

MÁRCIA OLIVEIRA CURI HALLAL

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DE
PELOTAS (RS)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Edgar Ricardo Schöffel

Pelotas, 2012.

Banca examinadora

Prof. Dr. Edgar Ricardo Schöffel

Prof. Dr. João Baptista Silva

Prof. Dr. Gilberto Barbosa Diniz

Prof. Dr. Antonio Sergio Bonini

Profa. Dra. Isabel Lago

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Edgar Ricardo Schöffel pela dedicação, empenho, disponibilidade e orientação, fundamentais, durante a realização deste trabalho.

Ao meu eterno parceiro, Jorge, pelo estímulo, desprendimento e apoio.

Aos meus filhos, Cecília, Paula e Marcelo pelo respeito e compreensão.

As colegas deste Programa pelo agradável convívio e amizade, em especial aos queridos Shirlei, Patrícia, Gabriel e André.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar pela oportunidade de realização deste curso.

À direção e colegas da área de Física e Matemática do Campus Visconde da Graça.

Resumo

HALLAL, Márcia Oliveira Curi. **Análise e comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Pelotas (RS)**. 2012. 74f. Tese (Doutorado)-Programa de Pós –Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O conhecimento do valor da evapotranspiração das plantas determina a quantidade de água que necessita ser reposta à cultura de maneira que não haja desperdício e atenuação da produtividade. Os valores da evapotranspiração de referência são muito variáveis em função dos vários métodos de estimativa utilizados e também pela variabilidade climática de cada região. Neste sentido, os objetivos deste trabalho foram: estimar a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, considerando-o como padrão por sua precisão, e analisar seus valores em relação a precipitação ocorrida na região, identificando os períodos de necessidade de irrigação; estimar a evapotranspiração de referência por métodos indiretos e compará-los com o padrão, identificando um método mais simples que produza resultados confiáveis; analisar a correlação das variáveis meteorológicas com o método padrão para identificar as variáveis mais influentes e, a partir destas, selecionar um método que as utilize, com uma expressão que permita ajustes locais nos coeficientes. Com dados da Estação Agroclimatológica de Pelotas entre os anos de 1971 e 2010, estimou-se a evapotranspiração de referência verificando que a média anual para Pelotas é de $2,25 \text{ mm d}^{-1}$; observou-se ainda que no período entre 20 de novembro e 20 de janeiro os valores médios decendiais de precipitação são menores do que os da estimativa da evapotranspiração de referência. A partir da correlação entre os métodos verificou-se que o método de Blaney-Criddle é o que melhor se ajusta ao padrão em todas as estações do ano e em todas as escalas de tempo analisadas. Concluiu-se, por último, que as variáveis mais influentes na evapotranspiração de referência para Pelotas são a radiação solar global e o saldo de radiação; e que a expressão do método de Jensen-Haise modificada, $E_{ToJHmod} = R_s (0,013T + 0,176)$ apresenta desempenho bom e muito bom, respectivamente, no verão e na primavera.

Palavras chave: Penman-Monteith, irrigação, correlação, índice de desempenho, variáveis meteorológicas.

Abstract

HALLAL, Márcia Oliveira Curi. **Análise e comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Pelotas (RS)**. 2012. 74f. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

The knowledge of the value of the evapotranspiration of the plants determines the amount of water that must be replaced in the culture so that there are no productivity wastes or attenuation. The values of the reference evapotranspiration are very variable because of the many estimative methods used and also because of the climatic variability of each region. In this sense, the objectives of this work were: to estimate the evapotranspiration using the Penman-Monteith method, considering it as standard due to its precision, and to analyze its values related to the precipitation occurred in the region, identifying the periods where there is necessity of irrigation; to estimate the reference evapotranspiration through indirect methods and compare them to the standard, identifying a simpler method that produces trustable results; to analyze the correlation of the meteorological variables with the standard method in order to identify the most influent variables and, from them, select a method that uses them, with an expression that allows local adjustments in the coefficients. With data of the years between 1971 and 2010 from the Agroclimatologic Station of Pelotas, it was estimated the reference evapotranspiration verifying that the annual average for Pelotas is 2.25 mm d^{-1} . It was also observed that in the period between November 20th and January 20th the average decendial values of precipitation are lower than those of the reference evapotranspiration estimative. From the correlation between methods it was verified that the Blaney-Criddle method is the one that best fits to the standard in all the seasons of the year in all time scales analyzed. Finally, it was concluded that the most influent variables in the reference evapotranspiration for the region of Pelotas are the global solar radiation and the net radiation; and that the modified expression of the Jensen-Haise method, $ET_{ToJHmod} = R_s (0.013T + 0.176)$, shows good and very good performance, respectively, on summer and spring.

Keywords: Penman-Monteith, Irrigation, Correlation. Performance rate, Meteorological variables.

Lista de Figuras

Metodologia Geral

- Figura 1 Relação entre a velocidade do vento diurno e do vento diário..... 18

Artigo 1 – Evapotranspiração de referência para Pelotas – RS

- Figura 1 Valores médios diários decendiais da radiação solar global (R_s), evapotranspiração de referência (ET_o , mm d^{-1}) e do desvio padrão (σ) para a região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 31
- Figura 2 Valores da evapotranspiração de referência (ET_o , mm d^{-1}) média e máxima absoluta anual na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 34
- Figura 3 Total anual da estimativa da evapotranspiração de referência e da chuva, em mm a^{-1} , ocorrida em Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 34
- Figura 4 Diferença média por decêndio entre chuva e estimativa da evapotranspiração de referência, (ET_o , mm d^{-1}) para Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 35
- Figura 5 Média diária mensal da diferença entre a chuva e a evapotranspiração de referência, (ET_o , mm d^{-1}) representadas anualmente, para a região de Pelotas-RS, nos meses janeiro (A) e setembro (B)..... 37

Artigo 3 – Ajuste local a uma equação de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Pelotas–RS

- Figura 1 Gráfico de dispersão e coeficientes da comparação do método de Penman-Monteith com os métodos de Blaney-Criddle (A), Makkink (B), Radiação Solar (C) e Jensen-Haise (D) com dados de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 66
- Figura 2 Gráfico de dispersão e coeficientes da comparação do método de Jensen-Haise original com o método de Jensen-Haise modificado no verão (A e A'), outono (B e B'), inverno (C e C') e primavera (D e D'), com dados de Pelotas-RS, no período de 2001 a 2010..... 70

Lista de Tabelas

Metodologia Geral

- Tabela 1 Valores do fator de ajuste (F) em função da temperatura média do período.... 15
- Tabela 2 Critério para classificação do desempenho dos métodos de estimativa da evapotranspiração potencial, pelo índice c 24

Artigo 1 – Estimativa de evapotranspiração de referência para Pelotas – RS

- Tabela 1 Valores médios sazonais da evapotranspiração de referência (ET_o , mm d^{-1}) e seu desvio padrão (σ) para a região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 33
- Tabela 2 Número de repetições de séries de dias consecutivos com diferença de ET_o e chuva negativa nos meses de setembro a março do período de 1971 a 2010..... 38

Artigo 2 - Comparação entre métodos indiretos de estimativa da evapotranspiração de referência

- Tabela 1 Média diária da evapotranspiração de referência (ET_o , mm d^{-1}) estimada para cada mês pelos métodos de Penman-Monteith (ET_{oPM}), Radiação Solar (ET_{oRS}), Linacre (ET_{oLI}), Jensen-Haise (ET_{oJH}), Makkink (ET_{oMK}), Camargo (ET_{oCA}), Thornthwaite (ET_{oTH}), Blaney-Criddle (ET_{oBC}), Hargreaves-Samani (ET_{oHS}) e Tanque Classe A (ET_{oTA}), na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 47
- Tabela 2 Erro padrão de estimativa em mm d^{-1} (EPE, mm d^{-1}), coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de correlação (r), coeficiente de exatidão (d), coeficiente de desempenho (c) e classificação da comparação do método de Penman-Monteith (ET_{oPM}), com os métodos da Radiação Solar (ET_{oRS}), Linacre (ET_{oLI}), Jensen-Haise (ET_{oJH}), Makkink (ET_{oMK}), Camargo (ET_{oCA}), Thornthwaite (ET_{oTH}), Blaney-Criddle (ET_{oBC}), Hargreaves-Samani (ET_{oHS}) e Tanque Classe A (ET_{oTA}), na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 49
- Tabela 3 Valores do coeficiente de desempenho (c) e do erro padrão de estimativa (EPE, mm d^{-1}) da comparação do método de Penman-Monteith com os métodos da Radiação Solar (ET_{oRS}), Linacre (ET_{oLI}), Jensen-Haise (ET_{oJH}), Makkink (ET_{oMK}), Camargo (ET_{oCA}), Thornthwaite (ET_{oTH}), Blaney-Criddle (ET_{oBC}), Hargreaves-Samani (ET_{oHS}) e Tanque Classe a (ET_{oTA}), para a estimativa de ET_o , para a cidade de Pelotas, no período de 1971 a 2010 nas escalas diária, quinquinidial e mensal apresentados mês a mês..... 50

Tabela 4 Valor médio de evapotranspiração de referência (ET_o , mm d^{-1}), erro padrão de estimativa (EPE, mm d^{-1}) coeficientes de determinação (r^2), de correlação (r), de exatidão (d) e de desempenho (c) e classificação do desempenho dos métodos da Radiação Solar, Linacre, Jensen-Haise, Makkink, Camargo Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani e Tanque Classe A em relação ao método de Penman-Monteith, obtidos com dados diários, na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 53

Tabela 5 Valor médio de evapotranspiração de referência (ET_o , mm d^{-1}), erro padrão de estimativa (EPE, mm d^{-1}) coeficientes de determinação (r^2), de correlação (r), de exatidão (d) e de desempenho (c) e classificação do desempenho dos métodos da Radiação Solar, Linacre, Jensen-Haise, Makkink, Camargo Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani e Tanque Classe A em relação ao método de Penman-Monteith, obtidos com dados de 5 dias, na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 53

Artigo 3 - Ajuste local a uma equação de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Pelotas-RS

Tabela 1 Valores do coeficiente de desempenho (c), do erro padrão de estimativa (EPE, mm d^{-1}) e a classificação dos métodos da Radiação Solar, Linacre, Jensen-Haise, Makkink, Camargo, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani e Tanque classe A em relação ao método de Penman-Monteith, obtidos com dados diários, na região de Pelotas, no período de 1971 a 2010..... 65

Tabela 2 Índices de correlação entre as variáveis meteorológicas e a estimativa da evapotranspiração de referência obtida pelos métodos de Penman-Monteith (ET_o PM), Blaney-Criddle (ET_o BC), Radiação Solar (ET_o RS), Makkink (ET_o MK) e Jensen-Haise (ET_o JH) em Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010..... 67

Sumário

1. Introdução Geral.....	11
2. Metodologia Geral.....	13
2.1. Localização e caracterização.....	13
2.2. Métodos de Estimativas da Evapotranspiração de Referência.....	13
2.2.1. Método do Tanque classe A.....	13
2.2.2. Método de Thornthwaite.....	14
2.2.3. Método de Camargo.....	15
2.2.4. Método de Makkink.....	16
2.2.5. Método da Radiação Solar.....	17
2.2.6. Método de Jensen-Haise.....	18
2.2.7. Método de Linacre.....	18
2.2.8. Método de Hargreaves-Samani.....	19
2.2.9. Método de Blaney-Criddle.....	20
2.2.10. Método de Penman-Monteith.....	20
2.3. Análise dos resultados.....	23
3. Artigo 1–Estimativa de evapotranspiração de referência para Pelotas–RS.....	26
3.1. Resumo.....	26
3.2. Abstract.....	26
3.3. Introdução.....	27
3.4. Material e Métodos.....	29
3.5. Resultados e discussão.....	31
3.6. Conclusões.....	38
3.7. Bibliografia.....	39
4. Artigo 2-Comparação entre métodos indiretos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	41
4.1. Resumo.....	41
4.2. Abstract.....	41
4.3. Introdução.....	42
4.4. Material e Métodos.....	44
4.5. Resultados e discussão.....	46
4.6. Conclusões.....	57
4.7. Bibliografia.....	57

5. Artigo 3- Ajuste local a uma equação de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Pelotas – RS.....	60
5.1.Resumo.....	60
5.2.Abstract.....	60
5.3.Introdução.....	61
5.4.Material e Métodos.....	63
5.5.Resultados e discussão.....	65
5.6.Conclusões.....	71
5.7.Bibliografia.....	71
6. Conclusões Gerais	73
7. Bibliografia.....	74

1. Introdução Geral

Em virtude da grande demanda de água utilizada pela agricultura a maneira de utilização desde recurso natural é motivo de preocupação e objeto de estudo sobre a forma de utilizá-la adequadamente. Segundo Reis et al. (2007), o conhecimento das reais necessidades hídricas das culturas, de determinada região, associado à sistemas ou métodos de irrigação, proporcionam o uso eficiente da água, possibilitando a aplicação da quantidade e momento certo que a planta requer, evitando o desperdício e mantendo o desenvolvimento adequado da cultura.

O consumo hídrico dos cultivos agrícolas depende da sua fase fenológica; da disponibilidade de água no solo e também da transferência da água para a atmosfera, as quais ocorrem por evaporação do solo e transpiração dos vegetais num processo simultâneo, denominado de evapotranspiração. Esse processo envolve, também, o suprimento de água do solo às plantas, disponibilidade de energia e demanda atmosférica.

A determinação do seu valor torna-se ferramenta básica para planejar o manejo de irrigação evitando o desperdício de água, o aumento de custos da produção e os danos à cultura causados por falta ou excesso de água.

A parcela da evapotranspiração relativa à transpiração dos vegetais é bastante variável em função da área foliar e características de cada cultura. Assim, foi introduzido o conceito de evapotranspiração de referência, para uma cultura hipotética, que associado a um coeficiente específico indica necessidade hídrica de cada cultura.

De acordo com Allen et al. (1998), a evaporação de referência é definida como a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água igual a 70 s m^{-1} , correspondendo à evapotranspiração de uma superfície gramada, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem restrição de água.

Evapotranspiração é um assunto bastante simples do ponto de vista teórico; porém o lado prático das medições torna-se bastante complexo e difícil. Outra forma de se obtê-la é através de estimativas aferidas pelos métodos diretos que utilizam variáveis meteorológicas registradas nas estações agrometeorológicas convencionais ou automáticas. Para isso foram determinados, no decorrer dos anos, vários métodos baseados em diferentes princípios nos seus desenvolvimentos.

Segundo Pereira et al. (1997), de acordo com os princípios envolvidos os métodos de estimativas podem ser agrupados em cinco categorias: aerodinâmicos, correlação dos

turbilhões, balanço de energia, combinados e empíricos. Os quatro primeiros são métodos mais complexos que envolvem balanço de energia no ambiente, transporte turbulento, dinâmica de fluidos e o poder evaporante do ar, tornando-os de aplicabilidade restrita, pois utilizam expressões complexas e necessitam de algumas variáveis não disponíveis em muitas estações meteorológicas dificultando ao agricultor familiar o acesso a dados necessários. Entretanto, é dentre os métodos combinados que se encontra o método de Penman-Monteith, universalmente conhecido como aquele que produz resultados mais próximos aos obtidos nas observações diretas da evapotranspiração. Apesar dos bons resultados que apresenta, esse método tem sua utilização restrita em função das muitas variáveis utilizadas e dificuldade de obtenção de algumas delas.

Os métodos empíricos são resultantes de correlações entre a evapotranspiração medida em condições padronizadas e os elementos meteorológicos medidos também em postos padrões. Conforme destacam Pereira et al. (1997), empiricismo não é sinônimo de falta de qualidade e alguns desses métodos têm aplicação quase universal, pois foram determinados e calibrados localmente e produzem melhores resultados do que aqueles fisicamente mais reais.

Neste sentido este trabalho, escrito na forma de artigos científicos, estima a evapotranspiração de referência para a região de Pelotas pelo método padrão de Penman-Monteith e pelos métodos de: Thornthwaite, Camargo, Makkink, Radiação Solar, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Blaney-Cridle e Tanque Classe A, determina ainda, a correlação entre os diversos métodos com o método padrão e a influência das variáveis meteorológicas no valor da estimativa obtida pelo método padrão e pelos métodos melhores ajustados a ele na região.

Assim, no primeiro artigo os objetivos foram estimar a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith e identificar os períodos em que a chuva não atende a demanda evaporativa atmosférica da região de Pelotas. No segundo artigo foram estimar a evapotranspiração de referência pelos demais métodos já citados e comparar de cada um deles com o método padrão em três escalas de tempo. No terceiro artigo os objetivos foram avaliar a correlação das variáveis meteorológicas com os valores das estimativas da evapotranspiração de referência e, ainda, propor um ajuste local aos coeficientes do método de Jensen-Haise com o intuito de aproximar seus valores dos obtidos pelo método padrão.

2. Metodologia Geral

2.1 Localização e caracterização

O trabalho foi desenvolvido com dados meteorológicos do acervo histórico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, instalada na cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul considerando o período entre os anos de 1971 a 2010. A região de Pelotas (31°52'S e 52°21'W, 13 m de altitude) possui clima do tipo subtropical úmido, com temperatura média anual de 17,8 °C, sendo que a temperatura média do mês mais frio (julho) é de 12,3 °C e do mês mais quente (janeiro) é de 23,2 °C, com chuva anual de 1367 mm, regularmente distribuída ao longo do ano (EAPEL, 2011).

2.2 Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência

Os valores da Evapotranspiração de referência foram estimados pelos seguintes métodos: Tanque Classe A (EToTA), Thornthwaite (EToTH), Camargo (EToCA), Makkink (EToMK), Radiação Solar (EToRS), Jensen-Haise (EToJH), Linacre (EToLI), Hargreaves-Samani (EToHS), Blaney-Criddle (EToBC) e Penman-Monteith (EToPM), através das expressões:

2.2.1 Método do Tanque classe A

O método do tanque classe A estima o valor da evapotranspiração de referência (EToTA) diária, em mm d^{-1} , através da seguinte expressão:

$$E_{ToTA} = K_p E_{Ca} \quad (1)$$

Onde:

E_{Ca} = evaporação medida no tanque classe A (mm d^{-1})

K_p = coeficiente de tanque determinado por:

$$K_p = 0,482 + 0,024\ln(B) - 0,000376U + 0,0045UR \quad (2)$$

Com

B = distância da área de bordadura (m)

UR = umidade relativa média do dia (%)

U = velocidade média diária do vento (Km d^{-1})

2.2.2 Método de Thornthwaite

As equações propostas por Thornthwaite utilizam apenas a temperatura do ar como variável meteorológica, foram baseadas no balanço hídrico de bacias hidrográficas e em medidas de evapotranspiração obtidas em lisímetros.

Esse método estima a evapotranspiração mensal padrão (ETpa) em, mm d⁻¹, para um mês com 30 dias e 12 horas de brilho solar através da expressão:

$$ETpa = 16 \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a \quad T_i > 0^\circ C \quad (3)$$

Onde:

T_i é a temperatura média mensal e I e a são índices dados por:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,7 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,4923 \quad (4)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 T_i)^{1,514} \quad (5)$$

Os coeficientes I e a são índices que expressam o nível de calor disponível, os quais indicam características térmicas de cada região e tornam-se constantes independentes do ano da estimativa da evapotranspiração.

Para a estimativa da evapotranspiração de referência em um período qualquer Thornthwaite considera a evapotranspiração padrão e um ajuste no número de dias e nas horas do fotoperíodo dado pela expressão:

$$ET_{oTH} = ETpa \frac{N}{12} \frac{ND}{30} \quad (6)$$

Com:

N = fotoperíodo do período

ND = número de dias do período

Onde:

$$N = \frac{2h_n}{15} \quad (7)$$

$$h_n = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta) \quad (8)$$

Com:

h_n = ângulo horário na hora do nascer do sol (radianos)

φ = latitude (radianos)

δ = declinação solar (radianos)

Esse fator de correção permite estimar a evapotranspiração de referência diária ao considerar N o fotoperíodo do dia e $ND = 1$ e, na equação (3) substituir T_i pela temperatura média diária.

2.2.3 Método de Camargo

O método proposto por Camargo para estimar a evapotranspiração de referência (ET_{oCA}), em mm d^{-1} , num período variável foi baseado nos resultados da equação de Thornthwaite e dado pela expressão:

$$ET_{oCA} = F Q'_o T ND \quad (9)$$

Onde:

Q'_o = radiação solar extraterrestre diária expressa em equivalente de evaporação no período considerado (mm d^{-1})

T = temperatura média no período ($^{\circ}\text{C}$)

ND = número de dias do período

F = fator de ajuste variável com a temperatura média do período cujos valores são apresentados na Tabela 1:

Tabela1. Valores do fator de ajuste (F) em função da temperatura média do período.

Temperatura média do período	F
Inferior a 23,5 $^{\circ}\text{C}$	0,01
De 23,6 a 24,5 $^{\circ}\text{C}$	0,0105
De 24,6 a 25,5 $^{\circ}\text{C}$	0,011
De 25,6 a 26,5 $^{\circ}\text{C}$	0,0115
De 26,6 a 27,5 $^{\circ}\text{C}$	0,012
Superior a 27,5	0,013

Para a estimativa diária da evapotranspiração de referência na equação (9) ND será considerado igual a 1.

O valor da radiação solar extraterrestre diária expressa em equivalente de evaporação será calculado pela expressão:

$$Q'_o = \frac{Q_o}{\lambda} \quad (10)$$

Com:

λ = calor latente de evaporação equivalente a 2,45 MJ Kg^{-1} e

Q_o = radiação solar extraterrestre em MJ m⁻²d⁻¹ dada pela expressão:

$$Q_o = 37,586 d_r [h_n \text{sen}\theta \text{sen}\delta + \text{cos}\theta \text{cos}\delta \text{sen}h_n] \quad (11)$$

Onde:

d_r = distância relativa Terra-Sol

h_n = ângulo horário na hora do nascer do sol (equação 8)

θ = latitude do local (em radianos)

δ = declinação solar do dia (em radianos)

Com:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(NDA \frac{2\pi}{365}\right) \quad (12)$$

$$\delta = 0,4093 \text{sen}\left(\frac{2\pi NDA}{365} - 1,405\right) \quad (13)$$

Onde NDA representa o número do dia do ano que se considera (calendário Juliano).

2.2.4 Método de Makkink

A estimativa da evapotranspiração de referência diária pelo método de Makkink (EToMK), dado em mm d⁻¹, é feita através de uma relação com a radiação solar ao nível da superfície, expressa em equivalente de evaporação. O método que também considera um fator de ponderação dependente da temperatura do bulbo úmido é expresso, por:

$$EToMK = 0,61 W R_s - 0,12 \quad (14)$$

Onde:

R_s = radiação solar global ao nível da superfície (mm d⁻¹)

W = fator de ponderação dado por:

$$W = 0,407 + 0,0145T_u \quad 0^\circ\text{C} < T_u < 16^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$W = 0,483 + 0,01T_u \quad 16,1^\circ\text{C} < T_u < 32^\circ\text{C}$$

Com:

T_u = temperatura do bulbo úmido (°C)

2.2.5 Método da Radiação Solar

Também conhecido como método FAO-24 da radiação é uma adaptação ao método de Makkink onde as constantes são substituídas por coeficientes relacionados à umidade do ar e do vento. A estimativa da evapotranspiração de referência diária pelo método da Radiação Solar (EToRS) é dada em equivalente de evaporação (mm d^{-1}), pela equação

$$\text{EToRS} = c_0 + c_1 W R_S \quad (16)$$

Onde:

$$c_0 = -0,3 \text{ mm d}^{-1}$$

$$R_S = \text{radiação solar global diária ao nível da superfície (mm d}^{-1}\text{)}$$

W = fator de ponderação, dependente do valor da temperatura do bulbo úmido, dado pelas equações (15):

O coeficiente c_1 obtém-se pela expressão abaixo:

$$c_1 = a_0 + a_1 UR + a_2 Ud + a_3 UR Ud + a_4 UR^2 + a_5 Ud^2 \quad (17)$$

Onde:

$$a_0 = 1,0656$$

$$a_3 = -0,00020033$$

$$a_1 = -0,0012975$$

$$a_4 = -0,000031508$$

$$a_2 = 0,044953$$

$$a_5 = -0,0011026$$

UR = umidade relativa média diária (%)

Ud = velocidade média diária do vento no período diurno medida a 2m de altura (m s^{-1})

O valor da velocidade média diária do vento no período diurno foi obtido por uma análise de tendência polinomial com dados de vento diário e vento diurno de 2005 a 2010 através da equação $y = 0,182x^2 + 0,386x + 0,927$ que estima o vento diurno (y) a partir do vento diário (x). Esta equação apresenta um coeficiente de determinação entre as variáveis $r^2 = 0,826$ conforme mostra a Figura 1

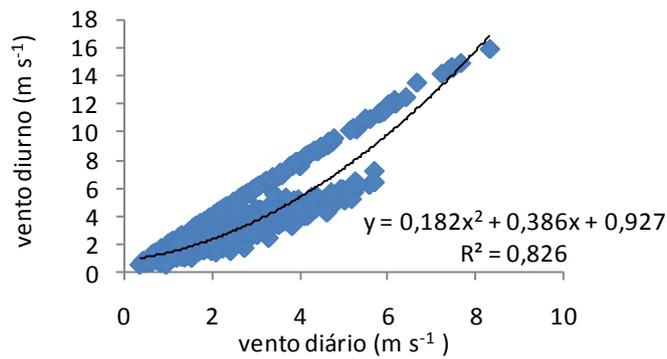


Figura 1. Relação entre a velocidade do vento diurno e do vento diário.

Como a velocidade média diária do vento no período diurno foi obtida pela velocidade diária do vento medida a 7m de altura foi utilizada a redução, de 7m para 2m, conforme Sansigolo (2005), através da lei da potência expressa a seguir:

$$U_d = U_7 \left(\frac{2}{7} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (18)$$

Onde:

U_7 é a medida da velocidade diária do vento no período diurno medida a 7 metros de altura ($m s^{-1}$)

2.2.6 Método de Jensen-Haise

Trabalhando em regiões semi-áridas americanas Jensen-Haise propuseram a estimativa da evapotranspiração de referência diária em $mm d^{-1}$ para períodos de 5 a 10 dias através da expressão:

$$ET_{oJH} = R_s (0,0252T + 0,078) \quad (19)$$

Onde:

T = temperatura média diária do período ($^{\circ}C$)

R_s = radiação solar diária ao nível da superfície expressa em equivalente de evaporação ($mm d^{-1}$)

2.2.7 Método de Linacre

É um método proposto para estimar a evapotranspiração mensal média, em milímetros por dia, de uma área bem suprida de umidade. É dado pela expressão:

$$ET_{oLI} = \frac{\frac{500(T+0,006h)}{100-\theta} + 15(T - T_o)}{80 - T} \quad (20)$$

Onde:

T = temperatura média do período (°C)

θ = latitude local (°)

h = altitude local (m)

T_o = temperatura média do ponto de orvalho do período (°C)

Na ausência da temperatura média do ponto de orvalho do período observado, T_o foi estimado pelas equações:

$$T_o = \frac{237,3 \log(e_a) - 156,8}{8,16 - \log(e_a)} \quad (21)$$

$$e_a = e_s \cdot 0,01 \text{ UR (\%)} \quad (22)$$

$$e_s = 4,58 \cdot 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad (23)$$

Onde:

e_a = pressão atual de vapor (mm Hg)

e_s = pressão de vapor de saturação (mm Hg)

UR = umidade relativa média do período (%)

2.2.8 Método de Hargreaves-Samani

Este método foi proposto para estimar a evapotranspiração de referência diária, em mm d^{-1} , numa região de clima semi-árido da Califórnia, a partir de dados obtidos de lisímetro instalado em área com gramado, através da expressão:

$$ET_{oHS} = 0,0023 Q'_o (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} (T + 17,8) \quad (24)$$

Onde:

Q'_o = radiação extraterrestre diária expressa em equivalente de evaporação (mm d^{-1})

T_{\max} = temperatura máxima diária (°C)

T_{\min} = temperatura mínima diária (°C)

T = temperatura média diária (°C)

A radiação solar extraterrestre foi calculada, em milímetros de evaporação equivalente, para cada dia do ano conforme equações 8, 11,12, e 13.

2.2.9 Método de Blaney-Criddle

Os termos da equação original levam em consideração elementos meteorológicos utilizados na escala mensal, porém, como a expressão permite estimativa em escalas menores foi feita a estimativa diária da evapotranspiração de referência, em milímetros por dia, através da expressão:

$$E_{ToBC} = a + b p(0,46T + 8,13) \quad (25)$$

Com:

$$a = 0,0043UR - \frac{n}{N} - 1,41 \quad (26)$$

$$b = a_0 + a_1 UR + a_2 \frac{n}{N} + a_3 U_d + a_4 UR \frac{n}{N} + a_5 UR U_d \frac{n}{N} \quad (27)$$

Onde:

$$a_0 = 0,81917$$

$$a_3 = 0,065649$$

$$a_1 = - 0,0040922$$

$$a_4 = - 0,0059684$$

$$a_2 = 1,0705$$

$$a_5 = - 0,0005967$$

T = temperatura média diária (°C)

p = porcentagem do total do fotoperíodo médio diário mensal sobre o total do fotoperíodo anual

UR = umidade relativa diária (%)

U_d = velocidade média diária diurna do vento a 2m de altura ($m s^{-1}$)

n = horas de brilho solar

N = fotoperíodo, calculado pelas equações 7 e 8

2.2.10 Método de Penman-Monteith

Os valores da evapotranspiração de referência foram estimados na escala diária, de acordo com a parametrização do método de Penman-Monteith realizada pela FAO 56 (Smith, 1991), a partir da seguinte equação:

$$ET_{oPM} = \frac{s}{s + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{900\gamma}{(s + \gamma^*)(T + 275)} U_2 (e_s - e_a) \quad (28)$$

Onde:

R_n = saldo diário de radiação ($MJ m^{-2}d^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($MJ m^{-2}d^{-1}$)

T = temperatura média diária ($^{\circ}C$)

U_2 = velocidade média diária do vento medido a 2 m de altura ($m s^{-1}$)

e_s = pressão de saturação de vapor (kPa)

e_a = pressão atual de vapor (kPa)

s = declividade da curva de pressão de vapor ($kPa ^{\circ}C^{-1}$)

γ e γ^* = coeficientes psicométricos ($kPa ^{\circ}C^{-1}$)

λ = calor latente de evaporação = $2,45 MJ Kg^{-1}$

As pressões de vapor, a declividade da curva de pressão de vapor e os coeficientes psicométricos foram obtidos pelas expressões:

$$e_s = 0,61078 \cdot 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad \text{para } T > 0^{\circ}C \quad (29)$$

$$e_a = e'_s - \gamma(T - T_u) \quad (30)$$

$$e'_s = 0,61078 \cdot 10^{\frac{7,5T_u}{237,3+T_u}} \quad (31)$$

com e_a obtido por medições psicométricas e e'_s sendo a pressão de vapor de saturação, medida em kPa, à temperatura do bulbo úmido (T_u). A declividade da curva de pressão de vapor e os coeficientes psicométricos foram obtidos pelas expressões:

$$s = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (32)$$

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \quad (33)$$

$$\gamma^* = \gamma(1 + 0,33U_2) \quad (34)$$

Onde

P é a pressão atmosférica diária em kPa.

O fluxo de calor no solo foi calculado utilizando diferença da temperatura média (T_d) dia com a temperatura média dos 3 dias anteriores (T_{3d}) pela expressão:

$$G = 0,38(T_d - T_{3d}) \quad (35)$$

O saldo de radiação foi calculado, conforme metodologia recomendada pela FAO 56, por:

$$R_n = R_{ns} + R_{nb} \quad (36)$$

R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$)

R_{nb} = saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$)

A equação utilizada para estimar R_{ns} teve seus coeficientes calibrados para a região de Pelotas por Steinmetz (1999) é dada por:

$$R_{ns} = (1 - r) \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) Q_o \quad (37)$$

Para estimar R_{nb} foi utilizada a expressão:

$$R_{nb} = - \left(0,9 \frac{n}{N} + 0,1 \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \sigma (T_{kx}^4 + T_{kn}^4) \frac{1}{2} \quad (38)$$

Onde:

r = coeficiente de reflexão considerado igual a 0,23 para o gramado, utilizado como cultura de referência,

n = horas de brilho solar, $\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1} \text{ K}^{-4}$ (constante de Stefan-Boltzmann),

T_{kx} e T_{kn} temperaturas diárias máxima e mínima do ar, respectivamente, em Kelvin

N = fotoperíodo, calculado pela equação:

$$N = \frac{2h_n}{15} \quad (39)$$

$$h_n = \arccos(-\text{tg}\phi\text{tg}\delta) \quad (40)$$

Q_o = radiação extraterrestre diária determinada pela expressão:

$$Q_o = 37,586 d_r (h_n \text{sen}\phi\text{sen}\delta + \text{cos}\phi\text{cos}\delta\text{sen}h_n) \quad (41)$$

Onde:

d_r = distância relativa Terra-Sol

h_n = ângulo horário na hora do nascer do sol (equação 13)

ϕ = latitude do local (em radianos)

δ = declinação solar do dia (em radianos)

Com:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\text{NDA} \frac{2\pi}{365} \right) \quad (42)$$

$$\delta = 0,4093 \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\text{NDA}} - 1,405 \right) \quad (43)$$

Onde

NDA = número do dia do ano.

2.3 Análise dos resultados

A planilha eletrônica Excel foi utilizada para estimar e analisar os valores das estimativas de 13926 dias, pois do período de 40 anos foram excluídos os dados referentes a junho de 1989 a dezembro de 1990, pela falta dos valores de temperatura de bulbo úmido, e cerca de outros 100 dias que apresentavam inconsistência dos dados em alguma das variáveis meteorológicas.

No primeiro artigo, com os valores diários de ETo estimados, os dados foram agrupados por decêndio, mês e estação do ano. Para o primeiro decêndio foram considerados os dados do dia 1 ao dia 10; para o segundo do dia 11 ao dia 20 e para o terceiro do dia 21 ao último dia de cada mês, portanto este variando de 8 a 11 dias. Posteriormente, esses valores foram comparados com os dados de chuva de cada período na região. Ainda, foram computados os dias consecutivos em que a diferença entre chuva e evapotranspiração foi negativa, ou seja, dias sem chuva ou dias em que esta foi menor do que a evapotranspiração. Essa quantificação foi realizada apenas para os meses de maior evapotranspiração (setembro a março).

No segundo artigo, as estimativas da evapotranspiração de referência foram determinadas para todos os métodos nas escalas diária, quinidial e mensal.

A escala quinidial foi estimada através da média de cinco dias das variáveis utilizadas nas equações. A escala mensal foi obtida pela média dos dias de cada mês. A comparação mensal dos métodos foi feita a partir das médias diárias mensais de cada ano da pesquisa. Os resultados das comparações diárias e quinidiais foram apresentados sazonalmente para facilitar sua apresentação e uso em projetos de irrigação.

Com os valores da estimativa da evapotranspiração de referência de todos os métodos, foi realizada a comparação individual de cada um deles com o método padrão de Penman-Monteith através da correlação linear.

O indicador da precisão da correlação é o coeficiente de correlação (r), indica o grau de dispersão dos dados em relação à média, sendo obtido pela expressão

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (44)$$

onde: x_i são os valores a ser comparados com o método padrão; y_i são valores estimados pelo método padrão e \bar{x} e \bar{y} as médias respectivas de x_i e y_i (Meyer (1976)).

A partir do coeficiente de correlação r obtém-se o coeficiente de determinação (r^2) que mede em valor absoluto o grau de relação entre as variáveis.

O grau de significância do coeficiente de correlação (r) foi determinado através do teste “t” Student e foi comparado com o valor crítico de t com $(n-2)$ graus de liberdade. A prova estatística foi feita pela expressão:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (45)$$

A significância do coeficiente de correlação é determinada pelo valor do t calculado ser maior que o valor de t crítico no nível desejado.

O indicador da exatidão, associado ao desvio entre os valores medidos e estimados, foi determinado pelo índice de Willmott (d), segundo metodologia apresentada por Camargo & Sentelhas (1997), expresso por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (|x_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \right] \quad (46)$$

O índice de desempenho (c), que reúne os índices de precisão (r) e de exatidão (d) através da expressão $c = r d$, foi utilizado para classificar a relação entre cada método com o método padrão, de acordo com a metodologia proposta por Camargo & Sentelhas (1997), segundo critério apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Critério para classificação do desempenho dos métodos de estimativa da evapotranspiração potencial, pelo índice c (Fonte: Camargo e Sentelhas, 1997).

Valores de c	Desempenho
Maior que 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
Menor 0,41	Péssimo

Para dar suporte a essa classificação também foi calculado o valor do Erro Padrão de Estimativa (EPE) através da expressão:

$$EPE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (47)$$

No terceiro artigo, foi determinada a correlação linear das variáveis meteorológicas com os valores das estimativas obtidas pelo método Penman-Monteith e com os valores obtidos pelos métodos que mostraram valores mais próximos ao método padrão.

Foi selecionado o método que melhor se adaptou as seguintes características: utiliza as variáveis meteorológicas que mostraram maior correlação com o método padrão; apresenta valores de estimativa da evapotranspiração de referência com correlação no mínimo boa com o método padrão; possui uma expressão simples. Nesta expressão foram feitos ajustes nos coeficientes, com a finalidade de melhor adaptá-la as condições climáticas da região.

3. Artigo 1 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA PELOTAS - RS

Resumo: Este trabalho teve como objetivo estimar a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith e relacionar essa estimativa com os valores de precipitação ocorrida nos mesmos períodos. Foram utilizados dados meteorológicos diários da Estação Agroclimatológica de Pelotas no período entre os anos de 1971 e 2010. Os valores estimados foram organizados por decêndios, mensal e sazonalmente para fornecer informações mais precisas e para caracterizar o comportamento da evapotranspiração em cada estação do ano. Esses valores foram comparados com os valores de precipitação para verificar os períodos onde a diferença de precipitação e evapotranspiração foi negativa. Concluiu-se que a média anual da evapotranspiração de referência para Pelotas é de 2,25 mm d⁻¹ sendo os maiores valores obtidos no verão e primavera (3,97 e 3,37 mm d⁻¹ respectivamente); que no período compreendido entre 20 de outubro e 20 de janeiro a diferença entre precipitação e evapotranspiração de referência é negativa e que a média mensal não é um bom preditor para analisar essa diferença, pois como o desvio padrão da serie de dados de precipitação é muito grande mascara longos períodos de estiagem.

Palavras-chave: Penman-Monteith, irrigação, chuva.

REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR PELOTAS - RS

Abstract: This work aimed to estimate the reference evapotranspiration using the Penman-Monteith method and to relate this estimative with the values of precipitation occurred in the same periods. Were used daily meteorological data from the Agroclimatic Station of Pelotas in the period between the years 1971 and 2010. The estimated values were organized in ten-day periods, monthly and seasonally in order to provide more precise information and to characterize the behavior of the evapotranspiration in each season of the year. These values were compared to the precipitation in order to verify the periods when the difference of precipitation and evapotranspiration was negative. We concluded that the annual average of the reference evapotranspiration for Pelotas is 2.25 mm d⁻¹ and the highest values were obtained in summer and spring (3.97 and 3.37 mm d⁻¹ respectively); that in the period comprehended between October 20th and January 20th the difference between precipitation and reference evapotranspiration is negative and that the monthly average is not a good predictor to analyse this difference because, as the standard deviation of the data serie of precipitation is too big, it masks long periods of drought.

Keywords: Penman-Monteith, irrigation, rain.

INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento populacional mundial pressiona o incremento da produção de alimentos e não é mais possível depender apenas da ocorrência de chuva. Na falta ou escassez de precipitação a irrigação é uma prática que visa atender adequadamente ao desenvolvimento das culturas.

Na ausência de um método de controle da irrigação e com receio de comprometer a produção geralmente o produtor rural faz mau uso da irrigação desconsiderando, muitas vezes, o desperdício de energia e de água, usada no processo. Por consumir grande quantidade da água a agricultura tem responsabilidade de gerir adequadamente esta riqueza natural.

A necessidade de sistemas de produção mais eficientes para garantir a sustentabilidade da agricultura irrigada torna importante o manejo de irrigação para que se faça uso racional da água e de energia na produção agrícola, evitando o desperdício ou a falta de água, adotando critérios que indiquem o momento e a quantidade necessária a determinada cultura (Roque, 2007).

A quantidade de água transpirada pela planta mais a água evaporada diretamente da superfície do solo ou da superfície da planta representam a taxa de evapotranspiração da cultura e, sua quantificação é essencial indicativo da necessidade de irrigação. A evapotranspiração da cultura pode ser obtida através da evapotranspiração de referência corrigida por um coeficiente específico de cada cultura o qual é variável de acordo com as características inerentes a cada espécie vegetal como a resistência do dossel, a altura do cultivo, a rugosidade do cultivo, o albedo, a cobertura do solo e a características radiculares do cultivo (Pereira et al., 2002).

A evapotranspiração é expressa em milímetros por unidade de tempo. Essa unidade expressa a quantidade de água transferida de uma superfície cultivada para a atmosfera em unidade de altura de água (Allen et al., 1998). É possível obter esse valor através de estimativas aferidas por vários métodos diretos que utilizam variáveis meteorológicas registradas nas estações agrometeorológicas convencionais ou automáticas.

Em maio de 1990 a FAO (Food and Agriculture Organization) indicou o método de Penman-Monteith como o mais adequado e preciso para estimar a evapotranspiração de referência e recomendou procedimentos para calcular os diferentes parâmetros incluídos no método, definindo a cultura hipotética com altura de 0,12 metros, resistência superficial de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23 (Allen et al., 1998).

Para a região de Palotina no Paraná, Syperreck et al. (2008) estimaram a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith obtendo valores médios diários maiores entre os meses de outubro e março quando há maior disponibilidade de energia no sistema solo-planta-atmosfera. Neste período os valores variaram de 3,04 a 3,78 mm d⁻¹, em contraste com os valores dos meses de maio, junho e julho que oscilaram entre 1,06 e 1,23 mm d⁻¹. No período analisado, entre 1994 e 2003, a média anual da evapotranspiração de referência obtido pelo método de Penman-Monteith foi de 2,58 mm d⁻¹. Já no estado de Sergipe em quatro micro regiões irrigadas a estimativa da evapotranspiração de referência observada teve pouca oscilação ao longo do ano, variando de 4,0 a 4,4 mm d⁻¹ (Souza et al., 2010).

Nos municípios de Cachoeira do Itapemirim, Sooretama e Venda Nova do Imigrante, localizados respectivamente, nas regiões Norte, Sul e Serrana do estado do Espírito Santo, Reis et al. (2007) estimaram a evapotranspiração de referência, com dados coletados nas plataformas de coleta do CEPTEC/INPE, e verificaram que na localidade serrana os valores oscilaram entre 2,31 e 2,36 mm d⁻¹; na região sul entre 2,43 e 2,48 mm d⁻¹ e na região norte entre 2,78 e 2,82 mm d⁻¹.

Na Estação Experimental de Campos de Goytacazes (RJ), Mendonça et al. (2003) estimaram a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith com dados meteorológicos medidos entre setembro de 1997 e dezembro de 2000. O valor médio da evapotranspiração do período foi de 3,5 mm d⁻¹ sendo que os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março apresentaram os maiores valores, equivalentes a 4,5; 4,6; 5,4 e 4,1 mm d⁻¹, respectivamente, e os valores mais baixos registrados foram de 2,0 e 2,4 mm d⁻¹, ocorridos nos meses de julho e agosto, respectivamente.

Portanto, verifica-se uma grande variação da estimativa da evapotranspiração de referência, pois estes valores estão relacionados diretamente as condições climáticas da região. Devido à grande diversidade do clima torna-se necessário que sejam feitos estudos regionais específicos e sazonais para estimar com maior precisão o valor da evapotranspiração às condições locais de determinada região. Assim, os objetivos deste trabalho foram determinar a estimativa da evapotranspiração de referência diária pelo método de Penman-Monteith na região de Pelotas-RS, e identificar períodos sazonais em que a chuva não atende a demanda evaporativa atmosférica da região.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido com dados meteorológicos do acervo histórico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, Rio Grande do Sul, considerando o período entre os anos de 1971 a 2010. A região de Pelotas (31°52'S e 52°21'W, 13 m de altitude) possui clima do tipo subtropical úmido, com temperatura média anual de 17,8 °C, sendo que a temperatura média do mês mais frio (julho) é de 12,3 °C e do mês mais quente (janeiro) é de 23,2 °C, com chuva anual de 1367 mm, regularmente distribuída ao longo do ano (EAPEL, 2011).

Os valores da evapotranspiração de referência foram estimados na escala diária, de acordo com a parametrização do método de Penman-Monteith realizada pela FAO 56 (SMITH, 1991), a partir da seguinte equação:

$$ET_{oPM} = \frac{s}{s + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{900\gamma}{(s + \gamma^*)(T + 275)} U_2 (e_s - e_a) \quad (1)$$

onde: R_n = saldo diário de radiação ($MJ m^{-2}d^{-1}$), G = fluxo de calor no solo ($MJ m^{-2}d^{-1}$), T = temperatura média diária (°C), U_2 = velocidade média diária do vento medido a 2 m de altura ($m s^{-1}$), e_s = pressão de saturação de vapor (kPa), e_a = pressão atual de vapor (kPa), s = declividade da curva de pressão de vapor ($kPa °C^{-1}$), γ e γ^* = coeficientes psicométricos ($kPa °C^{-1}$), λ = calor latente de evaporação = $2,45 MJ Kg^{-1}$. As pressões de vapor, a declividade da curva de pressão de vapor e os coeficientes psicométricos foram obtidos pelas expressões:

$$e_s = 0,61078 \cdot 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad (2)$$

$$e_a = e'_s - \gamma(T - T_u) \quad (3)$$

$$e'_s = 0,61078 \cdot 10^{\frac{7,5T_u}{237,3+T_u}} \quad (4)$$

com e_a obtido por medições psicométricas e e'_s sendo a pressão de vapor de saturação, medida em kPa, à temperatura do bulbo úmido (T_u). A declividade da curva de pressão de vapor e os coeficientes psicométricos foram obtidos pelas expressões:

$$s = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (5)$$

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \quad (6)$$

$$\gamma^* = \gamma(1 + 0,33U_2) \quad (7)$$

onde P é a pressão atmosférica diária em kPa.

O fluxo de calor no solo foi calculado utilizando diferença da temperatura média (T_d) dia com a temperatura média dos 3 dias anteriores (T_{3d}) pela expressão:

$$G = 0,38(T_d - T_{3d}) \quad (8)$$

O saldo de radiação foi calculado, conforme metodologia recomendada pela FAO 56, por:

$$R_n = R_{ns} + R_{nb} \quad (9)$$

R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$)

R_{nb} = saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$)

A equação utilizada para estimar R_{ns} teve seus coeficientes calibrados para a região de Pelotas por Steinmetz (1999) é dada por:

$$R_{ns} = (1 - r) \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) Q_o \quad (10)$$

Para estimar R_{nb} foi utilizada a expressão:

$$R_{nb} = - \left(0,9 \frac{n}{N} + 0,1 \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \sigma (T_{kx}^4 + T_{kn}^4) \frac{1}{2} \quad (11)$$

onde: r = coeficiente de reflexão considerado igual a 0,23 para o gramado, utilizado como cultura de referência, n = horas de brilho solar, $\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{K}^{-4}$ (constante de Stefan-Boltzmann), T_{kx} e T_{kn} temperaturas diárias máxima e mínima do ar, respectivamente, em Kelvin

N = fotoperíodo, calculado pela equação:

$$N = \frac{2h_n}{15} \quad (12)$$

$$h_n = \arccos(-\text{tg}\phi\text{tg}\delta) \quad (13)$$

Q_o = radiação extraterrestre diária determinada pela expressão

$$Q_o = 37,586 d_r (h_n \text{sen}\phi\text{sen}\delta + \text{cos}\phi\text{cos}\delta\text{sen}h_n) \quad (14)$$

onde: d_r = distância relativa Terra-Sol, h_n = ângulo horário na hora do nascer do sol (equação 13), ϕ = latitude do local (em radianos), δ = declinação solar do dia (em radianos)

Com:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\text{NDA} \frac{2\pi}{365} \right) \quad (15)$$

$$\delta = 0,4093 \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\text{NDA}} - 1,405 \right) \quad (16)$$

Onde NDA é o número do dia do ano.

Com os valores diários de ETo estimados pelo método de Penman-Monteith, os dados foram agrupados por decêndio, mês e estação do ano. Para o primeiro decêndio foram considerados os dados do dia 1 ao dia 10; para o segundo do dia 11 ao dia 20 e para o terceiro

do dia 21 ao último dia de cada mês, portanto este variando de 8 a 11 dias. Posteriormente, esses valores foram comparados com os dados de chuva de cada período na região. Ainda, foram computados os dias consecutivos em que a diferença entre chuva e evapotranspiração foi negativa, ou seja, dias sem chuva ou dias em que esta foi menor do que a evapotranspiração. Essa quantificação foi realizada apenas para os meses de maior evapotranspiração (setembro a março).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias e o desvio padrão dos valores diários da ETo foram calculados decendialmente e estão representadas na Figura 1, na qual é possível observar que esses valores apresentam um padrão de comportamento bem definido, decrescendo gradualmente de janeiro a junho e tornando-se crescente de julho a dezembro. Os valores extremos foram obtidos no segundo decêndio de junho, ($0,72 \text{ mm d}^{-1}$) e no primeiro decêndio de janeiro ($4,00 \text{ mm d}^{-1}$). Nota-se ainda, que o desvio padrão das séries é muito pequeno o qual proporciona credibilidade as médias decendiais encontradas. Observa-se na Figura 1 que os maiores valores médios diários ocorrem no mês de janeiro quando a evapotranspiração oscila entre $3,34 \text{ mm d}^{-1}$ e $4,16 \text{ mm d}^{-1}$, já o mês de junho mostra os menores valores variando de $0,64 \text{ mm d}^{-1}$ a $0,90 \text{ mm d}^{-1}$.

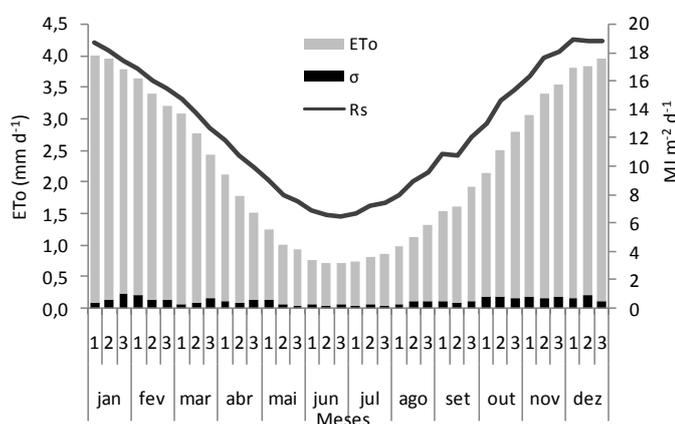


Figura 1. Valores médios diários decendiais da radiação solar global (Rs), evapotranspiração de referência (ETo, mm d^{-1}) e do desvio padrão (σ) de ETo, para a região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

Esta ampla variação da ETo ao longo do ano, representada na Figura 1, está diretamente relacionada a disponibilidade de energia solar envolvida neste processo, pois a radiação solar global, que apresenta alto coeficiente de determinação ($r^2 = 0,91$) com a estimativa da ETo pelo método de Penman-Monteith, diminui nos meses de inverno, para o hemisfério Sul, e aumenta nos meses do verão. Ainda na Figura 1, visualiza-se o

comportamento da radiação solar global (R_s) em Pelotas, que varia de $18,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a $6,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ entre janeiro e junho, e de $7,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a $18,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de julho a dezembro mostrando o mesmo padrão de comportamento da ETo. Isto está de acordo com os resultados encontrados por Marcuzzo et al. (2008) para a região de São Carlos-SP, onde os máximos valores de ETo foram obtidos durante os meses com maior radiação solar global.

A amplitude encontrada entre os valores médios mensais para a evapotranspiração na região de Pelotas, de $0,74 \text{ mm d}^{-1}$ a $3,90 \text{ mm d}^{-1}$, é maior do que a relatada por Syperreck (2008), com dados de 1994 a 2003, para Palotina, município do oeste do Paraná. No estudo paranaense os valores oscilam entre $1,06 \text{ mm d}^{-1}$ e $3,78 \text{ mm d}^{-1}$, ocorridos em junho e dezembro, respectivamente e apresentam média anual de $2,58 \text{ mm d}^{-1}$, levemente superior aos $2,25 \text{ mm d}^{-1}$ verificados na média do período total do estudo em Pelotas.

Ao analisar os dados meteorológicos de 1989 a 1993 em quatro regiões do estado de Sergipe, Souza et al. (2010) obtiveram estimativas de evapotranspiração de referência (ETo) utilizando vários métodos e em todos eles verificaram que os maiores valores da ETo foram obtidos nos sete primeiros e sete últimos decêndios do ano, tal qual Pelotas, que nestes períodos apresentaram os valores de ETo superior a 3 mm d^{-1} . Nos decêndios de alta demanda atmosférica em Sergipe os valores da ETo oscilaram entre $4,5 \text{ mm d}^{-1}$ e $5,5 \text{ mm d}^{-1}$ enquanto que no período de menor demanda, nos meses de maio, junho e julho, variaram de $2,5 \text{ mm d}^{-1}$ a $3,5 \text{ mm d}^{-1}$. A média anual da ETo nestas regiões foi de $4,2 \text{ mm d}^{-1}$, superior ao valor de $2,25 \text{ mm d}^{-1}$ ocorrido em Pelotas. Embora com valores mais elevados, a variabilidade anual teve o mesmo padrão daquela ocorrida em Pelotas. Isso pode ser justificado pela posição geográfica, pois segundo Martins et al. (2007), os valores da radiação solar nas regiões norte e nordeste são superiores aos da região sul do país na maioria dos períodos do ano.

Por influência dos valores da temperatura do ar cujas normais climatológicas em Pelotas variam de $22,9 \text{ °C}$ no verão, 19 °C na primavera, $16,4 \text{ °C}$ no outono a $13,2 \text{ °C}$ no inverno, havia a suspeita de que o verão seria a estação do ano com maior evapotranspiração de referência e, portanto, que exigisse mais atenção e cuidados com o suprimento de água para os cultivos. Entretanto, analisando sazonalmente a ETo, verifica-se que a primavera também necessita igual atenção pois, como mostrado na Tabela 1, os valores da evapotranspiração de referência são próximos daqueles observados no verão. Nota-se, também, que as ETo do verão e da primavera foram mais do que o dobro daquelas estimadas para o outono e inverno, mostrando grande variabilidade entre as estações. A máxima ETo foi observado para o período do verão, com uma média diária de $3,54 \text{ mm d}^{-1}$, o que está de

acordo com Camargo & Camargo (2000), que afirmam que a evapotranspiração no verão é mais elevada, pois é quando os dias são mais longos e ocorre uma maior radiação solar.

Esses resultados são condizentes com o saldo diário de radiação, cujas médias do verão e primavera são muito próximas, respectivamente, $13,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $12,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, e com a radiação extraterrestre, que apresenta valores semelhantes no verão ($40,22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e na primavera ($39,73 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), como consequência do ângulo de declinação solar o qual proporciona maior exposição solar nessas estações.

Tabela 1. Valores médios sazonais da evapotranspiração de referência (ET_o, mm d⁻¹) e seu desvio padrão (σ) para a região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

	Primavera	Verão	Outono	Inverno
ET _o	3,00	3,54	1,4	1,08
σ	0,68	0,44	0,60	0,33

Os valores do desvio padrão foram mais altos na primavera e no outono (Tabela 1), isso pode ser atribuído ao fato de serem estações de transição, ou seja, a primavera apresenta baixa demanda evapotranspirativa no início (setembro) e elevada ET_o no final da estação (novembro e dezembro) e o outono, alta demanda no começo (março e abril) e mais baixa ET_o no final da estação (junho). Estes resultados diferem daqueles obtidos por Petry (2004) que, considerando 13 anos de dados meteorológicos na avaliação da necessidade de irrigação na Depressão Central do Rio Grande do Sul, para o período entre agosto e dezembro, observou menor desvio padrão da ET_o nos meses de agosto e setembro.

Ainda na Tabela 1, verifica-se que no inverno foi obtida a menor ET_o ($1,08 \text{ mm d}^{-1}$), bem como, o menor desvio padrão entre as estações, cerca de $0,33 \text{ mm d}^{-1}$, isso está relacionado ao fato desta estação do ano dispor de menor energia solar, além de apresentar altas umidades relativas do ar aliado a regularidade das precipitações mais significativas neste período.

A evapotranspiração de referência anual apresenta a mesma regularidade em todos os anos do período analisado e a média de cada ano aproxima-se muito da média de ET_o de todo o período do estudo ($2,5 \text{ mm d}^{-1}$). As ET_o médias anuais estão representadas na Figura 2 que também contém a representação das ET_o máximas absolutas de cada ano, onde pode-se observar uma oscilação de valores desta última, entre 5 e 7 mm d^{-1} ocorrida nos anos de 2009 e 1976, respectivamente.

Quando se buscou identificar os meses em que ocorreram ET_o máximas absolutas, observou-se que a maioria desses valores ocorreu no mês de dezembro, onde se registraram

dezoito eventos, seguido do mês de janeiro, com quatorze ocorrências, de fevereiro com quatro e de novembro com apenas um registro.

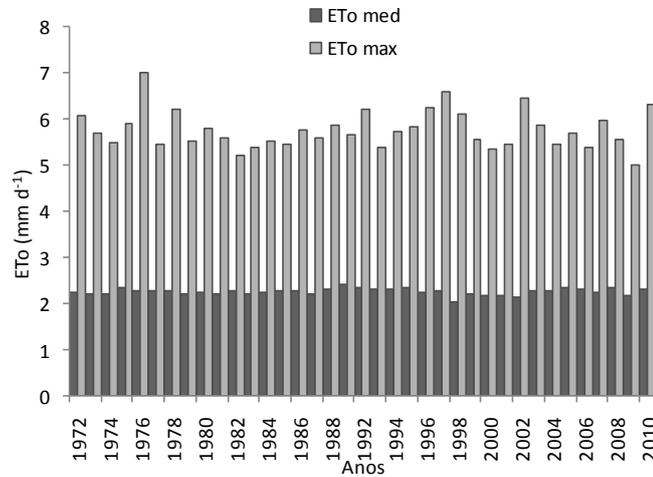


Figura 2. Valores da evapotranspiração de referência (ETo, mm d⁻¹) estimada pelo método de Penman-Monteith, média e máxima absoluta anual na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

Na Figura 3 estão representados os valores acumulados da evapotranspiração de referência e da chuva ocorrida em Pelotas, na qual é possível observar pouca variabilidade da ETo anual com valores próximos a 900 mm a⁻¹. Porém, para o somatório da chuva anual observa-se uma variação entre 890 mm a⁻¹ a 2314 mm a⁻¹ ocorrido nos anos de 1988 e 2002, respectivamente. A chuva do ano de 2002 foi uma exceção entre os demais anos e o valor registrado foi muito superior a normal climatológica anual da região, que é de 1366,9 mm. Em nove meses daquele ano foram registrados valores de chuva superiores a normal climatológica mensal, próximos de 340 mm nos meses de dezembro e março. A variação da chuva esta relacionada com a ocorrência e intensidade de fenômenos? La Niña e El Niño, os quais apresentam forte influência sobre esta variável no Sul do Brasil.

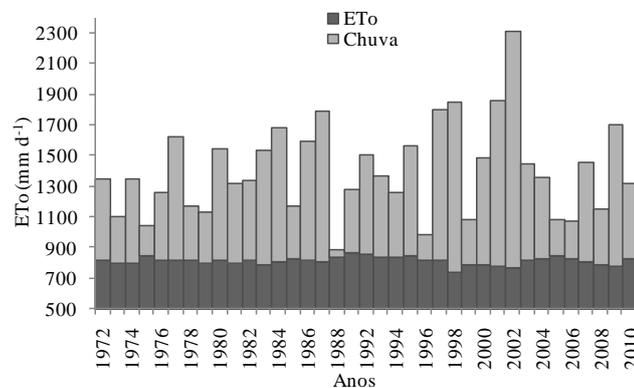


Figura 3. Total anual da estimativa da evapotranspiração de referência (ETo, mm d⁻¹) e da chuva, em mm a⁻¹, ocorrida em Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

Conforme pode ser observado na Figura 3, na comparação entre os valores anuais a chuva mostra valores superiores à evapotranspiração. Porém, quando se considera um intervalo de tempo menor, como dez dias, por exemplo, a evapotranspiração é superior a precipitação em alguns desses períodos. Na Figura 4 é possível verificar que na maioria dos meses a chuva em cada decêndio foi maior do que a evapotranspiração de referência ocasionando, no período de maio a setembro, diferença positiva entre eles, entretanto, em alguns decêndios da primavera e do verão ocorre déficit de precipitação, mais especificamente no período compreendido entre 20 de novembro e 20 de janeiro. Observa-se, por exemplo, que no primeiro decêndio de janeiro, a diferença média entre essas duas variáveis é de aproximadamente $-1,05 \text{ mm d}^{-1}$, a qual acarreta déficit hídrico de 10,5 mm no período. Essa análise permite inferir sobre a disponibilidade de água aos cultivos de acordo com o tipo de cultura e fase fenológica, bem como sobre a possível necessidade de irrigação em cada período.

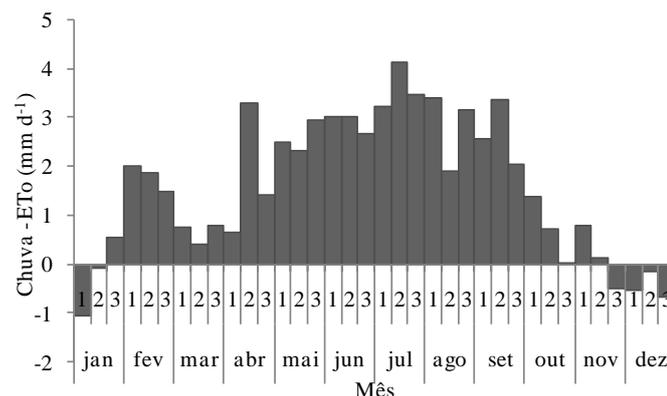


Figura 4. Diferença média por decêndio entre chuva e estimativa da evapotranspiração de referência, (ET_o , mm d^{-1}) para Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

O período de primavera/verão no Rio Grande do Sul apresenta uma elevada demanda evaporativa da atmosfera onde a precipitação no período, no geral, é insuficiente para atender a necessidade hídrica das culturas (Carlesso et al., 2001).

Para os demais decêndios foram observados valores positivos, o que corresponde a precipitações superiores a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith, sendo que do primeiro decêndio de maio ao segundo de setembro foram obtidos valores superiores a 2 mm dia^{-1} , e obtendo o valor máximo no segundo decêndio de julho com $4,13 \text{ mm dia}^{-1}$.

Resultados semelhantes foram obtidos por Silva (2008) para o município de Uruguaiana, localizado no oeste do Rio Grande do Sul. Utilizando dados de 1977 a 2006, a

autora estimou a evapotranspiração pelo método de Thornthwaite e verificou que dezembro e janeiro também foram os meses em que os valores médios mensais de evapotranspiração foram superiores aos de precipitação.

No entanto, para Marilândia no estado do Espírito Santo, que apresenta condições climáticas típicas de clima tropical, distintas das características da região sul, resultados obtidos por Silva et al. (2010), foram diferentes. Os autores estimaram a evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves e Samani e verificaram que no mês de janeiro os valores de ETo e de chuva se igualam, em novembro e dezembro a chuva supera a ETo e nos demais meses a ETo é maior do que a chuva concluindo que existe a necessidade de suplementação de água para as culturas na maioria dos meses do ano na região.

As diferenças entre as médias diárias mensais da chuva e da evapotranspiração dos meses de setembro a março, indicam situações anuais que oscilam entre déficit e excedente de precipitação. Na Figura 5 estão ilustrados os meses de setembro e janeiro os quais apresentaram os comportamentos extremos na região de Pelotas. No mês de setembro (Figura 5B) essa diferença é positiva na maioria dos anos, sugerindo que neste mês há poucos casos de déficit, entretanto em muitos anos do período analisado verificam-se períodos de dias consecutivos no mês em que essa diferença foi negativa. Exemplos dessa situação ocorreram nos anos de 1976, quando a média diária do mês foi de 2,3 mm e houve 15 dias consecutivos que acumularam déficit de 31,4 mm; em 1983 num período de 21 dias consecutivos em que a evapotranspiração foi maior que a precipitação, atingindo o déficit de 32,4 mm; e no ano de 1999, cuja média diária do mês (1,9 mm) não expressa o déficit de 37,9 mm, acumulados numa sequência de 16 dias.

Na Figura 5A observa-se que o mês de janeiro apresenta em vários anos médias mensais negativas, porém, os valores não refletem a intensidade do déficit causado por períodos de dias consecutivos em que a diferença diária entre precipitação e evapotranspiração foi negativa. No ano de 1980, por exemplo, a média diária mensal desse mês ($-2,1 \text{ mm d}^{-1}$) indica um déficit do 65,1 mm no mês, mas esse valor é bastante inferior aos 103 mm de déficit registrados em um período de 24 dias consecutivos. Analogamente, no ano de 2006 o déficit resultante de nove dias consecutivos foi de 33 mm e a média de $-0,1 \text{ mm d}^{-1}$ sinaliza um déficit de apenas 3,1 mm no mês. Essa situação também se verifica em anos que a média do mês de janeiro é positiva. Exemplo disso foi o ocorrido em 2002, quando a média mensal de 2,0 mm mascara o déficit de 48,7 mm, ocasionados por 14 dias consecutivos de diferenças negativas entre chuva e evapotranspiração. Nos meses de outubro, novembro, dezembro, fevereiro e março também ocorrem situações em que as médias não

refletem o comportamento da diferença da chuva ocorrida e da evapotranspiração de referência estimada.

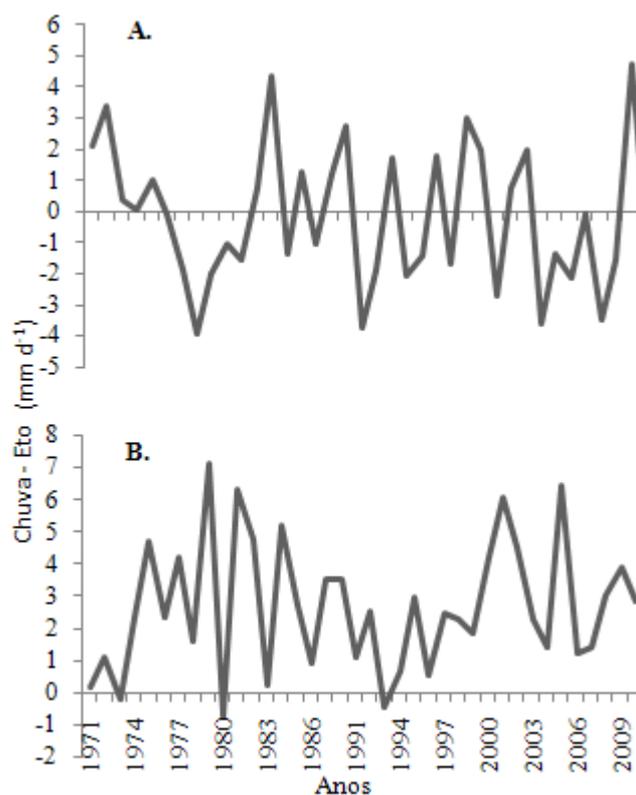


Figura 5. Média diária mensal da diferença entre a chuva e a evapotranspiração de referência, (ET_0 , $mm\ d^{-1}$) representadas anualmente, para a região de Pelotas-RS, nos meses janeiro (A) e setembro (B).

Com base nesses dados, verifica-se que é necessária atenção quando se utilizam dados médios. Em Pelotas, valores de precipitação formam uma série de dados que apresenta desvio padrão muito grande, devido à existência de muitos valores nulos fazendo com que a média não seja o melhor índice estatístico para representar os dados. Nestes casos, a média mascara uma situação, pois valores positivos para a média de um mês podem não refletir a ocorrência de vários dias consecutivos sem chuva, com consequências importantes no crescimento dos cultivos, dependendo da tolerância da cultura e da fase fenológica que se encontra quando ocorrem esses períodos de déficit de chuva.

Na Tabela 2 estão apresentadas as séries de dias consecutivos em que a diferença entre a precipitação e a ET_0 foi negativa e a quantidade de vezes que ocorreram nos meses de setembro a março. Períodos de 4 a 8 dias negativos são frequentes e merecem atenção, pois causam déficit de até 38 mm. Períodos mais longos são mais escassos, porém há estimativa de déficit de até 100 mm nestes períodos, o que pode ocasionar prejuízos na produção das culturas e, por essa razão também devem ser considerados.

Entre setembro e março existem longos períodos de dias secos em Pelotas. Entre 24 de dezembro de 2002 a 19 janeiro de 2003 registraram-se 27 dias consecutivos em que a diferença entre chuva e ETo foi negativa, gerando um déficit de 116,9 mm no período. Outro episódio de escassez de precipitação ocorreu entre novembro de 2006 e fevereiro de 2007 quando houve dois períodos de 25 dias e um de 15 dias sem chuvas gerando 245 mm de déficit entre chuva e ETo.

Tabela 2. Número de repetições de séries de dias consecutivos com diferença de chuva e ETo negativa, nos meses de setembro a março do período de 1971 a 2010.

Nº de dias	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
4	22	15	17	17	21	15	18
5	20	12	12	13	14	18	16
6	10	14	12	9	12	8	10
7	4	12	6	14	11	11	5
8	3	5	13	11	5	11	6
9	5	4	6	9	6	7	8
10	3	5	3	4	5	4	6
11	2	2	7	1	3	6	6
12	8	2	3	5	3	3	4
13	3	4	7	2	3	2	3
14	1	1	2	4	1	0	4
15	2	2	0	3	3	1	1
16	2	1	0	0	1	0	2
17	1	3	0	0	1	1	2
18	0	3	1	0	0	0	1
19	2	1	1	0	2	0	0
20	0	0	2	0	1	0	1
21	1	0	0	2	0	0	0
22	0	0	0	0	1	0	0
23	0	0	0	0	2	0	0
24	0	0	0	1	1	0	0
25	0	0	1	1	0	0	0
26	0	1	0	0	0	0	1
27	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	1	0

CONCLUSÕES

1. A média anual da evapotranspiração de referência para Pelotas é de 2,25 mm d⁻¹. A primavera apresenta valor médio de 3,00 mm d⁻¹, próximos aos 3,54 mm d⁻¹ observados no verão enquanto, outono e inverno apresentam valores de 1,40 e 1,08 mm d⁻¹, respectivamente.

2. A soma total anual da precipitação ocorrida em Pelotas é maior que o total da ETo, porém na média decendial observa-se que de 20 de novembro a 20 de janeiro a diferença entre chuva e ETo é negativa.

3. A média mensal não é um bom preditor para analisar a diferença entre chuva e ETo.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. - Rome, 1998. **FAO Irrigation and drainage paper n56**

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. **Uma revisão analítica da Evapotranspiração Potencial**. Bragantina, v.59, n.2, p.125-137, 2000.

CARLESSO, R.; PETRY, M. T; ROSA, G. M. Manejo da irrigação por aspersão visando a redução de custos de produção e energia. In: Carlesso et al. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Imprensa Universitária, p. 84-113, 2001.

EAPEL Estação Agroclimatológica de Pelotas.
<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/index.html>. Acesso em 27 de setembro de 2011.

MARCUZZO, F. F. N.; ARANTES, E. J.; WENDLAND, E. Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial e direta para a região de São Carlos-SP. **Irriga**, v.13, n.3, p.323-338, 2008.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; SALASSIER, B.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referencia na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.275-279, 2003.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. ; SEDYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHA, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Livraria e Editora Agropecuária, 2002, 478p.

PETRY, M. T. **Simulação da necessidade de irrigação no estado do Rio Grande do Sul para compensar perdas por deficiência hídrica de milho, soja e feijão**. Santa Maria: UFSM, 2004. 174p. Tese Doutorado.

REIS, E. F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G. O.; PEPOZZONE, J. E. M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. **Idesia**, Chile, v.25, n.3, p.75-84, 2007.

ROQUE, M. W, **Variabilidade espacial de atributos físicos hídricos do solo cultivado com feijão irrigado submetido a diferentes sistemas de preparo**. Campinas, SP, 2007. 198p. Tese (Doutor em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2007

SILVA, J. G. F.; RAMOS, H. E. A., IGREJA, G. C.; FREITAS, R. A.; ROCHA, G. A. Estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Marilândia- ES. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO E DO CARIBE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 9 E CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39, 2010, Vitória. **Anais do...Jaboticabal**: SBEA, 2010.CD Rom.

SILVA, M. V; CAMPOS, C. R. J. Balanço hídrico climatológico para Uruguaiana- RS. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16 E ENCONTRO DE PÓS- GRADUAÇÃO, 10, 2008, Pelotas. **Anais do...**Pelotas: UFPel. 2008. CD Rom.

SMITH, M. **Report n the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements.** Rome FAO, 45p. 1991.

SOUZA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G; NETTO, A. O. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado do Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, PB, v.14, n.6, p.633-644, 2010

SYPERRECK, V. L. G.; KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativa de evapotranspiração de referencia para região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy,** Maringá, v. 30, n. 5, p.603-609, 2008.

STEINMETZ, S.; ASSIS, F. N.; SOARES, W. R. Estimativa da radiação solar global a partir da insolação na região de Pelotas, Rio Grande do Sul. **Agropecuária Clima Temperado,** v. 2, n.1, p. 77-85, 1999.

4. Artigo 2 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS INDIRETOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Resumo: Este trabalho teve como objetivo comparar os métodos indiretos de estimativa da evapotranspiração de referência com o método padrão Penman-Monteith nas escalas diária, quinidial e mensal, para a região de Pelotas, e indicar o método de melhor desempenho em cada estação do ano. Foram utilizados dados meteorológicos diários da Estação Agroclimatológica de Pelotas-RS dos anos de 1971 a 2010 e os métodos do Tanque Classe A, Thornthwaite, Camargo, Makkink, Radiação Solar, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle e Penman-Monteith. Verificou-se que existem diferenças de desempenho entre os métodos nas escalas de tempo analisadas e que para as condições mesoclimáticas da região de Pelotas o método que melhor se ajusta ao método padrão, em todas as escalas e em todas as estações do ano é o de Blaney-Criddle, com ótimo desempenho na primavera e verão ($c=0,94$ e $c=0,93$ na escala de cinco dias), muito bom desempenho no outono ($c=0,90$) e desempenho regular no inverno ($c=0,74$), seguido dos métodos de Makkink, Radiação Solar e Jensen-Haise. Os métodos Tanque Classe A, Thornthwaite, Camargo e Hargreaves-Samani apresentaram desempenhos muito baixos em todas as estações do ano.

Palavras-chave: Penman-Monteith; métodos empíricos; evapotranspiração potencial; índice de desempenho.

COMPARISON BETWEEN REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION INDIRECT ESTIMATIVE METHODS

Abstract: This work aimed to compare the reference evapotranspiration indirect estimative methods with the Penman-Monteith standard method in the daily, quinquidial and monthly scales, for the region of Pelotas, and indicate the method with the best performance in every season of the year. Meteorological daily data from the Agroclimatologic Station of Pelotas-RS of the years from 1971 to 2010 and the Class A Tank, Thornthwaite, Camargo, Makkink, Solar Radiation, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle and Penman-Monteith methods were used. It was verified that there are performance differences between the methods in the time scales analyzed and that for the mesoclimatic conditions of the region of Pelotas the method that best fits to the standard method, in all scales and in all seasons of the year, is the Blaney-Criddle, with excellent performance on spring and summer ($c=0.94$ e $c=$

0.93 in the five-day scale), very good performance on autumn ($c=0.90$) and regular performance on winter ($c=0.74$), followed by the Makkink, Solar Radiation and Jensen-Haise methods. The Class A Tank, Thornthwaite, Camargo and Hargreaves-Samani methods presented very bad performances in all seasons of the year.

Keywords: Penman-Monteith. Empirical methods. Potential evapotranspiration. Performance rate.

INTRODUÇÃO

Utilizar racionalmente a água nas atividades agrícolas é crucial para o atendimento das necessidades alimentares da população na medida em que a escassez hídrica vem aumentando e, segundo Coelho et al. (2005), a agricultura irrigada consome cerca de 70% da água doce disponível no planeta. É fundamental, pois, fornecer e aplicar água na agricultura com maior eficiência aumentando a produtividade por litro de água consumida nas lavouras (Silveira Filho, 2005).

Evapotranspiração é o processo de transferência simultânea de água para a atmosfera através da evaporação da água da superfície e da transpiração das plantas. Em condições específicas, numa superfície de grama com altura entre 0,08 e 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água esse processo é chamado evapotranspiração de referência (ET_o) (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Estimativas de evapotranspiração através de métodos exclusivamente teóricos são muito trabalhosas e pouco precisas quando comparados com medições diretas. Métodos empíricos, resultantes de correlação entre a evapotranspiração medida em condições padronizadas e os elementos meteorológicos medidos em postos também padrões, produzem resultados melhores do que aqueles mais genéricos e fisicamente mais reais.

Os métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) são baseados em uma ou mais variáveis atmosféricas, tais como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa e vento. Dentre as muitas alternativas de expressões, Thornthwaite utiliza somente dados de temperatura do ar em seu método; Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Camargo apresentaram métodos para estimar a evapotranspiração de referência que, além da temperatura, utilizam dados de radiação solar e radiação extraterrestre, o método de Makkink faz uso de dados de radiação solar e temperatura de bulbo úmido. Para os métodos da Radiação Solar e de Blaney-Criddle, além da temperatura e radiação solar também são consideradas as medidas de vento, umidade do ar, insolação e fotoperíodo. Linacre utiliza dados locais de altitude, latitude, temperatura e a temperatura do ponto de orvalho como

variáveis. O método do Tanque classe A utiliza medida de evaporação de um tanque e faz ajustes em função das características de cobertura da superfície onde o tanque está instalado, da velocidade do vento e umidade relativa do ar (Pereira et al.1997).

O método de Penman-Monteith é um método mais complexo, sua expressão incorpora aspectos termodinâmicos e aerodinâmicos da cultura, considerando a resistência aerodinâmica e a resistência da vegetação. É o método recomendado pela FAO (Food and Agriculture Organization) como o mais adequado e preciso para estimar a evapotranspiração de referência (Allen, 1998).

No entanto, como o método de Penman-Monteith requer variáveis meteorológicas muitas vezes não disponíveis em estações meteorológicas de pequeno porte, muitos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de comparar outros métodos, que utilizem menor número de variáveis, com o padrão. As diferenças de clima e condições atmosféricas de cada região justificam as diferenças das estimativas de cada método e exigem que sejam feitos estudos regionais específicos e sazonais para identificar o mais adequado às condições locais.

Na Serra da Mantiqueira em Minas Gerais, Pereira et al.(2009), compararam os métodos de Makkink, Radiação Solar, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Priestley-Taylor, Penman, Hamon e Karrufa com o método padrão de Penman-Monteith, durante os anos de 2007 e 2008 obtiveram como resultado da pesquisa que, na escala diária, os métodos de Jensen-Haise, Radiação Solar, Penman e Blaney-Criddle apresentaram, independente da época do ano, bom ajuste ao método padrão, com os coeficientes de correlação nos períodos secos iguais a 0,89; 0,91; 0,99 e 0,90 respectivamente e os menores erros padrões médios entre todos os métodos.

Em Bento Gonçalves-RS, Conceição & Mandelli (2005) compararam o método de Penman-Monteith com métodos de estimativas da evapotranspiração de referência baseadas na temperatura do ar e na radiação solar incidente, representadas pelas equações de Hargreaves-Samani, Camargo, Thornthwaite, Makkink e Radiação Solar. O método de Hargreaves-Samani apresentou, surpreendentemente, o melhor desempenho ($c = 0,84$), pois o método foi ajustado para condições semi-áridas da Califórnia. Este resultado foi atribuído às diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas do ar utilizada no método que, de certa forma, refletem as condições de umidade do ar na região, pois em geral quanto maior a umidade relativa, menor a amplitude térmica.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência dos métodos indiretos de estimativa da evapotranspiração de referência em comparação com o método padrão Penman-Monteith-FAO, nas escalas diária, quinidial e mensal, para as condições climáticas da

região de Pelotas, e indicar o método de melhor desempenho em cada estação do ano em cada escala.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido com dados meteorológicos do acervo histórico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, instalada na cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul considerando o período entre os anos de 1971 a 2010. A região de Pelotas (31°52'S e 52°21'W, 13 m de altitude) possui clima do tipo subtropical úmido, com temperatura média anual de 17,8 °C, sendo que a temperatura média do mês mais frio (julho) é de 12,3 °C e do mês mais quente (janeiro) é de 23,2 °C, com chuva anual de 1367 mm, regularmente distribuída ao longo do ano (EAPEL, 2011).

Os valores da Evapotranspiração de referência foram estimados pelos seguintes métodos: Tanque Classe A (EToTA), Thornthwaite (EToTH), Camargo (EToCA), Makkink (EToMK), Radiação Solar (EToRS), Jensen-Haise (EToJH), Linacre (EToLI), Hargreaves-Samani (EToHS), Blaney-Criddle (EToBC) e Penman-Monteith (EToPM), através das expressões:

Tanque Classe A (EToTA)	$EToTA = KpECa$
Thornthwaite (EToTH)	$EToTH = 16 \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a \quad T_i > 0^\circ C$
Camargo (EToCA)	$EToCA = F Q'_o T ND$
Makkink (EToMK)	$EToMK = 0,61 W R_s - 0,12$
Radiação Solar (EToRS)	$EToRS = c_0 + c_1 W R_s$
Jensen-Haise (EToJH)	$EToJH = R_s (0,0252 T + 0,078)$
Linacre (EToLI)	$EToLI = \frac{\frac{500(T+0,006 h)}{100-\phi} + 15(T - T_o)}{80 - T}$
Hargreaves-Samani (EToHS)	$EToHS = 0,0023 Q'_o (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T + 17,8)$
Blaney-Criddle (EToBC)	$EToBC = a + b p (0,46 T + 8,13)$
Penman-Monteith(EToPM)	$EToPM = \frac{s}{s + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{900\gamma}{(s + \gamma^*)(T + 275)} U_2 (e_s - e_a)$

A descrição detalhada das variáveis acima é encontrada em Pereira et al (1997).

Após o cálculo da estimativa diária da evapotranspiração de referência para cada método, foi feita a comparação, individual, através do coeficiente de correlação (r) obtido da correlação linear entre cada método com o método padrão de Penman-Monteith. Segundo Meyer (1976), a precisão será medida pelo coeficiente de correlação (r) que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação a média, ou seja, o erro aleatório o qual é determinado pela expressão:

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

onde: x_i são os valores a ser comparados com o método padrão; y_i são valores estimados pelo método padrão e \bar{x} e \bar{y} as médias respectivas de x_i e y_i .

O grau de significância do coeficiente de correlação (r) foi determinado através do teste “t” Student e foi comparado com o valor crítico de t com $(n-2)$ graus de liberdade. A prova estatística foi feita pela expressão:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

A significância do coeficiente de correlação é determinada pelo valor do t calculado ser maior que o valor de t crítico no nível desejado.

A exatidão foi determinada pelo índice de Willmott (d), segundo metodologia apresentada por Camargo e Sentelhas (1997), expresso por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(x_i - y_i)^2}{\sum(|x_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \right]$$

O índice de desempenho (c), que reúne os índices de precisão (r) e de exatidão (d) através da expressão $c = r d$, foi utilizado para classificar a relação entre cada método com o método padrão, de acordo com a metodologia proposta por Camargo & Sentelhas (1997), da seguinte forma: a relação foi considerada ótima (OT), quando c apresentou valores maiores que 0,85; muito boa (MB), para valores entre 0,76 e 0,85; boa (BO), para valores entre 0,66 e 0,75; mediano (ME), para valores entre 0,61 e 0,65; sofrível (SO), para valores entre 0,51 e 0,60; mau (MA), para valores entre 0,41 e 0,50; e péssima (PE), para valores do índice c inferiores a 0,41.

Para dar suporte a essa classificação também foi calculado o valor do Erro Padrão de Estimativa (EPE) através da expressão:

$$EPE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

As estimativas da evapotranspiração de referência foram determinadas para todos os métodos nas escalas diária, quinquidial e mensal.

A escala quinquidial foi estimada através da média de cinco dias das variáveis utilizadas nas equações. A escala mensal foi obtida pela média dos dias de cada mês. A comparação mensal dos métodos foi feita a partir das médias diárias mensais de cada ano da pesquisa. Os resultados das comparações diárias e quinquidiais foram apresentados sazonalmente para facilitar sua apresentação e uso em projetos de irrigação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao analisar as médias diárias mensais da evapotranspiração de referência, constantes na Tabela 1, observa-se que não existe um único método que apresente valores médios mais próximos dos valores estimados pelo método padrão de Penman- Monteith (EToPM) em todos os meses.

A maior proximidade ocorre com as estimativas obtidas pelo método de Blaney-Criddle nos meses de janeiro, fevereiro e março quando, por exemplo, a estimativa média para janeiro foi de 3,92 mm d⁻¹ enquanto que pelo método padrão foi de 3,90 mm d⁻¹; e nos meses de abril, maio, setembro e outubro com o método de Makkink cuja estimativa de abril foi de 1,88 mm d⁻¹ e pelo método padrão foi de 1,81 mm d⁻¹.

Vê-se ainda na Tabela 1, que nos meses de maio, junho, julho e novembro as maiores proximidades apresentadas foram com o método de Camargo enquanto que o método de Thornthwaite apresentou as estimativas mais próximas ao padrão nos meses de agosto e dezembro.

Deve-se notar que os valores apresentados na Tabela 1 são resultados da média de todos os dias dos meses, assim, valores como os das estimativas dos métodos de Penman-Monteith e Makkink, em janeiro (3,90 e 3,42 mm d⁻¹), cuja diferença é de apenas 0,48 mm d⁻¹, representam uma diferença de 14,88 mm no mês que, dependendo da cultura e da fase que se encontra, pode ser importante no seu desenvolvimento e produtividade.

Tabela 1- Média diária da evapotranspiração de referência (ET_o, mm d⁻¹) estimada para cada mês pelos métodos de Penman-Monteith (ET_oPM), Radiação Solar (ET_oRS), Linacre (ET_oLI), Jensen-Haise (ET_oJH), Makkink (ET_oMK), Camargo (ET_oCA), Thornthwaite (ET_oTH), Blaney-Criddle (ET_oBC), Hargreaves-Samani (ET_oHS) e Tanque Classe A (ET_oTA), na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

	ET _o PM	ET _o RS	ET _o LI	ET _o JH	ET _o MK	ET _o CA	ET _o TH	ET _o BC	ET _o HS	ET _o TA
JAN	3,90	4,86	2,67	5,55	3,42	4,36	4,11	3,92	4,94	5,35
FEV	3,42	4,19	2,54	4,92	3,04	3,96	3,84	3,49	4,47	4,84
MAR	2,75	3,35	2,33	3,99	2,53	3,12	3,25	2,88	3,72	4,05
ABR	1,81	2,41	1,91	2,72	1,88	2,02	2,22	2,15	2,72	3,05
MAI	1,06	1,54	1,52	1,70	1,28	1,28	1,45	1,43	1,90	2,00
JUN	0,74	1,13	1,31	1,18	0,95	0,92	1,03	1,03	1,46	1,60
JUL	0,81	1,21	1,29	1,24	1,01	0,96	1,01	1,16	1,56	1,73
AGO	1,15	1,63	1,42	1,63	1,30	1,31	1,22	1,39	2,02	2,12
SET	1,69	2,31	1,60	2,27	1,74	1,88	1,61	1,89	2,62	2,75
OUT	2,50	3,34	1,95	3,38	2,41	2,69	2,31	2,63	3,53	3,70
NOV	3,32	4,47	2,33	4,61	3,11	3,40	2,98	3,51	4,42	4,77
DEZ	3,86	5,11	2,60	5,53	3,54	4,05	3,70	4,06	4,92	5,50

Observa-se ainda, que todos os métodos apresentaram o mesmo padrão de resposta à evapotranspiração, a qual é decrescente de janeiro a junho e crescente de julho a dezembro. Os valores mais elevados de ET_o foram observados nos meses de dezembro e janeiro e os mais baixos nos meses de junho e julho. Esta variabilidade foi menos acentuada no método de Linacre que, juntamente com o de Makkink, alcançou menor amplitude da ET_o entre os meses de verão e inverno.

A amplitude do método de Linacre de 1,38 mm d⁻¹ foi menor que a dos demais métodos e o método não demonstrou o mesmo comportamento obtido pelo método de Penman-Monteith, pois apresentou valores inferiores aos obtidos pelo método padrão nos meses mais quentes e superiores ao padrão nos meses mais frios entre abril e agosto. À exceção dos métodos de Linacre, Makkink e Thornthwaite, os demais métodos apresentam os valores da ET_o superiores aos do método padrão, em todos os meses do ano (Tabela 1).

A tendência de comportamento observada em todos os métodos segue o mesmo padrão de variação da temperatura média do ar. Os métodos da Radiação Solar e Makkink, que utilizam a temperatura de bulbo úmido, também exibiram a mesma tendência de comportamento.

Apesar de a radiação solar ser levada em consideração diretamente apenas nos métodos ET_oRS, ET_oJH, ET_oMK e ET_oCA, é uma variável influente nas estimativas de ET_o pois atua como fator climático e interfere diretamente nos demais elementos do clima.

A variação dos resultados mensais contidos na Tabela 1 apresentou o mesmo padrão de comportamento observado por Borges & Mendiondo (2007), no estado de São Paulo, entretanto diferem quanto aos valores obtidos nas estimativas, as quais variaram de valores próximos a $2,0 \text{ mm d}^{-1}$ no mês de junho até valores em torno de $5,3 \text{ mm d}^{-1}$ nos meses de dezembro e janeiro. No estudo paulista os métodos de Blaney-Criddle, Camargo e Thornthwaite subestimaram os valores em praticamente todos os meses do ano, entretanto, nos meses de janeiro, fevereiro e março, tal quais os resultados obtidos para Pelotas, o método de Blaney-Criddle apresentou valores muito próximos daqueles obtidos pelo método padrão.

O mesmo comportamento da variação dos valores médios da estimativa de ETo foi observado por Oliveira & Carvalho (1998), para Seropédica no Rio de Janeiro, embora os valores tenham apresentado menor amplitude variando de cerca de $2,5$ a $4,3 \text{ mm d}^{-1}$. Nessa pesquisa os métodos da Radiação Solar e Hargreaves-Samani superestimaram a ETo em todos os meses.

Os resultados anteriores diferem dos obtidos por Pereira et al. (2009), para a Serra da Mantiqueira em Minas Gerais, onde foi observado que os valores mensais da ETo variam entre $2,0$ e $3,7 \text{ mm d}^{-1}$ e mostram comportamento diferente ao longo do ano pois decrescem de janeiro a fevereiro, mantendo-se estável entre fevereiro e março quando iniciam decréscimo até junho, voltando a crescer desse mês até outubro, decrescendo de outubro a novembro e voltando a crescer em dezembro. As estimativas foram feitas por treze métodos e todos apresentaram o mesmo padrão.

Fazendo-se a comparação dos valores das estimativas de cada método com o obtidos pelo método de Penman-Monteith em todo o período analisado, de 1971 a 2010, nas escalas diárias, quinquidiais e mensais observa-se que essas relações podem variar bastante de acordo com o período analisado.

Amatya et al. (1995), analisando dados da região leste do Estado da Carolina do Norte, Estados Unidos da América, concluíram que os métodos de Priestley-Taylor e Turc foram os que apresentam melhor desempenho na comparação mensal com o método de Penman-Monteith nos meses do verão, enquanto que na escala diária os valores da evapotranspiração estimados por Priestley-Taylor e Makkink ajustaram-se melhor ao método padrão.

Na comparação entre cada método com o método padrão, ao longo dos 13926 dias do período, é possível destacar os métodos de Blaney-Criddle e Makkink que demonstraram ótimo e muito bom desempenho com índice $c = 0,91$ e $0,85$ (Tabela 2), mostrando também os menores valores de erro padrão de estimativa equivalente a $0,51$ e $0,60 \text{ mm d}^{-1}$,

respectivamente, quando comparados com o método padrão. Os métodos da Radiação Solar e Jensen-Haise apresentaram muito bom desempenho com índice de desempenho em torno de 0,80 e valores de erro padrão de estimativa em torno de 1,1.

Na Tabela 2 observa-se ainda que, embora os métodos de Linacre, Camargo e Hargreaves-Samani tenham apresentado coeficiente de desempenho muito próximos, o valor do coeficiente de correlação e do erro padrão de estimativa indica o método de Linacre como mais ajustado ao método padrão do que os métodos de Camargo e Hargreaves-Samani. Para a região, os métodos de Thornthwaite e Tanque classe A apresentam os piores desempenhos com índice $c = 0,60$ e $0,63$, respectivamente.

Tabela 2- Erro padrão de estimativa (EPE, mm d⁻¹), índice de determinação (r^2), coeficiente de correlação (r), coeficiente de exatidão (d), coeficiente de desempenho (c) e classificação da comparação dos métodos da Radiação Solar (EToRS), Linacre (EToLI), Jensen-Haise (EToJH), Makkink (EToMK), Camargo (EToCA), Thornthwaite (EToTH), Blaney-Criddle (EToBC), Hargreaves-Samani (EToHS) e Tanque Classe A (EToTA) com o método de Penman-Monteith (EToPM), na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

	EToRS	EToLI	EToJH	EToMK	EToCA	EToTH	EToBC	EToHS	EToTA
EPE	1,13	0,91	1,35	0,60	0,91	1,02	0,51	1,21	1,68
r^2	0,84	0,74	0,85	0,81	0,62	0,51	0,89	0,74	0,66
r	0,92	0,86	0,92	0,90	0,79	0,71	0,94	0,86	0,81
d	0,89	0,80	0,85	0,94	0,88	0,84	0,97	0,83	0,77
c	0,81	0,69	0,79	0,85	0,69	0,60	0,91	0,71	0,63
Classif*	MB	BO	MB	MB	BO	SO	OT	BO	ME

*Classificação para o índice desempenho OT- ótimo, MB- muito bom, BO- bom, ME- mediano, SO- sofrível

** coeficiente de correlação r significativo a 1%

Mendonça et al. (2003), em estudo da comparação de estimativas de ETo feitas por lisímetro de pesagem com vários métodos, no estado do Rio de Janeiro, também identificou que o método do Tanque classe A apresentou o pior desempenho e o de Penman-Monteith o melhor. Este resultado difere daqueles obtidos por Trajkovic e Gocic (2010), com dados do sul da Itália, e por Barros et al. (2009), no Rio de Janeiro, que identificaram os métodos de Penman-Monteith e do Tanque Classe A como os mais precisos. O estudo italiano dá preferência ao segundo por sua facilidade de aplicação.

Considerando-se a grande variabilidade climática no decorrer dos meses do ano em Pelotas, foi realizada análise mês a mês da comparação entre os valores da estimativa da evapotranspiração de referência obtida pelos métodos indiretos. Assim, supondo que a escala de tempo adotada pode gerar diferenças nas estimativas, em função das expressões e variáveis utilizadas em cada método, foram realizadas estimativas nas escalas diária, quinidial e mensal para identificar os resultados mais precisos.

Tabela 3- Valores do coeficiente de desempenho (c) e do erro padrão de estimativa (EPE, mm d⁻¹) da comparação dos métodos da Radiação Solar (EToRS), Linacre (EToLI), Jensen-Haise (EToJH), Makkink (EToMK), Camargo (EToCA), Thornthwaite (EToTH), Blaney-Criddle (EToBC), Hargreaves-Samani (EToHS) e Tanque Classe a (EToTA) com o método de Penman-Monteith, para a estimativa de ETo, para a cidade de Pelotas, no período de 1971 a 2010 nas escalas diária, quinquidial e mensal apresentados mês a mês.

	valores diários																	
	EToRS		EToLI		EToJH		EToMK		EToCA		EToTH		EToBC		EToHS		EToTA	
	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE
JAN	0,69	1,42	0,38	1,45	0,55	0,96	0,75	0,77	0,04	1,26	0,03	1,23	0,86	0,49	0,29	1,38	0,42	1,98
FEV	0,74	1,16	0,49	1,11	0,57	1,75	0,78	0,63	0,06	1,20	0,04	1,19	0,88	0,42	0,36	1,32	0,35	1,94
MAR	0,70	0,94	0,52	0,69	0,53	1,49	0,72	0,54	0,17	0,89	0,12	1,03	0,85	0,39	0,34	1,18	0,35	1,73
ABR	0,60	0,89	0,59	0,45	0,44	1,16	0,60	0,52	0,07	0,76	0,00	0,98	0,74	0,51	0,24	1,12	0,26	1,64
MAI	0,41	0,75	0,39	0,59	0,28	0,88	0,36	0,53	0,01	0,57	0,01	0,83	0,56	0,52	0,10	1,01	0,19	1,32
JUN	0,28	0,70	0,34	0,68	0,14	0,70	0,18	0,54	0,05	0,55	0,04	0,76	0,43	0,50	0,00	0,91	0,16	1,18
JUL	0,29	0,73	0,35	0,64	0,18	0,72	0,21	0,54	0,00	0,54	0,00	0,70	0,40	0,59	0,14	0,94	0,12	1,37
AGO	0,45	0,86	0,52	0,50	0,36	0,82	0,41	0,58	0,04	0,64	0,03	0,76	0,62	0,50	0,17	1,08	0,21	1,37
SET	0,55	1,03	0,59	0,47	0,51	0,93	0,58	0,58	0,02	0,80	0,01	0,90	0,70	0,51	0,22	1,18	0,25	1,51
OUT	0,66	1,25	0,55	0,79	0,61	1,22	0,75	0,56	0,04	0,96	0,01	1,08	0,81	0,48	0,34	1,30	0,41	1,67
NOV	0,66	1,55	0,51	1,20	0,60	1,61	0,78	0,62	0,05	1,09	0,04	1,24	0,84	0,56	0,36	1,43	0,40	2,23
DEZ	0,65	1,58	0,42	1,50	0,54	1,93	0,75	0,70	0,02	1,20	0,01	1,28	0,85	0,55	0,34	1,39	0,37	2,08
	valores quinquidiais																	
	EToRS		EToLI		EToJH		EToMK		EToCA		EToTH		EToBC		EToHS		EToTA	
	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE
JAN	0,61	1,18	0,41	1,35	0,44	1,76	0,68	0,62	0,10	0,85	0,06	0,81	0,91	0,26	0,39	1,10	0,37	1,66
FEV	0,66	0,94	0,44	1,00	0,45	1,58	0,75	0,48	0,08	0,88	0,04	0,83	0,91	0,23	0,36	1,18	0,39	1,58
MAR	0,66	0,75	0,51	0,56	0,45	1,37	0,77	0,34	0,35	0,64	0,23	0,76	0,87	0,21	0,39	1,08	0,36	1,46
ABR	0,60	0,74	0,72	0,27	0,48	1,03	0,74	0,29	0,29	0,48	0,15	0,70	0,77	0,35	0,37	1,01	0,33	1,38
MAI	0,46	0,61	0,46	0,47	0,34	0,77	0,49	0,35	0,21	0,39	0,08	0,62	0,61	0,37	0,23	0,94	0,24	0,12
JUN	0,36	0,50	0,39	0,59	0,21	0,55	0,27	0,35	0,00	0,38	0,00	0,57	0,58	0,33	0,06	0,82	0,21	0,96
JUL	0,27	0,54	0,33	0,53	0,20	0,55	0,24	0,35	0,07	0,32	0,05	0,46	0,39	0,41	0,10	0,83	0,13	1,09
AGO	0,50	0,64	0,60	0,34	0,45	0,62	0,55	0,34	0,22	0,38	0,14	0,47	0,72	0,31	0,28	0,96	0,30	1,11
SET	0,62	0,80	0,67	0,24	0,52	0,70	0,65	0,32	0,13	0,50	0,07	0,56	0,78	0,27	0,27	1,04	0,28	1,22
OUT	0,62	0,98	0,55	0,62	0,58	0,97	0,83	0,27	0,14	0,59	0,08	0,68	0,88	0,23	0,42	1,14	0,40	1,33
NOV	0,56	1,30	0,46	1,07	0,51	1,37	0,82	0,35	0,09	0,63	0,09	0,81	0,90	0,27	0,40	1,20	0,39	1,33
DEZ	0,55	1,35	0,40	1,36	0,58	0,97	0,82	0,27	0,08	0,59	0,10	0,68	0,91	0,23	0,38	1,14	0,38	1,33
	valores mensais																	
	EToRS		EToLI		EToJH		EToMK		EToCA		EToTH		EToBC		EToHS		EToTA	
	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE	c	EPE
JAN	0,33	1,06	0,28	1,25	0,20	1,70	0,40	0,56	0,07	0,59	0,09	0,43	0,88	0,17	0,25	1,06	0,26	1,49
FEV	0,42	0,83	0,33	0,91	0,28	1,51	0,57	0,42	0,01	0,66	0,00	0,57	0,91	0,14	0,28	1,07	0,26	1,48
MAR	0,36	0,66	0,37	0,45	0,20	1,26	0,51	0,29	0,06	0,46	0,06	0,59	0,86	0,15	0,16	0,98	0,17	1,33
ABR	0,42	0,64	0,83	0,13	0,32	0,94	0,76	0,14	0,23	0,29	0,14	0,48	0,63	0,35	0,27	0,92	0,21	1,28
MAI	0,19	0,51	0,23	0,47	0,14	0,66	0,26	0,25	0,11	0,25	0,08	0,45	0,31	0,37	0,08	0,85	0,08	0,97
JUN	0,18	0,41	0,21	0,58	0,17	0,45	0,20	0,24	0,04	0,24	0,04	0,38	0,35	0,30	0,04	0,74	0,04	0,88
JUL	0,14	0,43	0,21	0,50	0,12	0,45	0,15	0,24	0,07	0,24	0,09	0,28	0,31	0,36	0,09	0,77	0,07	0,95
AGO	0,26	0,51	0,38	0,28	0,28	0,50	0,50	0,19	0,09	0,20	0,21	0,19	0,53	0,25	0,13	0,88	0,12	0,99
SET	0,23	0,65	0,73	0,12	0,26	0,59	0,43	0,15	0,16	0,25	0,18	0,23	0,62	0,22	0,13	0,94	0,04	1,10
OUT	0,29	0,87	0,34	0,56	0,24	0,90	0,69	0,15	0,09	0,33	0,09	0,38	0,77	0,17	0,18	1,05	0,15	1,23
NOV	0,31	1,18	0,29	1,00	0,26	1,31	0,69	0,26	0,03	0,33	0,01	0,50	0,82	0,22	0,22	1,12	0,17	1,51
DEZ	0,34	1,22	0,20	1,31	0,25	1,68	0,48	0,41	0,05	0,41	0,14	0,37	0,83	0,21	0,36	1,05	0,20	1,65

O método da Radiação Solar mostrou melhor desempenho na maioria dos meses na escala diária (Tabela 3), obtendo o maior índice de desempenho (bom) nos meses de outubro a março. No entanto, entre as três escalas (diária, quinquidial e mensal) analisadas, os erros observados foram maiores, em todos os meses, na escala diária. O método de Linacre tem na escala mensal o melhor desempenho nos meses de abril e setembro, quando é classificado

como muito bom e bom, e os menores erros de 0,13 e 0,12, respectivamente; nos demais meses os índices mais altos (inferiores a 0,60) alternam-se nas escalas diária e quinquidial.

O método de Jensen-Haise também alterna seus melhores resultados nas escalas diária e quinquidial, mas o valor do coeficiente de desempenho não ultrapassa 0,60 em nenhum mês.

Conforme se verifica na Tabela 3, o método de Thornthwaite apresenta seu melhor desempenho quando se considera a escala mensal, porém, embora apresente valores de erros muito baixos o coeficiente c tem classificação péssima em todos os meses, pois em Pelotas seu maior valor foi de 0,23 no mês de março na escala quinquidial.

A escala quinquidial apresenta o melhor desempenho nos métodos de Camargo, Hargreaves-Samani e Tanque Classe A em dez meses do ano (Tabela 3), entretanto esses valores são muito baixos e a classificação do índice de desempenho é péssima em todos os métodos, em todas as escalas.

Com dados dos meses entre março e junho de Paraipaba, Ceará, Medeiros (2002) também identificou que a escala de cinco dias apresentou melhor ajuste de Hargreaves-Samani com o método de Penman-Monteith, pois obteve $c = 0,48, 0,45$ e $0,44$, respectivamente para as escalas quinquidial, diária e decendial. Porém, na comparação do método padrão com o Tanque Classe A os valores de c foram 0,60, 0,44 e 0,39 para as escalas decendial, diária e quinquidial indicando, diferentemente de Pelotas, a escala de cinco dias como a de menor ajuste ao padrão.

Os métodos de Makkink e Blaney-Criddle também se classificam melhor na escala quinquidial (Tabela 3), quando apresentam melhor desempenho em nove e onze meses, respectivamente.

O método de Makkink apresenta desempenho muito bom na escala diária, nos meses de janeiro e fevereiro; na escala quinquidial, nos meses de março, outubro, novembro e dezembro e na escala mensal, no mês de abril. Nos demais meses o desempenho do método não é bom e verifica-se que o índice c é inferior a 0,55.

O método de Blaney-Criddle apresenta coeficiente de desempenho igual a 0,91, na escala quinquidial e mensal, no mês de fevereiro; 0,40 na escala diária, no mês de julho e os demais meses tem maior precisão na escala quinquidial. Nos meses de outubro a março o desempenho do método é ótimo; muito bom em abril e setembro. Nesse método, os valores do erro padrão de estimativa são baixos (0,40 em julho e inferior a 0,35 nos demais meses) fortalecendo o bom ajuste do método para a região de Pelotas.

Na análise dos resultados por estações do ano, nas escalas quinquidial e diária, verificou-se que a maioria dos métodos apresentaram melhor desempenho na escala quinquidial (Tabelas 4 e 5). Este resultado está de acordo com Barros et al. (2009), que na comparação dos dados de lisímetro com os obtidos pelo método de Penman-Monteith, apresenta índice de desempenho $c = 0,93$ e $0,66$, respectivamente, na escala quinquidial e diária.

Evidenciou-se também, nas duas escalas e para todos os métodos, que a correlação com o padrão é pior nos meses de inverno, período do ano em que a temperatura e a radiação solar são menores. Esta baixa correlação pode estar associada ao fato de que a evapotranspiração é muito baixa nos meses frios, assim, a estimativa é mais precisa nos métodos que levam em consideração o maior número de fatores que interferem na ETo, no caso o método de Penman-Monteith.

Com base nos coeficientes estatísticos contidos nas Tabelas 4 e 5, depreende-se que os métodos de Thornthwaite, Tanque classe A, Camargo e Hargreaves-Samani apresentaram os piores desempenhos nos índices de correlação, exatidão e desempenho na grande maioria das estações do ano nas duas escalas de tempo.

Na escala diária, durante o verão, os menores índices foram observados para os métodos de Camargo e Thornthwaite, os quais obtiveram índice de exatidão (d) de $0,54$ e $0,50$, e índices de desempenho (c) de $0,16$ e $0,10$, respectivamente, conforme pode ser verificado na Tabela 4. Nesta escala o desempenho desses métodos foi péssimo praticamente em todas as estações.

Para a escala de cinco dias, como mostra a Tabela 5, verifica-se que os métodos mostram leve ascensão nos valores dos índices, mas o pior desempenho foi mantido no verão, quando Camargo apresentou $c = 0,27$ e Thornthwaite $c = 0,18$, mantendo o desempenho classificado como péssimo na estação. Entretanto, na primavera e no outono os desempenhos foram melhores, classificados como sofrível e muito bom, respectivamente.

Nota-se ainda que nas duas escalas de tempo as estimativas do erro nesses métodos são mais baixas que alguns métodos que apresentaram melhor classificação no índice de desempenho obtido em Pelotas. Com isso, apesar dos valores médios estimados por Thornthwaite em cada mês serem os mais próximos ao padrão em agosto e dezembro (Tabela 1), os coeficientes de correlação são muito baixos no inverno ($r = 0,38$) e na primavera ($r = 0,66$) (Tabela 5), sugerindo restrições a sua aplicação.

Tabela 4 - Valor médio de evapotranspiração de referência (ETo, mm d⁻¹), erro padrão de estimativa (EPE, mm d⁻¹) coeficientes de determinação (r²), de correlação (r), de exatidão (d) e de desempenho (c) e classificação do desempenho dos métodos da Radiação Solar (EToRS), Linacre (EToLI), Jensen-Haise (EToJH), Makkink (EToMK), Camargo (EToCA) Thornthwaite (EToTH), Blaney-Criddle (EToBC), Hargreaves-Samani (EToHS) e Tanque Classe A (EToTA) em relação ao método de Penman-Monteith, obtidos com dados diários, na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

Métodos	EPE	r ²	r	d	c	clasf						
							EPE	r ²	r	d	c	clasf
Verão							Inverno					
EToRS	1,28	0,81	0,90	0,81	0,73	bom	0,84	0,50	0,71	0,73	0,51	sofrível
EToLI	1,22	0,58	0,76	0,63	0,48	mau	0,56	0,42	0,65	0,74	0,48	mau
EToJH	1,82	0,76	0,87	0,67	0,59	sofrível	0,79	0,41	0,64	0,70	0,45	mau
EToMK	0,68	0,75	0,86	0,90	0,77	muito bom	0,57	0,39	0,62	0,78	0,49	mau
EToCA	1,17	0,09	0,30	0,54	0,16	péssimo	0,64	0,12	0,35	0,59	0,21	péssimo
EToTH	1,18	0,04	0,20	0,50	0,10	péssimo	0,77	0,03	0,17	0,49	0,09	péssimo
EToBC	0,44	0,86	0,93	0,96	0,89	ótimo	0,54	0,59	0,77	0,83	0,64	mediano
EToHS	1,32	0,42	0,65	0,65	0,42	mau	1,04	0,26	0,51	0,55	0,28	péssimo
EToTA	1,95	0,47	0,68	0,62	0,42	mau	1,38	0,28	0,53	0,52	0,27	péssimo
Outono							Primavera					
EToRS	0,82	0,69	0,83	0,82	0,68	bom	1,44	0,79	0,89	0,79	0,71	bom
EToLI	0,58	0,62	0,78	0,81	0,63	mediano	1,09	0,68	0,83	0,71	0,58	sofrível
EToJH	1,03	0,66	0,81	0,75	0,61	mediano	1,52	0,77	0,88	0,77	0,67	bom
EToMK	0,54	0,60	0,77	0,87	0,68	bom	0,63	0,74	0,86	0,92	0,79	muito bom
EToCA	0,67	0,42	0,64	0,78	0,50	mau	1,04	0,22	0,47	0,66	0,31	péssimo
EToTH	0,91	0,26	0,51	0,68	0,35	péssimo	1,16	0,16	0,40	0,63	0,25	péssimo
EToBC	0,51	0,80	0,89	0,90	0,81	muito bom	0,53	0,84	0,92	0,95	0,87	ótimo
EToHS	1,07	0,50	0,71	0,67	0,48	mau	1,38	0,49	0,70	0,70	0,49	mau
EToTA	1,47	0,47	0,68	0,62	0,42	mau	1,87	0,52	0,72	0,67	0,48	mau

* coeficiente de correlação r significativo a 1%

Tabela 5 - Valor médio de evapotranspiração de referência (ETo, mm d⁻¹), erro padrão de estimativa (EPE, mm d⁻¹) coeficientes de determinação (r²), de correlação (r), de exatidão (d) e de desempenho (c) e classificação do desempenho dos métodos da Radiação Solar (EToRS), Linacre (EToLI), Jensen-Haise (EToJH), Makkink (EToMK), Camargo (EToCA) Thornthwaite (EToTH), Blaney-Criddle (EToBC), Hargreaves-Samani (EToHS) e Tanque Classe A (EToTA) em relação ao método de Penman-Monteith, obtidos com dados de 5 dias, na região de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

Métodos	EPE	r ²	r	d	c	clasf						
							EPE	r ²	r	d	c	clasf
Verão							Inverno					
EToRS	1,06	0,84	0,91	0,75	0,69	bom	0,63	0,69	0,83	0,71	0,59	sofrível
EToLI	1,16	0,71	0,84	0,55	0,46	mau	0,43	0,52	0,72	0,69	0,50	sofrível
EToJH	1,64	0,81	0,90	0,57	0,51	mau	0,59	0,65	0,81	0,69	0,56	sofrível
EToMK	0,51	0,78	0,88	0,87	0,77	muito bom	0,34	0,61	0,78	0,84	0,65	mediano
EToCA	0,82	0,19	0,43	0,63	0,27	péssimo	0,39	0,40	0,63	0,75	0,48	mau
EToTH	0,81	0,10	0,31	0,57	0,18	péssimo	0,50	0,15	0,38	0,62	0,24	péssimo
EToBC	0,23	0,91	0,96	0,98	0,93	ótimo	0,35	0,76	0,87	0,85	0,74	bom
EToHS	1,15	0,63	0,79	0,62	0,49	mau	0,93	0,62	0,79	0,51	0,41	péssimo
EToTA	1,61	0,64	0,80	0,57	0,45	mau	1,12	0,57	0,75	0,48	0,36	péssimo
Outono							Primavera					
EToRS	0,66	0,84	0,91	0,84	0,77	muito bom	1,20	0,86	0,93	0,75	0,69	bom
EToLI	0,44	0,81	0,90	0,84	0,76	muito bom	0,95	0,85	0,92	0,70	0,64	mediano
EToJH	0,90	0,86	0,93	0,77	0,71	bom	1,29	0,89	0,94	0,72	0,68	bom
EToMK	0,33	0,80	0,89	0,93	0,83	muito bom	0,38	0,83	0,91	0,95	0,86	muito bom
EToCA	0,44	0,70	0,84	0,89	0,75	muito bom	0,62	0,51	0,72	0,82	0,59	sofrível
EToTH	0,66	0,54	0,74	0,80	0,59	sofrível	0,73	0,43	0,66	0,79	0,52	sofrível
EToBC	0,35	0,92	0,96	0,94	0,90	ótimo	0,27	0,92	0,96	0,98	0,94	ótimo
EToHS	0,96	0,82	0,90	0,71	0,64	mediano	1,19	0,77	0,87	0,68	0,60	sofrível
EToTA	1,23	0,78	0,88	0,65	0,58	sofrível	1,57	0,71	0,84	0,62	0,52	sofrível

* coeficiente de correlação r significativo a 1%

O baixo desempenho desses métodos está de acordo com as avaliações de Chen et al. (2005), em estudo na China onde concluiu que o método de Thornthwaite superestima ETo no sudeste do país, onde ETo é baixa, e subestima nas regiões norte e noroeste onde ETo é alta e justifica os resultados pelo fato que o método usa somente a temperatura como dados de entrada e dependendo da época e região, outras variáveis como velocidade do vento, umidade e radiação solar podem determinar a magnitude da evapotranspiração.

De outra forma, Camargo & Camargo (2000), numa revisão de vários trabalhos sobre métodos de estimativa de evapotranspiração, destacam que o modelo de Thornthwaite funciona adequadamente em regiões de clima úmido, independentemente da latitude e altitude. Nessa revisão são relatados resultados satisfatórios em clima frígido do norte do Canadá, no clima temperado de New Jersey, Estados Unidos; no tropical do Estado de São Paulo; no equatorial da República Dominicana, e na Ilha de Trindade, no Caribe.

Nos estados de São Paulo e Paraná os métodos foram avaliados mostrando iguais desempenhos classificados como muito bom (c aproximadamente 0,80), segundo Camargo & Sentelhas (1997), analisando a escala mensal, e bom (c aproximadamente 0,70), por Syperreck et al. (2008). Observe-se que a similaridade de desempenho entre os métodos de Thornthwaite e Camargo é esperada, pois o segundo foi desenvolvido com base no primeiro (Conceição & Mandelli, 2005).

Os métodos de Hargreaves-Samani e Tanque classe A apresentaram baixos índices de desempenho das duas escalas de tempo embora, na escala quinidial os valores tenham sido um pouco mais elevados

É possível verificar na Tabela 5 que, para períodos de cinco dias na região de Pelotas, os métodos de Hargreaves-Samani e Tanque classe A mostraram seus melhores desempenhos no outono, quando obtiveram classificação mediana e sofrível, respectivamente. Nas demais estações do ano, estes dois métodos apresentaram desempenho péssimo, no inverno; sofrível, na primavera; e, mau no verão. Além do baixo desempenho, esses dois métodos apresentaram erros elevados, e o Tanque classe A apresentou os maiores erros entre todos os métodos, nas quatro estações do ano.

Na escala de quinze dias a comparação do método do Tanque classe A com o método padrão de Penman-Monteith, obtido por Vescove & Turco (2005), apresentou $r^2 = 0,84$ no período de verão e outono e $r^2 = 0,63$, no período de primavera e inverno, numa fazenda de citrus em Araraquara no estado de São Paulo. Observa-se que os resultados paulista mostram melhor precisão do que os observados em Pelotas nos dois métodos em todas as estações, com exceção da primavera. Entretanto, com dados diários de quatro regiões do estado de Sergipe,

Souza et al.(2010) verificaram que o coeficiente de determinação entre os métodos mostrou oscilação entre as regiões estudadas, com valores de r^2 entre 0,16 a 0,59.

Para Pelotas, a classificação do desempenho do método de Linacre mostrou alteração nas estações do ano nas escalas diária e quinquidial. Conforme se verifica na Tabela 4, para o período diário o método passa por desempenho mau no verão e inverno ($c = 0,48$), sofrível na primavera ($c = 0,58$), e mediano no outono ($c = 0,63$).

Para o estado de São Paulo a classificação do desempenho desse método foi mau, com $c = 0,46$ (Camargo & Sentelhas, 1997). Da mesma forma, Mendonça & Dantas (2010), ao comparar as estimativas obtidas com o método de Linacre no estado da Paraíba, verificaram que o método não se ajusta ao padrão por subestimar os valores de ETo em todo o período da pesquisa. Porém, segundo Souza et al. (2010), para o estado de Sergipe o método apresentou bom desempenho em três regiões e muito bom ($c = 0,80$) em uma região. Situações como estas evidenciam as diferenças de ajustes entre os vários métodos com o método padrão associadas a diferenças climáticas regionais.

Na escala quinquidial, o método de Jensen-Haise mostrou índice c variando de 0,51, no verão, a 0,71, no outono, classificando o desempenho do método como mau e bom (Tabela 5), respectivamente, nestas estações, sofrível no inverno e bom na primavera. Embora não sejam valores que indiquem um desempenho satisfatório esses valores são mais elevados do que os obtidos na escala diária.

Esses resultados diferem de Pereira et al. (2009) na Serra da Mantiqueira em Minas Gerais, analisando os valores da estimativa da evapotranspiração de referência nas escalas diária e mensal durante períodos secos (abril a setembro) e chuvosos (outubro a março) entre 2007 e 2008 que identificou na escala diária o melhor ajuste do método de Jensen-Haise ao método padrão. Os valores de 0,83 e 0,92 para o índice c classificam o desempenho do método como muito bom e ótimo em período seco e chuvoso, respectivamente, na região.

Com exceção do inverno, os métodos de Radiação Solar e Makkink mostraram desempenhos satisfatórios quando comparados com o método de Penman-Monteith nas duas escalas de tempo. Os índices de desempenhos foram semelhantes na escala diária, porém na escala de cinco dias o método de Makkink mostrou valores mais elevados e apresentou erros menores do que os da Radiação Solar em todas as estações do ano nas duas escalas de tempo.

O método da Radiação Solar apresentou melhor desempenho na escala diária no verão e, na escala de cinco dias, no outono. Para períodos de cinco dias o método indicou valores do índice c oscilando entre 0,69 e 0,77 classificando o desempenho do método como

bom no decorrer do ano, com exceção do inverno cujo desempenho foi classificado como sofrível com $c = 0,59$, como se observa na Tabela 5.

Nas Tabelas 4 e 5 verifica-se que os valores do índice de desempenho do método de Makkink são mais elevados na escala de cinco dias onde apresentou desempenho muito bom no outono, primavera e verão quando o índice c variou entre 0,77 e 0,86. Nota-se ainda que coeficiente de correlação não tem valores muito elevados, entretanto, os valores do índice de exatidão garantiram bom desempenho ao método que também apresentou baixos valores de erro padrão de estimativa ($EPE = 0,35$ aproximadamente) na comparação com os demais métodos (Tabela 5). Esse conjunto de resultados o identifica como um bom método para estimar a ETo na região de Pelotas.

Vescove & Turco (2005), também identificaram desempenho semelhante dos dois métodos e bom ajuste de ambos em relação ao padrão. Analisando a estimativa da evapotranspiração com dados médios de quinze dias, segundo os autores, os métodos apresentaram coeficiente de determinação $r^2 = 0,97$, no período de verão e outono, e $r^2 = 0,80$, aproximadamente, na primavera e inverno, no estado de São Paulo. Ainda no mesmo estado, na escala decenal, Camargo & Sentelhas (1997), também classificaram como bom o desempenho do método de Makkink em relação ao padrão, pois o índice c ficou próximo a 0,71 no decorrer do período entre 1954 e 1960.

Dos métodos analisados o de Blaney-Criddle foi o que apresentou melhor ajuste com o método de Penman-Monteith nos períodos diário e quinidial, em todas as estações do ano na região de Pelotas, pois foi o método que apresentou os maiores valores dos coeficientes de correlação e de índices de exatidão e, como consequência os melhores índices de desempenhos e ainda os menores valores de erro.

Como pode ser observado na Tabela 5, assim como nos demais métodos, o pior desempenho foi durante o inverno, mas mesmo assim, também foi satisfatório, pois na escala de cinco dias, o índice c foi equivalente a 0,73 classificando o método neste período como bom. Nas demais estações o método obteve ótimo desempenho com $c = 0,90$ no outono e $c = 0,93$ no verão e primavera. Percebe-se também que neste método a comparação com o padrão apresentou os menores erros, sempre inferiores a 0,35 chegando a 0,23 no verão.

Batista et al.(2007), também identificaram no método de Blaney-Criddle o melhor ajuste com o método padrão no estado de Sergipe onde obtiveram $r^2 = 0,95$ na comparação dos métodos. Ainda nas regiões norte, sul e serrana do estado do Espírito Santo Reis et al. (2007), compararam as estimativas obtidas por vários métodos com a obtida por Penman-Monteith em períodos diários, de três, cinco e sete dias e concluíram que o maior período

apresentou melhores ajustes e o método de Blaney-Criddle apresentou ótimo desempenho nas regiões norte e serrana e muito bom na região sul. No entanto, Camargo & Camargo (2000), concluíram que esse método estima satisfatoriamente a ETo no verão seco da Califórnia e superestima os valores no inverno na região do hemisfério norte e também no sudeste brasileiro.

CONCLUSÕES

1. Os métodos da Radiação Solar, Linacre, Jensen-Haise, Makkink, Camargo, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves- Samani e Tanque Classe A apresentam valores da evapotranspiração de referência superiores aos valores obtidos pelo método de Penman-Monteith, com exceção dos métodos de Linacre e Makkink nos três primeiros e três últimos meses do ano e do método de Thornthwaite nos meses de setembro a dezembro.

2. As estimativas mensais não identificaram diferenças destacadas entre os métodos.

3. Existem diferenças de desempenho entre os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na comparação com o método padrão quando os dados são agrupados por período de cinco dias e organizados sazonalmente, indicando vários níveis de classificação.

4. As estimativas obtidas pelos métodos de Linacre, Hargreaves Samani, Tanque classe A, Camargo e Thornthwaite apresentaram baixos índices de desempenho nas quatro estações do ano em relação ao método de Penman-Monteith, em todas as escalas de tempo, não sendo recomendado o uso destes na região de Pelotas em nenhuma das escalas do estudo.

5. Para as condições climáticas da região de Pelotas o método que melhor se ajusta ao método padrão em todas as estações do ano e em todas as escalas é o de Blaney-Criddle, com ótimo desempenho na primavera e verão, muito bom desempenho no outono e desempenho mediano no inverno, na escala diária, seguido dos métodos de Makkink, Radiação Solar e Jensen-Haise cujos desempenhos se destacaram em todas as escalas.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. - Rome, 1998. **FAO Irrigation and drainage paper n56**

AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; GREGORY, J.D. Comparison of Methods for estimating REF-ET. **Jornal of irrigation and drainage engineering**. New York, v.121, n.6, p.427-435, 1995.

BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C. ; SILVA, L. B .D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, RJ, utilizando lisímetros de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v.4, n.2, p.198-203, 2009.

BATISTA, W. R. M.; FACCILOLO, G. G.; SILVA, A. A. G. Determinação e comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referencia para a região de Canindé do São Francisco-SE. **Revista da Fapese**. Aracajú v.3, n.2, p.71-76, 2007.

BORGES, A.C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v.11, n.3, p.293-300, 2007.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da Evapotranspiração Potencial. **Bragantina**, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CHEN, D.; GAO, G.;XU, C. Y.; GUO, J.; REN, G.COMPARISON OF THE Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. **Climate Research**, Freiburg, v. 28, pag 123-132, 2005

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L.. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso da água. **Bahia Agrícola**, Salvador. V.7, n.1, p. 57-60, 2005

CONCEIÇÃO, M. A. F; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referencia em Bento Gonçalves. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.13, n.2, p.303-307, 2005.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Crop Water requeriment**. Rome: FAO, 1977, 144p.

EAPEL Estação Agroclimatológica de Pelotas.
<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/index.html>. Acesso em 27 de setembro de 2011.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. Piracicaba: SP, 2002. 103p. Tese (Doutor em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo, 2002.

MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1976, 391p.

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referencia no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.2, p.196-202, 2010.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; SALASSIER, B.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referencia 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 em Seropédia e Campos, estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v.2, n.2, p.132-135, 1998.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. ; SEDYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, D. R.; YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; SILVA, L. A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referencia para a região de Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v.39, n.9, p.2488-2493, 2009.

REIS, E. F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G. O.; PEPOZZONE, J. E. M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. **Idesia**, Chile, v.25, n.3, p.75-84, 2007.

SILVEIRA FILHO, I. L. A Agricultura e os comitês de bacias hidrográficas. In: Federação dos Clubes de Integração e Troca de Experiência-FEDERACITEa. (Org.). **As Estiagens e as Perdas na Agricultura: Fenômeno Natural ou Imprevidência?** 1ª ed. Porto Alegre: Ideograf Editora Gráfica, 2005, v.1, p. 11-16.

SOUZA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G; NETTO, A. O. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado do Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v.14, n.6, p.633-644, 2010

SYPERRECK, V. L. G.; KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativa de evapotranspiração de referencia para região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 5 supl., p.603-609, 2008.

TRAJKOVIC, S.; GOCIC ,M. Comparison of some empirical equations for estimating daily reference evapotranspiration. **Facta Universitates-** Series: Architecture and Civil Eng, Serbia, v.8, n.2, p. 163-168. 2010

VESCOVE, H.; TURCO, J. Comparação entre três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, SP, v.25, n.3, p.713-721, 2005

5. Artigo 3 - AJUSTE LOCAL A UMA EQUAÇÃO DE ESTIMATIVA DIÁRIA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DE PELOTAS-RS

Resumo: Este trabalho teve como objetivo identificar as variáveis meteorológicas mais influentes na estimativa da evapotranspiração diária obtida pelo método de Penman-Monteith na região de Pelotas, selecionar outro método mais simples que as utilize e propor um ajuste de seus parâmetros ou constantes às condições climáticas locais para melhorar seu desempenho frente ao método padrão. Foi determinada a correlação das variáveis meteorológicas com as estimativas da evapotranspiração realizadas com dados meteorológicos diários da Estação Agroclimatológica de Pelotas-RS no período entre os anos de 1971 e 2010. A radiação solar e o saldo de radiação foram as variáveis mais influentes em todos os métodos que as utilizam. O método de Jensen-Haise por utilizar somente dados de radiação solar e temperatura e apresentar índice de desempenho em relação ao método padrão em torno de 0,6, foi escolhido para modificação em suas constantes. A expressão do método com as constantes adaptadas à região apresentou coeficiente de desempenho superiores aos da equação original em todas as estações do ano apresentando índice c de 0,75 e 0,85 no verão e primavera, respectivamente, sendo portanto seu uso indicado para a região de Pelotas.

Palavras-chave: correlação, variáveis meteorológicas, Penman-Monteith,

LOCAL ADJUSTMENT TO AN EQUATION OF DAILY REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATIVE FOR THE REGION OF PELOTAS-RS

Abstract: This work aimed to identify the most influent meteorological variables in the daily evapotranspiration estimative obtained using the Penman-Monteith method in the region of Pelotas, to select another simpler method that uses them and to propose an adjustment of its parameters or constants to the local climatic conditions in order to improve its performance facing the standard method. It was determined the correlation of the meteorological variables with the evapotranspiration estimatives performed with daily meteorological data from the Agroclimatologic Station of Pelotas-RS in the period between the years 1971 and 2010. The solar radiation and the net radiation were the most influent variables in the methods that use them. Because the Jensen-Haise method uses only solar radiation and temperature data and

shows performance rate around 0.6 related to the standard method, it was chosen for the modification on its constants. The expression of the method with the constants adapted to the region showed performance coefficient higher than those of the original equation in all seasons of the year showing c rate 0.75 and 0.85 on summer and spring, respectively, so its usage is indicated for the region of Pelotas.

Keywords: Correlation. Meteorological variables. Penman-Monteith. Jensen-Haise.

INTRODUÇÃO

A necessidade de se produzir produtos alimentícios diversificados com qualidade, produtividade e em maior quantidade exigem da comunidade científica novos conhecimentos sobre as reais necessidades hídricas das culturas. Buscam-se sistemas ou métodos de irrigação, com o objetivo de aplicar a quantidade certa de água e no momento adequado que a planta requer, com adoção de manejo da água na propriedade e preocupação com a diminuição dos impactos ambientais negativos sobre o recurso natural água no processo de irrigação (Reis et al., 2007).

A determinação do consumo de água nos diversos estádios de desenvolvimento das culturas é fundamental no manejo da irrigação, podendo ser obtida a partir de medições efetuadas no solo, na planta e na atmosfera. Os métodos baseados em medições efetuadas no solo se fundamentam na determinação do seu teor de água; os que utilizam medições na planta consideram o monitoramento do seu potencial hídrico e avaliações de resistência estomática e da temperatura da folha, entre outros; já os métodos baseados no clima consideram desde simples medições da evaporação da água num tanque, como o tanque Classe “A”, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração (Rocha et al., 2003).

Apesar de algumas dificuldades, a estimativa da evapotranspiração é a forma mais prática e que proporciona maior agilidade nos resultados permitindo ações rápidas no manejo de irrigação.

A evapotranspiração de referência pode ser obtida por métodos diretos e indiretos. Os diretos são geralmente utilizados em projetos de pesquisa devido ao elevado custo dos equipamentos. Os indiretos, menos onerosos, baseiam-se na aplicação de métodos matemáticos que utilizam dados meteorológicos (Pereira et al., 1997).

Para quantificar a evapotranspiração inúmeros métodos foram desenvolvidos em função da adequação do método às condições climáticas da região, da limitação imposta pela

disposição dos dados meteorológicos utilizados e pela simplicidade de aplicação desses métodos. Os valores da evapotranspiração de referência variam de acordo com as condições climáticas locais, com as variáveis utilizadas nas expressões e com a influência dessas variáveis.

A expressão descrita por Penman-Monteith é reconhecida pela Food and Agriculture Organization (FAO) como a mais precisa para estimar a evapotranspiração de referência e é utilizada como padrão de comparação com os outros métodos (Souza et al, 2010; Mendonça & Dantas, 2010; Silva et al., 2005).

Segundo Andrade et al. (2003), o conhecimento das variáveis de maior relevância na estimativa da evapotranspiração de referência numa região é um fator importante para se fazer a seleção mais adequada do modelo a ser aplicado.

Em experimento conduzido para medir em lisímetros a evapotranspiração da cultura do pimentão cultivado em estufa plástica, Dalmago et al, (2006) concluíram que o saldo de radiação externo à estufa e o déficit de saturação do ar médio no interior da estufa foram as variáveis meteorológicas que apresentaram maior relação com a evapotranspiração da cultura durante o outono. Segundo Araújo et al. (2011), as variáveis radiação global e temperatura média do ar foram as únicas variáveis meteorológicas que apresentaram efeito direto sobre a evapotranspiração de referência, estimada pelo método de Penman-Monteith, na região sul do Espírito Santo. Os autores utilizaram a técnica de análise de trilha para obter os resultados e orientam que métodos que não consideram essas variáveis podem levar a erros na estimativa da evapotranspiração de referência.

Muitas das expressões amplamente utilizadas para estimar a evapotranspiração são adaptações de outras anteriormente conhecidas, aprimoradas com a finalidade de apresentar melhor ajuste a determinadas localizações geográficas em estudo. Com essa finalidade, por exemplo, Borges e Mendiondo (2007) verificaram a precisão dos métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Camargo, Thornthwaite, Hamon e Karrufa na comparação como o método de Penman-Monteith, para a bacia do rio Jacupiranga em São Paulo. Os autores propuseram novos valores para as constantes e para alguns parâmetros das equações que proporcionaram aumento no nível de confiança em todos os métodos, apresentando o índice de desempenho superior a 0,90 em todas as comparações.

Sentelhas et al.(2010), estudando métodos que utilizam basicamente a temperatura para estimar a evapotranspiração de referência para doze cidades no sul do Canadá concluíram que os métodos de Hargreaves-Samani e Thornthwaite, após alguns ajustes foram as opções mais precisas para estimar a evapotranspiração de referência na região. Segundo

Carvalho et al. (2011), trabalhos dessa natureza evidenciam que a calibração de alguns parâmetros dos métodos pode melhorá-los consideravelmente.

Assim, os objetivos desse trabalho foram identificar as variáveis meteorológicas mais influentes na estimativa da evapotranspiração diária obtida pelo método de Penman-Monteith na região de Pelotas, selecionar entre os demais métodos analisados aquele que utilize essas variáveis, com uma expressão de fácil utilização, que possibilite ajustar seus parâmetros ou constantes às condições climáticas locais.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido com dados meteorológicos do acervo histórico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, instalada na cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul considerando o período entre os anos de 1971 a 2010. A mesorregião de Pelotas (31°52'S e 52°21'W, 13 m de altitude) possui clima do tipo subtropical úmido, com temperatura média anual de 17,8 °C, sendo que a temperatura média do mês mais frio (julho) é de 12,3 °C e do mês mais quente (janeiro) é de 23,2 °C, com chuva anual de 1367 mm, regularmente distribuída ao longo do ano (EAPEL, 2011).

Os valores da evapotranspiração de referência foram estimados pelos seguintes métodos descritos pelas expressões:

Tanque Classe A (EToTA)	$EToTA = K_p E C_a$
Thornthwaite (EToTH)	$EToTH = 16 \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a \quad T_i > 0^\circ C$
Camargo (EToCA)	$EToCA = F Q'_o T ND$
Makkink (EToMK)	$EToMK = 0,61 W R_s - 0,12$
Radiação Solar (EToRS)	$EToRS = c_0 + c_1 W R_s$
Jensen-Haise (EToJH)	$EToJH = R_s (0,0252 T + 0,078)$
Linacre (EToLI)	$EToLI = \frac{\frac{500(T+0,006 h)}{100-\phi} + 15(T - T_o)}{80 - T}$
Hargreaves-Samani (EToHS)	$EToHS = 0,0023 Q'_o (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T + 17,8)$
Blaney-Criddle (EToBC)	$EToBC = a + b p (0,46 T + 8,13)$
Penman-Monteith(EToPM)	$EToPM = \frac{s}{s + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{900\gamma}{(s + \gamma^*)(T + 275)} U_2 (e_s - e_a)$

Após a determinação da estimativa diária da evapotranspiração de referência por todos os métodos, foi feita a comparação individual de cada um deles com o método padrão de Penman-Monteith através da correlação linear.

O indicador da precisão da correlação é o coeficiente de correlação (r), que indica o grau de dispersão dos dados em relação à média, sendo obtido pela expressão

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

onde: x_i são os valores a ser comparados com o método padrão; y_i são valores estimados pelo método padrão e \bar{x} e \bar{y} as médias respectivas de x_i e y_i (Meyer, 1976).

A partir do coeficiente de correlação r obtém-se o coeficiente de determinação (r^2) que mede em valor absoluto o grau de relação entre as variáveis.

O grau de significância do coeficiente de correlação (r) foi determinado através do teste “t” Student e foi comparado com o valor crítico de t com $(n-2)$ graus de liberdade. A prova estatística foi feita pela expressão:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

A significância do coeficiente de correlação é determinada pelo valor do t calculado ser maior que o valor de t crítico no nível desejado.

O indicador da exatidão, associado ao desvio entre os valores medidos e estimados, foi determinada pelo índice de Willmott (d), segundo metodologia apresentada por Camargo e Sentelhas (1997), expresso por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(x_i - y_i)^2}{\sum(|x_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \right]$$

O índice de desempenho (c), que representa o produto entre os índices de precisão (r) e de exatidão (d), foi utilizado para classificar a relação entre cada método com o método padrão, de acordo com a metodologia proposta por Camargo & Sentelhas (1997), da seguinte forma: a relação foi considerada ótima (OT), quando c apresentou valores maiores que 0,85; muito boa (MB), para valores entre 0,76 e 0,85; boa (BO), para valores entre 0,66 e 0,75; mediano (ME), para valores entre 0,61 e 0,65; sofrível (SO), para valores entre 0,51 e 0,60, mau (MA), para valores entre 0,41 e 0,50 e, péssima (PE), para valores do índice c inferiores a 0,41.

Para dar suporte a essa classificação também foi calculado o valor do Erro Padrão de Estimativa (EPE) através da expressão:

$$EPE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

As estimativas da evapotranspiração de referência foram determinadas para todos os métodos, na escala diária e os resultados foram agrupados sazonalmente.

Para identificar a participação de cada elemento meteorológico sobre a ETo foi determinada a correlação linear das variáveis meteorológicas com os valores das estimativas da ETo obtidas pelo método Penman-Monteith e, também, com os valores obtidos pelos métodos que mostraram melhor ajuste com padrão.

Entre os métodos de estimativa da ETo foi selecionado aquele que melhor se adaptou as seguintes características: utilizou as variáveis meteorológicas que mostraram alta correlação com a ETo pelo método padrão; apresentou valores de estimativa com correlação, no mínimo, boa com o método padrão; seja uma expressão simples. Nesta expressão foram feitos ajustes nos coeficientes, com a finalidade de melhor adaptá-la as condições climáticas da região.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da correlação do valor da estimativa por Penman-Monteith com os valores dos demais métodos de estimativa da evapotranspiração de referência mostrada na Tabela 1 sugere que os métodos de Camargo, Thornthwaite, Hargreaves-Samani e Tanque classe A não devem ser utilizados em Pelotas em virtude do baixo desempenho apresentado por esses métodos em todas as estações do ano.

O método de Linacre mostrou desempenho intermediário entre os métodos pesquisados enquanto que os métodos que apresentaram melhores desempenhos na comparação com Penman-Monteith foram os métodos de Blaney-Criddle, Makkink, Radiação Solar e Jensen-Haise conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela1-Valores do coeficiente de desempenho (c), do erro padrão de estimativa (EPE, mm d⁻¹) e a classificação dos métodos da Radiação Solar (EToRS), Linacre (EToLI), Jensen-Haise (EToJH), Makkink (EToMK), Camargo (EToCA), Thornthwaite (EToTH), Blaney-Criddle (EToBC), Hargreaves-Samani (EToHS) e Tanque classe A (EToTA) em relação ao método de Penman-Monteith, obtidos com dados diários, na região de Pelotas, no período de 1971 a 2010.

	EToRS			EToLI			EToJH			EToMK			EToCA			EToTH			EToBC			EToHS			EToTA		
	c	clasf	EPE																								
VER	0,7	BO	1,3	0,5	MA	1,2	0,6	SO	1,8	0,8	MB	0,7	0,2	PE	1,2	0,1	PE	1,2	0,9	OT	0,4	0,4	MA	1,3	0,4	MA	1,9
OUT	0,7	BO	0,8	0,6	ME	0,6	0,6	ME	1,0	0,7	BO	0,5	0,5	MA	0,7	0,3	PE	0,9	0,8	MB	0,5	0,5	MA	1,1	0,4	MA	1,5
INV	0,5	SO	0,8	0,5	MA	0,6	0,5	MA	0,8	0,5	MA	0,6	0,2	PE	0,6	0,1	PE	0,8	0,6	ME	0,5	0,3	PE	1,0	0,3	PE	0,4
PRI	0,7	BO	1,4	0,6	SO	1,1	0,7	BO	1,5	0,8	MB	0,6	0,3	PE	1,0	0,2	PE	1,2	0,9	OT	0,5	0,5	MA	1,4	0,5	MA	1,8

*Classificação para o índice desempenho OT- ótimo, MB- muito bom, BO- bom, ME- mediano, SO- sofrível

Na Figura 1 é possível observar que o método de Blaney-Criddle apresenta a menor dispersão em relação ao método padrão apresentando ótimo desempenho indicado pelos valores dos índices de desempenho (c) e de exatidão (d) e pelo coeficiente de determinação (r^2). Verifica-se também que o ajuste dos demais métodos destacados em relação ao método padrão é classificado como muito bom, o que indica que esses métodos foram capazes de aproximar-se dos valores de ETo estimados pelo método de Penman-Monteith, tanto por seus coeficientes e parâmetros, pelas variáveis utilizadas ou pela influência dessas variáveis em suas expressões.

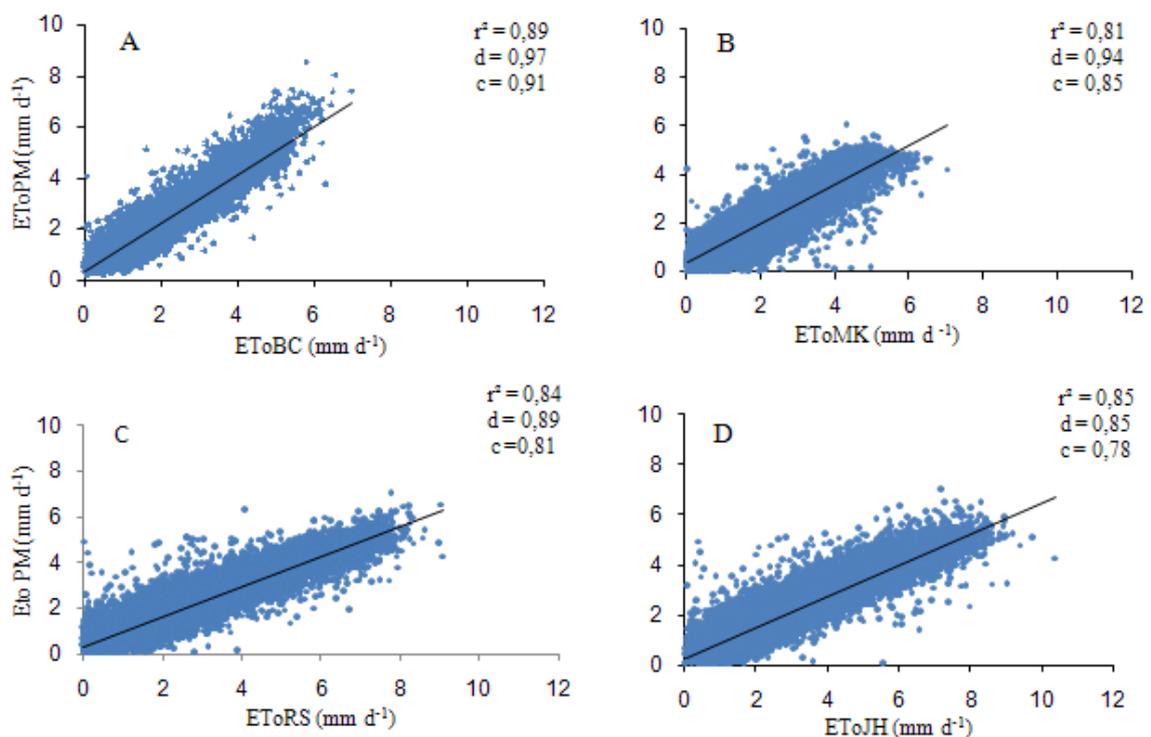


Figura 1- Gráfico de dispersão e coeficientes da comparação dos métodos de Blaney-Criddle (A), Makkink (B), Radiação Solar (C) e Jensen-Haise (D) com o método de Penman-Monteith com dados de Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010.

Assim, para quantificar a magnitude da influência das variáveis meteorológicas em cada método, foi utilizada a correlação linear simples cujos resultados estão na Tabela 2, onde é possível verificar que, nos quatro métodos, as variáveis de maior relevância na estimativa de ETo estão relacionadas a radiação solar,. Mesmo utilizando muitas variáveis meteorológicas, nota-se que no método de Penman-Monteith o saldo de radiação apresentou coeficiente de correlação igual a 0,94 o que demonstra a grande influência desta variável na estimativa da evapotranspiração de referência nesta mesoregião.

A radiação solar global apresenta uma correlação de 0,88 com os valores da evapotranspiração estimados pelo método de Penman-Monteith embora não seja usada

diretamente na expressão do método. A variável apresentou a melhor correlação nos métodos da Radiação Solar e Makkink e Jensen-Haise com valores de 0,98 nos dois primeiros e 0,94 no último.

Esses resultados corroboram aqueles obtidos em trabalhos realizados por Caixeta (2009), Ruhoff et al. (2009) e por Araujo et al. (2011) nos quais também houve a indicação da radiação solar global como a variável mais influente na estimativa da evapotranspiração de referência. Em estudo desenvolvido, na zona da Mata mineira, em Viçosa- MG, o primeiro autor detectou que a radiação solar e a temperatura máxima apresentaram coeficientes de correlação de 0,58 e de 0,51, respectivamente, com a estimativa obtida pelo método do Tanque classe A.

Tabela 2. Coeficiente de correlação entre as variáveis meteorológicas e a estimativa da evapotranspiração de referência obtida pelos métodos de Penman-Monteith (EToPM), Blaney-Criddle (EToBC), Radiação Solar (EToRS), Makkink (EToMK) e Jensen-Haise (EToJH) em Pelotas-RS, no período de 1971 a 2010

Variáveis	EToPM	EToBC	EToRS	EToMK	EToJH
Rs	0,88		0,98	0,98	0,94
Rn	0,94				
Qo	0,82				
N	0,82	0,75			
n	0,65	0,70			
Tmax	0,64				
es	0,64				
T	0,63	0,64			0,67
Ur	-0,63	-0,67	-0,65		
Tu	0,51		0,41	0,46	
Tmin	0,49				
ea	0,42				
Ud	0,27	0,34	0,19		

*Rn: saldo de radiação; Rs: radiação solar global; Qo: radiação extraterrestre; N: fotoperíodo; n: horas de brilho solar; Tmax: temperatura máxima do ar; es: pressão de vapor na saturação; T: temperatura média do ar; UR: umidade relativa do ar; Tu: temperatura de bulbo úmido; Tmin: temperatura mínima do ar; ea: pressão atual de vapor; Ud: vento.

** coeficiente de correlação r significativo a 1%

As variáveis meteorológicas fotoperíodo e insolação, bastante associadas a emissão de energia, apresentaram valores de correlação relativamente altos (Tabela 2). Para a região de Pelotas essas duas variáveis são as mais importantes quando se considera o método de Blaney-Criddle, com valores do coeficiente de correlação de 0,75 e 0,70, respectivamente.

Muito provavelmente pela facilidade de medição, a temperatura média do ar é uma variável utilizada em muitos métodos de estimativa, mas seu valor de correlação com as estimativas não é o alto. Observa-se, na Tabela 2, que a temperatura média do ar (T) apresentou correlação igual a 0,63, no método de Penman-Monteith, e 0,67, no método de

Jensen-Haise, valores estes semelhantes aos da umidade relativa do ar, porém em sentidos opostos.

No estado do Espírito Santo Araujo et al. (2011) estimaram a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith e analisaram sua relação com as variáveis através da análise de trilha onde o coeficiente de correlação com o temperatura média do ar foi de 0,79 superado apenas pelo coeficiente da radiação solar global de 0,93.

Conforme pode ser observado na Tabela 2, o vento foi uma grandeza que apresentou baixos coeficientes de correlação com a ETo em Pelotas, obtendo valores de 0,19, 0,27 e 0,34 nos métodos da Radiação Solar, Penman-Monteith e Blaney-Criddle, respectivamente. Este resultado está de acordo com aqueles observados por Caixeta (2009) e Oliveira (2009) que concluíram que a velocidade do vento apresentou baixa correlação com a evapotranspiração de referência. O primeiro autor analisou a correlação das variáveis meteorológicas com os valores de ETo estimados pelo tanque classe A, e o segundo com valores estimados por irrigametro.

Em uma análise dos componentes principais da ETo de três regiões climáticas diferentes do Centro-Sul do Ceará Andrade et al. (2003), concluíram que as variáveis envolvidas no processo de evapotranspiração de maior significância na região de clima tropical chuvoso foram a velocidade do vento e a umidade relativa do ar. Entretanto, no mesmo trabalho, nas estações localizadas em região de clima semi-árido a variável razão de insolação foi a que apresentou maior influência, seguida da precipitação anual e velocidade do vento.

Na região do Alto de Paranaíba-MG, Oliveira (2009) verificou que nos meses de novembro a março as correlações entre as variáveis meteorológicas e a ETo foram muito baixas, inferiores a 0,30, com exceção ao mês de janeiro em que os coeficientes de correlação foram de 0,78 para a umidade relativa do ar e em torno de 0,60 para as temperaturas máxima e mínima e radiação solar.

Estudos sobre a influência das variáveis meteorológicas nas estimativas da evapotranspiração de referência nas diversas regiões brasileiras mostram diferentes resultados ocasionados pela grande variabilidade climática no país. Por esta razão, estudos regionais são necessários para fornecer informações precisas às condições locais que poderão proporcionar ajustes em métodos de estimativa da ETo adequados à região em estudo.

A alta correlação da radiação solar e de outras variáveis associadas a ela com os valores da estimativa da evapotranspiração de referência obtida pelo método padrão na região de Pelotas induziu a seleção por um método mais simples que utilizassem essa variável e que

apresentasse um bom ajuste com o método de Penman-Monteith. Nessas condições, o método de Jensen-Haise foi o que melhor se adaptou a essas características. Somado a isto, a expressão do método dada por: $E_{To JH} = R_s (0,0252T + 0,078)$ permite que se substitua os coeficientes para adequá-la mais precisamente a região de Pelotas.

Assim, com o propósito de que o valor estimado pela expressão de Jensen-Haise seja o mais próximo ao valor obtido por Penman-Monteith, foi feita uma análise linear entre a razão $\frac{E_{To PM}}{R_s}$ e a temperatura média T. Os coeficientes da equação obtida foram utilizados para uma nova expressão de Jensen-Haise expressa por:

$$E_{To JHmod} = R_s (0,013T + 0,176)$$

Para a análise linear entre a razão $\frac{E_{To PM}}{R_s}$ e a temperatura média T consideraram-se os dados meteorológicos compreendidos entre 1971 a 2000. Com a expressão de Jensen-Haise modificada foi feita nova comparação do método com Penman-Monteith para validação do modelo, utilizando-se os dados do período de 2001 a 2010, em cada estação do ano, analisado segundo os critérios já citados anteriormente e mostrados na Figura 2, juntamente com os índices obtidos da equação original.

Pela Figura 2 observa-se que a dispersão dos dados não sofre grande alteração na equação modificada em relação à equação original. No entanto, identifica-se menor dispersão dos dados nos períodos de verão (Figura 2 A e A') e na primavera (Figura 2 D e D') quando os dados encontram-se mais aglutinados indicando melhor ajuste das comparações.

Na análise dos coeficientes estatísticos observa-se que o método modificado apresentou índice de desempenho (c) mais elevado em todas as estações do ano. Nota-se ainda, que os valores do coeficiente de determinação (r^2) sofreram pouca diferença enquanto os valores do índice de exatidão, indicada pelo índice d, apresentaram considerável aumento, conforme se vê na Figura 2. Essa situação ocorreu porque o coeficiente r^2 refere-se a aproximação dos dados das séries com os respectivos valores médios dessas séries. Os novos coeficientes da equação de Jensen-Haise produziram uma nova série, com nova média, e a relação entre as séries original e modificada com suas respectivas médias não provocou alteração na correlação de ambas com o método padrão.

Porém, o índice d referente à exatidão do método em relação ao padrão, está relacionado ao afastamento dos valores obtidos pelo método analisado em relação aos valores do método padrão, mostrou-se mais elevado para os dados obtidos pela equação de Jensen-Haise modificada. O valor do índice d mais elevado fez com que o índice de desempenho fosse superior na comparação da equação de Jensen-Haise modificada com o método padrão.

A expressão de Jensen-Haise modificada obteve valores do índice c que elevaram a classificação do método em todas as estações: no verão, de sofrível para bom; no outono, de mediano para bom; no inverno, de mau para sofrível e na primavera, de bom para muito bom.

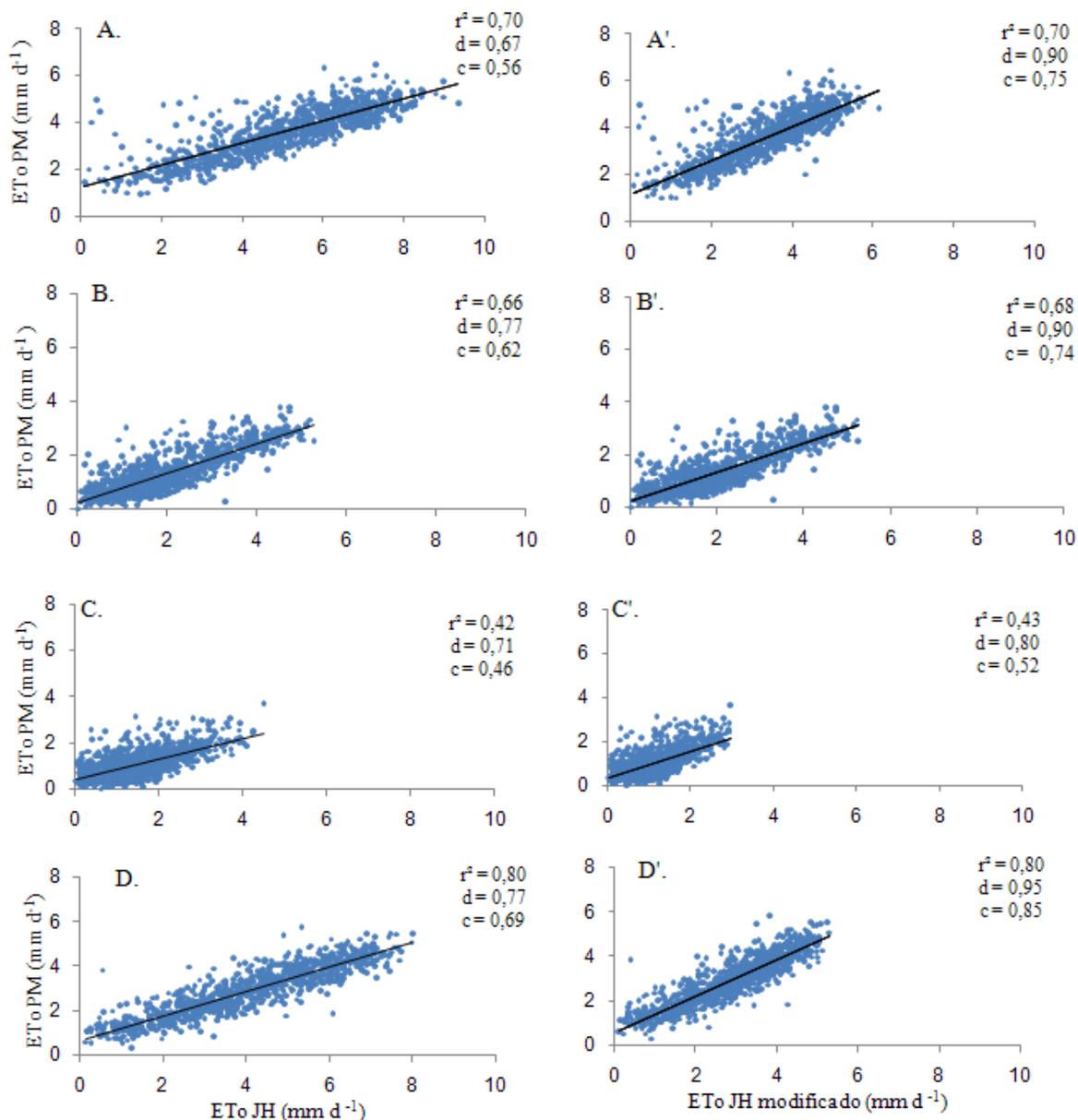


Figura 2- Gráfico de dispersão e coeficientes da comparação do método de Jensen-Haise original e do método de Jensen-Haise modificado com o método de Penman-Monteith (ET₀PM) no verão (A e A'), outono (B e B'), inverno (C e C') e primavera (D e D'), com dados de Pelotas-RS, no período de 2001 a 2010.

Observa-se, ainda na Figura 2, que o valor do índice c , na primavera (0,85) é muito próximo do valor que classifica o método com ótimo ajuste ao método padrão, e o valor do mesmo índice para o verão (0,75) é superior aos valores do índice em todos os métodos, com exceção do método de Blaney-Criddle, cuja expressão, assim como a do método de Penman-Monteith, é bastante trabalhosa e necessita de variáveis não disponíveis em estações

meteorológicas básicas. Nota-se, ainda que essa melhoria ocorre justamente nas estações do ano que demandam maior necessidade de irrigação na região. Isso indica que a modificação é bastante conveniente, pois utilizando somente dados de temperatura e radiação solar, numa expressão de simples aplicação, apresentou ajuste muito bom em relação ao método padrão de Penman-Monteith.

CONCLUSÕES

1. As variáveis meteorológicas mais relevantes na estimativa da evapotranspiração de referência para Pelotas-RS são a radiação solar global e o saldo de radiação.
2. A equação de Jensen-Haise com os coeficientes modificados é uma boa alternativa para estimar a evapotranspiração de referência para Pelotas-RS apresentando desempenho classificado como bom no verão e outono, e muito bom na primavera.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE, E. A.; SILVEIRA, S. S.; AZEVEDO, B. M. Investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração na região centro sul do Ceará pela análise de componentes principais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.39-44, 2003.
- ARAÚJO, G. L.; REIS, E. F.; MOREIRA, G. R. Correlação entre variáveis meteorológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.5, n.2, p.96-104, 2011.
- BORGES, A.C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.293-300, 2007.
- CAIXETA, S. P. **Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo irrigâmetro nas condições climáticas da Mata Mineira**. Viçosa: UFV, 2009. 52p. Dissertação Mestrado.
- 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, 1977.
- CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.
- DALMAGO, G. A.; HELDWEIN, A. B.; NIED, A. H.; GRIMM, E. L.; PIVETTA, C. R. Evapotranspiração máxima da cultura de pimentão em estufa plástica em função da radiação solar, da temperatura, da umidade relativa e do déficit de saturação do ar. **Ciência Rural**, v.36, n.3, p.785-792, 2006.

- EAPEL Estação Agroclimatológica de Pelotas.
<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/index.html>. Acesso em 27 de setembro de 2011.
- MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.196-202, 2010.
- MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1976, 391p.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- OLIVEIRA, E.M. **Desempenho do irrigômetro na estimativa da evapotranspiração de referência na região do Alto Paranaíba-MG**. Viçosa: UFV, 2009. 75p. Dissertação Mestrado.
- REIS, E. F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G. O.; PEPOZZONE, J. E. M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. **Idesia**, v.25, n.3, p.75-84, 2007.
- ROCHA, O. C.; GUERRA, A. F.; AZEVEDO, H. M. Ajuste no modelo Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.263-268, 2003.
- RUHOFF, A. L.; SALDANHA, C. B.; COLLISHONN, W.; UVO, C. B.; ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M. R. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de Cerrado e cana de açúcar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.14, n.4, p. 137-146, 2009.
- SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.
- SILVA, V. P. R.; BELO FILHO, A. F.; SILVA, B.B.; CAMPOS, J.H.B.C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.547-553, 2005.
- SOUZA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G; NETTO, A. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado do Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.6, p.633-644, 2010.

6. Conclusões Gerais

1. A média anual da evapotranspiração de referência para Pelotas é de 2,25 mm d⁻¹. A primavera apresenta valor médio de 3,00 mm d⁻¹, próximos aos 3,54 mm d⁻¹ observados no verão enquanto, outono e inverno apresentam valores de 1,40 e 1,08 mm d⁻¹, respectivamente.
2. A soma total anual da precipitação ocorrida em Pelotas é maior que o total da ETo, porém na média decenal observa-se que de 20 de novembro a 20 de janeiro a diferença entre chuva e ETo é negativa.
3. A média mensal não é um bom preditor para analisar a diferença entre chuva e ETo.
4. Os métodos da Radiação Solar, Linacre, Jensen-Haise, Makkink, Camargo, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves- Samani e Tanque Classe A apresentam valores da evapotranspiração de referência superiores aos valores obtidos pelo método de Penman-Monteith, com exceção dos métodos de Linacre e Makkink nos três primeiros e três últimos meses do ano e do método de Thornthwaite nos meses de setembro a dezembro.
5. As estimativas mensais não identificaram diferenças destacadas entre os métodos.
6. Existem diferenças de desempenho entre os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na comparação com o método padrão quando os dados são agrupados por período de cinco dias e organizados sazonalmente, indicando vários níveis de classificação.
7. As estimativas obtidas pelos métodos de Linacre, Hargreaves Samani, Tanque classe A, Camargo e Thornthwaite apresentaram baixos índices de desempenho nas quatro estações do ano em relação ao método de Penman-Monteith, em todas as escalas de tempo, não sendo recomendado o uso destes na região de Pelotas em nenhuma das escalas do estudo.
8. Para as condições climáticas da região de Pelotas o método que melhor se ajusta ao método padrão em todas as estações do ano e em todas as escalas é o de Blaney-Criddle, com ótimo desempenho na primavera e verão, muito bom desempenho no outono e

desempenho mediano no inverno, na escala diária, seguido dos métodos de Makkink, Radiação Solar e Jensen-Haise cujos desempenhos se destacaram em todas as escalas.

9. As variáveis meteorológicas mais relevantes na estimativa da evapotranspiração de referência para Pelotas-RS são a radiação solar global e o saldo de radiação.

10. A equação de Jensen-Haise com os coeficientes modificados é uma boa alternativa para estimar a evapotranspiração de referência para Pelotas-RS apresentando desempenho classificado como bom no verão e outono, e muito bom na primavera.

7. Bibliografia

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. - Rome, 1998. **FAO Irrigation and drainage paper n56.**

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.

EAPEL Estação Agroclimatológica de Pelotas.
<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/index.html>. Acesso em 27 de setembro de 2011.

MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1976, 391p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. FEALQ, 1997. 183p.

REIS, E. F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G. O.; PEPOZZONE, J. E. M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. **Idesia**, v.25, n.3, p.75-84, 2007.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação:
Bibliotecária Daiane Schramm – CRB-10/1881**

H832a Hallal, Márcia Oliveira Curi

Análise e comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Pelotas (RS) / Márcia Oliveira Curi Hallal; Orientador: Edgar Ricardo Schöffel. – Pelotas, 2012.
74f.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas.

1. Penman-Monteith. 2. Irrigação. 3. Correlação. 4. Índice de desempenho. 5. Variáveis meteorológicas. I. Schöffel, Edgar Ricardo; orient. II. Título.

CDD 630