

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS INDIRETOS PARA A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM PIRACICABA-SP

J. G. Nascimento¹, L. R. Sobenko², E. F. Elli², O. A. Figueira³, L. F. Santos³, F. R. Marin⁴

RESUMO: Diversos métodos diretos e indiretos permitem determinar a evapotranspiração de referência (ET_o). Dentre os indiretos, o modelo de Penman-Monteith (PM) é preconizado pela FAO-56 como padrão. No entanto, este modelo necessita de um grande número de dados meteorológicos, os quais nem sempre estão disponíveis em uma determinada região, o que justifica o estudo de modelos mais simples que demandam um menor número de dados. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes modelos empíricos para estimar a ET_o, comparando-os com o método padrão de PM, para o município de Piracicaba – SP, em escala diária, semanal, decenal e mensal. Os modelos avaliados quanto a precisão e acurácia foram: Camargo, Hargreaves-Samani, Linacre, Makkink, Priestley-Taylor e Thornthwaite. A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada por meio do coeficiente de determinação (R²) e dos índices de concordância de Willmott (d), confiança (c) e Nash-Sutcliffe (NSE). Em todas as escalas temporais, os modelos de Hargreaves-Samani, Makkink, Priestley-Taylor foram os que apresentaram melhores desempenhos para estimar a evapotranspiração quando comparados ao padrão PM.

PALAVRAS-CHAVE: Penman-Monteith; precisão; modelos empíricos.

COMPARISON OF THE PERFORMANCE OF INDIRECT METHODS TO ESTIMATE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN PIRACICABA-SP

ABSTRACT: Several methods allow us to estimate reference evapotranspiration. However, this model requires many meteorological data, which are not always available in a particular region, and that justifies the study of simpler models that use less data. This study aimed to

¹ Estudante de mestrado, Departamento de Biossistemas/ESALQ. Av. Pádua Dias, 11 - São Dimas, CEP 13418- 900, Piracicaba - SP, Brasil. E-mail: jessicagarcia@usp.br

² Estudante de doutorado, Departamento de Engenharia de Biossistemas /ESALQ, Piracicaba – São Paulo.

³ Estudante de mestrado, Departamento de Engenharia de Biossistemas /ESALQ, Piracicaba – São Paulo.

⁴ Prof. Doutor, Departamento de Engenharia de Biossistemas /ESALQ, Piracicaba – São Paulo.

evaluate the performance of different empirical models to estimate the ETo, comparing them to the standard PM method, for the city of Piracicaba - SP, in a time scale of daily, weekly, ten-day period, and monthly. The models evaluated for precision and accuracy were: Camargo, Hargreaves-Samani, Linacre, Makkink, Priestley-Taylor and Thornthwaite. Linear regression R^2 and the index of agreement of Willmott (d), reliability (c) and Nash-Sutcliffe (NSE) were used for model performance evaluation. In all temporal scales, models of Hargreaves-Samani, Makkink, Priestley-Taylor showed the best performance to estimate evapotranspiration compared to the PM standard.

KEYWORDS: Penman-Monteith; precision; accuracy; empirical models.

INTRODUÇÃO

A produção agrícola é condicionada por inúmeros fatores relacionados ao solo e atmosfera. Dentre eles se destaca o fornecimento adequado de água ao longo do ciclo das culturas. O manejo racional da água na agricultura irrigada depende, principalmente, da quantificação correta do conteúdo de água perdido por evapotranspiração dos cultivos (Oliveira et al., 2010).

A evapotranspiração das culturas pode ser determinada por métodos diretos e indiretos. Dentre os métodos, o lisímetro é considerado padrão e o mais preciso, porém possui como desvantagem o elevado custo que faz com que seu uso seja restrito a instituições de pesquisa para calibração regional de métodos indiretos (Ximenes et al., 2015). De acordo com Pereira et al. (1997), a medida direta, além de onerosa, é de difícil obtenção.

Desta forma, de maneira indireta, a evapotranspiração da cultura pode ser conhecida através da estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) corrigida pelo coeficiente de cultura. A estimativa da ETo pode ser feita por meio de modelos empíricos baseados em variáveis meteorológicas disponíveis no local de estudo. Entretanto, para que seja utilizado um modelo empírico em determinado local, é necessário verificar o seu desempenho e, quando necessário, fazer calibrações para minimizar erros de estimativa.

O método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (Allen et al., 1998) é considerado o método padrão de referência para a estimativa da ETo, porém requer uma grande quantidade de elementos meteorológicos (radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento) que pode ser de difícil obtenção e implicar na necessidade da utilização de metodologias mais simples.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes modelos empíricos para estimativa da ETo, sendo estes o de Thornthwaite, Hargreaves-Samani, Linacre, Makkink, Priestley-Taylor e Camargo, quando comparados com o método padrão de Penman-Monteith, para o município de Piracicaba-SP, em escala diária, semanal, quinzenal e mensal.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram obtidos do posto meteorológico da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), na cidade de Piracicaba – SP, com latitude de 22° 42' 30" S, longitude de 47° 38' 00" O, e altitude de aproximadamente 546 m. O clima do local é do tipo Cwa, segundo a classificação climática de Köppen (Guiselini, 2002).

No estudo foram analisados os dados no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2016, caracterizando uma série histórica de dez anos. Os dados foram analisados em escala diária, semanal, decenal e mensal.

Para a estimativa da ETo, foram utilizados os modelos empíricos de Thornthwaite (TW), Hargreaves-Samani (HS), Linacre (LN), Makkink (MK), Priestley-Taylor (PT) e Camargo (CA) para a estimativa da ETo e comparação com o método padrão de Penman-Monteith (PM). Os dados foram analisados em escala diária, semanal, decenal e mensal.

Para análise da relação entre os valores obtidos pelo método de PM e os estimados pelos demais métodos, os seguintes parâmetros estatísticos foram considerados: Índice de Concordância de Willmott - d (Willmott et al., 1985), Índice de Confiança - c (Camargo & Sentelhas, 1997) e Índice de Eficiência de Modelagem – EF (Nash & Sutcliffe, 1970), obtidos pelas equações (1), (2) e (3), respectivamente.

$$d = 1 - \frac{\sum(S_i - O_i)^2}{\sum(|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1)$$

$$c = r \cdot d \quad (2)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum(O_i - S_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

Em que,

d – índice de concordância, adimensional

S_i – evapotranspiração estimada pelos demais métodos, mm d⁻¹

O_i – evapotranspiração estimada por PM, mm d^{-1}

\bar{O} – evapotranspiração média estimada pelo método de PM, mm d^{-1}

c – índice de confiança, adimensional

r – coeficiente de correlação, adimensional

EF – índice de eficiência de modelagem, adimensional

\bar{S} – evapotranspiração média estimada pelos métodos, mm d^{-1} .

O índice “c” foi classificado de acordo com os critérios estabelecidos por Camargo & Sentelhas (1997), como de desempenho “ótimo” ($c \geq 0,85$); “muito bom” ($0,76 \leq c \leq 0,84$); “bom” ($0,66 \leq c \leq 0,75$); “mediano” ($0,61 \leq c \leq 0,65$); “sofrível” ($0,51 \leq c \leq 0,60$); “mau” ($0,41 \leq c \leq 0,50$); e “péssimo” ($c \leq 0,40$). Adicionalmente, foram plotados gráficos demonstrando a relação entre os valores obtidos pelo método de Penman-Monteith e os valores estimados pelos demais métodos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao serem comparados os valores dos índices estatísticos obtidos na estimativa da ETo em escala diária, semanal e decendial pelos métodos empíricos em relação ao método padrão de PM (Figuras 1, 2 e 3), foram observados melhores desempenhos para os métodos de HS, MK e PT, seguidos pelos métodos de CA, LN e TW. Em escala mensal, os modelos de HS, MK e PT apresentaram melhores correlações com o método de PM, porém, neste cenário, os métodos de CA, LN e TW também apresentaram bom desempenho (Figura 4).

Em todas as escalas temporais avaliadas, o método de HS apresentou maior concordância com o método de PM com índice “d” de, aproximadamente, 0,96. O índice “d” refere-se à aproximação dos valores de ETo estimados pelos métodos em relação ao de PM e seus valores variam de zero à unidade, representando dados sem concordância e com concordância perfeita, respectivamente (Araujo et al., 2013).

O método de PT foi classificado como ótimo, de acordo com o índice “c” nas escalas diária, semanal, decendial e mensal (0,92, 0,89 e 0,88, respectivamente). Em um estudo realizado por Camargo & Sentelhas, (1997) sobre o desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, o modelo de PT apresentou índice “c” de 0,79 na escala mensal, sendo, então, este método classificado como muito bom, o que indica boa correlação com o de PM e possibilita a sua aplicação em estudos de ETo mensal nesta localidade.

O método de MK utiliza o saldo de radiação como dado de entrada. Em escala decendial, este modelo foi classificado com desempenho muito bom (índice “c” de 0,80) e de boa

concordância com a ETo estimada por PM (índice “d” de 0,85). Sousa et al. (2010), em um estudo realizado em perímetros irrigados no estado de Sergipe, verificaram que os modelos que incorporam o saldo de radiação solar apresentaram os valores mais próximos daqueles obtidos pelo método de PM.

Os métodos de HS e CA superestimaram a evapotranspiração de referência em relação ao método padrão de PM nas escalas temporais analisadas. De acordo com Jensen et al. (1990), os métodos que se baseiam na temperatura do ar e na radiação, tendem a superestimar a evapotranspiração de referência em 15 a 25%, em climas úmidos. A superestimativa pode ser explicada pelo fato de esses métodos não considerarem em seu cálculo a umidade relativa do ar, a qual é um dos elementos meteorológicos que determinam o déficit de pressão de vapor, que indica a capacidade evaporativa do ar (Araujo et al., 2013).

O método de TW apresentou melhor desempenho e concordância conforme o aumento da escala temporal. Para este método, os índices “c” e “d” foram de 0,49 e 0,78, respectivamente, na escala diária e de 0,70 e 0,85 na escala mensal, o que pode indicar a utilização deste modelo para avaliar a ETo quando são utilizados dados mensais.

O modelo de CA obteve índices negativos de eficiência de modelagem “EF” nas escalas semanal, decendial e mensal (-0,32, -0,37 e -0,61) e positivo na escala diária (0,03), o que sugere melhor adequação deste método quando são analisados dados diários.

Este trabalho demonstra a diferença entre as estimativas da ETo pelos diferentes métodos testados. As estimativas de cada método diferem em função da escala temporal, da estrutura e dos coeficientes dos modelos, bem como das variáveis de entrada utilizadas. A escolha de um método adequado de acordo com as características meteorológicas da região estudada é importante, para que seja possível a realização de um dimensionamento adequado da necessidade hídrica das culturas e, conseqüentemente, para que os recursos hídricos sejam utilizados de modo racional.

CONCLUSÕES

Os métodos de Hargreaves-Samani, Makkink, Priestley-Taylor foram os que apresentaram melhores desempenhos para estimar a evapotranspiração de referência para a localidade de Piracicaba-SP, comparando-se com o método padrão de Penman-Monteith, em escala diária, semanal, decendial e mensal. Em escala mensal, os métodos de Thornthwaite, Linacre e Camargo também demonstram resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper, 56. Rome: FAO, p. 300, 1998.
- ARAÚJO, G. L.; DOS REIS, E. F., MARTINS, C. A. D. S.; BARBOSA, V. S.; RODRIGUES, R. R. Desempenho comparativo de métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, V. 5, n. 2, 2013.
- 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**, V. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- GUISELINI, C. Microclima e produção de gérbera em ambientes protegidos com diferentes tipos de cobertura. Piracicaba, 2002. 52 p. Dissertação (Mestrado na área de concentração Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP.
- JENSEN, M. E., BURMAN, R. D., ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York. ASCE, p. 332, 1990.
- OLIVEIRA, G.M.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; BISPO, R.C.; SANTOS, I.M.S.; ALMEIDA, A.C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte da Bahia. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, 104–109 p., 2010.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. V.1 Piracicaba: FEALQ, p. 183, 1997
- SOUSA, I. F. D., SILVA, V. D. P., SABINO, F. G., SILVA, B. K., & AZEVEDO, P. V. D. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, V. 14, n. 6, p. 633-644., 2010..
- WILLMOTT C.J.; ACKLESON S.G.; DAVIS R.E.; FEDDEMA J.J.; KLINK K.M.; LEGATES D.R.; O'DONNELL L.; ROWE C.M Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.
- XIMENES, A. R.; SANCHES, F. M.; CASTRO, M. A.; CORADI, P. C.; CUNHA, F. F. Utilizing Sevap Software To Estimate the Reference Evapotranspiration on the Minas Gerais State. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 159–172, 2015.

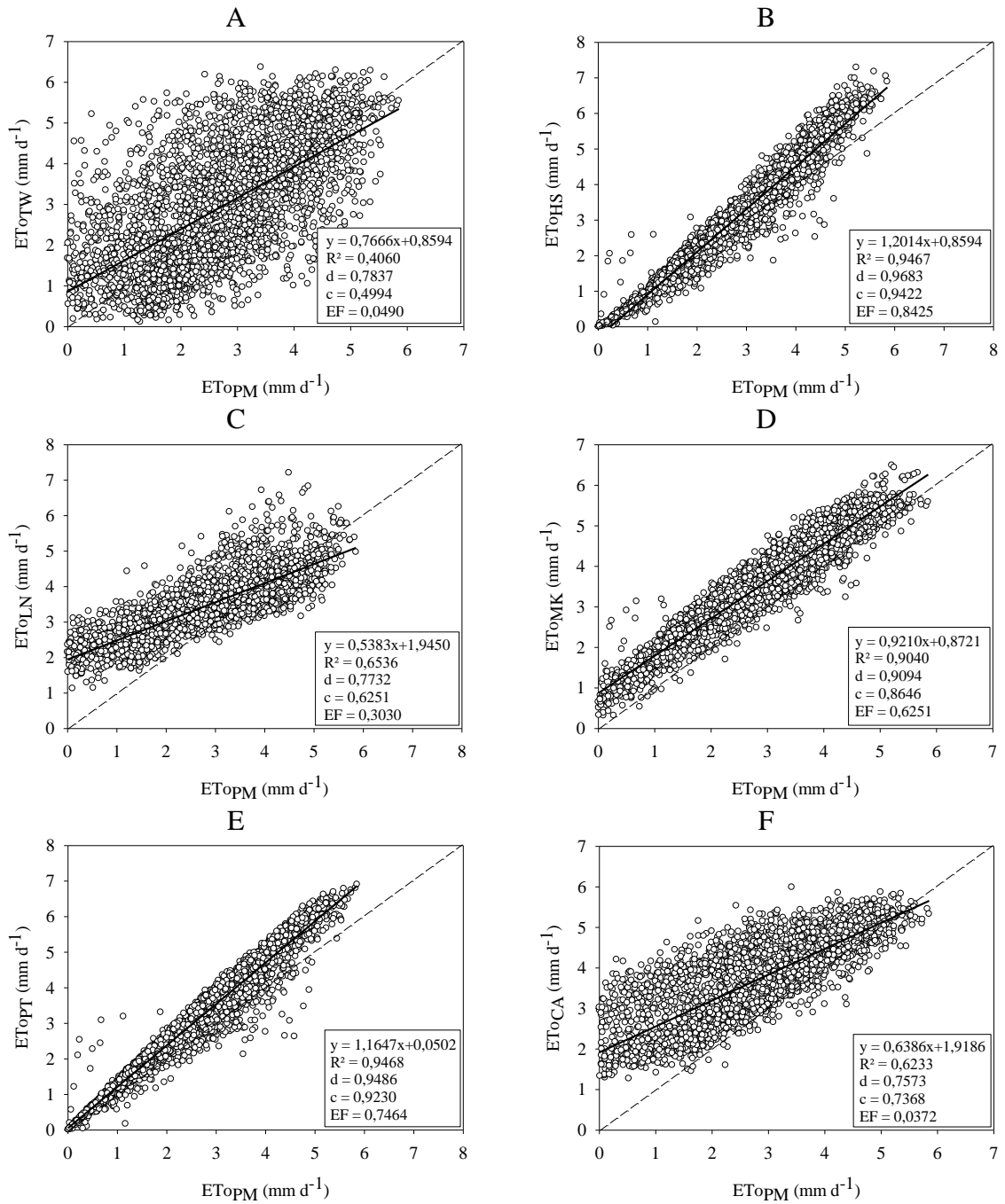


Figura 1. Relação entre a evapotranspiração de referência estimada, em escala diária, pelo método de Penman-Monteith (PM) e pelos métodos de Thornthwaite (A), Hargreaves-Samani (B), Linacre (C), Makkink (D), Priestley-Taylor (E) e Camargo (F) e critérios estatísticos: Índice de Concordância de Willmott (d), Coeficiente de Determinação (R^2), Índice de Confiabilidade de Camargo (c) e Índice de Eficiência de Modelagem (EF) utilizados para avaliar o desempenho dos diferentes modelos, com base no método padrão de Penman-Monteith, para a localidade de Piracicaba (SP), durante o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2016.

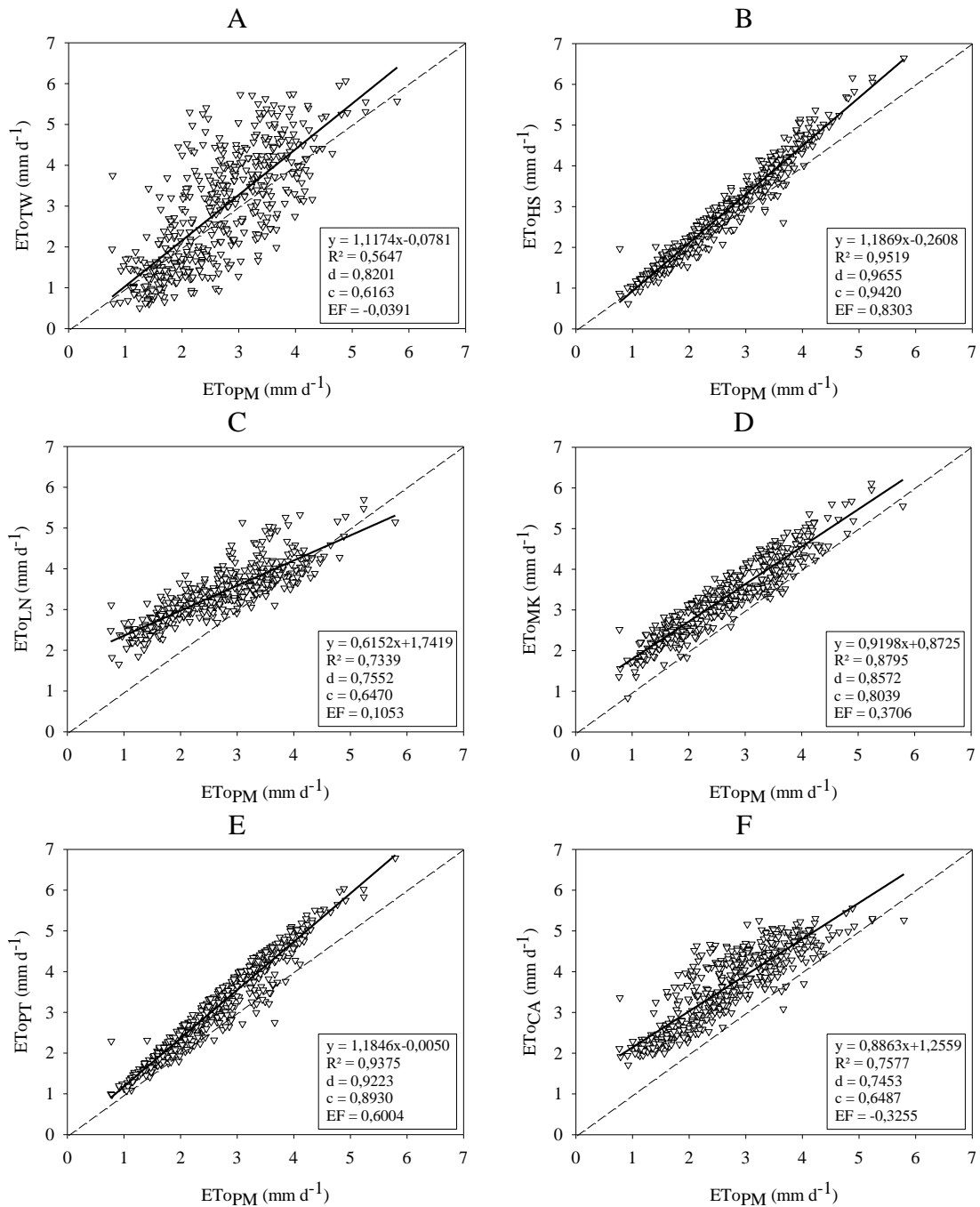


Figura 2. Relação entre a evapotranspiração de referência estimada, em escala semanal, pelo método de Penman-Monteith (PM) e pelos métodos de Thornthwaite (A), Hargreaves-Samani (B), Linacre (C), Makkink (D), Priestley-Taylor (E) e Camargo (F) e critérios estatísticos: Índice de Concordância de Willmott (d), Coeficiente de Determinação (R^2), Índice de Confiabilidade de Camargo (c) e Índice de Eficiência de Modelagem (EF) utilizados para avaliar o desempenho dos diferentes modelos, com base no método padrão de Penman-Monteith, para a localidade de Piracicaba (SP), durante o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2016.

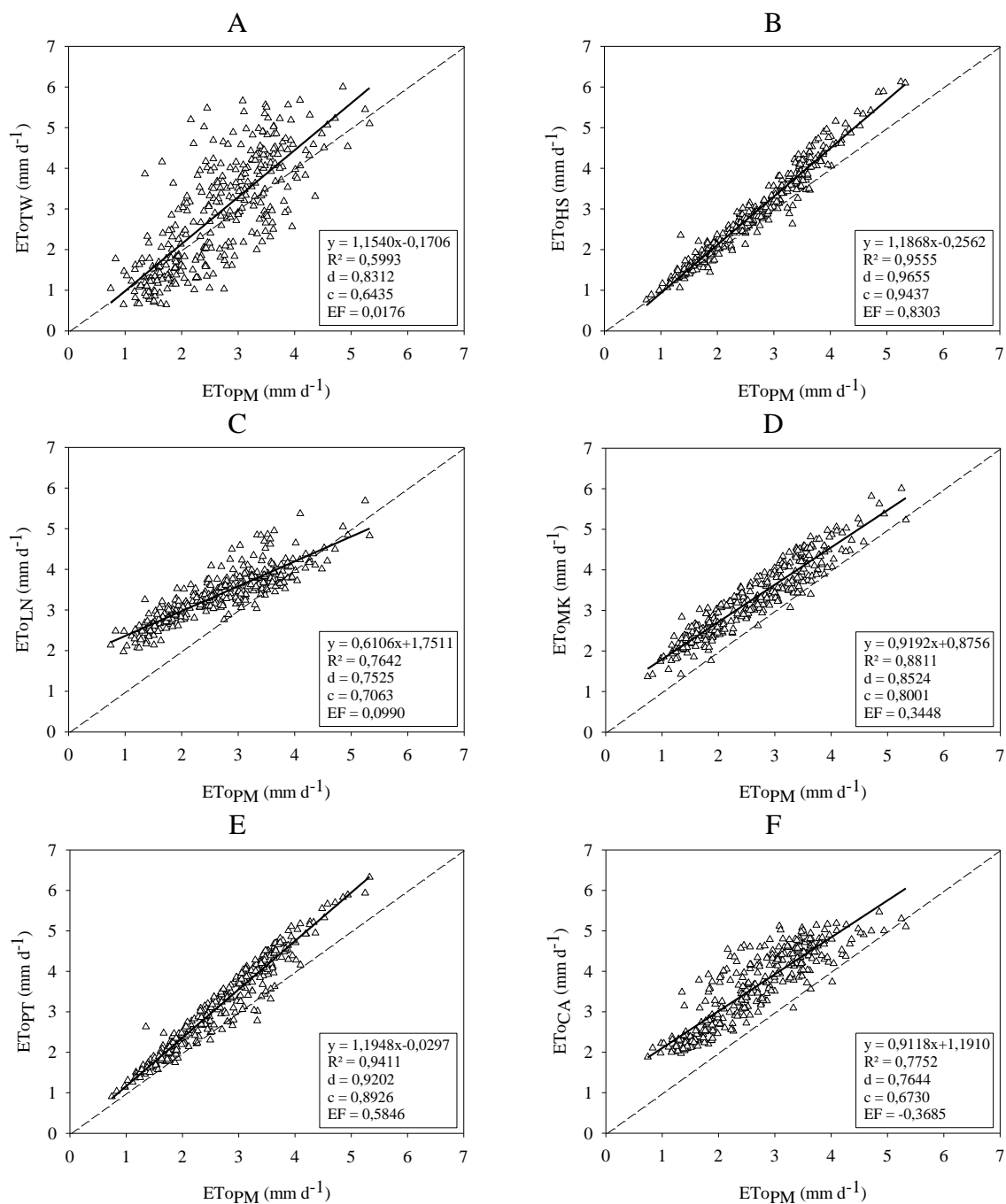


Figura 3. Relação entre a evapotranspiração de referência estimada, em escala decenal, pelo método de Penman-Monteith (PM) e pelos métodos de Thornthwaite (A), Hargreaves-Samani (B), Linacre (C), Makkink (D), Priestley-Taylor (E) e Camargo (F) e critérios estatísticos: Índice de Concordância de Willmott (d), Coeficiente de Determinação (R^2), Índice de Confiabilidade de Camargo (c) e Índice de Eficiência de Modelagem (EF) utilizados para avaliar o desempenho dos diferentes modelos, com base no método padrão de Penman-Monteith, para a localidade de Piracicaba (SP), durante o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2016.

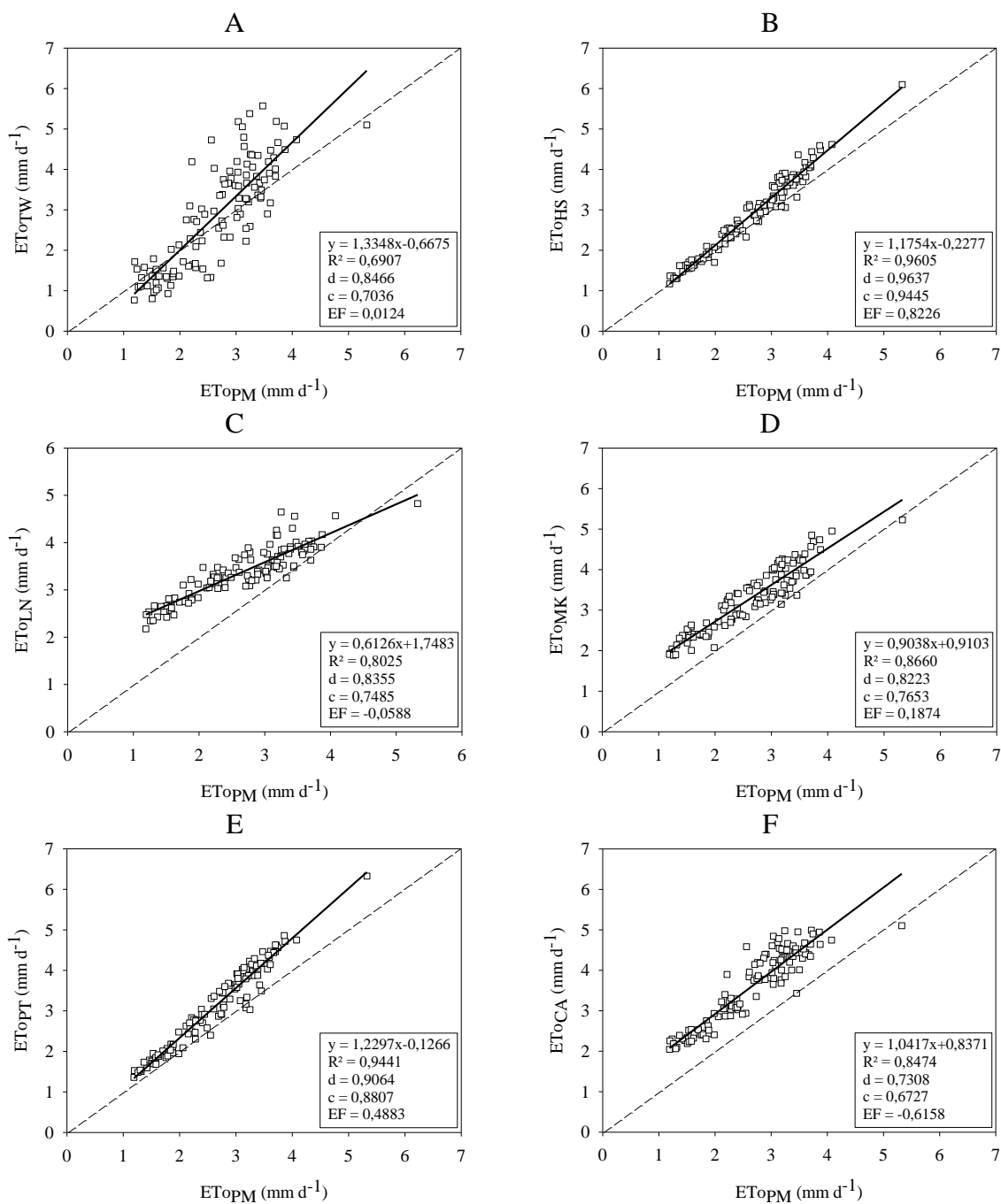


Figura 4. Relação entre a evapotranspiração de referência estimada, em escala mensal, pelo método de Penman-Monteith (PM) e pelos métodos de Thornthwaite (A), Hargreaves-Samani (B), Linacre (C), Makkink (D), Priestley-Taylor (E) e Camargo (F) e critérios estatísticos: Índice de Concordância de Willmott (d), Coeficiente de Determinação (R^2), Índice de Confiabilidade de Camargo (c) e Índice de Eficiência de Modelagem (EF) utilizados para avaliar o desempenho dos diferentes modelos, com base no método padrão de Penman-Monteith, para a localidade de Piracicaba (SP), durante o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2016.