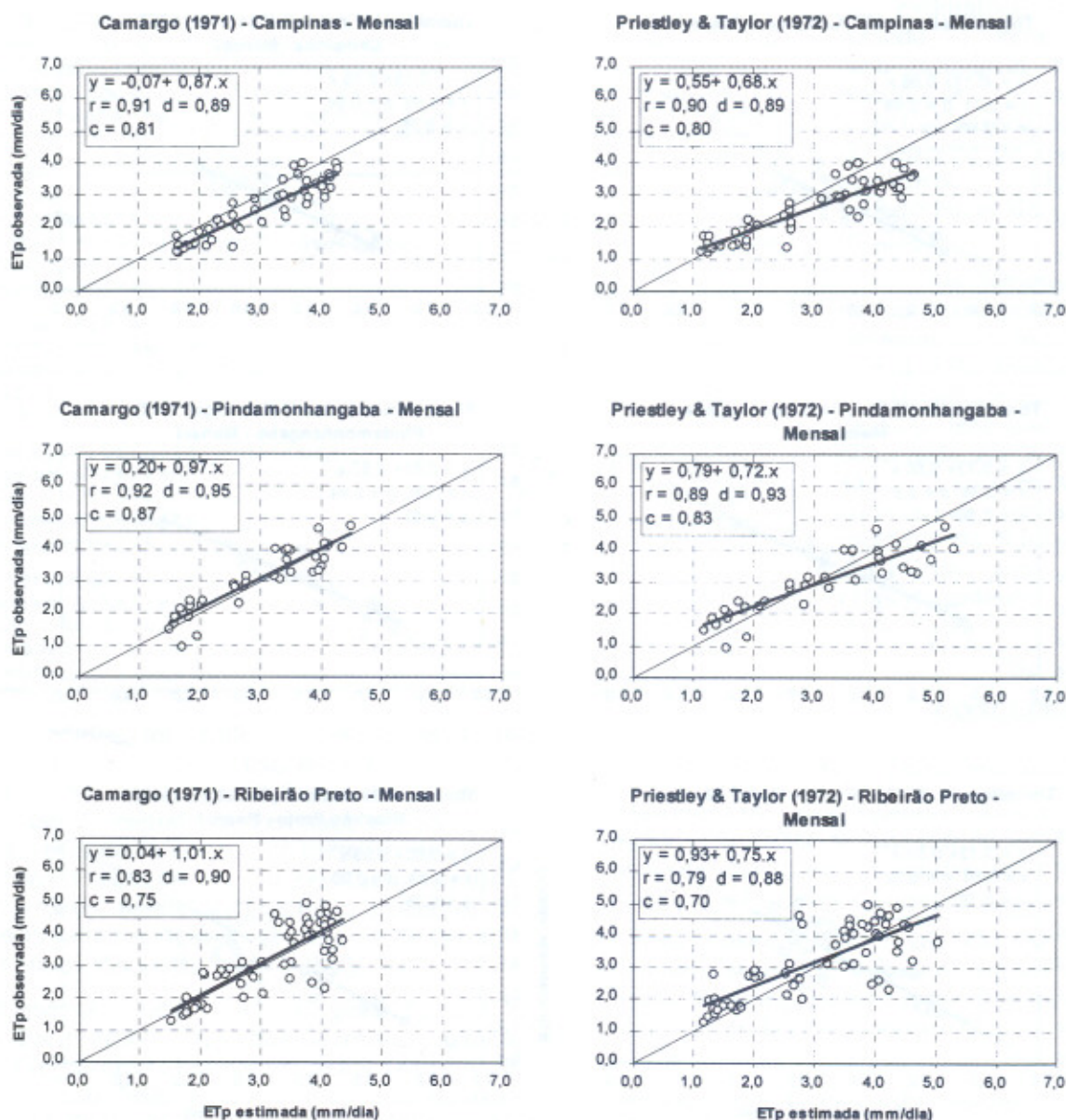


Figura 3. Análise de regressão entre ETp mensal medida e estimada pelos métodos de Camargo e Priestley & Taylor, para as localidades de Campinas, Pindamonhangaba e Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, no período de 1954 a 1960.

evapotranspiration and evaporation from a free water surface. Rome, FAO, 1972, 21 p.

HARGREAVES, G.H. **Potential evapotranspiration and irrigation requirements for Northeast of Brazil.** In: Farm Water Management Research Program. Utah State Univ., 1974, 55 p.

HARGREAVES, G.H. **Climate and irrigation requirements for Brazil.** Dep. Agr. Irrig. Eng. Logan, Utah Univ. 1976, 44 p.

HASHEMI, F., HABIBIAN, M.T. Limitations of temperature - based methods in estimating crop evapotranspiration in arid-zone agricultural development projects. **Agricultural**

Meteorology. Amsterdam, v. 20, p. 237-247, 1979.

JENSEN, M.E., HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **J. Irrigation and Drainage.** Div. Proc. Am. Soc. Civil Engineers, v. IR4, p. 15-41, 1963.

LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature alone. **Agricultural Meteorology,** Amsterdam, v. 18, p. 409-429, 1977.

MAKING, G.F. Ekzameno de la formula de Penman. **Neth. J. Agric. Sci.,** Wageningen, v. 5, p. 290-305, 1957.

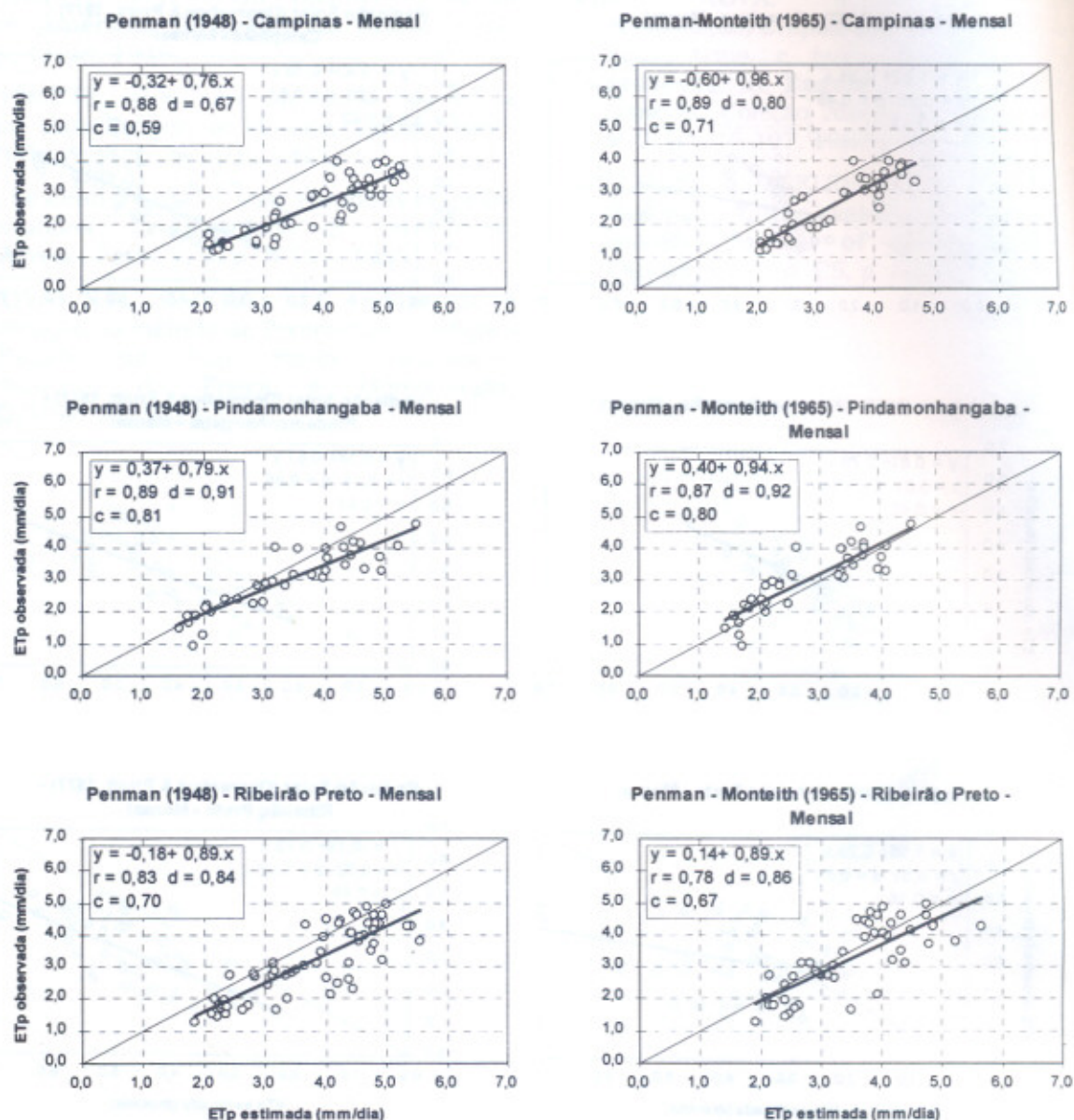


Figura 4. Análise de regressão entre ETp mensal medida e estimada pelos métodos de Penman e Penman-Monteith, para as localidades de Campinas, Pindamonhangaba e Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, no período de 1954 a 1960.

MATHER, J.R. A summary of evapotranspiration at Seabrook. New Jersey. 1947-1953. In: The measurement of potential evapotranspiration. Seabrook N.J. The Johns Hopkins University. **Publications in Climatology**, v. 7, n. 1, p. 7-28, 1954.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symp. Soc. Exp. Biology**. London, v. 119, p. 205-234, 1965.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from water, bare soil and grass. **Proc. Roy. Soc. A**, London v. 193, p. 120-143, 1948.

PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N.A., SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, DFM/ESALQ/USP. Apostila. 70 p., 1996.

PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR, R.J. On the assesment of surface heat flux on evaporation using large scale parameters. **Monthly Weather Rev.**, v. 100, p. 81-92, 1972.

ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L., ERMA, S.B. **Microclimate. The biological environment**. 2 ed. New York, John Willey & Sons. 1983, 455 p.

SANTOS, A.O., BERGAMASCHI, H., CUNHA, G.R. Avaliação de métodos para a estimativa de evapotranspiração máxima da alfafa. **Revista**

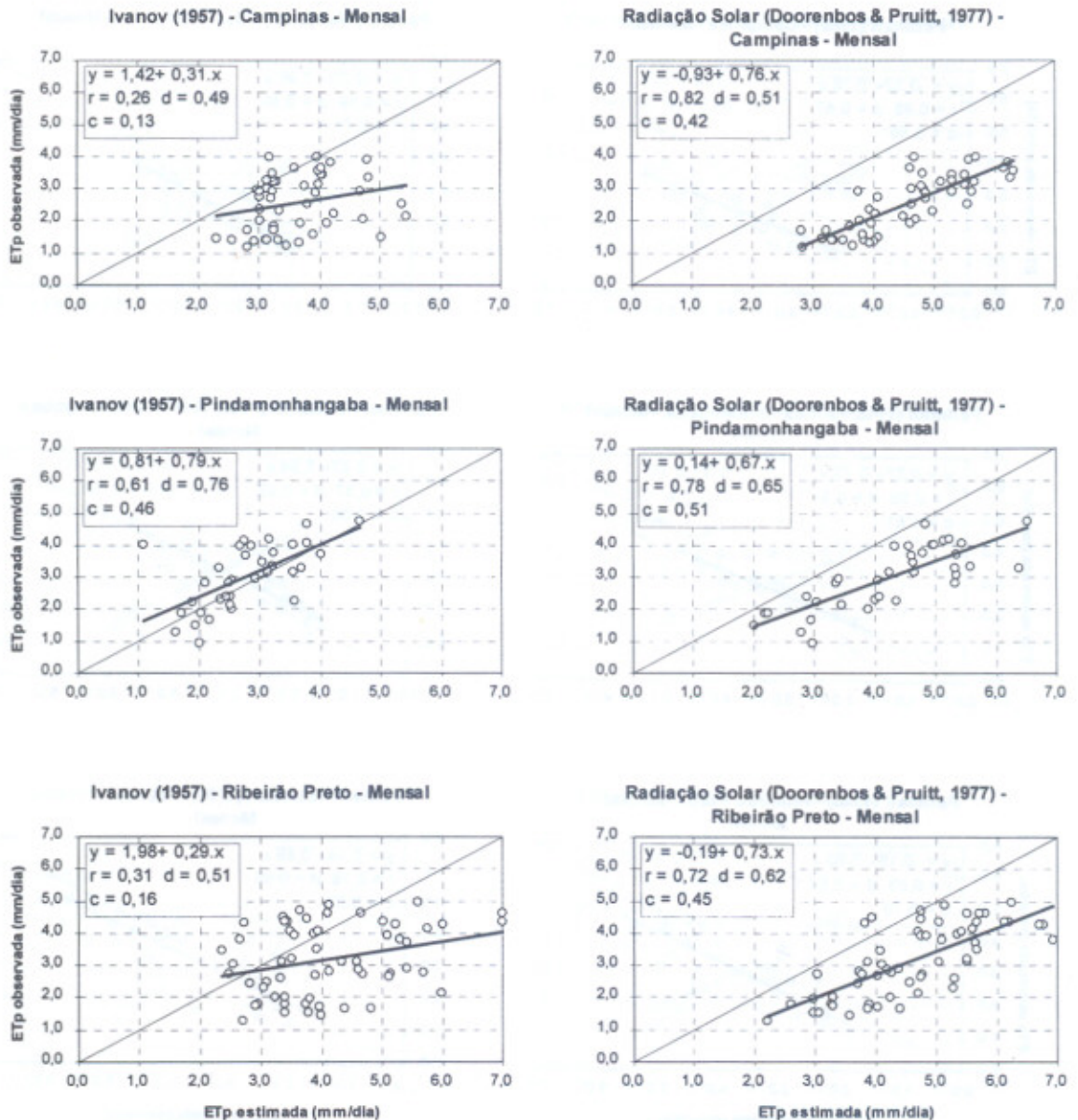


Figura 5. Análise de regressão entre ETp mensal medida e estimada pelos métodos de Ivanov e Radiação Solar, para as localidades de Campinas, Pindamonhangaba e Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, no período de 1954 a 1960.

Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 2, p. 37-42, 1994.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. i-xii, 1996.

SENELHAS, P.C., CAMARGO, A.P. Equação para a estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, baseada no método de Hargreaves 1974. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 77-81, 1996.

SORIANO, B.M.A., PEREIRA, A.R. Estimativa da evapotranspiração de referência para a sub-região Nhecolândia, pantanal mato-grossense. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 123-129, 1993.

STANHILL, G. A comparison of methods of calculating potential evapotranspiration from climatic data. **Israel J. Agric Res.**, Tel-Aviv, v. 11, p. 159-171, 1961.

TANNER, C.B., PELTON, W.L. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. **J. Geoph. Res.**, Ottawa, v. 65, p. 3391-3403, 1960.

- THORNTON, C.W. The moisture factor in climate. **American Geographical Union**, v. 27, n. 1, p. 41-48, 1946.
- THORNTON, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geogr. Rev.**, New York, v. 38, p. 55-916, 1948.
- TURK, L. Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. **Ann. Agron.**, Paris, v. 6, p. 5-131, 1955.
- VILLA NOVA, N.A., OMETTO, J.C. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições de Estado de São Paulo. Piracicaba, Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP. 1975. 23 p.
- VILLA NOVA, N.A., REICHARDT, K. Evaporação/Evapotranspiração de um ecossistema e suas relações com o meio ambiente. In: **Engenharia Hidrológica**, Rio de Janeiro. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 2, p. 145-197, 1989.
- WILLMOTT, C.J., CKLESON, S.G., DAVIS, R.E. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.