

AJUSTE DA EQUAÇÃO DE THORNTHWAITE PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL EM CLIMAS ÁRIDOS E SUPERÚMIDOS, COM BASE NA AMPLITUDE TÉRMICA DIÁRIA

ADJUST OF THE THORNTHWAITE'S METHOD TO ESTIMATE THE POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION FOR ARID AND SUPERHUMID CLIMATES, BASED ON DAILY TEMPERATURE AMPLITUDE

Ângelo Paes de Camargo¹, Fábio Ricardo Marin², Paulo Cesar Sentelhas³, Angélica Giarolla Picini⁴.

RESUMO

A equação de Thornthwaite não estima satisfatoriamente a evapotranspiração potencial (ETP) em climas áridos e superúmidos por não considerar o termo aerodinâmico na equação, seja a contribuição da energia latente. O uso de uma temperatura média corrigida, em função da amplitude térmica diária, poderia representar o termo aerodinâmico e ser usado para ajustar a fórmula de Thornthwaite. Em condições de aridez, com grande contribuição da energia latente, a amplitude térmica diária fica normalmente bastante elevada. As temperaturas máximas aumentam e as mínimas diminuem. Para estudar o papel da amplitude térmica no ajuste da equação de Thornthwaite foram usados dados de temperatura, máxima e mínima, de numerosas estações meteorológicas de diversas partes do globo, para obtenção da amplitude térmica e uma temperatura média corrigida, designada temperatura efetiva (Tef), a ser usada na equação de Thornthwaite. Foram desenvolvidas várias equações para obter a Tef. A melhor expressão foi: $0,36 (3T_{max} - T_{min})$, a qual foi testada neste trabalho. Adotou-se como testemunha, os dados de ETP segundo Penman-Monteith. Os resultados dos testes mostraram que a equação de Thornthwaite usando a Tef teve desempenho geral considerado satisfatório.

Palavras-chave: evapotranspiração potencial, Thornthwaite, Penman-Monteith, temperatura efetiva.

SUMMARY

The Thornthwaite's method for estimating monthly potential evapotranspiration (ETP) has been largely used for agrometeorological purposes due to its simplicity. It needs just one meteorological variable: air temperature. However, the method does not estimate satisfactorily ETP in arid and in superhumid climates, using the standard mean air temperature. This work studies the Thornthwaite equation using an adjusted mean temperature, named effective temperature (Tef) given by the equation: $Tef = 0,36 (3T_{max} - T_{min})$. Penman-Monteith's data for 86 places, around the world, was used as testimony. One confidence coefficient **c** (**c=r.d**; **r** is the correlation coefficient; **d**, the concordance coefficient of Willmott) was used to quantify the Thornthwaite equation performance, based on the Tef mean air temperature. The performance was very good.

Key words: potential evapotranspiration; Thornthwaite equation; effective temperature; confidence coefficient.

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração potencial (ETP) representa a chuva necessária para atender a demanda hídrica de um gramado extenso, sendo resultante apenas de trocas verticais de energia. Se a chuva, for superior à ETP haverá aumento da água no solo e pode ocorrer excedente hídrico. Ao contrário, se a chuva for inferior

¹Engº Agrº, Dr., Centro de Ecofisiologia e Biofísica, IAC, caixa postal 28, 13001-970 Campinas-SP, email: mcamargo@cec.iac.br bolsista do CNPq.

²Acadêmico de Agronomia, ESALQ/USP, bolsista da FAPESP.

³Engº Agrº, Dr., Professor, Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP.

⁴Engº Agrº, Msc em Agrometeorologia ESALQ/USP, bolsista da CAPES.

à ETP, a umidade do solo diminuirá e poderá haver deficiência hídrica e necessidade de irrigação (THORNTHWAITE, 1948).

A ETP pode ser quantificada por observações diretas em evapotranspirômetros (CAMARGO, 1962) ou estimada por equações baseadas em outros elementos meteorológicos, como temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento (PENMAN, 1948; THORNTHWAITE, 1946; 1948).

Entre as equações mais complexas baseadas em princípios físicos e em grande número de elementos meteorológicos para quantificar a energia disponível necessária para promover a evapotranspiração, estão as de PENMAN (1948) e de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965). Seus resultados são bastante satisfatórios nas mais diversas condições climáticas (ALLEN, 1986; ALLEN et al., 1989 e PERES et al., 1995). Por outro lado, as mais simples, ou analíticas, como as de THORNTHWAITE (1948), CAMARGO (1962), CAMARGO & SENTELHAS (1997), podem estimar muito bem a ETP em regiões de clima úmido e são baseadas apenas na energia solar recebida em função do comprimento do dia e em um único elemento meteorológico: a temperatura média do ar.

Entretanto, em regiões com situações climáticas extremas de umidade, como a aridez ou a superumidade, a fórmula de Thornthwaite não fornece estimativas satisfatórias de evapotranspiração potencial. Em condições de aridez, a equação de Thornthwaite subestima a ETP por não considerar a energia latente recebida por advecção regional de áreas secas distantes (PRUITT, 1964; ROSENBERG et al., 1983; MALEK, 1987; PEREIRA et al., 1997). Posteriormente, CAMARGO & PICINI (1995) em estudos preliminares para corrigir a equação de Thornthwaite em climas áridos, verificaram que essa equação também não estima satisfatoriamente a ETP em condições de elevada umidade do ar, como em Manaus (AM) e Belém (PA), onde, ao contrário do clima árido, ela superestima a ETP. Nessa situação de superumidade, admite-se que a equação não considera a baixa energia latente encontrada no ar úmido, com baixo déficit de saturação, o que faz reduzir muito a estimativa do seu poder evaporante.

Contudo, é possível usar na equação de Thornthwaite uma temperatura capaz de expressar o efeito do alto e também do baixo déficit de saturação do ar, baseando-se na amplitude térmica diária, partindo-se da premissa de que quanto mais seca a atmosfera, maior a temperatura máxima diária e menor a temperatura mínima, ou seja, a amplitude térmica diária é maior.

Considerando o fato de o método de Thornthwaite não oferecer estimativas adequadas de evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, o presente trabalho tem como objetivo testar a confiabilidade dessa equação para tais condições, extremas de umidade climática, utilizando uma

temperatura média efetiva (Tef) corrigida segundo modelo proposto neste trabalho. A equação de Penman-Monteith, considerada padrão pela FAO (SMITH, 1991), foi tomada como testemunha na comparação das estimativas.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram adquiridos da FAO dados mensais de temperatura, máximas e mínimas, de altitude e coordenadas geográficas de numerosas regiões do globo, excetuando-se os Estados Unidos e a União Soviética, onde a FAO não dispunha de dados. Adquiriu-se também estimativas de evapotranspiração potencial (ETP) mensais segundo Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) as quais foram utilizadas para correlacionar com os resultados obtidos pelo método de THORNTHWAITE (1948) utilizando a temperatura corrigida, proposta neste trabalho. Aproveitaram-se os dados de 74 localidades que se mostraram mais consistentes, segundo análise preliminar.

Os valores da temperatura corrigida, denominada efetiva (Tef), utilizados na equação de Thornthwaite, foram estimados pela expressão:

$$Tef = k (T + A) \quad (1)$$

onde Tef é a temperatura efetiva (°C), T a temperatura média do ar (°C) e A, a amplitude térmica média diária. O modelo com os melhores resultados, depois de muitos refinamentos e simplificações, foi:

$$Tef = 0,72 (T + A) \quad (2)$$

Para facilitar os cálculos, essa expressão foi transformada para:

$$Tef = 0,36 [3T_{max} - T_{min}] \quad (3)$$

onde, T_{max} é a média mensal das temperaturas máxima diárias e T_{min}, a média das mínimas.

Os resultados de ETP segundo Thornthwaite, baseados nas temperaturas médias convencionais (T_{med}) e na média efetiva (Tef) foram correlacionados com os de Penman-Monteith enviados pela FAO. Para avaliar o desempenho da equação de Thornthwaite, corrigida pela Tef, utilizou-se o índice de confiança **c**, de CAMARGO & SENTELHAS (1997), o qual associa o coeficiente de correlação **r**, precisão da estimativa, com o de concordância **d**, de WILLMOTT et al. (1985), indicativo da exatidão dos dados estimados (aproximação da reta de 1:1). O índice **c**, de confiança, corresponde ao produto de **r** e **d**. O critério adotado para avaliar o desempenho da equação pelo índice **c** está na Tabela 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados climatológicos recebidos da FAO estimaram-se a ETP segundo Thornthwaite usan-

do as temperaturas convencional (Tmed) a efetiva (Tef). A Tabela 2 traz os índices de confiança (c) para avaliar o desempenho da equação de Thornthwaite, para ambas as temperaturas.

Pelos dados do índice **c**, nas Tabelas 2 e 3, verifica-se que o desempenho da equação de Thornthwaite foi melhor quando usou-se a temperatura média corrigida (Tef). As Figuras 1 e 2 permitem avaliar visualmente o comportamento das equações em seis localidades de clima bem diferentes.

O método de Thornthwaite aplicado em climas secos, como de Petrolina e Ouricuri (PE), usando a Tmed convencional, superestimou a ETP, como era esperado (Figura 2). Utilizando-se, porém, a temperatura média efetiva (Tef) houve melhora do desempenho da equação, quer quanto à precisão, quer quanto à exatidão das estimativas de ETP. Em Petrolina o índice **c** passou de 0,67 - desempenho mediano, para 0,89 - desempenho muito bom, segundo a Tabela 1. Em Ouricuri, passou de 0,58 - mediano, para 0,86 - muito bom.

Em Piracicaba (SP), sob clima tropical de inverno seco, a equação de Thornthwaite subestimou a ETP, particularmente no inverno. Usando a Tef o desempenho da equação melhorou consideravelmente. O índice **c**, de confiança, passou de 0,78 - bom, para 0,96 - ótimo.

Quanto às localidades de clima apenas úmido, como Porto Alegre (RS), nota-se que o método de Thornthwaite aplicado com a temperatura média convencional (Tmed) mostrou desempenho muito bom, índice **c** = 0,84. Entretanto, foi melhorado com o emprego da temperatura efetiva, mostrando ótimo desempenho, **c** = 0,95 (Figura 1).

Para regiões de clima superúmido, como Belém (PA) e Manaus (AM), observa-se que o método de Thornthwaite, usando a Tmed, superestimou a muito ETP (Figura 1). Porém, com a temperatura efetiva, Tef, a correlação foi quase perfeita. O índice de confiança **c** para Belém, que era de 0,33 - mau desempenho, passou para 0,93 - ótimo desempenho. Em Manaus, de 0,34 - mau desempenho, passou para 0,99

Tabela 1. Critério adotado na interpretação do índice **c**, para avaliar o desempenho de uma equação.

Valor de c	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
≤ 0,30	Péssimo

Fonte: CAMARGO & SENTELHAS (1997).

- ótimo desempenho.

Considerando as médias anuais para o conjunto das 86 localidades, brasileiras e estrangeiras (Tabela 3), ao usar a temperatura média convencional (Tmed), o desempenho médio da equação de Thornthwaite mostrou-se apenas bom, mas houve melhora considerável nas estimativas da evapotranspiração potencial com o uso da temperatura efetiva (Tef), atingindo resultados considerados muito bom e ótimo.

CONCLUSÕES

- A equação de Thornthwaite, para estimativa da evapotranspiração potencial (ETP) funcionou muito bem em regiões de clima úmido, mesmo com moderada estação seca, dando estimativas muito próximas das obtidas pelo método de Penman-Monteith.
- Em regiões de clima árido, ou durante estação seca pronunciada, onde a equação de Thornthwaite normalmente subestima a ETP, o uso da temperatura efetiva (Tef) trouxe melhora considerável nas estimativas de ETP.
- Em localidades de clima superúmido e próximas de grandes massas de água, encontradas nas baixadas da Amazônia, a equação de Thornthwaite corrigida com a Tef deixou de superestimar ETP. As estimativas ficaram muito próximas dos resultados obtidos pelo método de Penman-Monteith.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G. Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, London, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.
- ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L., et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 650-662, 1989.
- CAMARGO, A.P. Contribuição para determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 163-213, 1962.
- CAMARGO, A.P., PICINI, A.G. Modelo para estimativa da ETP considerando a advecção regional em climas áridos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., Campina Grande, 1995. **Anais**. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ UFPA, 1995. p. 407-408.
- CAMARGO, A.P., SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

Tabela 2. Desempenho das estimativas de evapotranspiração potencial anuais obtidas pelo método de Thornthwaite, a partir da temperatura média convencional (Tmed) e da temperatura efetiva (Tef), segundo o critério do índice de confiança (c) para setenta e quatro localidades brasileiras e estrangeiras.

Local	Tmed	Tef	Local	Tmed	Tef
Araxá-MG	0,52	0,83	Lavras-MG	0,72	0,88
Aswan-Egito	0,72	0,71	Lima-Peru	0,84	0,79
Atenas-Grécia	0,89	0,74	Londrina-PR	0,81	0,98
Avaré-SP	0,87	0,96	Luanda-Angola	0,87	0,61
Bagdá-Irã	0,84	0,87	Madrid-Espanha	0,84	0,92
Bambari-Índia	0,77	0,50	Manaus-AM	0,34	0,93
Bangalore-Índia	0,50	0,75	Marabá-PA	0,08	0,59
Bangkok-Taiândia	0,48	0,80	Maringá-PR	0,82	0,98
Barcelona-Espanha	0,90	0,90	Mashad-Irã	0,84	0,96
Barra do Corda-MA	0,37	0,52	Medelin-Colômbia	0,08	0,51
Barreiras-BA	0,47	0,51	Ouricuri-PE	0,58	0,86
Belém-PA	0,33	0,93	Paratinga-SP	0,77	0,51
Belo Horizonte-MG	0,70	0,82	Parintins-AM	0,49	0,86
Benjamin Constant-AM	0,34	0,48	Petrolina-PE	0,67	0,89
Blumenau-SC	0,95	0,97	Piracicaba-SP	0,78	0,96
Bom Jesus-BA	0,58	0,29	Poços de Caldas-MG	0,60	0,78
Brusque-SC	0,93	0,95	Ponta Porã-PR	0,76	0,94
Bruxelas-Bélgica	0,95	0,97	Porto Alegre-RS	0,84	0,95
Campo Grande-MT	0,67	0,77	Punta del Este-Urug.	0,83	0,82
Campinas-SP	0,72	0,88	Quixadá-CE	0,51	0,70
Campina Grande-PB	0,66	0,83	Ribeirão Preto-SP	0,55	0,88
Catalão-GO	0,60	0,62	Riyadh-Aráb.Saudita	0,66	0,69
Chinchiná-Colômbia	0,28	0,67	San Juan-Paraguai	0,67	0,44
Concepción-Paraguai	0,62	0,88	Santa Maria-RS	0,88	0,98
Corumbá-MS	0,89	0,96	Santiago-Chile	0,81	0,77
Curutiba-PR	0,78	0,90	S. Feranado Apure-VE	0,57	0,83
El Turbio-México	0,98	0,98	São João-PI	0,54	0,35
Fonte Boa-AM	0,46	0,63	São Luiz-MA	0,47	0,59
Franca-SP	0,52	0,72	Singapura-Malásia	0,07	0,26
Guadalajara-México	0,50	0,86	Taguatinga-GO	0,28	0,65
Guaira-PR	0,89	0,94	Taracua-AM	0,32	0,61
Guiana-PE	0,46	0,68	Teheran-Iran	0,85	0,92
Hanoi-Vietnã	0,94	0,98	Teresina-PI	0,52	0,74
Hermosillo	0,76	0,93	Trinidad-Ilha	0,71	0,66
Iauaretê-AM	0,27	0,53	Uaupês-AM	0,32	0,91
Iguape-SP	0,95	0,95	Uberaba-MG	0,45	0,65
Jaguariaíva-PR	0,74	0,65	Vitória-ES	0,84	0,61

MÉDIA GERAL: Tmed = 0,64; Tef = 0,76

Tabela 3. Valores médios anuais do índice de confiança (c) e desempenho da estimativa de ETP obtido segundo o método de Thornthwaite com a temperatura média convencional (Tm) e com a temperatura média efetiva (Tef), para localidades brasileiras e estrangeiras.

Situação	Valor do índice de confiança (c)	Desempenho
Para localidades brasileiras		
Pela temperatura média convencional (Tmed)	0,66	Mediano
Pela temperatura média efetiva (Tef)	0,82	Muito bom
Para localidades estrangeiras		
Pela temperatura média convencional (Tmed)	0,68	Mediano
Pela temperatura média efetiva (Tef)	0,88	Muito bom

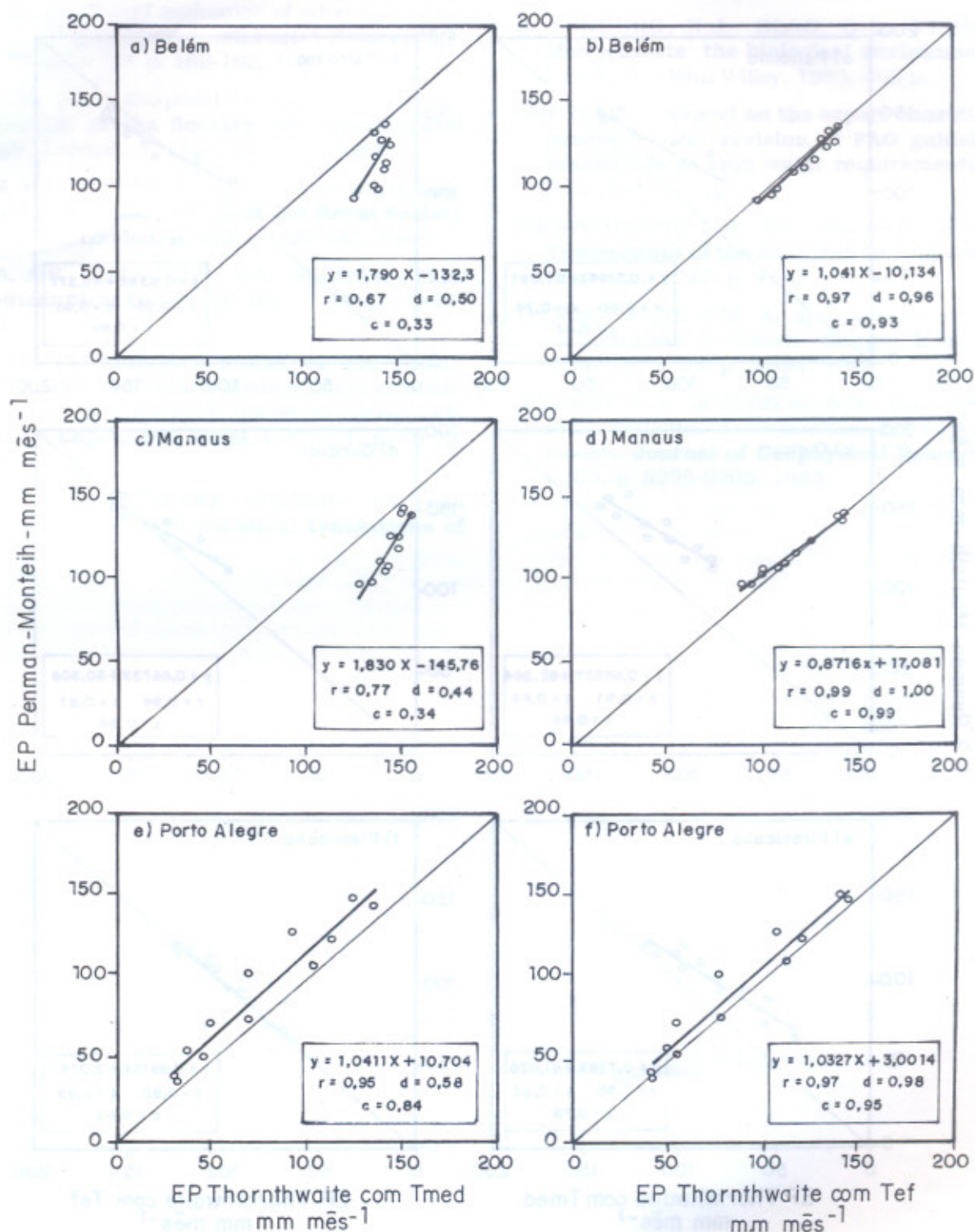


Figura 1. Correlação dos valores de evapotranspiração potencial (ETP), em mm.mês⁻¹, estimada pelo método de Penman-Monteith e de Thornthwaite utilizando a temperatura média (Tmed) e a temperatura efetiva (Tef), para localidades de clima superúmido e úmido.

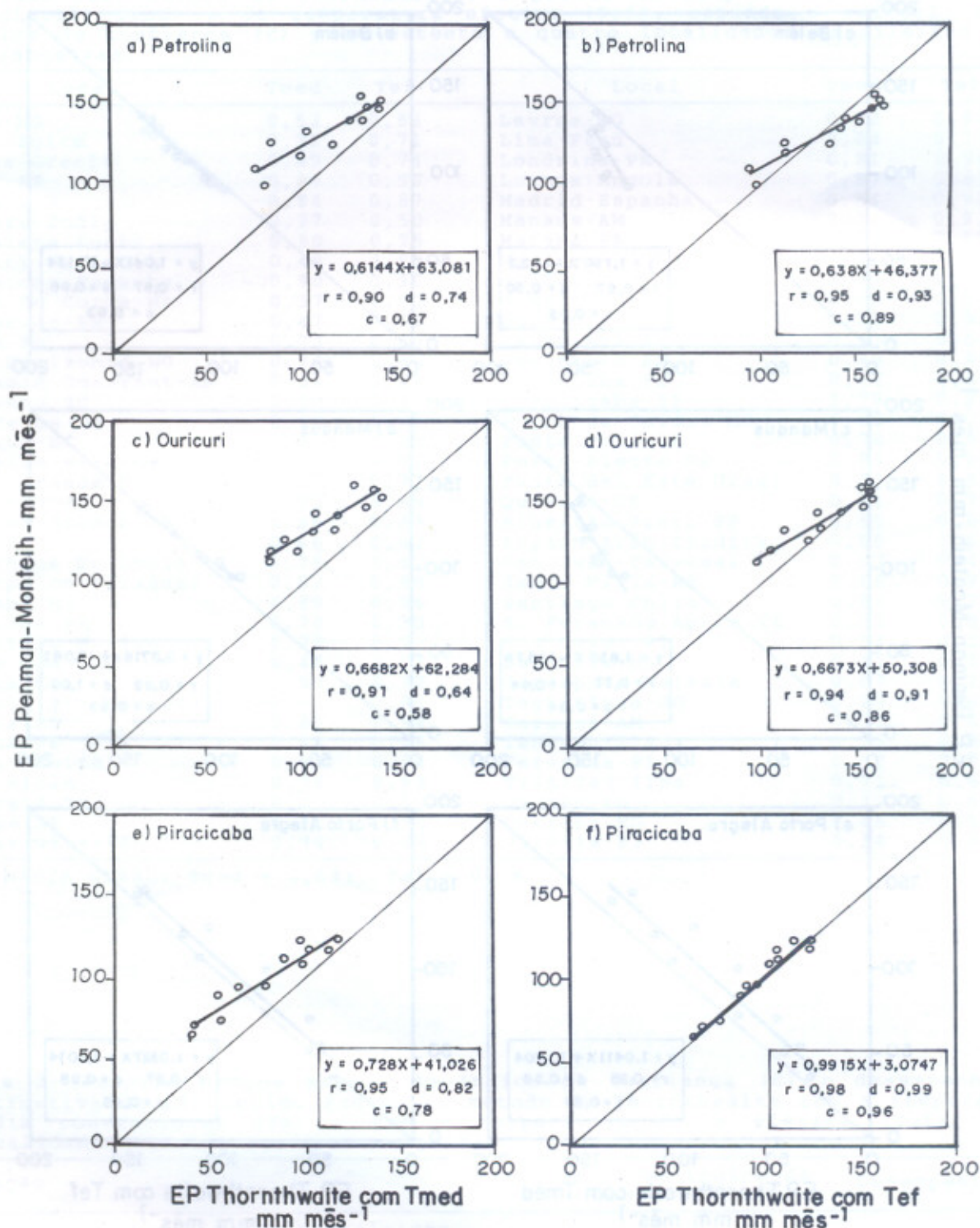


Figura 2. Correlação de valores de evapotranspiração potencial (ETP), em mm.mês⁻¹, estimada pelo método de Penman-Monteith e de Thornthwaite utilizando a temperatura média (Tmed) e a temperatura efetiva (Tef), para localidades de clima árido e sub-úmido.

- MALEK, E. Comparison of alternative methods for estimating ETP and evaluation of advection in the Bajah area, Iran. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 39, p. 185-192, 1987.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposium of the Society for Experimental Biology**, Londres, v. 19, p. 205-234, 1965.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of America**, London, n. 193, p. 120-143, 1948.
- PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N.A., SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba : FEALQ, 1997. 183 p.
- PERES, J.G., PEREIRA, A.R., FRIZZONE, J.A. Avaliação do modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizada pela FAO. **Engenharia Rural**, v. 6, n. 1, p. 65-75, 1995.
- PRUITT, W.O. Cycling relations between evapotranspiration and radiation. **Transactions of the ASAE**, Washington, v. 7, n. 3, p. 271-275, 1964.
- ROSENBERG, N.J., BLAD, D.L., VERMA, S.B. **Microclimate: the biological environment**. 2 ed. New York : John Willey, 1983. 495 p.
- SMITH, M. ed. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements**. Rome : FAO, 1991. 45 p.
- THORNTHWAITE, C.W. The moisture factor in climate. **Transactions of the American Geophysical Union**. Centerton, v. 27, p. 41-46, 1946.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, Centeron, v. 38, p. 55-94, 1948.
- WILLMOT, C.J., ACKLESON, S.G., DAVIS, R.E., J.J. et al. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.