

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

VALDINEY JOSÉ DA SILVA

**COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA UBERLÂNDIA-MG**

**Uberlândia
Julho-2009**

VALDINEY JOSÉ DA SILVA

**COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA UBERLÂNDIA-MG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Agronomia da Universidade
Federal de Uberlândia para obtenção do grau
de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Hudson de Paula Carvalho

Uberlândia
Julho-2009

VALDINEY JOSÉ DA SILVA

**COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA UBERLÂNDIA-MG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Agronomia da Universidade
Federal de Uberlândia para obtenção do grau
de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado pela Banca Examinadora em 09 de julho de 2009

Prof. Dr. Reginaldo de Camargo
Membro da banca

Prof. Dr. Lísias Coelho
Membro da Banca

Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho
Orientador

RESUMO

Quantificar a demanda hídrica de uma cultura para que esta não seja fator limitante a sua produção e ao mesmo tempo evitar aplicação excessiva de água é um desafio para a agricultura moderna. Uma das diversas maneiras para manejo eficiente de sistemas de irrigação é através da correlação entre a evapotranspiração de referência (ET_o) com evapotranspiração da cultura para cada um de seus estádios fenológicos. Muitas são as metodologias de estimativas da ET_o. Neste trabalho foram avaliados alguns métodos de estimativa da ET_o para as condições climáticas de Uberlândia-MG. Os métodos avaliados foram os de Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor e do tanque classe A. A ET_o estimada por esses métodos foram correlacionadas com as obtidas com o método de Penman-Monteith (Padrão FAO-56) através de índices estatísticos. O método de Priestley-Taylor apresentou ótimo desempenho enquanto que Thornthwaite e Hargreaves-Samani tiveram desempenho considerado bom. Já para o método de Camargo atribuiu-se desempenho apenas regular enquanto que o método do tanque classe A apresentou péssimo desempenho. O método de Thornthwaite apresenta-se como uma alternativa para se estimar a ET_o para Uberlândia-MG, especialmente quando se dispõe apenas da temperatura como elemento climatológico.

Palavras chave: evapotranspiração, metodologias, Penman-Monteith.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	05
2 REVISÃO DE LITERATURA	07
2.1 Importância da medição da evapotranspiração de referência	07
2.2 Métodos de medidas da evapotranspiração de referência	08
3 MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 Local de coleta dos dados climatológicos	11
3.2 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência	11
3.2.1 Método de Penman-Monteith (Padrão FAO-56)	11
3.2.2 Método do tanque classe A	12
3.2.3 Método de Camargo	13
3.2.4 Método de Thornthwaite	13
3.2.5 Método de Hargreaves-Samani	14
3.2.6 Método de Priestley-Taylor	15
3.3 Metodologia estatística	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5 CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

Á água, considerada o bem renovável mais abundante do planeta, é o principal componente da matéria viva da terra. Ela corresponde a 70% da superfície terrestre, tendo percentual semelhante na composição do corpo humano. Porém, apenas 2,5% da água do planeta é doce, e somente 0,8% do total de água do planeta está disponível para consumo humano (HODJA, 2005).

Não obstante esta ínfima quantidade de água doce corrente, um dos grandes problemas da sociedade moderna é a crescente poluição dos mananciais de água por resíduos industriais, domésticos ou agrícolas. Estudos mostram que se não forem tomadas as devidas providências para redução do índice de poluição, a quantidade de água potável disponível será insuficiente para atender à necessidade humana. Em algumas partes do planeta a água já é racionada para garantir o abastecimento, como por exemplo, no Oriente Médio. No Brasil, um dos países com a maior quantidade de água doce do mundo, em alguns centros urbanos, como na região Metropolitana de São Paulo, a grande poluição é um fator preocupante e já é feita racionalização da água na estação de seca para garantir o abastecimento da população. Resultados de pesquisas estimam que num futuro próximo os conflitos na terra se darão principalmente por disputa pela água.

A agricultura tem um papel importante na quantidade de água consumida. Por meio da irrigação as culturas são manejadas para que não tenham a água como fator limitante da produção. Porém, a irrigação é uma das atividades econômicas que apresenta a maior demanda de água, e, com o crescimento populacional, essa demanda tende a se tornar cada vez maior. No mundo, a irrigação é responsável por 70% do total de água consumida (UNESCO, 2003) e por 64,7% do consumo no Brasil (TUCCI et al., 2001).

O manejo eficiente da irrigação requer, além de métodos e tecnologia adequada de aplicação, estudos científicos específicos de consumo de água para cada cultura em épocas, locais e estádios de desenvolvimento distintos. O manejo adequado da água na agricultura não pode ser considerado uma etapa independente do processo de produção agrícola mas, sim, analisado dentro do contexto de um sistema integrado. Assim, para que se tenha um suprimento hídrico adequado da cultura agrícola e sem desperdício de água, diversas pesquisas científicas foram e são desenvolvidas em diferentes locais e épocas sob condições edafoclimáticas distintas para que sejam obtidos dados que representem o consumo hídrico para as diversas regiões agrícolas do mundo.

Como cada cultura apresenta uma necessidade hídrica distinta, há a necessidade de estabelecer um valor padrão para que facilite, entre outros fatores, o manejo hídrico das culturas quando manejadas com fins comerciais.

O consumo de água por uma cultura, quando esta está no seu máximo desenvolvimento vegetativo, é denominada evapotranspiração potencial da cultura. Quando esta é determinada para uma vegetação que cobre toda superfície, com altura de 8 a 15 cm em crescimento vegetativo ativo é denominada de evapotranspiração potencial de referência (ET_o) (PEREIRA et al., 1997). Esta é uma das diversas maneiras de se manejar adequadamente um sistema de irrigação de modo que não haja uso excessivo nem déficit hídrico para a cultura, objetivando o rendimento agrícola máximo sem desperdício de água. Assim, este trabalho objetivou avaliar diferentes metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições climáticas de Uberlândia-MG.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da medida da evapotranspiração de referência

A evapotranspiração é o processo conjugado da transpiração vegetal e da evaporação que a vegetação apresenta. A transpiração vegetal ocorre através dos estômatos e da cutícula das plantas, utilizando a água que o seu sistema radicular absorveu ao longo do perfil de solo explorado. A evaporação corresponde a perda da água depositada na superfície vegetal e da água contida no solo.

A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica, e pelo suprimento de água do solo às plantas. A disponibilidade de energia depende do local e da época do ano. O local é caracterizado pelas coordenadas geográficas (latitude e altitude) e pela topografia da região. A latitude determina o total diário de radiação solar potencialmente passivo de ser utilizado no processo evaporativo. Em um terreno plano, o total diário de radiação solar é modulado pela época do ano, que determina o ângulo de incidência dos raios solares. Em topografia acidentada, dependendo da estação do ano, terrenos com faces distintas terão disponibilidade diferentes de energia (PEREIRA et al., 1997).

A altitude também afeta diretamente a temperatura do solo e do ar, e a pressão atmosférica, que são fatores que influenciam a evapotranspiração. Para um local, a disponibilidade de radiação é controlada pelo poder refletor da superfície, que é expresso pelo coeficiente de reflexão. Superfícies mais claras refletem mais que aquelas mais escuras e, portanto, têm menos energia disponível. Portanto, uma vegetação mais escura, tipo floresta, reflete menos radiação solar que uma cultura ou um gramado. Logo, sob mesmas condições climáticas, uma floresta evapotranspira mais que um gramado (PEREIRA et al., 1997).

A demanda atmosférica é controlada pelo poder evaporante do ar. Quanto mais seco estiver o ar, maior será a demanda atmosférica. No entanto, existe inter-relação entre a demanda pelo ar e o suprimento de água pelo solo. Segundo Pereira et al. (1997), o solo é um reservatório ativo que, dentro de certos limites, controla a taxa de perda d'água pelas plantas.

A intensidade da evapotranspiração depende da proporção com que cada fenômeno isolado atua. Assim, é necessário estabelecer condições padrões para que possam estudar comparativamente as diferentes formas de evapotranspiração.

2.2 Métodos de medidas da evapotranspiração de referência

A estimativa da evapotranspiração de referência pode ser feita por vários métodos. Alguns são de uso universal enquanto outros são de uso restrito. Didaticamente, esses métodos podem ser divididos em dois grandes grupos, ou seja, métodos diretos e métodos indiretos. (BERNARDO et al., 2006). A medida direta da evapotranspiração é extremamente difícil e onerosa. Difícil porque exige instalações e equipamentos especiais, e onerosos porque tais estruturas são de alto custo (PEREIRA et al., 1997). Os métodos indiretos de estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) determinam-na por meio de um fator determinado para cada região e para cada método indireto. Esse fator é determinado através da correlação entre a evapotranspiração medida em centros de pesquisa onde existam lisímetros com os estimados para cada método indireto (BERNARDO et al., 2006).

Os métodos indiretos de estimativas da ET_o são agrupados em cinco categorias conforme os princípios envolvidos no seu desenvolvimento, em: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação dos turbilhões. Os métodos empíricos são resultantes de correlações entre a evapotranspiração medida em condições padronizadas e os elementos meteorológicos medidas em postos também padrões. O método aerodinâmico é um método micrometeorológico, com embasamento físico-teórico da dinâmica dos fluídos e transporte turbulento. Os métodos de balanço de energia baseiam-se na contabilização das interações dos diversos tipos de energia com a superfície. Os métodos combinados combinam os efeitos do balanço de energia com aquelas do poder evaporante do ar. Já o método da correlação dos turbilhões baseia-se no aparecimento de turbilhões resultantes da interação da atmosfera com a superfície (PEREIRA et al., 1997).

O método do tanque classe A é um método empírico bastante difundido entre os agricultores. Por ele estima-se a evapotranspiração de referência a partir da medida direta da evaporação da água livre no tanque (EV) considerando as condições meteorológicas da região e o local em que o tanque está instalado em relação ao meio circundante por meio do coeficiente do tanque (K_t) (BERNARDO et al., 2006).

O método de Thornthwaite foi proposto para estimativa da evaporação potencial (ETP) mensal de um gramado como um elemento climatológico, visando à classificação climática, tida como a chuva ideal para que uma região não apresente nem excesso nem deficiência hídrica durante o ano. Esse é um método empírico que pode ser usado para estimar a evapotranspiração de referência por meio de uma equação que tem somente a temperatura do

ar como variável independente, motivo pelo qual tem sido bastante criticado. (PEREIRA et al., 1997).

O método de Camargo também é um método indireto de estimativa da ETo proposto por Camargo (1971), baseado nos resultados da equação de Thornthwaite porém com uma fórmula mais simples, mas com a mesma eficiência para estimativas da evapotranspiração de referência em períodos de 10 ou 30 dias (PEREIRA et al., 1997).

O método de Hargreaves-Samani, outro modelo de equação de estimativa de ETo, também é um método empírico. Esse método foi desenvolvido para as condições climáticas da Califórnia (clima semi-árido) com alguns modelos variantes para adaptações em locais com temperaturas máxima e mínima fortemente dependente da altitude ou para áreas em que estas temperaturas são relativamente constantes (PEREIRA et al., 1997).

Já o método de Priestley-Taylor é um método indireto de estimativa de ETo que se baseia no balanço de energia. Esse método pode ser interpretado como uma versão do método de Penman. Ele foi proposto a partir da análise de dados observados em lisímetros obtidos na ausência de advecção e com superfície úmida após chuva superior a 20 mm ocorrida três dias antes e também por dados de expedições marítimas (PEREIRA et al., 1997).

O método de Penman-Monteith padrão FAO-56 é um método indireto e combinado de estimativa de ETo proposto em 1990 por um grupo de 14 especialistas reunidos pela FAO. Dessa reunião saiu a resolução de adotá-lo como o método mais adequado de estimar a evapotranspiração de uma cultura na escala diária por evitar o uso do coeficiente de cultura (K_c) na conversão de ETo para ETc (Evapotranspiração Potencial da Cultura).

A estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) de uma localidade constitui-se numa dificuldade ao planejamento correto da irrigação, pois para a maior parte dos métodos utilizados são necessários dados climatológicos e/ou coeficientes de ajuste normalmente não disponíveis ao irrigante; além disso, existem problemas de sub ou superestimativas da lâmina evapotranspirada (OLIVEIRA; CARVALHO, 1998).

Muitos trabalhos, em diferentes partes do mundo, vem avaliando o desempenho dos diferentes métodos de estimativa da ETo (CAMARGO; SENTELHAS, 1996). As conclusões variam muito segundo cada autor, o que dificulta ao usuário decidir sobre a conveniência de qual método adotar (PEREIRA et al., 1997). O ideal seria que um método para estimar a evapotranspiração incorporasse todos os fatores que a influenciam, tais como a morfologia da planta, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, estágio de crescimento, condições de solo, principalmente a forma com que as propriedades físicas do solo afetam diretamente a água disponível para a extração pelo sistema radicular e, é claro, as condições

microclimáticas nos aspectos dos processos de transferências de energia e massa (SEDIYAMA, 1996). Machado e Mattos (1999) ao avaliarem o desempenho de três métodos de estimativas de ETo (Penman, tanque classe “A” e tanque 20 m²), verificou que a melhor estimativa dentre esses três métodos foi obtida com o método de Penman, segundo eles, devido ao seu melhor ajuste aos dados lisimétricos. Santiago et al. (2002), ao avaliar a ETo por meio de lisímetro de pesagem automática e estimada por Penman-Monteith (FAO-56) nas escalas mensal e decendial, observaram que as relações estatísticas resultantes não diferiram daquelas relatadas por Allen et al. (1989), sendo possível concluir-se que face às dificuldades de mensuração lisimétrica de ETo, a performance da parametrização proposta pela Food and Agriculture Organization – FAO para a equação de Penman-Monteith, pode ser considerada como adequada tanto para estimativas mensais como decendiais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de coleta de dados

Os dados climatológicos necessários para execução desse trabalho foram obtidos na Estação Climatológica Uberlândia situada no Campus Santa Mônica, pertencente à Universidade Federal de Uberlândia. A estação climatológica faz parte da rede de estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e se encontra na latitude de 18° 55' 25''S, longitude de 48° 17' 19''W e altitude de 872 m. No Banco de dados da Estação Climatológica foram obtidos os valores da umidade relativa do ar, as temperaturas mínima, média e máxima, a velocidade do vento, a evaporação medida no tanque classe A e a insolação. A umidade relativa do ar, a temperatura média do ar e a velocidade do vento geraram médias a partir de três leituras diárias: a primeira feita às 9 horas, a segunda às 15 horas e a última às 21 horas. Esse conjunto de dados foi obtido para o período de 366 dias com coletas realizadas no ano de 2004.

3.2 Métodos de estimativa da evapotranspiração potencial comparados

Foram avaliados os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência de Penman-Monteith (Eq. 1), conforme Allen et al. (1998); tanque classe A (Eq. 2), Camargo (Eq. 3), Thornthwaite (Eq. 4), Hargreaves-Samani (Eq. 5), Priestley-Taylor (Eq. 6), conforme Pereira et al. (2002).

3.2.1 Método de Penman-Monteith (Padrão FAO-56)

$$ETP = \frac{0,408 \cdot s \cdot (Rn - G) + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (es - ea)}{T + 275}}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \dots\dots\dots Eq. 1$$

Em que:

Rn = radiação líquida total diária, MJ m⁻² dia⁻¹;

G = fluxo de calor no solo, MJ m⁻² dia⁻¹;

U₂ = velocidade do vento, medida a dois metros de altura, m s⁻¹;

T = temperatura média do ar, °C;

γ = constante psicrométrica, 0,063 kPa °C⁻¹;

e_s = pressão de saturação de vapor, kPa;

e_a = pressão parcial de vapor, kPa;

s = é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, kPa °C⁻¹.

A pressão de saturação de vapor foi estimada pela Equação 1.1.

$$e_s = 0,06108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5}{273,3+T}\right)} \dots\dots\dots \text{Eq. 1.1}$$

A pressão parcial de vapor será estimada pela equação 1.2.

$$e_a = \frac{(e_s \cdot UR)}{100} \dots\dots\dots \text{Eq. 1.2}$$

A declividade da curva de pressão de vapor foi calculada pela equação 1.3.

$$s = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 273,3)^2} \dots\dots\dots \text{Eq. 1.3}$$

3.2.2 Método do tanque classe A

$$ET_o = K_p \cdot ECA \text{ (mm)} \dots\dots\dots \text{Eq. 2}$$

em que K_p é o coeficiente do tanque (adimensional).

Os valores do coeficiente do tanque para as condições locais de Uberlândia-MG foram obtidos com base Equação 2.1.

$$K_p = 0,482 + 0,024 \ln F - 0,000376 U + 0,0045 UR \dots\dots\dots \text{Eq. 2.1}$$

Em que:

F = distância da área da bordadura em relação ao centro do tanque, m;

U = velocidade do vento, km h⁻¹;

UR = umidade relativa do ar, %.

3.2.3 Método de Camargo

$$ETP = 0,01 \cdot Q_o \cdot T \cdot ND \dots\dots\dots Eq. 3$$

Em que:

ETP = evapotranspiração potencial, mm dia⁻¹;

Qo = irradiância solar global extraterrestre, mm dia⁻¹;

T = temperatura média do ar, °C;

ND = número de dias do período considerado.

3.2.4 Método de Thornthwaite

$$ETP = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{Tn}{I} \right)^a \text{ para } 0 \leq Tn < 26,5 \text{ °C} \dots\dots\dots Eq. 4$$

Em que:

ETP = evapotranspiração potencial padrão, mm dia⁻¹;

Tn = temperatura média do mês, °C;

I = índice que expressa o nível de calor disponível na região, °C.

No caso de $Tn \geq 26,5 \text{ °C}$ a ETp foi calculada pela Equação 4.1.

$$ETP = -415,85 + 32,24 \cdot Tn - 0,43 \cdot Tn^2 \dots\dots\dots Eq. 4.1$$

O valor do índice I foi calculado da seguinte forma (Eq. 4.2):

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 \cdot T_n)^{1,514} \dots\dots\dots \text{Eq. 4.2}$$

O expoente a, da equação 2, sendo função de I, também é um índice térmico regional, e foi calculado por função polinomial (Eq 4.3).

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \dots\dots\dots \text{Eq. 4.3}$$

Os coeficientes I e a, calculados com as normais climatológicas, são características da região, tornam-se constantes, sendo independentes do ano de estimativa de ETp.

O valor de ETp calculado, por definição, representa o total mensal da evapotranspiração que ocorreria naquelas condições térmicas, mas para um mês padrão de 30 dias, em que cada dia teria 12 horas de fotoperíodo. Portanto, para se obter a ETP do mês correspondente, esse valor de ETp foi corrigido em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês ou seja:

$$ETP = ETp \cdot Cor \dots\dots\dots \text{Eq. 4.4}$$

$$Cor = \left(\frac{ND}{30}\right) \cdot \left(\frac{N}{12}\right) \dots\dots\dots \text{Eq. 4.5}$$

Em que:

ND = número de dias do mês em questão;

N = fotoperíodo médio daquele mês, h.

3.2.5 Método de Hargreaves-Samani

$$ETP = 0,0023 \cdot Q_o \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \cdot (T_{med} + 17,8) \dots\dots\dots \text{Eq. 5}$$

Em que:

ETP = evapotranspiração potencial, mm dia⁻¹;

Q_0 = irradiância solar global extraterrestre, mm dia^{-1} ;

T_{max} = temperatura máxima do ar, °C;

T_{min} = temperatura mínima do ar, °C;

T_{med} = temperatura média do ar, °C.

3.2.6 Método de Priestley-Taylor

$$ETP = 1,26 \cdot W \cdot \frac{(R_n - G)}{2,45} \dots\dots\dots \text{Eq. 6}$$

Em que:

R_n = radiação líquida total diária, $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$;

G = fluxo total diário de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$;

W = fator de ponderação dependente da temperatura e do coeficiente psicrométrico.

Sendo que W é calculado pelas Equações 6.1 e 6.2.

$$W = 0,407 + 0,0145 \cdot T \quad (0 \text{ °C} < T < 16 \text{ °C}) \dots\dots\dots \text{Eq. 6.1}$$

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T \quad (16,1 \text{ °C} < T < 32 \text{ °C}) \dots\dots\dots \text{Eq. 6.2}$$

O fluxo de calor no solo foi calculado a partir da temperatura do ar, como detalhado pela Equação 6.3.

$$G = 0,38 \cdot (T_d - T_{-3d}) \dots\dots\dots \text{Eq. 6.3}$$

Em que:

T_d = temperatura média do ar do dia em questão, °C;

T_{-3d} = temperatura média do ar dos 3 dias anteriores, °C.

3.3 Metodologia estatística

Os valores de evapotranspiração potencial estimados nos métodos do tanque classe A, Camargo, Thornthwaite, Hargreaves-Samani e Priestley-Taylor Foram confrontados com os valores estimados por Penman-Monteith (Padrão FAO-56), através de índices estatísticos, conforme Camargo e Sentelhas (1996). Foram calculados o índice de exatidão (Eq. 7), o coeficiente de correlação de Pearson (Eq. 8) e por último, o coeficiente de confiança ou desempenho (Eq. 9).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \dots\dots\dots \text{Eq. 7}$$

Em que:

d = índice de exatidão adimensional;

P_i = valor estimado;

O_i = valor observado;

O = média dos valores observados.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots \text{Eq. 8}$$

Onde, x₁, x₂, ..., x_n e y₁, y₁, ..., y_n são os valores medidos de ambas as variáveis. Os valores médios de x e y foram calculados, respectivamente, pelas Equações 8.1 e 8.2.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots 8.1$$

e

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \dots\dots\dots 8.2$$

Em que:

r = coeficiente de correlação de Pearson, adimensional.

$$c = r \cdot d \dots\dots\dots\text{Eq. 9}$$

Em que:

c = coeficiente de confiança ou desempenho, adimensional.

O critério adotado para interpretar o desempenho dos métodos pelo índice “ c ”, para as médias diárias da ETo, estão compilados na Tabela 1.

Tabela 1. Critério de interpretação do desempenho do método de estimativa da evapotranspiração, 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
\leq 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1996).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os gráficos e os modelos resultantes da regressão linear considerando os métodos de estimativa utilizados na análise tendo o método de Penman-Monteith (Padrão FAO-56) como padrão.

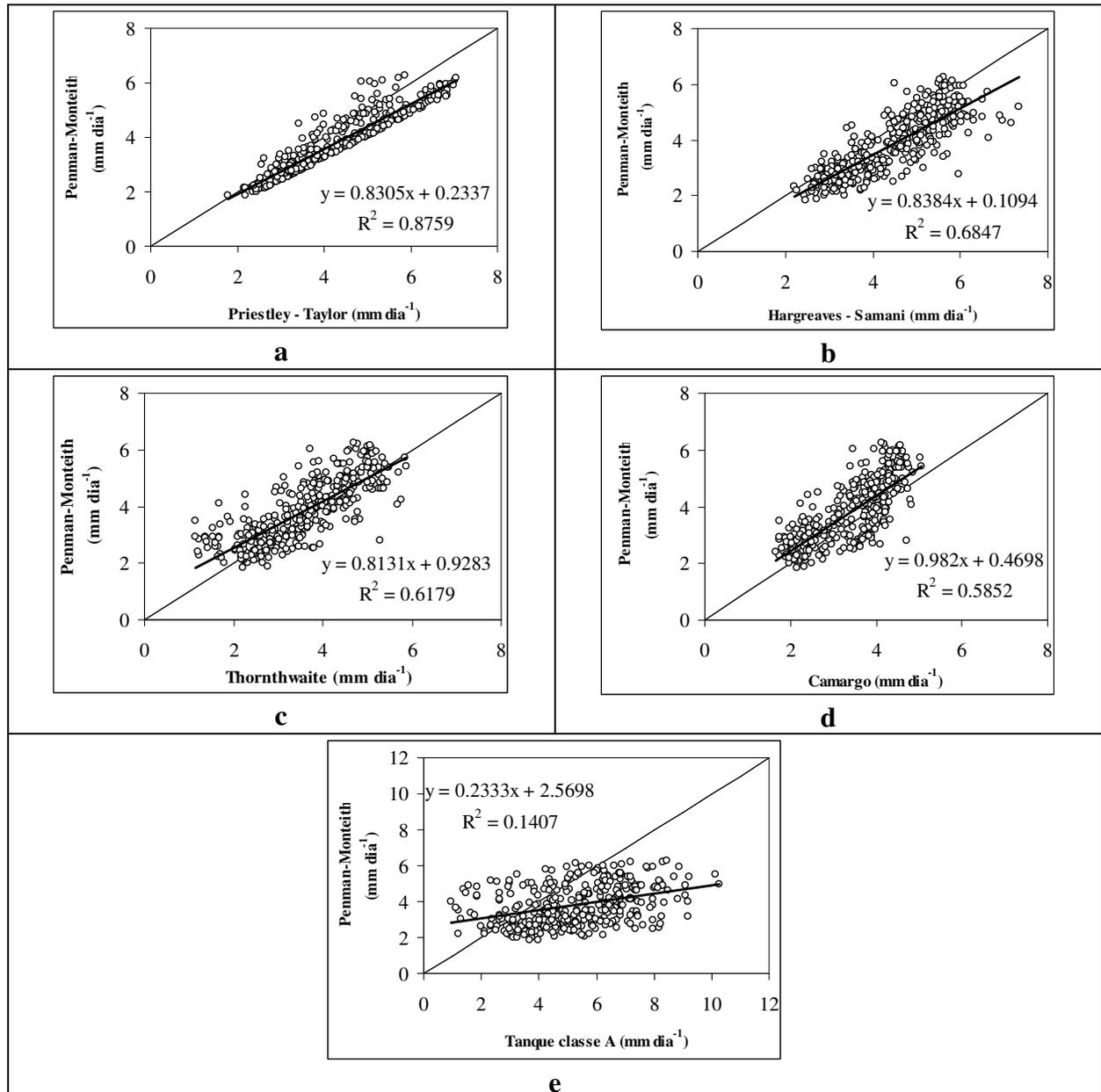


Figura 1. Comparação entre os valores diários da ETo estimados pelo método de Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991) e os obtidos pelos métodos de Priestley-Taylor (a), Hargreaves-Samani (b), Thornthwaite (c), Camargo (d), e tanque classe A (e), em Uberlândia, MG.

Analisando a Figura 1, nota-se que os métodos de Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani e tanque classe A apresentaram tendência de superestimar os valores de ETo estimados pelo método padrão Penman-Monteith. Por outro lado, os métodos de Thornthwaite e Camargo, na maioria dos medidos, subestimaram tais valores.

Analisando a Tabela 2, verifica-se que o método de Priestley-Taylor apresentou o melhor desempenho dentre os métodos avaliados, sendo considerado ótimo. Os métodos de Hargreaves-Samani foram classificados com desempenho bom e o método de Camargo obteve desempenho apenas mediano. Já o método do tanque classe A teve o pior desempenho recebendo classificação péssima.

Tabela 2. Desempenho dos métodos de estimativa da ETo diária, segundo índice de desempenho “c”, para Uberlândia – MG.

Métodos	r¹	d²	c³	Desempenho
Priestley-Taylor	0,94	0,92	0,86	Ótimo
Hargreaves-Samani	0,83	0,84	0,70	Bom
Thornthwaite	0,79	0,87	0,68	Bom
Camargo	0,76	0,82	0,63	Mediano
Tanque classe A	0,37	0,50	0,19	Péssimo

¹: Coeficiente de correlação de Pearson; ²: índice de exatidão; ³: índice de desempenho de camargo.

O método de Priestley-Taylor apresentou coeficiente de correlação de Pearson “r” de 0,94 e índice de exatidão “d” de 0,92, o que resultou em índice de desempenho de camargo “c” igual 0,86. O ótimo desempenho desse método já era esperado por ele se assemelhar ao método padrão (Penman-Monteith) exigindo praticamente os mesmos elementos climatológicos. Alguns desses elementos climatológicos são difíceis de serem medidos, exigindo instalação de equipamentos específicos. Isso restringe sua aplicação para locais onde não há carência dos mesmos. O modelo de regressão linear com R² igual a 0,88 se ajustou bem para os resultados de ETo diários, porém para valores maiores o método de Priestley-Taylor (Figura 1a) tende a superestimá-los.

Para os métodos de Hargreaves-Samani e de Thornthwaite os resultados foram semelhantes, com índice de desempenho “c” igual a 0,70 e 0,68, respectivamente. Hargreaves-Samani apresentou coeficiente de correlação de Pearson 0,83 e índice de exatidão igual a 0,84 e Thornthwaite 0,79 e 0,87 respectivamente. Ambos apresentaram desempenho

bom, mas para localidades que disponha somente de dados de temperatura como elemento climatológico, pode-se aplicar o método de Thornthwaite para estimar a ETo com boa confiabilidade. Para Conceição (2003), os métodos que empregam apenas a temperatura do ar limitam a representatividade das condições climáticas para efeito de estimativas da evapotranspiração de referência. Isso porque conforme as condições de umidade e vento, a demanda hídrica atmosférica será diferente para os mesmos valores de temperatura do ar. Nota-se também que o método de Thornthwaite (Figuras 1c) com R^2 0,62 tende em superestimar os valores de ETo estimados por Penman-Monteith, principalmente os mais baixos. Já Hargreaves-Samani (Figuras 1b) com R^2 0,68 apresentou comportamento contrário subestimando valores baixos de ETo e superestimando os mais altos. Conceição (2003), ao avaliar diferentes métodos de estimativas de ETo com base na temperatura do ar às condições do Baixo Rio Grande, SP obteve comportamento semelhante para o método de Thornthwaite com R^2 igual a 0,67. Porém, para o método de Hargreaves-Samani, Conceição (2003) obteve R^2 de 0,84. Para Conceição (2003) a semelhança entre a região para a qual o método de Hargreaves-Samani foi desenvolvido com as do noroeste paulista justifica o bom desempenho do método na região.

Ao avaliar-se o método de Camargo para estimativas diárias de ETo encontrou-se índice de desempenho de camargo “c” de 0,63 com 0,76 e 0,82 para o coeficiente de correlação de Pearson e índice de exatidão, respectivamente, resultados considerados apenas mediano. Esses resultados corroboram com os obtidos por Conceição (2003) para as condições climáticas do Baixo Rio Grande, SP. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,58. Para quaisquer estimativas de ETo verifica-se sempre tendência em superestimá-las.

A classificação como desempenho péssimo do método do tanque classe A, com índice de desempenho apenas 0,19 e de 0,37 e 0,50 para coeficiente de correlação de Pearson e índice de exatidão respectivamente, contraria os resultados obtidos por Carvalho et al. (2006), que obtiveram desempenho ótimo ao comparar os valores de ETo estimados pelo tanque classe A e os medidos por lisímetro de pesagem automática para a região de Seropédica-RJ. Oliveira et al. (2008) tiveram desempenho satisfatório com o método do tanque classe A para estimativas diária de ETo para a região de Viçosa, MG.

Com R^2 de 0,14 para o modelo de regressão linear, o método do tanque classe A tende a subestimar ou superestimar os valores muito baixos de ETo ou os mais altos, respectivamente. Vescove e Turco (2005) ao avaliar métodos de estimativa da ETo para a região de Araraquara-SP verificaram que o método do tanque classe A superestima os valores de ETo calculados pelo método de Penman-Monteith nos períodos de verão-outono e inverno-

primavera, comportamentos esses semelhantes aos obtidos nesse trabalho. Mendonça et al. (2003) obtiveram R^2 igual a 0,43 para ETo diária evidenciando o baixo ajuste desse modelo de regressão para a região Norte Fluminense. O péssimo desempenho desse método em Uberlândia, MG pode ser atribuído à ocorrência de altas temperaturas aliada a baixas umidades relativa, principalmente no período que antecede o início das chuvas nos meses de setembro e outubro e por altos índices pluviométricos concentrados no verão, respectivamente. Altas temperaturas ocasionam superaquecimento da água nas bordas do tanque classe A e isso, relacionado com baixa umidade relativa, superestima a evaporação medida diretamente no tanque, enquanto altos índices pluviométricos concentrados nos meses de dezembro a março principalmente, dificultam as leituras da evaporação.

6 CONCLUSÕES

- 1 O método de Priestley-Taylor mostrou-se mais exato e confiável em relação aos demais métodos, com índice de desempenho “c” considerado ótimo;
- 2 Quando se dispõe apenas de dados de temperatura do ar, pode-se usar o método de Thornthwaite com boa confiabilidade;
- 3 Não se recomenda o uso do método do tanque classe A para a estimativas diária de ETo em Uberlândia, MG.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: ed. UFV, 2006. 625 P.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Equação para a estimativa da evapotranspiração potencial baseada no método de Hargreaves – 1974. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 77-81, 1996.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica – RJ, utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p.187-195, 2006.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144p. (Irrigation and Drainage Paper 24).
- HODJA, A. **Gestão da política de recursos hídricos: O papel da agência do rio Tietê**. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo – SP, p. 31-40, Monografia, 2005.
- MACHADO, R. E.; MATTOS, A. Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 193-197, 2000.
- MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.275-279, 2003.
- OLIVEIRA, M. A. A.; CARVALHO, D. F. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*zea mays* L.) em seropédica e campos, Estado do rio de janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 132-135, 1998.
- OLIVEIRA, A. R.; TAGLIAFERRE, C. SEDIYAMA, C. G.; MATERAM, F. J. V.; CECON, P. R. Desempenho do irrigômetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 166-173, 2008.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba, FEALQ, 1997. 175 p.

SANTIAGO, A.V.; PEREIRA A. R.; FOLEGATTI, M. V.; MAGGIOTTO, S. R. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decendial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 57-66, 2002.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-12, 1996.

SILVA, F. C.; FIETZ, C. R.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, F. A. C. Distribuição e frequência da evapotranspiração de referência de cruz das almas, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.284-286, 1998.

TUCCI, C.E.M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O.M. **Gestão de água no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2001. 156 p.

UNESCO. UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Water for people, water for life**: un world water development report. Paris, 2003. 34 p.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de araraquara – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.713-721, set./dez. 2005.