

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE DADOS  
DIÁRIOS DE PREVISÃO METEOROLÓGICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Zanandra Boff de Oliveira**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE DADOS DIÁRIOS DE  
PREVISÃO METEOROLÓGICA**

por

**Zanandra Boff de Oliveira**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da  
Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau  
de  
**Doutor em Engenharia Agrícola.**

**Orientador: Reimar Carlesso**

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Oliveira, Zanandra Boff de  
Estimativa da evapotranspiração a partir de dados diários de previsão meteorológica / Zanandra Boff de Oliveira.-2015.  
95 f.; 30cm

Orientador: Reimar Carlesso  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2015

1. previsão meteorológica 2. evapotranspiração 3. balanço hídrico I. Carlesso, Reimar II. Título.

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Zanandra Boff de Oliveira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Campus da UFSM, Rua Q, Prédio 68, Camobi, Santa Maria, RS, CEP 97105-900.

Fone: (55) 3220 8399; E-mail: zanandraboff@gmail.com

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE DADOS DIÁRIOS DE  
PREVISÃO METEOROLÓGICA**  
elaborada por  
**Zanandra Boff de Oliveira**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Agrícola.**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Dr. Reimar Carlesso**  
Presidente/Orientador

**Dr. Arno Bernardo Heldwein (UFSM)**

**Dra. Mirta T. Petry (UFSM)**

**Dr. Juliano Dalcin Martins (IF Rio Grande do Sul - Ibirubá)**

**Dra. Dolores Wolschick (IF Santa Catarina – São Miguel do Oeste)**

Santa Maria, 17 de março de 2015.

Ao meu filho Antônio, meu bem maior, luz da minha vida.

Ao meu amor Alberto, companheiro e amigo.

**DEDICO** este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela vida, pela saúde e por iluminar meu caminho e minhas decisões.

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita.

Ao Centro de Ciências Rurais, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela possibilidade de realização deste curso e pela bolsa de estudos concedida.

Aos professores Reimar Carlesso, Mirta Petry e Luis Santos Pereira, pela orientação.

Aos amigos do Sistema Irriga: Rodrigo C. da Silva, Juliano D. Martins, Maria Gabriela G. Piñango, Ticiane François, Anderson L. Zwirter, Vinícius Dubou, Henrique M. Fries, Núbia P. Aires, Júlio C. Gatto e Jonas R. Henckes.

Aos colegas do Instituto Federal Farroupilha Câmpus Júlio de Castilhos, Cleudson, Carla, Carina e Ana Elisa, pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

Aos meus alunos do Instituto Federal Farroupilha Câmpus Júlio de Castilhos, pelo incentivo a minha qualificação profissional.

Aos meus familiares, especialmente aos meus pais Guilherme e Marli, pelo apoio e incentivo.

A minha irmã Marília, pela amizade e companheirismo.

A meus amores Antônio e Alberto, por superarem e compreenderem a minha ausência nos inúmeros momentos em que me dediquei a esta tese.

A todos aqueles que, de uma ou outra maneira, contribuíram para que esse momento se concretizasse.

A todos, meu sincero agradecimento e carinho.

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE DADOS DIÁRIOS DE PREVISÃO METEOROLÓGICA

Autor: Zanandra Boff de Oliveira  
Orientador: Reimar Carlesso  
Santa Maria, 17 de março de 2015

A determinação em tempo real e futuro da evapotranspiração (ET) pode contribuir para a maior eficiência no gerenciamento da irrigação. Assim, o objetivo do presente trabalho foi: (i) avaliar a precisão da estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) calculada com dados diários da previsão meteorológica para sete dias futuros ( $ET_{o\text{est}}$ ), para diferentes locais, anos agrícolas e períodos com e sem chuvas e; (ii) avaliar o impacto da utilização da  $ET_{o\text{est}}$  no balanço hídrico de um solo cultivado com milho. A estimativa da  $ET_o$  foi realizada para Santa Maria - RS e para Cristalina e Morrinhos - GO. A coleta de dados da previsão meteorológica foi realizada entre 26 de junho de 2011 a 31 de março de 2014. Coletou-se, diariamente (6:00 AM), do site: <http://www.tempoagora.com.br/>, os dados de previsão de temperatura máxima ( $T_{\text{max}}$ ) e mínima ( $T_{\text{min}}$ ) do ar, umidade relativa máxima ( $RH_{\text{max}}$ ) e mínima ( $RH_{\text{min}}$ ) do ar e velocidade do vento ( $U_2$ ), para os próximos sete dias. O cálculo da  $ET_{o\text{est}}$  foi realizado pelos métodos FAO-Penman-Monteith (FAO-PM) e Hargreaves. A  $ET_o$  do dia observado ( $ET_{o\text{dia}}$ ) foi calculada pelo método FAO-PM, com dados medidos pela estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os valores de  $ET_{o\text{est}}$  (est+1 a est+7) foram comparados com os valores do dia observado ( $ET_{o\text{dia}}$ ). A precisão da estimativa da  $ET_{o\text{est}}$  foi avaliada a partir de indicadores estatísticos (coeficiente de determinação -  $R^2$ , coeficiente angular - b, raiz quadrada do erro quadrático médio -RMSE e erro médio - ME). Para a análise do balanço hídrico de um solo cultivado com milho, um experimento de campo foi realizado no ano agrícola 2011/12, em área experimental da UFSM. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, bifatorial, com quatro repetições. O fator "A" constituiu de duas metodologias de cálculo para a estimativa da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ): (i) utilizando coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) simples e; (ii) utilizando  $K_c$  dual. O fator "D" foi constituído de quatro estratégias de irrigação: (i) 100% de reposição da  $ET_c$ ; (ii) 75% de reposição da  $ET_c$ ; (iii) 50% de reposição da  $ET_c$  e; (iv) 25% de reposição da  $ET_c$ . O conteúdo volumétrico e a água disponível no solo simulados foram comparados com os medidos (tratamento 100% com  $K_c$  simples). Os resultados são de uma superestimativa média da  $ET_{o\text{est}}$  ( $>0,04$  e  $<0,72$  mm dia<sup>-1</sup>) para os três locais, atribuída a superestimativa da  $T_{\text{max}}$  pela previsão meteorológica, variável que apresentou elevada associação com a  $ET_{o\text{est}}$  ( $R^2$  de 0,60). Essa superestimativa da  $ET_{o\text{est}}$  é reduzida à medida que a estimativa se aproxima do dia observado. As diferenças entre a  $ET_{o\text{dia}}$  e a  $ET_{o\text{est}}$ , tem pequena influência nos resultados do balanço hídrico do solo (RMSE inferior a 10 mm para a água disponível). Assim, a  $ET_{o\text{est}}$  pode ser uma alternativa para a determinação da necessidade de irrigação das culturas em tempo futuro, contribuindo para o gerenciamento da atividade irrigada e para a maior eficiência na utilização dos recursos naturais e demais insumos agrícolas.

**Palavras-chave:** previsão meteorológica; evapotranspiração; balanço hídrico.

## ABSTRACT

Doctorate's Thesis  
Post-Graduation Program on Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria

### ESTIMATED EVAPOTRANSPIRATION FORECAST OF DAILY DATA FROM WEATHER

Author: Zanandra Boff de Oliveira  
Advisor: Reimar Carlesso  
Santa Maria, March 17<sup>th</sup>

The real time determination and future of evapotranspiration (ET) can contribute to more efficient management of irrigation. The objective of this study was: (i) to evaluate the accuracy of the estimate of the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) calculated on daily data of the weather forecast for seven future days (ET<sub>o,est</sub>), to different locations, growing seasons and periods with and without and rain; (ii) evaluate the impact of using the ET<sub>o,est</sub> in the water balance of a soil cultivated with corn. The estimate ET<sub>o</sub> was performed to Santa Maria - RS and Crystalline and Morrinhos - GO. The collection of weather forecast data was carried out between June 26, 2011 to March 31 2014 was collected-daily (6:00 AM), the site: <http://www.tempoagora.com.br/>, the forecast data maximum temperature (T<sub>max</sub>) and minimum (T<sub>min</sub>) air, maximum relative humidity (RH<sub>max</sub>) and minimum (RH<sub>min</sub>) and wind speed (U<sub>2</sub>) for the next seven days. The ET<sub>o,est</sub> calculation was carried out by FAO-Penman-Monteith (FAO-PM) and Hargreaves methods. The ET<sub>o</sub> observed day (ET<sub>o,day</sub>) was calculated by the FAO- PM method with data measured by automatic weather station of the National Institute of Meteorology (INMET). The values of ET<sub>o,est</sub> (est+1 the est+7) were compared with the values observed daily (ET<sub>o,dia</sub>). The accuracy of the estimated ET<sub>o,est</sub> was evaluated using statistical indicators (coefficient of determination - R<sup>2</sup>, slope - b, mean square error of the square root -RMSE and average error - ME). For the analysis of the water balance of a soil cultivated with corn, a field experiment was accomplished in the year 2011/12, in an area of UFSM. The experimental design was a completely randomized factorial design with four replications. The factor "A" consisted of two methods of calculation to estimate crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>): (i) using crop coefficient (K<sub>c</sub>) and simple; (ii) using dual K<sub>c</sub>. The "D" factor consisted of four irrigation strategies: (i) 100% replacement of ET<sub>c</sub>; (ii) 75% replacement of ET<sub>c</sub>; (iii) 50% of ET<sub>c</sub> and replacement; (iv) 25% of replacement etc. The volumetric water content and available soil were simulated is compared with the measured (100% tartamento simple K<sub>c</sub>). The results are an overestimation of ET<sub>o,est</sub> (>0,04 and <0,72 mm day<sup>-1</sup>) for the three sites, attributed to overestimation of T<sub>max</sub> by the weather forecast, a variable that showed high association with ET<sub>o,est</sub> (R<sup>2</sup> 0,60). This overestimation of ET<sub>o,est</sub> is reduced as the estimation approximates the observed daily. The differences between the ET<sub>o,dia</sub> and ET<sub>o,est</sub>, has small influência the results of the soil water balance (RMSE less than 10 mm for the available water). Thus, ET<sub>o,est</sub> can be an alternative for determining the need for crop irrigation in future time, contributing to the management of irrigated activity and for the most efficient use of natural resources and other agricultural.

**Keywords:** weather forecast; evapotranspiration; water balance.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	10
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
<b>3 Artigo 1: ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM DADOS DIÁRIOS DA PREVISÃO METEOROLÓGICA PARA UMA REGIÃO DE CLIMA SUBTROPICAL NO BRASIL</b> .....	16
3.1 INTRODUÇÃO.....	18
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
3.4 CONCLUSÕES.....	39
3.5 REFERÊNCIAS .....	39
<b>4 Artigo 2: ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM DADOS DIÁRIOS DA PREVISÃO METEOROLÓGICA PARA UMA REGIÃO DE CLIMA DE SAVANA NO BRASIL</b> .....	44
4.1 INTRODUÇÃO.....	45
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	48
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
4.4 CONCLUSÕES.....	59
4.5 REFERÊNCIAS .....	60
<b>5 Artigo 3: SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DE UM SOLO CULTIVADO COM MILHO UTILIZANDO VALORES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADOS COM DADOS DA PREVISÃO METEOROLÓGICA</b> .....	64
5.1 INTRODUÇÃO.....	66
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	69
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
5.4 CONCLUSÕES.....	83
5.5 REFERÊNCIAS .....	84
<b>6 DISCUSSÃO GERAL</b> .....	87

<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	90
<b>8 REFERÊNCIAS</b> .....	91

## 1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET), processo combinado da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas, constitui importante componente do ciclo hidrológico, de fundamental importância para as diversas atividades humanas que tratam da utilização e manejo da água. Na agricultura, a ET é uma variável fundamental para a determinação das necessidades hídricas das culturas, constituindo um dos parâmetros do balanço hídrico do solo, conceituado de uma maneira simplificada como a diferença entre as entradas e saídas de água do sistema (camada ou profundidade do solo considerada). Além disso, estimativas confiáveis de ET são essenciais no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, para fins hidrológicos e ambientais. De acordo com Raziei e Pereira (2013), a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e a evapotranspiração da cultura ET<sub>c</sub>, são fundamentais para estimar o consumo de água das plantas, no suporte à programação de irrigação, no manejo de secas e nos estudos de mudanças climáticas.

A ET pode ser determinada ou estimada de diferentes maneiras, de forma direta ou indireta. A medida direta de ET por lisimetria é difícil e onerosa, justificando sua utilização apenas em condições experimentais. Assim, inúmeros métodos de cálculo dessa variável a partir de dados meteorológicos, têm sido descritos, testados e utilizados em variadas condições de clima e solo. Uma das primeiras abordagens sobre ET foi feita por Thornthwaite; Wilm (1944) e por Penman (1948), que definiram evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>) e propuseram métodos para a sua estimativa. Na década de 1960, Monteith, com base no método de Penman, propôs um método que estimava diretamente a ET<sub>c</sub>, denominando-o de Penman-Monteith. E assim, houveram evoluções nos conceitos de ET e nos métodos de cálculo para a sua estimativa, podendo-se destacar: o do tanque classe A (TCA) descrito por Doorenbos; Pruitt (1977), Allen et al. (1998), Barros et al. (2009); o de Blaney-Criddle, descrito por Doorenbos; Pruitt (1977), Pereira et al. (1997), López-Urrea et al. (2006); o da Radiação Solar, descrito por Doorenbos; Pruitt (1977), Pereira et al. (1997); o de Hargreaves, descrito por Allen et al. (1998); o de Priestley-Taylor descrito em Pereira et al. (1997), Sentelhas et al. (2010), Tabari (2010). De acordo com Allen et al (2011), são relatadas na literatura diferentes maneiras de determinação da ET, incluindo

lisímetros, covariância de vórtices turbulentos, razão de Bowen, balanço hídrico, fluxo de seiva e sensoriamento remoto. As diferentes abordagens sobre a ET ao longo do último século, estão associados com um conjunto de problemas e desafios existentes quando utilizado estes dados (ET) para modelagem hidrológica (ALLEN, 2005).

A grande evolução sobre os conceitos e estimativa da ETo foi com a publicação do boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998). Neste documento, definiu-se como método padrão de estimativa da ETo o desenvolvido por Penman-Monteith, que, após parametrização, passou a denominar-se Penman-Monteith FAO (FAO-PM). A equação FAO-PM pode ser decomposta em dois termos: o termo radiativo e o termo aerodinâmico. Para realização da estimativa, este método requer dados meteorológicos de radiação solar ( $R_s$ ), temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), umidade relativa do ar (RH) e velocidade do vento ( $U_2$ ). Neste caso, a cultura de referência utilizada é uma cultura hipotética. Os parâmetros numéricos, para a cultura hipotética, são: altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água ( $r_s$ ) igual a  $70 \text{ s m}^{-1}$  (ALLEN et al., 1998). Sendo que, para estimativas horárias da ETo, deve-se utilizar valores de  $r_s$  de  $50 \text{ s m}^{-1}$  para o cálculo de dia e de  $200 \text{ s m}^{-1}$  para o cálculo de noite (ALLEN et al., 2005). Dessa forma, a ETo é um parâmetro relacionado a condição meteorológica e expressa o poder evaporante da atmosfera (ALLEN et al., 1998; ALLEN, 2005). Além disso, foi discutido e apresentado no documento (boletim FAO 56), a atualização do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), que serve como uma integração das diferenças físicas e fisiológicas existentes entre a cultura em questão e a cultura de referência, sendo este necessário para a estimativa da ETc ( $ETc = ETo \times K_c$ ). De acordo com Pereira et al. (2014), a publicação do boletim FAO 56 foi um avanço na aplicação das curvas de  $K_c$  para uma vasta variedade de climas e localizações.

Conforme foi abordado, existem diversos métodos para a estimativa da ETo, desde aqueles mais simples, com base puramente empírica, como por exemplo, o método Hargreaves, que estima a ETo somente com dados de  $T_{ar}$ , até aqueles que apresentam embasamento físico consistente sobre o fenômeno, como o método padrão FAO-PM (ALLEN et al., 1998). Assim, é necessário averiguar qual é o método mais indicado, de acordo com a precisão necessária. De acordo com Bachour et al. (2013), a equação de Hargreaves muitas vezes tende a superestimar ou subestimar sistematicamente ET, por isso deve ser calibrada regionalmente. Por outro lado, o método FAO-PM foi avaliado mundialmente, apresentando resultados satisfatórios

para as diferentes condições climáticas e escala de tempo (XU; CHEN, 2005; YODER et al., 2005; LÓPEZ-URREA et al., 2006; JABLOUN; SAHLI, 2008; BARROS et al., 2009; ROCHA, 2011). Também, foram desenvolvidos estudos que comprovam a precisão do método, mesmo na indisponibilidade de algum dado meteorológico (estimado a partir de parâmetros existentes), conforme relatado nos trabalhos de Cai et al. (2007), Jabloun; Sahli (2008), Sentelhas et al. (2010) e Rocha (2011). Por exemplo, em casos de ausência de dados medidos de  $R_s$ , os mesmos podem ser estimados a partir de dados de  $T_{ar}$ , que é o elemento meteorológico mais disponível em estações meteorológicas (ALLEN et al., 1998; ASCE-EWRI, 2005).

De acordo com Allen (2005), um dos maiores desafios para o cálculo da ETo é a obtenção de dados meteorológicos que refletem o ambiente para a qual ET é estimada. Para Pereira et al. (2014), houveram muitos avanços na estimativa da ET com a publicação do Boletim FAO 56 (15 anos), tais como, estimativas mais adequadas para solo descoberto, estimativas diárias mais precisas a partir de dados fixos para a cultura de referência, entre outras. Ainda, de acordo com estes autores, com o avanço das tecnologias de informação e de obtenção e processamento de imagens de satélites, os estudos sobre ET irão evoluir no sentido de determinações em tempo real e futuro.

Portanto, as estimativas da ET que evoluíram com o passar dos anos de uma escala de tempo maior (mensal, quinzenal) para uma escala de tempo menor (diárias, horários) (ALLEN et al., 2005), tendem a evoluir para uma escala de tempo futura (dias) (PEREIRA et al., 2014). A estimativa da ETo em escala futura, utilizando dados da previsão meteorológica, é a temática de alguns estudos publicados (XU et al., 2012; SILVA et al., 2010; ER-RAKI et al., 2010; ISHAK et al., 2010; CAI et al., 2007; CAI et al., 2009; PERERA et al., 2013). A previsão da ETc das culturas (consumo hídrico) com antecedência, pode contribuir para o cálculo mais exato do balanço hídrico do solo e para um melhor planejamento das da atividade irrigada, possibilitando o aumento da eficiência da utilização da água e dos demais insumos agrícolas.

Na prática, conhecendo com antecedência o requerimento hídrico dos cultivos agrícolas, as irrigações poderão ser efetuadas em horários que a energia é mais barata, poderão ser antecipadas evitando que vários equipamentos operem ao mesmo tempo, além disso, o manejo fitossanitário e nutricional das plantas poderá ser realizado de acordo com a prática de irrigação, entre outras vantagens. Além disso, essa pode ser uma ferramenta útil para melhorar a eficiência na gestão da água de

irrigação, podendo ser aplicada em estimativas de retirada da água de reservatórios, como no caso de tabuleiros ou cooperativas de irrigação.

A utilização de dados meteorológicos da previsão do tempo apresenta-se como uma alternativa para a determinação da ETo em tempo futuro. Pois, existe a disponibilidade de dados para uma ampla área de cobertura (no Brasil existem aproximadamente 20 portais de meteorologia), diferente do que ocorre com os dados meteorológicos observados, que no Brasil, embora exista uma grande rede (INMET e Centro de Previsão e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - CPTEC/INPE) de observação meteorológica, ainda há muitas regiões produtoras agrícolas não cobertas pelas mesmas. Assim como, a utilização de estações meteorológicas automáticas nem sempre é possível em propriedades agrícolas, em razão do seu custo inicial e da infra-estrutura necessária. Todavia, existe a necessidade de validação desses dados de ETo estimados com dados da previsão meteorológica e a verificação dos impactos da utilização dos mesmos no balanço hídrico do solo (efeitos na disponibilidade de água no solo). Pois, trabalhos com essa finalidade são insipientes. Uma abordagem realizando a simulação do balanço hídrico do solo durante o ciclo de desenvolvimento do trigo, utilizando valores de ETo estimados a partir de dados da previsão meteorológica e o modelo ISAREG, foi realizada por Cai et al. (2009). Os autores obtiveram resultados satisfatórios do conteúdo de água no solo estimado em comparação aos valores medidos, com RMSE variando de 0,007 a 0,016m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para diferentes tratamentos de irrigação.

O balanço hídrico é um método contábil de estimativa da disponibilidade de água no solo e baseia-se na aplicação do princípio de conservação de massa (PEREIRA et al., 1997). Permite observar a dinâmica de água no solo a partir do armazenamento, deficiência e excessos hídricos (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Existem modelos computacionais que simulam o balanço hídrico do solo para diversas finalidades, finalidades, um exemplo é o modelo SIMDualKc (ROSA et al., 2012), que realiza a simulação do balanço hídrico do solo utilizando a abordagem Kc dual para o cálculo da ETc, visando o planejamento e programação da irrigação. Nessa abordagem, o Kc é dividido em dois fatores distintos que descrevem os componentes de evaporação (Ke) e de transpiração (Kcb). Allen et al. (2005) relata que, para culturas com cobertura parcial do solo e para irrigações de alta frequência ou locais com chuvas frequentes, o uso da metodologia dos coeficientes culturais duais permite determinações mais exatas da ETc.

Assim, justificam-se novos estudos que abordem a precisão da estimativa da ETo futura em diferentes locais e a aplicação dessa metodologia no balanço hídrico de um solo cultivado. É o caso do presente estudo, em que a metodologia da estimativa da ETo é avaliada em diferentes locais para sete dias futuros e aplicada a cultura do milho. A cultura do milho foi escolhida, tendo em vista a sua importância em áreas irrigadas por aspersão nas regiões Sul e Centro-Oeste do Brasil, que de acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013), respondem por 34,5 e 43,4% da produção nacional, respectivamente. Segundo Brasil (2013), a cultura do milho ocupa o quarto lugar em área irrigada, correspondendo a 559 mil hectares.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar a precisão da estimativa da  $ET_o$  calculada com dados diários da previsão meteorológica para sete dias futuros ( $ET_{o_{est}}$ ) comparando-a com a  $ET_o$  calculada com dados observados do dia ( $ET_{o_{dia}}$ ), para diferentes locais, anos agrícolas e períodos com e sem chuvas e, avaliar o impacto da utilização da  $ET_{o_{est}}$  no balanço hídrico de um solo cultivado com milho.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Estimar a  $ET_o$  com dados diários da previsão meteorológica para sete dias futuros, utilizando os métodos FAO-PM e Hargreaves, para Santa Maria – RS e Cristalina e Morrinhos – GO, Brasil.
- Avaliar a precisão da estimativa da  $ET_{o_{est}}$  para todo o conjunto de dados coletados, para diferentes intervalos de valores de  $ET_o$ , para diferentes anos agrícolas e para períodos com e sem chuvas.
- Simular o balanço hídrico de um solo cultivado com milho utilizando no modelo SIMDualKc os valores de  $ET_o$  estimados e observados.
- Comparar os valores de conteúdo volumétrico de água no solo e de água disponível no solo medidos em experimento de campo com os simulados pelo modelo SIMDualKc.

### 3 Artigo 1: ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM DADOS DIÁRIOS DA PREVISÃO METEOROLÓGICA PARA UMA REGIÃO DE CLIMA SUBTROPICAL NO BRASIL

**RESUMO:** A determinação em tempo real e futuro da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), a partir de dados da previsão meteorológica, pode ser uma alternativa para estimativas mais exatas do balanço hídrico do solo, além de contribuir para o melhor gerenciamento das atividades agrícolas e para a maximização do uso da água e dos demais insumos agrícolas. Assim, o objetivo do presente trabalho foi determinar para Santa Maria – RS, a  $ET_o$  diária definida como  $ET_{o\text{dia}}$  e a  $ET_o$  definida como  $ET_{o\text{est}}$ , usando as equações Penman-Monteith FAO (FAO-PM) e Hargreaves, e, avaliar a precisão da  $ET_{o\text{est}}$  para diferentes anos agrícolas, intervalos de dados e períodos com e sem chuvas. No período compreendido entre 26 de junho de 2011 e 31 de março de 2014 foram coletados, diariamente (6:00 AM), do site: <http://www.tempoagora.com.br/>, os dados de previsão de temperatura máxima ( $T_{\text{max}}$ ), temperatura mínima ( $T_{\text{min}}$ ), umidade relativa máxima ( $RH_{\text{max}}$ ), umidade relativa mínima ( $RH_{\text{min}}$ ) e velocidade do vento ( $U_2$ ) para os próximos sete dias. O cálculo da  $ET_{o\text{est}}$  foi realizado pelos métodos FAO-PM e Hargreaves. A  $ET_o$  do dia observado ( $ET_{o\text{dia}}$ ) foi calculada pelo método FAO-PM com dados obtidos da estação meteorológica automática (Waisala, modelo Maws 301) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os valores de  $ET_{o\text{est}}$  (est+1 a est+7) foram comparados com os valores do dia observado ( $ET_{o\text{dia}}$ ). A precisão das estimativas foi avaliada por indicadores estatísticos, sendo estes: erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente angular (b). Essa análise foi realizada para todo o conjunto de dados, para os diferentes intervalos de dados (0 - 2; 2 - 4; 4 - 6 e >6 mm dia<sup>-1</sup> de  $ET_o$ ) e para três anos agrícolas (2011/12, 2012/13 e 2013/14), em dias com e sem chuvas. Considerou-se um ano agrícola, o período compreendido entre primeiro de agosto a 31 de março e, dia com chuva o que apresentou valor superior a 2 mm. Os resultados obtidos para Santa Maria – RS, são de superestimativa (>0,52 mm dia<sup>-1</sup>) da  $ET_{o\text{est}}$  com um a sete dias de antecedência ao dia observado, atribuída a superestimativa da  $T_{\text{max}}$  pela previsão meteorológica, variável que apresentou maior associação com a  $ET_o$ . A superestimativa da  $ET_{o\text{est}}$  é reduzida à medida que a previsão se aproxima do dia observado, com melhores resultados (<0,65 mm dia<sup>-1</sup>) até o quarto dia de estimativa. Houve uma menor superestimativa (<0,5 mm dia<sup>-1</sup>) para valores de  $ET_{o\text{est}}$  superiores a 2 mm dia<sup>-1</sup>. As melhores estimativas da  $ET_{o\text{est}}$  são obtidas em dias sem chuva, com uma superestimativa média variando de 0,03 a 0,99 mm dia<sup>-1</sup>, para os anos agrícolas 2011/12, 2012/13 e 2013/14, enquanto que, para dias com chuva essa variação é de 0,97 a 5,30 mm dia<sup>-1</sup>. Maior precisão na estimativa da  $ET_{o\text{est}}$  é obtida utilizando o método padrão FAO-PM comparando ao método Hargreaves, o qual pode ser utilizado como uma alternativa simplificada para o cálculo da  $ET_{o\text{est}}$ , mas com uma correção sistemática de 13% na superestimativa desta. Assim, pode-se concluir que existe precisão aceitável na estimativa da  $ET_o$  com dados da previsão meteorológica, para fins de manejo de irrigação.

**PALAVRAS-CHAVE:** previsão meteorológica, evapotranspiração, estimativa.

**ABSTRACT:** The real time determination and future reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), from the weather forecast data, can be an alternative to more accurate estimates of soil water balance, and contribute to better management of agricultural activities and the maximizing the use of water and other agricultural inputs. The objective of this study was to determine to Santa Maria - RS, the daily ET<sub>o</sub> set to ET<sub>o</sub><sub>day</sub> and ET<sub>o</sub> set to ET<sub>o</sub><sub>est</sub>, using the Penman-Monteith FAO (FAO- PM) and Hargreaves equations, and evaluate the accuracy of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> for different agricultural years intervals data and periods with and without rain. In the period from June 26, 2011 and March 31, 2014 were collected daily (6:00 AM), the site: <http://www.tempoagora.com.br/>, the forecast data maximum temperature (T<sub>max</sub>), minimum temperature (T<sub>min</sub>), maximum relative humidity (RH<sub>max</sub>), minimum relative humidity (RH<sub>mim</sub>) and wind speed (U<sub>2</sub>) for the next seven days. The calculation was carried ET<sub>o</sub><sub>est</sub> methods by FAO-PM and Hargreaves. The ET<sub>o</sub> the observed day (ET<sub>o</sub><sub>day</sub>) was calculated by the FAO-PM method with data obtained from automatic weather station (Waisala, model Maws 301) INMET, available at: <http://www.inmet.gov.br/sonabra>. The ET<sub>o</sub><sub>est</sub> values (est+1 the est+7) were compared with the values observed daily (ET<sub>o</sub><sub>day</sub>). The accuracy of the estimates was assessed by statistical indicators, namely: mean error (ME), square root of the mean square error (RMSE), coefficient of determination (R<sup>2</sup>) and slope (b). This analysis was conducted for the entire data set for different ranges of data (to 0 - 2, 2 - 4; 4 - 6 and < 6 mm day<sup>-1</sup> ET<sub>o</sub>) for agricultural and three years (2011/12, 2012/13 and 2013/14), on days with and without rain. It was considered a crop year, the period from August 1 to March 31 and day with rain that had value was greater than 2 mm. The results obtained for Santa Maria - RS, are overestimation (> 0,52 mm day<sup>-1</sup>) of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> with one to seven days before the observed day, attributed to overestimation of T<sub>max</sub> for the weather forecast, variable that most association with ET<sub>o</sub>. The overestimation of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> is reduced as the forecast approaches the observed day, with better results (<0,65 mm day<sup>-1</sup>) until the fourth day estimate. There was a minor overestimation (<0,5 mm day<sup>-1</sup>) to ET<sub>o</sub><sub>est</sub> values greater than 2 mm one day. The best estimates of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> are obtained on days without rain, with an average overestimation ranging from 0,03 to 0,99 mm day<sup>-1</sup>, for crop years 2011/12, 2012/13 and 2013/14, while for days with rain this variation is 0,97 to 5,30 mm day<sup>-1</sup>. Improved accuracy in estimating the ET<sub>o</sub><sub>est</sub> is obtained using the standard method FAO-PM comparing the Hargreaves method which can be used as a simplified alternative for the calculation of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> but with a systematic offset in overestimation of this 13%. Thus, we can conclude that there is acceptable accuracy in estimating the ET<sub>o</sub> with data from weather forecast for the irrigation purposes.

**KEYWORDS:** weather forecast, irrigation management, evapotranspiration.

### 3.1 INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas demandam grandes quantidades de água, sendo cada vez mais preocupante a sua escassez. Esforços tem sido aplicados no desenvolvimento de pesquisas e tecnologias visando a maximização de seu uso, em todo o planeta. Neste sentido, o correto conhecimento da evapotranspiração (ET), seja para fins agrícolas (dimensionamento de projetos de irrigação e/ou manejo da irrigação) ou para fins hidrológicos e ambientais, assume fundamental importância.

A ET depende de fatores meteorológicos, como: temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), umidade relativa do ar (RH), radiação solar ( $R_s$ ) e  $U_2$ . Depende de fatores relacionados a cultura, como: área foliar, estágio de desenvolvimento das plantas, arquitetura foliar, resistência do dossel, entre outros que geralmente estão associados ao valor de coeficiente de cultura ( $K_c$ ) (ALLEN et al., 1998). Devido à complexidade dos processos e a sua importância, ou seja, a estimativa do consumo de água pelas plantas, a ET é um termo bastante estudado (PEREIRA et al., 2014; ALLEN et al., 2011).

Uma das primeiras abordagens sobre o tema foi feita por Thornthwaite; Wilm (1944), introduzindo o conceito de evapotranspiração potencial (ETp), caracterizada como a perda máxima de água de uma superfície de solo bem umedecido, completamente coberto com vegetação, em fase de desenvolvimento ativo. Estes autores, apresentaram uma primeira equação para a determinação da ETp, que envolvia o comprimento do dia, a temperatura média diária ( $T_{med}$ ) e também a umidade relativa média ( $RH_{med}$ ). Quase simultaneamente, Penman (1948), na Inglaterra, também definiu a ETp, ressaltando que a vegetação deveria ser rasteira e com altura uniforme. Monteith (1965), na década de 1960, ao tratar do aspecto micrometeorológico e físico da evaporação, incluindo parâmetros de resistência à evaporação ( $r_a$ ) (internos e externos) no método de Penman, propôs um método que estimava diretamente a evapotranspiração da cultura (ETc), denominando-o de Penman-Monteith (PM). Mais tarde, Doorenbos; Pruitt (1977), introduziram o conceito de ETo em substituição ao termo ETp. Além desses, outros métodos foram desenvolvidos ao longo dos anos, como descrevem Doorenbos; Pruitt (1977); Pereira et al. (1997); Allen et al. (1998), podendo –se destacar o método Hargreaves; Samani (1985), por ser simples e bastante difundido, já que o mesmo estima a ETo somente

com dados de  $T_{ar}$ . Mas, a grande evolução na estimativa da ETo foi com a publicação do boletim FAO – 56 (ALLEN et al., 1998), em que ficou estabelecido como método padrão para a estimativa da ETo o desenvolvido por Penman-Monteith, que, após parametrização, passou a denominar-se FAO Penman-Monteith (FAO–PM), o qual foi bastante aceito, internacionalmente, devido a sua elevada precisão em uma grande variabilidade de condições meteorológicas (ALLEN et al., 1998; ALLEN et al., 2005). Neste caso, a cultura de referência utilizada é uma cultura hipotética, cujas características se assemelham, bem de perto, à ET da grama. Após essas importantes definições, Allen (2005) enfatizou que, um dos maiores desafios para o cálculo da ETo é a obtenção de dados meteorológicos que refletem o ambiente para a qual ET é estimada.

No contexto atual, de acordo com Allen et al (2011), estão sendo relatados na literatura diferentes maneiras de determinação da ET, incluindo lisímetros, covariância de vórtices turbulentos, razão de Bowen, balanço hídrico, fluxo de seiva e sensoriamento remoto. A estimativa da ETo, também, pode ser realizada por diversos métodos, desde aqueles mais simples, com base puramente empírica, até aqueles que apresentam embasamento físico consistente sobre o fenômeno, antes de adotar algum método, é necessário averiguar qual é o mais indicado diante das condições locais e da disponibilidade de dados meteorológicos. O método FAO–PM foi validado mundialmente, apresentando resultados satisfatórios para as diferentes condições climáticas e escala de tempo (XU; CHEN, 2005; YODER et al., 2005; LÓPEZ-URREA et al., 2006; JABLOUN; SAHLI, 2008; BARROS et al., 2009; ROCHA, 2011). Também, foram realizados estudos utilizando dados meteorológicos mínimos para estimar a ETo com o método padrão FAO–PM, demonstrando sucesso dessa aplicação para diferentes condições climáticas, como relatado nos trabalhos de Cai et al. (2007), Jabloun; Sahli (2008), Cai et al. (2009), Sentelhas et al. (2010) e Rocha (2011). Um dos casos mais comum é a ausência de dados medidos de radiação solar ( $R_s$ ), nessa situação de acordo com Allen et al. (1998) e ASCE-EWRI (2005), os mesmos podem ser estimados a partir de dados de  $T_{ar}$ , que é o elemento climático mais disponível em estações meteorológicas.

A estimativa da ETo pode ser em diferentes escalas de tempo (mensal, quinzenal, decenal, diária e horária), dependendo da finalidade para que se quer estimar. Por exemplo, para projetos de irrigação, previsão de secas, estimativa de rendimento de safra, entre outros, essa estimativa não necessita ser tão precisa,

podendo ser numa escala de tempo maior. Para fins de manejo de irrigação, a precisão da estimativa da ETo deve ser elevada, pois implica diretamente na disponibilidade de água no solo, assim, a estimativa da ETo é realizada em escala diária. Entretanto, mesmo com a estimativa diária, o resultado é uma lâmina de irrigação inferior a real, pois não se pode contabilizar a ETc do dia da irrigação. Por isso, estimativas futuras da ETo, a partir de dados da previsão meteorológica (XU et al., 2012; SILVA et al., 2010; ER-RAKI et al., 2010; ISHAK et al., 2010; CAI et al., 2007; CAI et al., 2009; PERERA et al., 2013), além de contribuírem para o cálculo mais exato do balanço hídrico do solo, serão úteis para o planejamento da atividade irrigada e gestão da água e irrigação.

Trabalhando com a estimativa da ETo (método FAO-PM) a partir de dados numéricos da previsão do tempo obtido por meio do modelo de projeções climática MM5 (Mesocale Model versão 5) na região central do Chile, Silva et al. (2010), observaram para diferentes locais, valores de RMSE variando de 0,67 a 1,15 mm dia<sup>-1</sup>. Utilizando dados gerados desse mesmo modelo (MM5), para a estimativa da ETo, no sudoeste da Inglaterra, ISHAK et al. (2010), observaram uma superestimativa variando de 27 a 46% entre as estações do ano. Cai et al. (2007), avaliaram a precisão da estimativa da ETo com dados da previsão meteorológica com um banco de dados de cinco anos, para locais com clima árido, semi-árido, úmido e semi-úmido na China, observando valores de RMSE que variaram de 0,052 mm dia<sup>-1</sup> em clima úmido a 0,993 mm dia<sup>-1</sup> em clima árido. Além desses trabalhos científicos, pode-se destacar, também, a iniciativa do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade de California, que desenvolveu um site (<http://www.wrh.noaa.gov/forecast/evap>) para a divulgação dos resultados da ETo estimados a partir de dados da previsão meteorológica, para a região de Sacramento.

Os dados meteorológicos da previsão do tempo, são facilmente obtidos por meio de portais de meteorologia (aproximadamente 20 no Brasil), de jornais impressos e de outros meios de comunicação, que fornecem essas informações. A previsão numérica do tempo (PNT), consiste na integração numérica de sistemas de equações que simulam os processos físicos, dinâmicos e termodinâmicos em relação ao tempo para simular as mudanças na atmosfera (FERREIRA, 2011). No Brasil, o Centro de Previsão e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – (CPTEC/INPE) utiliza os seguintes modelos para gerar a PNT: (i) escala regional: ETa (11 dias), BRAMS (3 dias), ETa/Ensemble (5 dias); (ii) escala global: MGA (7 dias);

América do Sul (15 dias); Global (15 dias). Os dados disponibilizados nos portais de meteorologia são os de:  $T_{ar}$  (máxima e mínima), RH (máxima e mínima),  $U_2$ , pressão atmosférica (Pa). Estes dados são atualizados quatro vezes ao longo do dia (3:00, 9:00, 15:00 e 21:00 h). Para Santa Maria – RS, de acordo com Ferreira (2011), os dados estimados pela previsão do tempo (calculados pelo modelo BRAMS) de  $T_{ar}$  são superestimados em 0,65 °C e de RH são subestimados em 4,77%

Diante do exposto, a estimativa da ETo com dados da previsão meteorológica em tempo futuro, pode contribuir para a determinação do requerimento hídrico dos cultivos agrícolas e, com isso, para um manejo mais eficiente de sistemas irrigados. A partir dessa informação, os produtores irrigantes, poderão programar as irrigações nos horários em que a energia é mais barata, antecipar irrigações evitando que vários equipamentos operem ao mesmo tempo, programar o manejo fitossanitário e nutricional das plantas de acordo com a prática de irrigação, entre outras vantagens, que contribuem para a maior eficiência do uso da água na agricultura. Assim, o presente estudo tem relevância para a região Sul do Brasil, tendo em vista que o Rio Grande do Sul é o estado com maior área irrigada do Brasil (arroz inundado) e tem passado por uma recente expansão da irrigação por aspersão (SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E AGRONEGÓCIO, 2012).

Diante disso, o objetivo do presente trabalho foi determinar para Santa Maria – RS, a ETo diária com dados observados, definida como  $ET_{odia}$ , e, a ETo em tempo futuro, definida como  $ET_{oest}$ , usando as equações FAO–PM e Hargreaves, e, avaliar a precisão da  $ET_{oest}$  para diferentes anos agrícolas, intervalos de dados e períodos com e sem chuvas.

### 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado para Santa Maria – RS, situada em Latitude de 29°41'24"S, Longitude de 53°48'42"W e altitude de 95m. O clima da região, conforme Moreno (1961), é do tipo "Cfa" de acordo com a classificação climática de Köppen (subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes). A chuva média anual da região varia de 1.322 a 1.769 mm.

No período compreendido entre 26 de junho de 2011 a 31 de março de 2014 foram coletados diariamente (6:00 AM), por meio de um script desenvolvido em linguagem PHP, os dados de previsão meteorológica para Santa Maria – RS, do site: <http://www.tempoagora.com.br/>. O site foi escolhido pela disponibilidade de dados meteorológicos para um período superior a sete dias e pela facilidade de transformar os dados no formato de imagem em dados numéricos. Coletaram-se os dados de previsão da  $T_{max}$ , da  $T_{min}$ , da  $RH_{max}$ , da  $RH_{min}$  e da  $U_2$  para os próximos sete dias. Os dados de  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $U_2$  e umidade relativa média ( $RH_{med}$ ) ( $RH_{med} = (RH_{max} + RH_{min})/2$ ) foram armazenados em um banco de dados, conforme ilustrado na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Exemplo da organização dos dados meteorológicos diários obtidos da previsão meteorológica. Santa Maria, RS, 2015.

Data da coleta	Data previsão	Observação	$T_{max}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$RH_{med}$ (%)	$U_2$ (Km h <sup>-1</sup> )
	21/07/2012	est+1	18	9	90	8
	22/07/2012	est+2	19	8	78	9
	23/07/2012	est+3	18	4	77,5	10
20/07/2012	24/07/2012	est+4	24	8	82,5	15
	25/07/2012	est+5	24	12	82	13
	26/07/2012	est+6	26	14	82,5	13
	27/07/2012	est+7	26	15	81	12

$T_{max}$ : temperatura máxima do ar diária (°C);  $T_{min}$ : temperatura mínima do ar diária (°C);  $RH_{med}$ : umidade relativa média do ar ( $(RH_{max} + RH_{min})/2$ );  $U_2$  velocidade do vento (Km h<sup>-1</sup>) convertidos em m s<sup>-1</sup> para o cálculo da ETo.

Os valores estimados pela previsão meteorológica de  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $RH_{med}$  e  $U_2$  foram comparados com valores observados, obtidos da estação meteorológica automática (Waisala, modelo Maws 301) do INMET. Estes dados meteorológicos estão disponíveis no site: <http://www.inmet.gov.br/sonabra>.

A verificação da precisão das estimativas dos dados meteorológicos, foi realizada com o auxílio dos seguintes indicadores estatísticos: ME (Equação 3.1), RMSE (Equação 3.1),  $R^2$  (Equação 3.3) e b (Equação 3.4). O RMSE dá a medida do erro médio que está sendo cometido. O ME é uma variável que indica a direção média dos desvios de um conjunto de previsões a partir de um conjunto de valores observados. Este valor indica a tendência, se o modelo está superestimando (ME positivo) ou subestimando (ME negativo) (WILKS, 1995). Nas equações, as siglas Oi

e  $P_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) representam pares de valores observados e simulados para uma determinada variável, e  $\bar{O}$  e  $\bar{P}$  são os respectivos valores médios.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (3.1)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (3.2)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (3.3)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (3.4)$$

O cálculo da  $ET_{o_{est}}$  para um a sete dias de antecedência ao dia observado, conforme demonstra a tabela 3.2, foi realizado utilizando os métodos Hargreaves (Equação 3.5) e FAO-PM (Equação 3.6), ambos descritos por Allen et al. (1998). O cálculo da  $ET_{o_{dia}}$  foi realizado utilizando o método FAO-PM (Equação 3.6).

Tabela 3.1- Representação da organização dos dados de evapotranspiração de referência estimados com os dados da previsão meteorológica. Santa Maria, RS, 2015.

Data da previsão		ETo (mm)
13/01/2014	est+7	2,78
14/01/2014	est+6	2,42
15/01/2014	est+5	2,29
16/01/2014	est+4	2,83
17/01/2014	est+3	2,07
18/01/2014	est+2	2,07
19/01/2014	est+1	2,21
20/01/2014	Obs	2,21

ETo: evapotranspiração de referência; obs: valor de ETo observado; est+1 ETo estimada com os dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado, ou seja, no sétimo dia da previsão.

$$ET_o = 0,0023 (T_{med} + 17,8) (T_{max}-T_{min})^{0,5} Ra \quad (3.5)$$

em que:

$ET_o$ : é a evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>)

$T_{max}$  e  $T_{min}$ : é a temperatura máxima e mínima do ar (°C)

$T_{med}$ : temperatura média do ar (°C)

$R_a$ : é a radiação extraterrestre diária (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (3.6)$$

em que:

$ET_o$ : evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>)

$R_n$ : radiação líquida na superfície da cultura (MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>)

$G$ : densidade de fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

$T$ : média da temperatura do ar a 2,0 m de altura (°C)

$U_2$ : média da velocidade do vento a 2,0 m de altura (m s<sup>-1</sup>)

$(e_s - e_a)$ : déficit de pressão de vapor do ar, medido a 2,0 m de altura (kPa)

$\Delta$ : declividade da curva de pressão de vapor (kPa°C<sup>-1</sup>)

$\gamma$ : constante psicrométrica (kPa°C<sup>-1</sup>)

Os procedimentos de cálculo da  $ET_o$  (FAO–PM) foram os descritos por Allen et al. (1998). Sendo que, a pressão média de saturação de vapor ( $e_s$ ) foi calculada pela seguinte equação:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (3.7)$$

em que:

$e_s$ : pressão de saturação de vapor do ar

$T_{max}$ : temperatura máxima do ar (°C)

$T_{min}$ : temperatura mínima do ar (°C)

A pressão de vapor na temperatura máxima e mínima diária foi calculada a partir da equação 3.8.

$$e_s = e^o(T_{\max} \text{ ou } T_{\min}) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27T_{\max} \text{ ou } T_{\min}}{T_{\max} \text{ ou } T_{\min} + 237.3} \right] \quad (3.8)$$

A pressão parcial de vapor ( $e_a$ ) foi calculada pela seguinte equação:

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} e_s \quad (3.9)$$

em que:

$RH_{\text{med}}$ : umidade relativa do ar média do dia (%)

Para o cálculo da  $ET_{Oest}$ , a  $R_s$  foi estimada a partir da equação de radiação proposta por Hargreaves (HARGREAVES; SAMANI, 1982).

$$R_s = K_{RS} (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} R_a \quad (3.10)$$

em que:

$R_s$ : radiação solar ou radiação de onda curta ( $MJm^{-2} d^{-1}$ )

$R_a$ : radiação extraterrestre ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )

$K_{RS}$ : é o coeficiente empírico de ajuste da  $R_s$  para regiões continentais. O valor utilizado foi de 0,16, escolhido a partir da interpretação dos indicadores estatísticos obtidos para o conjunto de 769 dados de  $ET_{Oest+1}$  calculados com diferentes valores de  $K_{RS}$  (Tabela 3.3)

Tabela 2.3 - Resultados dos indicadores estatísticos para a evapotranspiração de referência estimada com um dia de antecedência ao dia observado, utilizando diferentes valores de coeficiente empírico de ajuste da radiação solar para regiões continentais. Santa Maria, RS, 2014.

$K_{RS}$	Indicadores estatísticos			
	$b$	$R^2$	RMSE	ME
0,16	1,10	0,68	1,18	0,60
0,17	1,10	0,59	1,33	0,65
0,18	1,19	0,51	1,66	0,97
0,19	1,17	0,57	1,53	0,90

$K_{RS}$ : é o coeficiente empírico de ajuste da radiação solar para regiões continentais;  $b$ : coeficiente angular;  $R^2$ : coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro médio ao quadrado; ME: erro médio.

A  $R_s$  para o céu totalmente limpo ( $R_{so}$ ) foi calculada por:

$$R_{so} = (0.75 + 2.10^5 Z) R_a \quad (3.11)$$

em que:

$R_{so}$ : radiação solar para o céu totalmente limpo ( $Mj\ m^{-2}dia^{-1}$ )

Z: altitude local (m)

Para o cálculo do balanço de ondas longas ( $R_{nl}$ ) foi usada a seguinte equação:

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K^4} + T_{min,K^4}}{2} \right] \left( 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (3.12)$$

em que:

$R_{nl}$ : balanço de ondas longas ( $Mj\ m^{-2}\ dia^{-1}$ )

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann Boltzmann ( $4,9\ 10^{-9}\ MJ\ K^{-4}m^{-2}dia^{-1}$ )

$T_{max}$ : máxima temperatura absoluta ( $^{\circ}C$ )

$T_{min}$ : mínima temperatura absoluta ( $^{\circ}C$ )

$e_a$ : pressão de vapor atual (KPa)

$R_s/R_{so}$ : relação da radiação solar incidente

Posteriormente, foi estimado o balanço de ondas curtas ( $R_{ns}$ ):

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (3.13)$$

em que:

$\alpha$ : albedo da superfície (0,23)

Por fim, calculou-se o balanço de radiação ( $R_n$ ):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (3.14)$$

em que:

$R_n$ : radiação líquida ( $MJm^{-2}dia^{-1}$ )

O grau de associação entre as variáveis meteorológicas e a ETo, foi determinado mediante ao  $R^2$  (Equação 3.3) e, mediante a análise de sensibilidade da  $ET_{oest}$  a inclusão de dados meteorológicos medidos. Os valores de ETo estimados (est+1 a est+7), foram comparados com os valores do dia observado ( $ET_{odia}$ ). A verificação da precisão das estimativas da  $ET_{oest}$ , foi realizada pelos seguintes indicadores estatísticos: ME (Equação 3.1), RMSE (Equação 3.2),  $R^2$  (Equação 3.3) e b (Equação 3.4). A avaliação da precisão da estimativa da  $ET_{oest}$  foi realizada para as seguintes situações: (i) todo o conjunto de dados, (ii) para diferentes intervalos de dados (0 - 2; 2 - 4, 4 - 6 e maior que 6 mm dia<sup>-1</sup> de ETo), (iii) para três anos agrícolas (2011/12, 2012/13 e 2013/14) em dias com e sem chuvas. Considerou-se um ano agrícola, o período compreendido entre primeiro de agosto a 31 de março e, dia com chuva, aquele que apresentou valor superior a 2 mm.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período compreendido entre 26 de julho de 2011 a 31 de março de 2014, foram coletados 936 dados meteorológicos. Na tabela 3.3 estão apresentados os valores máximos, mínimos e médios para as variáveis meteorológicas observadas e estimadas e, os indicadores estatísticos para as variáveis meteorológicas estimadas pela previsão meteorológica, para sete dias.

Observa-se que aumenta a semelhança dos valores máximos, mínimos e médios estimados com os observados, à medida que a previsão se aproxima do dia observado (est+1), evidenciada pela redução nos erros (RMSE e ME) e pelos valores de b e  $R^2$  mais próximos a um. A diferença média entre valores de  $T_{max}$  observados e estimados pela previsão meteorológica foi pequena, resultando em uma superestimativa que variou entre 0,10 e 0,74 °C para os dias est+1 e est+7, respectivamente. O mesmo ocorreu para a  $T_{min}$ , havendo uma subestimativa que variou entre 0,06 e 0,18 °C para o dia est+1 e est+7, respectivamente. Ferreira (2011), realizou um estudo comparativo do pós-processamento estatístico aplicado ao modelo BRAMS (modelo de escala regional CPTEC/INPE) e observou para Santa Maria – RS a superestimativa da  $T_{ar}$  de 0,65 °C (previsão para 3 dias). Avaliando este mesmo modelo (BRAMS) na previsão numérica da  $T_{ar}$  e da RH para o estado da Paraíba,

Mariano et al. (2011), concluíram que os valores estimados pelo modelo BRAMS mostram-se satisfatórios para até 5 dias.

Tabela 3.3- Valores máximos, mínimos e médios para as variáveis meteorológicas observadas e indicadores estatísticos para as variáveis meteorológicas estimadas e pela previsão meteorológica para sete dias, para o período de 26/07/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>b</b>	<b>RMSE*</b>	<b>ME*</b>
<b>Temperatura máxima (°C)</b>							
est+7	36,00	11,00	26,17	0,58	1,01	4,66	0,74
est+6	36,00	11,00	26,15	0,60	1,01	4,49	0,72
est+5	38,00	11,00	26,09	0,62	1,01	4,56	0,66
est+4	37,00	9,00	25,87	0,65	1,01	4,44	0,44
est+3	37,00	9,00	25,78	0,64	1,01	4,42	0,35
est+2	38,00	9,00	25,72	0,65	1,01	4,40	0,29
est+1	39,00	8,00	25,53	0,67	1,01	4,38	0,10
obs	39,50	8,10	25,43				
<b>Temperatura mínima (°C)</b>							
est+7	26,00	1,00	14,62	0,56	0,99	4,07	-0,18
est+6	25,00	1,00	14,65	0,59	0,99	4,04	-0,15
est+5	26,00	1,00	14,64	0,57	0,98	3,98	-0,16
est+4	26,00	0,00	14,68	0,59	0,99	3,95	-0,13
est+3	25,00	0,00	14,67	0,63	0,99	3,85	-0,14
est+2	28,00	0,00	14,68	0,65	0,98	3,73	-0,12
est+1	25,00	0,00	14,74	0,63	0,99	3,83	-0,06
obs	30,00	-1,80	14,80				
<b>Umidade relativa média do ar (%)</b>							
est+7	93,00	30,00	51,16	0,34	0,88	22,50	-23,45
est+6	93,00	31,00	51,57	0,34	0,88	22,30	-23,04
est+5	94,00	29,00	55,86	0,34	0,90	21,40	-18,75
est+4	95,00	27,50	62,87	0,37	0,92	16,37	-11,74
est+3	95,50	28,00	62,15	0,38	0,91	19,82	-12,46
est+2	96,00	28,00	64,59	0,35	0,95	16,09	-10,02
est+1	93,50	29,50	63,93	0,36	0,94	15,48	-10,68
obs	97,60	36,00	74,61				
<b>Velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>)</b>							
est+7	12,22	0,28	4,27	0,35	2,20	3,12	2,59
est+6	9,44	0,28	4,26	0,35	2,20	3,09	2,58
est+5	8,89	0,28	3,85	0,37	2,20	3,0	2,17
est+4	8,89	0,28	3,66	0,37	2,20	3,0	1,98
est+3	8,06	0,28	3,37	0,42	2,00	2,5	1,69
est+2	7,78	0,28	2,92	0,43	1,90	2,3	1,24
est+1	7,78	0,28	2,73	0,43	1,70	2,1	1,05
obs	4,5	0,36	1,68				

\*expresso na unidade que a variável foi medida; est+1... est+7: dados da previsão meteorológica com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: dados meteorológicos do dia observado; b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

Maior diferença entre os dados estimados e observados foi verificada para a RH e para a  $U_2$ , especialmente para os primeiros dias de previsão (est+7 a est+5). Observa-se uma elevada subestimativa da RH entre os dias de estimativa ( $>10,68 < 23,45 \%$ ). Ferreira (2011), realizou um estudo comparativo do pós-processamento estatístico aplicado ao modelo BRAMS (modelo de escala regional CPTEC/INPE) e observou para Santa Maria – RS a subestimativa da RH de 4,77% (previsão para 3 dias). Coll Delgado et al. (2009), desenvolveram para Minas Gerais, modelos físico-matemáticos para estimativa da RH a partir de dados de  $T_{ar}$  e, observaram que a mesma foi subestimada em 13 localidades. A  $U_2$  foi superestimada em valores que variaram entre os dias de previsão de 1,05 a 2,59  $m s^{-1}$ . De acordo com Ishak et al. (2013) e Huntington et al. (2014), uma das maiores dificuldades de utilizar dados gerados por modelos de circulação geral da atmosfera para a estimativa da  $ET_o$ , é a imprecisão na estimativa da  $U_2$ .

Todas as variáveis meteorológicas descritas, participam do processo de ET direta ou indiretamente. A  $T_{ar}$  atua no processo de ET, pois o ar aquecido próximo às plantas transfere energia para a cultura na forma de fluxo de calor sensível, aumentando as taxas evapotranspiratórias. Por isso, a  $T_{ar}$  é variável direta na estimativa da  $ET_o$ , considerada por ambos os métodos (Hargreaves e FAO-PM). Além disso, a  $T_{ar}$  foi utilizada como variável preditiva da  $e_s$  (equação 3.8) utilizada no método FAO-PM, que foi superestimada em função da superestimativa da  $T_{max}$ . Ademais, a ET é influenciada pela RH, pois em ambiente com RH elevada, o ar já está muito próximo da saturação e assim, menos água adicional pode ser armazenada e, ocorrendo ET mais baixa. Por isso, a diferença entre a pressão do vapor d'água ( $e_s - e_a$ ), entre a cultura e o ar vizinho, é um fator determinante para o processo de ET. No caso do presente estudo, para a aplicação do método FAO-PM, a  $e_a$  foi calculada a partir da RH e, por consequência foi subestimada. Como resultado, o déficit de pressão de vapor ( $e_s - e_a$ ) foi superestimado. Ainda, o processo de remoção do vapor depende do vento e da turbulência do ar, que transporta grandes quantidades de ar acima da superfície evaporante. Para fins de identificar o efeito de cada uma dessas variáveis no cálculo da  $ET_o$ , na Tabela 3.4 está apresentado o  $R^2$  entre as variáveis meteorológicas e a  $ET_o$  observada e estimada para Santa Maria – RS (período de 26/07/2011 a 31/03/2014) e, na tabela 3.5 estão apresentados os indicadores estatísticos comparando a  $ET_{odia}$  com a  $ET_{oest+1}$  calculada com inclusão de dados meteorológicos medidos.

Tabela 3.4 – Coeficiente de determinação entre os valores diários de evapotranspiração de referência estimada pelo método FAO –PM e as variáveis meteorológicas. Santa Maria, RS, 2015.

Variável meteorológica	R <sup>2</sup>	
	ET <sub>O</sub> dia	ET <sub>O</sub> est+1
Radiação solar incidente (Mj m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	0,80	0,53
Temperatura máxima do ar (°C)	0,62	0,60
Temperatura mínima do ar (°C)	0,29	0,23
e <sub>a</sub> - e <sub>s</sub>	0,50	0,29
Velocidade do vento (m s <sup>-1</sup> )	0,08	0,07

Em que: R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; ET<sub>O</sub>obs evapotranspiração de referência calculada com dados meteorológicos observados; ET<sub>O</sub>est+1: evapotranspiração de referência estimada com os dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado.

Tabela 3.5- Indicadores estatísticos para a evapotranspiração de referência estimada com os dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado (ET<sub>O</sub>est+1) pelo método FAO–PM e, com dados observados de umidade relativa do ar média, velocidade do vento e temperatura do ar, para o período de 26/07/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2014.

		R <sup>2</sup>	b	RMSE	ME
	Todos os dados est	0,66	1,07	1,16	0,52
ET <sub>O</sub>	U <sub>2</sub> obs	0,68	1,07	1,14	0,52
Est+1	RH <sub>med</sub> obs	0,77	1,05	0,99	0,47
	T <sub>ar</sub> obs	0,83	1,04	0,88	0,25

b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio; Dados est: ET<sub>O</sub>est com os dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado; U<sub>2</sub>obs: ET<sub>O</sub>est com os dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado e com dados observados de velocidade do vento; RH<sub>med</sub>obs: ET<sub>O</sub>est com os dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado e com dados observados de umidade relativa do ar média; T<sub>ar</sub>obs: ET<sub>O</sub>est com os dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado e com dados observados de temperatura máxima e mínima do ar

A variável meteorológica com maior associação com a ET<sub>O</sub>est foi a T<sub>max</sub> (R<sup>2</sup> 0,60), seguida da R<sub>s</sub> (estimada com dados de T<sub>ar</sub>). A associação da ET<sub>O</sub> com as variáveis T<sub>min</sub> foi representada por um R<sup>2</sup> de 0,23. O e<sub>a</sub> - e<sub>s</sub>, que está associado as variáveis T<sub>ar</sub> e RH<sub>med</sub>, teve a sua associação com a ET<sub>O</sub>est representada por um R<sup>2</sup> de 0,29. E, o efeito da U<sub>2</sub> no cálculo foi praticamente nulo. Todavia, em estudo similar a este, realizado na Austrália, Perera et al. (2013), observaram maior associação da U<sub>2</sub> para as estimativas da ET<sub>O</sub> com um dia a três dias de antecedência ao dia observado e, da T<sub>ar</sub> e da R<sub>s</sub> para estimativas de quatro a nove dias de antecedência ao dia observado. Por outro lado, Fonseca; Marin (2007), estudando o efeito de variáveis meteorológicas na ET<sub>O</sub> em uma região de clima tropical úmido do Brasil, concluíram que, a R<sub>s</sub> seguida da T<sub>ar</sub> e da RH foram as variáveis que mais influenciaram na

estimativa da ETo pelo método FAO-PM. Xu et al. (2006), em estudo conduzido na China, observaram que a variável mais importante no cálculo da ETo (FAO-PM) foi a RH, seguida da Rs e da  $T_{ar}$ , já a variável  $U_2$  apresentou os menores valores de coeficiente de sensibilidade.

Na tabela 3.5, visualiza-se que a inclusão de valores medidos de  $RH_{med}$  e  $U_2$  no cálculo da  $ET_{oest+1}$ , promovem uma pequena melhoria na sua estimativa, se comparada a melhoria existente com inclusão de valores medidos de  $T_{ar}$ . A inclusão de valores medidos de  $T_{ar}$  resulta na redução dos valores de RMSE de  $1,16 \text{ mm dia}^{-1}$  (ETo calculada com todos os dados estimados) para  $0,88 \text{ mm dia}^{-1}$  (ETo calculada com dados de  $RH_{med}$  e  $U_2$  estimados e dados de  $T_{ar}$  medidos). Estes resultados, ilustram a importância da  $T_{ar}$  para o cálculo da  $ET_{oest}$ , por ser uma variável direta para o cálculo (FAO-PM), além de ser usada para a estimativa da Rs e do  $e_s$ .

No presente trabalho, como a  $T_{max}$ , variável estimada com uma pequena superestimativa pela previsão meteorológica (Tabela 3.3) se comparada aos resultados obtidos por Ferreira (2011), apresentou elevada associação (Tabela 3.4) com a  $ET_{oest}$ , assim como, houve uma superestimativa do  $e_a - e_s$ , que é a terceira variável com maior  $R^2$  com a  $ET_{oest}$ , o resultado é a superestimativa da  $ET_{oest}$ . Tais resultados podem ser observados na tabela 3.6, em que estão apresentados os resultados dos indicadores estatísticos (RMSE, ME,  $R^2$  e b) comparando a  $ET_{odia}$  e a  $ET_{oest}$ , para todo o conjunto de dados (período de 26/07/2011 a 31/03/2014).

Tabela 3.6 - Resultado dos indicadores estatísticos comparando a evapotranspiração de referência observada com a estimada a partir de dados da previsão meteorológica (est+1 a est+7), pelos métodos FAO-PM e Hargreaves para o período de 26/07/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

Previsão	FAO-PM				Hargreaves			
	b	$R^2$	RMSE*	ME*	b	$R^2$	RMSE*	ME*
est+7	1,12	0,55	1,48	0,72	1,09	0,58	1,39	0,68
est+6	1,13	0,56	1,47	0,69	1,09	0,60	1,31	0,67
est+5	1,08	0,51	1,44	0,61	1,09	0,54	1,29	0,66
est+4	1,08	0,57	1,30	0,56	1,09	0,61	1,30	0,65
est+3	1,07	0,61	1,26	0,54	1,09	0,60	1,30	0,64
est+2	1,07	0,61	1,23	0,53	1,09	0,62	1,29	0,66
est+1	1,07	0,66	1,16	0,52	1,09	0,68	1,19	0,65

\*expresso na unidade que a variável foi medida ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); est+1... est+7: ETo estimada com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: ETo calculada com dados observados; b: coeficiente angular;  $R^2$ : coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

A redução na superestimativa da  $ET_{O_{est}}$  (FAO-PM) foi de 0,72 para 0,52 mm  $dia^{-1}$  do dia est+7 para o dia est+1, respectivamente (Tabela 3.6). Para a  $ET_{O_{est}}$  pelo método Hargreaves, observou-se uma pequena variação entre os dias de previsão, com uma superestimativa média entre 0,65 e 0,68 mm  $dia^{-1}$  (Tabela 3.6). Os menores valores de erro (ME e RMSE) ocorreram até o quarto dia de estimativa (RMSE de 1,16 a 1,30 e ME de 0,52 a 0,65 mm  $dia^{-1}$ ), a partir desse dia os erros foram maiores, indicando uma menor confiabilidade da utilização destes dados. Perera et al. (2013), avaliando a precisão da estimativa da ETo para nove dias de antecedência ao dia observado na Austrália, com um banco de dados de 14 anos, observou uma maior precisão na estimativa da ETo com dados da previsão meteorológica para um período de até seis dias de antecedência ao dia observado (RMSE de 0,65 a 1,01 mm  $dia^{-1}$ ).

Na tabela 3.7, estão apresentados os resultados dos valores máximos, mínimos e médios da  $ET_{O_{dia}}$  e da  $ET_{O_{est}}$ , demonstrando que as maiores superestimativas são para valores de ETo mais baixos (<2 mm) (Tabela 3.6 e Figura 3.1).

Tabela 3.7 - Valores máximos, mínimos e médios da evapotranspiração de referência observada e estimada pelos métodos FAO-Penman-Monteith e Hargreaves no período de 26/07/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

	FAO-PM			Hargreaves		
	máximo	mínimo	Médio	máximo	mínimo	médio
est+7	8,99	1,01	4,04	7,56	1,12	4,00
est+6	8,74	1,03	4,01	7,46	0,88	3,99
est+5	8,68	0,98	3,93	7,98	0,80	3,98
est+4	8,39	0,87	3,88	8,08	0,79	3,97
est+3	8,98	0,55	3,86	8,08	0,58	3,96
est+2	8,21	0,55	3,84	7,90	0,55	3,98
est+1	8,64	0,28	3,83	8,08	0,57	3,97
Obs	8,94	0,50	3,32	8,94	0,50	3,32

est+1... est+7: ETo estimada com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: ETo calculada com dados observados.

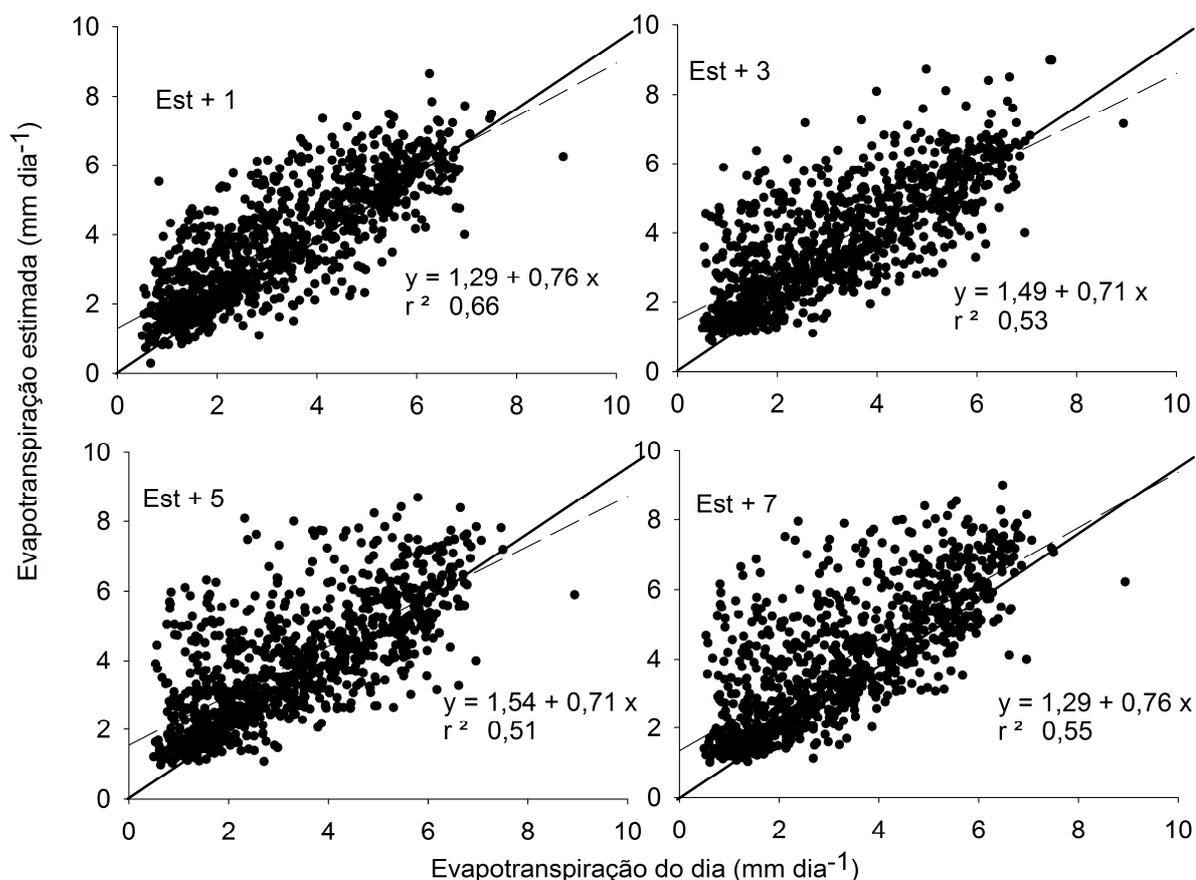


Figura 3.1 – Comparação entre a evapotranspiração de referência observada e a estimada pelo método FAO-PM com dados da previsão meteorológica para sete dias, no período compreendido entre 26/07/2011 a 31/03/2014. Em que: a linha cheia representa a relação 1:1 e a linha pontilhada representa a regressão linear. Santa Maria, RS, 2015.

Separando o banco de dados de  $ET_{o_{est}}$  em diferentes intervalos (0-2; 2-4; 4-6; 6-9  $\text{mm dia}^{-1}$ ) (Tabela 3.8), fica evidente que as estimativas são mais precisas ( $ME < 0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ) para valores superiores a 2  $\text{mm dia}^{-1}$ .

Tabela 3.8– Resultado dos indicadores estatísticos comparando diferentes intervalos de evapotranspiração de referência estimada a partir de dados da previsão meteorológica para o período de 26/07/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

Valor de $ET_{o_{est}}$ $\text{mm dia}^{-1}$	$R^2$	b	RMSE $\text{mm dia}^{-1}$	ME $\text{mm dia}^{-1}$
0 a 2	0,44	1,46	0,65	0,65
2 a 4	0,75	1,26	0,49	0,47
4 a 6	0,81	1,09	0,45	0,43
6 a 9	0,96	1,05	0,31	0,30

b: coeficiente angular;  $R^2$ : coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

Estes resultados são relevantes, pois na região Sul do Brasil, as culturas agrícolas necessitam de irrigação no período de primavera/verão, em que a demanda evapotranspirométrica é maior e o número de dias com chuvas é menor. Nesse período, como a ETo prevalece, na maioria dos dias, acima de 3 mm, conforme demonstra a figura 3.2, que ilustra a média anual da ETo para Santa Maria – RS (média do período de 2004 a 2014), a recomendação de irrigação baseada na ETo futura tende a ser mais precisa, com uma superestimativa inferior a 0,5 mm dia<sup>-1</sup> (Tabela 3.8).

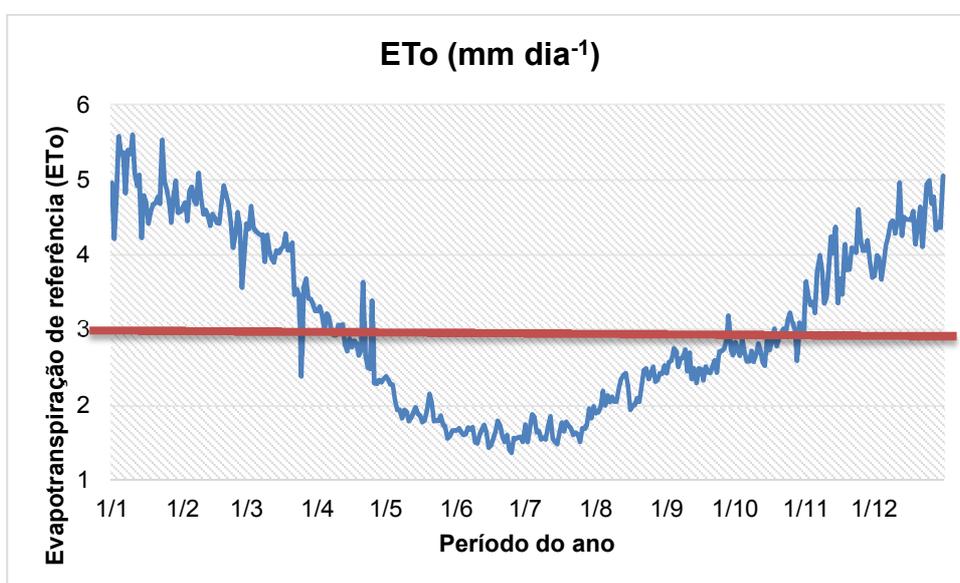


Figura 3.2 – Média diária de um período de dez anos (2004 a 2014) da evapotranspiração de referência, para Santa Maria – RS. Santa Maria, RS, 2015.

A confiabilidade dos modelos numéricos de previsão do tempo varia conforme vários fatores, como época do ano (sazonalidade, meses de transição) e período de previsão (HART et al., 2004; FERREIRA, 2011). Sendo assim, a precisão na estimativa das variáveis meteorológicas foi avaliada para dias com e sem chuva, em três anos agrícolas. Na figura 3.3 está apresentada a distribuição das chuvas nos anos agrícolas 2011/12, 2012/13 e 2013/14.

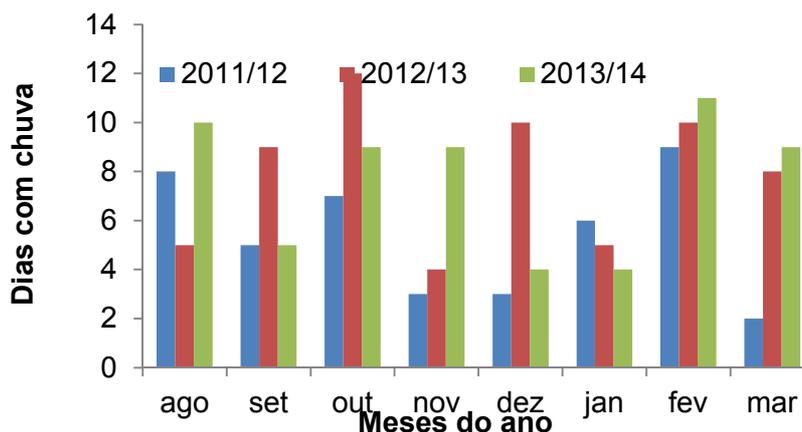


Figura 3.3 – Distribuição das chuvas em três anos agrícolas 2011/12, 2012/13 e 2013/14. Santa Maria, RS, 2015.

Observa-se uma elevada variabilidade na distribuição das chuvas entre os anos agrícolas, até mesmo para os anos agrícolas 2012/13 e 2013/14 em que o número de dias de chuva foram similares. Outubro e fevereiro foram os meses com maior número de dias chuvosos. Já, nos meses de novembro a fevereiro, o número de chuvas tende a ser mais baixo, em função disso e da elevada demanda atmosférica (maiores valores de ETo) são necessárias irrigações suplementares com maior frequência. Os resultados dos indicadores estatísticos (RMSE, ME,  $R^2$  e b), comparando as variáveis meteorológicas observadas e estimadas em dias com e sem chuvas, estão apresentados na tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Resultado dos indicadores estatísticos comparando as variáveis meteorológicas medidas com as estimadas pela previsão do tempo, em dias com e sem chuvas, no período compreendido de 26/07/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

	Sem chuva				Com chuva			
	$T_{max}$	$T_{min}$	$RH_{med}$	$U_2$	$T_{max}$	$T_{min}$	$RH_{med}$	$U_2$
	<b>est+7</b>							
b	1,01	0,99	0,80	2,42	1,05	0,99	0,74	2,20
$R^2$	0,67	0,43	0,50	0,18	0,34	0,66	0,20	0,25
RMSE	4,57	3,66	35,78	2,82	6,07	3,40	39,52	2,69
ME	0,85	-0,77	-17,14	2,58	2,17	-0,20	-20,91	2,07
	<b>est+1</b>							
b	1,01	0,98	0,94	1,35	1,03	0,99	0,88	1,26
$R^2$	0,70	0,67	0,53	0,20	0,54	0,64	0,25	0,40
RMSE	3,98	3,69	14,71	1,61	5,42	3,61	19,21	1,50
ME	0,60	-0,23	-4,78	0,95	1,56	-0,12	-9,41	0,69
Média obs	25,66	14,25	72,61	1,65	23,62	16,60	81,44	1,76

Continuação...

Média <sub>est+1</sub>	26,26	14,00	71,43	2,60	25,18	16,48	72,03	2,45
Média <sub>est+7</sub>	26,51	13,48	55,47	4,23	25,80	16,40	60,53	3,83

T<sub>max</sub>: temperatura máxima do ar (°C); T<sub>min</sub>: temperatura mínima do ar (°C); RH: umidade relativa do ar média (%); U<sub>2</sub>: velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>); b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

Em dias com chuva acentua-se a tendência de superestimativa da T<sub>max</sub> e de subestimativa da RH<sub>med</sub> pela previsão meteorológica, que são variáveis com maior influência no cálculo da ETo em Santa Maria (Tabela 3.4), possivelmente pela dificuldade dos modelos de previsão do tempo em estimar o aumento da RH<sub>med</sub> e a redução da T<sub>max</sub> que ocorre nestes dias (Tabela 3.9). Nas tabelas 3.10 e 3.11 é apresentada a precisão da estimativa da ETo avaliada para três anos agrícolas 2011/12, 2012/13 e 2013/14 em dias sem e com chuva, respectivamente.

Tabela 3.10– Resultado dos indicadores estatísticos comparando a evapotranspiração de referência observada com a estimada pelos métodos FAO-Penman-Monteith e Hargreaves com dados da previsão meteorológica para os anos agrícolas 2011/12, 2012/13 e 2013/14, em dias sem chuva. Santa Maria, RS, 2015.

	FAO-PM				b	Hargreaves			
	B	R <sup>2</sup>	RMSE*	ME*		R <sup>2</sup>	RMSE*	ME*	
<b>2011-12</b>									
est+7	1,18	0,47	1,72	0,99	1,02	0,60	1,26	0,38	
est+6	1,17	0,49	1,72	0,95	1,02	0,64	1,28	0,34	
est+5	1,16	0,41	1,72	0,93	1,03	0,64	1,24	0,33	
est+4	1,09	0,53	1,65	0,65	1,03	0,61	1,30	0,35	
est+3	1,06	0,54	1,62	0,61	1,02	0,61	1,28	0,32	
est+2	1,06	0,57	1,57	0,61	1,02	0,65	1,25	0,31	
est+1	1,06	0,57	1,27	0,62	1,01	0,62	1,25	0,24	
<b>2012-13</b>									
est+7	1,12	0,47	1,65	0,79	1,10	0,50	1,68	0,78	
est+6	1,15	0,47	1,55	0,93	1,09	0,51	1,64	0,72	
est+5	1,03	0,56	1,53	0,35	1,09	0,55	1,53	0,67	
est+4	1,02	0,58	1,51	0,41	1,07	0,50	1,70	0,64	
est+3	1,01	0,52	1,50	0,42	1,08	0,51	1,58	0,69	
est+2	1,00	0,58	1,46	0,37	1,06	0,57	1,53	0,68	
est+1	0,99	0,63	1,32	0,33	1,06	0,57	1,54	0,66	
<b>2013-14</b>									
est+7	0,94	0,56	0,94	0,20	1,07	0,57	1,28	0,37	
est+6	0,93	0,56	0,94	0,20	1,02	0,60	1,26	0,34	

Continuação...

est+5	0,94	0,55	0,95	0,21	1,02	0,60	1,28	0,32
est+4	0,97	0,58	0,93	0,19	1,02	0,64	1,23	0,32
est+3	1,01	0,59	0,93	0,16	1,02	0,61	1,11	0,31
est+2	1,01	0,59	0,91	0,16	1,01	0,61	1,13	0,28
est+1	1,01	0,61	0,92	0,03	1,01	0,62	1,13	0,28

\*expresso em mm dia<sup>-1</sup>; est+1... est+7: ETo estimada com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: ETo calculada com dados observados; b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

Tabela 3.31 – Resultado dos indicadores estatísticos comparando a evapotranspiração de referência observada com a estimada pelos métodos FAO-Penman-Monteith e Hargreaves com dados da previsão meteorológica para os anos agrícolas 2011/12, 2012/13 e 2013/14, em dias com chuva. Santa Maria, RS, 2015.

	FAO-PM				Hargreaves			
	b	R <sup>2</sup>	RMSE*	ME*	b	R <sup>2</sup>	RMSE*	ME*
<b>2011-12</b>								
est+7	1,69	0,37	3,05	5,30	1,36	0,39	2,13	1,59
est+6	1,70	0,44	2,93	5,22	1,37	0,46	1,94	1,56
est+5	1,69	0,40	2,95	5,19	1,36	0,39	2,02	1,49
est+4	1,43	0,44	2,27	4,54	1,31	0,44	1,80	1,27
est+3	1,36	0,47	1,89	4,18	1,37	0,49	1,90	1,48
est+2	1,36	0,47	1,88	4,16	1,25	0,54	1,64	1,16
est+1	1,33	0,56	1,68	1,30	1,26	0,52	1,57	1,14
<b>2012-13</b>								
est+7	1,49	0,42	2,73	2,11	1,38	0,49	2,27	1,83
est+6	1,48	0,42	2,57	2,06	1,39	0,48	2,23	1,85
est+5	1,34	0,44	2,50	1,85	1,51	0,47	2,80	2,27
est+4	1,30	0,42	2,21	1,58	1,43	0,47	2,17	1,81
est+3	1,24	0,46	1,86	1,22	1,23	0,53	2,22	1,78
est+2	1,24	0,48	1,77	1,19	1,48	0,48	2,45	2,01
est+1	1,21	0,55	1,51	0,97	1,43	0,47	2,06	1,74
<b>2013-14</b>								
est+7	1,21	0,48	1,72	1,17	1,35	0,56	2,10	1,67
est+6	1,19	0,46	1,70	1,16	1,33	0,56	2,04	1,59
est+5	1,24	0,53	1,73	1,11	1,29	0,58	2,06	1,49
est+4	1,21	0,59	1,57	1,21	1,33	0,54	2,05	1,58
est+3	1,21	0,57	1,59	1,04	1,29	0,46	2,07	1,49
est+2	1,21	0,59	1,57	1,04	1,31	0,43	2,17	1,59
est+1	1,20	0,60	1,54	1,00	1,32	0,45	1,91	1,43

\* expresso em mm dia<sup>-1</sup>; est+1... est+7: ETo estimada com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: ETo calculada com dados observados; b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

A menor qualidade da  $ET_{oest}$  em dias com chuva foi observada nos três anos agrícolas. Por exemplo, no ano agrícola 2013/14, a superestimativa da  $ET_{oest+1}$  (FAO-PM) foi de  $0,03 \text{ mm dia}^{-1}$ , para dias sem chuva (Tabela 3.10) e, de  $1,00 \text{ mm dia}^{-1}$  para dias com chuva (Tabela 3.11). Os valores de RMSE foram menores em dias sem chuva, variando para a  $ET_{oest}$  (FAO-PM) de  $0,91$  a  $1,72 \text{ mm dia}^{-1}$  entre os dias de estimativa e anos agrícolas e, para dias com chuva entre  $1,51$  a  $3,05 \text{ mm dia}^{-1}$ . Estudos com essa abordagem não estão disponíveis na literatura para a comparação com os resultados aqui demonstrados. Todavia, esses valores de RMSE ( $0,91$  a  $1,72 \text{ mm dia}^{-1}$ ) obtidos para Santa Maria – RS, cujo clima é subtropical úmido sem estação seca definida e com verões quentes, são elevados se comparados aos obtidos por Cai et al. (2007) para regiões com diferentes climas ( $0,052 \text{ mm dia}^{-1}$  em clima úmido a  $0,993 \text{ mm dia}^{-1}$  em clima seco). Mas, são semelhantes aos obtidos por Perera et. al (2013) de  $0,65$  a  $1,26 \text{ mm dia}^{-1}$ , para um e nove dias de antecedência ao dia observado, respectivamente, obtido para uma região de clima subtropical, com verão quente e sem estação seca definida na Austrália.

O método Hargreaves superestimou a  $ET_{oest}$  para todas as situações avaliadas. Silva et al. (2014), relatam que o método (HARGREAVES; SAMANI, 1982), possui tendência de superestimar a  $ET_o$  para a cidade de Santa Maria, sendo que ajustes na equação e ajustes específicos por época podem resultar em melhora adicionais.

Para fechamento do presente estudo, toma-se como base o ano agrícola 2013/14, em que as estimativas foram mais precisas (Tabelas 3.10 e 3.11). Neste, somaram-se 175 dias sem chuva, cujo valor médio de  $ET_{odia}$  foi de  $4,16 \text{ mm dia}^{-1}$ , representando  $728 \text{ mm}$  acumulados e, os valores médios da  $ET_{oest+1}$  foram de  $4,19$  (FAO-PM) e de  $4,44 \text{ mm dia}^{-1}$  (Hargreaves), representando um somatório  $733$  e de  $777 \text{ mm}$ , respectivamente. Assim, o erro acumulado da  $ET_o$  durante o ano agrícola foi de apenas  $5 \text{ mm}$ , utilizando o método FAO-PM e, de  $49 \text{ mm}$  utilizando o método Hargreaves. Indicando que a metodologia da estimativa futura da  $ET_o$  proposta nesse trabalho, pode ser útil para a determinação do balanço hídrico em tempo real e futuro. Do mesmo modo Er-Raki et al. (2010) relatou que, dados meteorológicos gerados com os modelos numéricos de previsão do tempo são uma alternativa e uma solução eficaz para estimar  $ET_o$ .

### 3.4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para Santa Maria – RS, são de superestimativa ( $>0,52$  e da  $ET_{O_{est}}$  com um a sete dias de antecedência ao dia observado, atribuída a superestimativa da  $T_{max}$  pela previsão meteorológica, variável que apresentou maior associação com a  $ET_o$ .

A superestimativa da  $ET_{O_{est}}$  é reduzida à medida que a previsão se aproxima do dia observado, com melhores resultados ( $<0,65$  mm dia<sup>-1</sup>) até o quarto dia de estimativa. Houve uma menor superestimativa ( $<0,5$  mm dia<sup>-1</sup>) para valores de  $ET_{O_{est}}$  superiores a 2 mm dia<sup>-1</sup>.

As melhores estimativas da  $ET_{O_{est}}$  são obtidas em dias sem chuva, com uma superestimativa média variando de 0,03 a 0,99 mm dia<sup>-1</sup>, para os anos agrícolas 2011/12, 2012/13 e 2013/14, enquanto que, para dias com chuva essa variação é de 0,97 a 5,30 mm dia<sup>-1</sup>.

Maior precisão na estimativa da  $ET_{O_{est}}$  é obtida utilizando o método padrão FAO–PM comparando ao método Hargreaves, o qual pode ser utilizado como uma alternativa simplificada para o cálculo da  $ET_{O_{est}}$ , mas com uma correção sistemática de 13% na superestimativa desta.

### 3.5 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. FAO, Irrigation and Drainage **Paper No. 56**, FAO, Rome, Italy, pp.300 1998.

ALLEN, R. G. 46: Evaporation Modeling: Potential. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. 2005.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**. v.98, p.899–920, 2011.

ASCE-EWRI. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Report 0-7844-0805-X, ASCE Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston, Va., American Soc. Civil Engineers, 2005.

BARROS, V. R et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.2, p.198-203, 2009.

CAI, J. B. et al. Simulation of the soil water balance of wheat using daily weather forecast messages to estimate the reference evapotranspiration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.1045–1059, 2009.

CAI, J. et al. Estimating reference evapotranspiration with FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 145, n. 01/02, p. 22-35, 2007.

COLL DELGADO, R.; SEDIYAMA, G. C.; ZOLNIER, S.; COSTA, M. H. Modelos físicomatemáticos para estimativa da umidade relativa do ar a partir de dados de temperatura. **Revista Ceres**, v.56, p.256-265, 2009.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DA UNIVERSIDADE DE CALIFORNIA. **Experimental Forecast Reference Crop Evapotranspiration**. Disponível em: <http://www.wrh.noaa.gov/forecast/evap/FRET/FRET.php?wfo=sto>. Acesso em 9 de outubro de 2014.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 179p., 1977. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 24).

ER-RAKI et. al. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as a alternate of ground meteorological parameters? **Journal of Arid Environments**, v.3, p. 1-10, 2010.

FERREIRA, S.P. estudo comparativo do pós-processamento estatístico aplicado ao modelo BRAMS. **Dissertação**. Programa de Pós- -Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FONSECA, M. A.; MARIN, F. R. Efeito de variáveis meteorológicas sobre a evapotranspiração de referência em uma região de clima tropical úmido no Brasil. In: X REUNIÓN ARGENTINA Y IV LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA,

2004, Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata, 10., Associação Argentina de Agrometeorologia, 2004. v. 1, p. 1-10.

HARGREAVES, G.H., SAMANI, S. Estimating potential evapotranspiration. **Journal Irrigation Drainage**, 1083 225–230, 1982.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HART, K. A.; STEENBURGH, W. J.; ONTON, D. J.; SIFFERT, A. J. An evaluation of mesoscale model based model output statistics (mos) during the 2002 olympic and Paralympic winter games. **Weather and Forecasting**, v. 19, p. 200–218, 2004.

ISHAK, A.M., BRAY, M., REMESAN, R., HAN, D. Estimating reference evapotranspiration using numerical weather modelling. **Hydrol. Processes**. 24, 3490–3509, 2010.

HUNTINGTON, J.L et al. West-wide climate risk assessments: bias-corrected and spatially downscaled irrigation demand and reservoir evaporation projections. In: **Technical Memorandum** No. 86-68210-2014-01. US Bureau of Reclamation, Dept. Interior, Denver, CO, 215 p. 2014.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**. v. 95, n. 06, p. 707-715, 2008.

LOPEZ-URREA, R., SANTA OLALLA, F., FABEIRO, C., AND MORATALLA, A.: Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate, **Agricultural Water Management**, 85(1–2), 15–26, 2006.

MARIANO, E. B.; CALVACANT, I E. P.; RODRIGUES, H. P. Avaliação do BRAMS na Previsão Numérica de Temperatura e Umidade Relativa do Ar para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 03.463-475, 2011.

MCT/INPE. INPE reduz margem de erro nas previsões de tempo. Disponível in: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=margem-erro-previsoes-tempo&id=010175130125#.U7WNdJRdWSh>.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, 42p.1961.

PENMAN, H.L. **Natural evaporation from open water, bare soil, and grass**. Proc. Roy. Soc. London A193:120-146, 1948.

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

PERERA, K.; WETERN, A.; NAWARATHNA, B.; GEORGE, B. Forecasting Daily Reference Evapotranspiration for Shepparton, Victoria, Australia using Numerical Weather Prediction outputs. In **20th International Congress on Modelling and Simulation**, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013.

ROCHA, E.J.T.; EVANGELISTA, S.R.M.; FUCK JÚNIOR, S.C.F.; GONDIM, R.S. Estimativa da ETo pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.1, p.75-83, 2011.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E AGRONEGÓCIO. **Mais Água, Mais Renda**. Disponível em: [http://www.agricultura.rs.gov.br/conteudo/1032/?Mais\\_%C3%81qua%2C\\_Mais\\_Renda](http://www.agricultura.rs.gov.br/conteudo/1032/?Mais_%C3%81qua%2C_Mais_Renda). Acesso em 01/09/2014.

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. 05, p. 635-644, 2010.

SILVA, D.; MEZA, F.J.; VARAS, E. Estimating reference evapotranspiration (ETo) using numerical weather forecast data in central Chile. **Journal of Hydrology**. v. 382, p. 64–71, 2010.

SILVA, J. R et al. Ajustes dos coeficientes da equação de hargreaves-samani para a estimativa da evapotranspiração de referência em Santa Maria – RS. Resumo. **Anais**. 66ª Reunião Anual da SBPC. Ciência e Tecnologia emu ma Amazonia sem Fonteiros. Acre, Brasil. 2014.

SOMAR METEOROLOGIA. **Perguntas mais frequentes, recebidas pela equipe de previsão da Somar Meteorologia**. Disponível em: <http://www.somarmeteorologia.com.br/v3/index.php?goTo=e8ff75cc>. Acesso em 01/08/2014.

THORNTON, W. H. An approach toward a ration classification classification on climate. **Geographical Review**, n. 38, p. 55-94, 1948.

WILKS, D.S. **Forecast verification**, p. 255-336. In: Statistical methods in the atmospheric sciences. v.1. Cornell University, San Diego, United States of America. 1995.

XU, C et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. **Journal of Hydrology**, v.329, p.620-629, 2006.

XU. J.Z. et al. Predicting daly evapotranspiration in a Humid region of China by the locally calibrated Hargreaves-Samani equation using weather forecast data. **Journal of Agricultural Science and Technology**. v.14, p.1331-1342, 2012.

YODER, R. E.; ODHIAMBO, L. O.; WRIGHT, W. C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 2, p. 197-202, 2005.

## 4 Artigo 2: ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM DADOS DIÁRIOS DA PREVISÃO METEOROLÓGICA PARA UMA REGIÃO DE CLIMA DE SAVANA NO BRASIL

**RESUMO:** A evapotranspiração (ET) é um dos principais parâmetros do balanço hídrico, utilizado para a determinação das necessidades hídricas das culturas e para a recomendação da lâmina de irrigação. A sua estimativa em tempo futuro, a partir de dados da previsão meteorológica, pode ser útil para determinações mais exatas do balanço hídrico do solo e para a gestão da irrigação. O objetivo do presente trabalho foi determinar para Cristalina e Morrinhos - GO, Brasil, a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) diária (definida como  $ET_{o\text{dia}}$ ) e a  $ET_o$  para até sete dias futuros (definida como  $ET_{o\text{est}}$ ), usando as equações Penman-Monteith FAO (FAO-PM) e Hargreaves e, avaliar a precisão da  $ET_{o\text{est}}$  para todo o conjunto de dados obtidos e para as duas estações do ano (seca e chuvosa). No período compreendido entre 24 de novembro de 2011 a 31 de março de 2014 foram coletados, diariamente (às 6:00 AM), do site: <http://www.tempoagora.com.br/>, os dados de previsão de temperatura máxima do ar ( $T_{\text{max}}$ ), de temperatura mínima do ar ( $T_{\text{min}}$ ), de umidade relativa máxima do ar ( $RH_{\text{max}}$ ), de umidade relativa mínima do ar ( $RH_{\text{min}}$ ) e velocidade do vento ( $U_2$ ), para os próximos sete dias. O cálculo da  $ET_{o\text{est}}$  foi realizado pelos métodos FAO-PM e Hargreaves. A  $ET_o$  do dia observado ( $ET_{o\text{dia}}$ ) foi calculada pelo método FAO-PM com dados obtidos da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponíveis em: <http://www.inmet.gov.br>. Os valores de  $ET_o$  estimados (est+1 a est+7) foram comparados com os valores do dia observado ( $ET_{o\text{dia}}$ ). A verificação da qualidade das estimativas foi realizada para todo o conjunto de dados e para duas estações do ano (seca e chuvosa), mediante a interpretação dos seguintes indicadores estatísticos: erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente de regressão (b). Os resultados obtidos indicam para a Cristalina e Morrinhos - GO, uma superestimativa de 0,04 a 0,69 mm dia<sup>-1</sup> da  $ET_{o\text{est}}$  com um a sete dias de antecedência ao dia observado, sendo está atribuída a superestimativa da  $T_{\text{max}}$  pela previsão meteorológica. A superestimativa da  $ET_{o\text{est}}$  foi reduzida à medida que a previsão se aproximou do dia observado, sendo o ME de até 0,39 mm dia<sup>-1</sup>, para estimativas com sete dias de antecedência ao dia observado e o ME de 0,05 mm dia<sup>-1</sup>, para estimativas com um dia de antecedência ao dia observado. A qualidade da  $ET_{o\text{est}}$ , foi representada por um RMSE de 1,00 a 1,23 mm dia<sup>-1</sup> para Morrinhos e de RMSE 1,19 a 1,26 mm dia<sup>-1</sup> para Cristalina. As melhores estimativas da  $ET_{o\text{est}}$  foram na estação chuvosa, para ambos os locais (RMSE <1,21 mm dia<sup>-1</sup>). O método Hargreaves, se adotado como uma alternativa simplificada para o cálculo da  $ET_{o\text{est}}$ , resultará em uma maior superestimativa desta, se comparada a estimada pelo método FAO-PM. Assim, pode-se concluir que existe precisão aceitável na estimativa da  $ET_o$  com dados da previsão meteorológica, para fins de manejo de irrigação.

**PALAVRAS-CHAVE:** previsão meteorológica, manejo da irrigação, evapotranspiração.

**ABSTRACT:** Evapotranspiration (ET) is one of the main parameters of the water balance used to determine the water needs of crops and the recommendation of the water depth. Its estimated in future time, from the weather forecast data can be useful for more accurate determination of the soil water balance and irrigation management. The objective of this study was to determine for Cristalina and Morrinhos - GO, Brazil, the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) daily (defined as ET<sub>o</sub><sub>day</sub>) and ET<sub>o</sub> for up to seven days ahead (defined as ET<sub>o</sub><sub>est</sub>), using the FAO-PM and Hargreaves equations and evaluate the accuracy of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> for all obtained data set and for the two seasons (dry and wet). In the period from 24 November 2011 to 31 March 2014 were collected daily (6:00 AM), the site: <http://www.tempoagora.com.br/>, the forecast data maximum temperature air (T<sub>max</sub>), minimum air temperature (T<sub>min</sub>), maximum relative humidity (RH<sub>max</sub>), minimum relative humidity (RH<sub>min</sub>) and wind speed (U<sub>2</sub>), for the next seven days. The ET<sub>o</sub><sub>est</sub> calculation was carried out by FAO-PM and Hargreaves methods. The ET<sub>o</sub> the observed day (ET<sub>o</sub><sub>day</sub>) was calculated by the FAO-PM method with data obtained from automatic weather station INMET, available at: <http://www.inmet.gov.br>. The estimated values of ET<sub>o</sub> (est+1...est+7) were compared with the values observed daily (ET<sub>o</sub><sub>day</sub>). The verification of the quality of the estimates was conducted for the entire data set and for two seasons (dry and wet) by the interpretation of the following statistical indicators: mean error (ME), square root of the mean square error (RMSE) determination coefficient (R<sup>2</sup>) and regression coefficient (b). The results indicate to the Crisalina and Morrinhos - GO, overestimating from 0,04 to 0,69 mm day<sup>-1</sup> ET<sub>o</sub><sub>est</sub> with one to seven days before the observed day, being attributed to overestimation of T<sub>max</sub> for the weather forecast. The overestimation of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> was reduced as the forecast approached the observed day, and the ME of up to 0,39 mm day<sup>-1</sup> for estimates with seven days prior to the day observed and the ME of 0,05 mm day<sup>-1</sup> for estimates with a day in advance to the observed day. The quality of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> was represented by an RMSE 1,00 to 1,23 mm for 1 day and RMSE Morrinhos 1,19 to 1,26 mm for 1 day Cristalina. The best estimates of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> were in the rainy season, for both local (RMSE <1,21 mm day<sup>-1</sup>). The Hargreaves method is adopted as a simplified alternative for the calculation of ET<sub>o</sub><sub>est</sub> will result in overestimation of this greater, compared to estimated by the FAO-PM method. Thus, we can conclude that there is acceptable accuracy in estimating the ET<sub>o</sub> with data from weather forecast for the irrigation purposes.

**KEYWORDS:** weather forecast, irrigation management, evapotranspiration.

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Um dos principais parâmetros do balanço hídrico, utilizado para determinação da necessidade hídrica da cultura é a ET. Esse componente é usado para descrever o processo de transferência de água para a atmosfera proveniente da evaporação do solo e da transpiração dos vegetais, sendo a sua mensuração de grande importância, pois está relacionada com a quantidade de água a ser repostada no solo pela chuva ou pela irrigação, de modo a auxiliar no manejo da água, bem como, no dimensionamento de sistemas irrigados. A medição da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) requer instrumentos especializados, como o lisímetro (LÓPEZ-URREA et al., 2006), equipamentos Bowen (JARA et al., 1998) ou a instrumentação específica para calcular os fluxos instantâneos "vórtices turbulentos" (RANA et al., 2005). Em função disso, a ET<sub>c</sub> pode ser estimada a partir da ET<sub>o</sub> e do coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>). Neste sentido, inúmeros métodos de cálculo da ET<sub>o</sub> a partir de dados meteorológicos, têm sido descritos, testados e utilizados em variadas condições de clima e solo (PEREIRA et al., 2014; ALLEN et al., 2011).

O primeiro ao tratar sobre a ET foi Thornthwaite em 1948, desenvolvendo um método visando a estimativa da evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>) mensal de um gramado. O método de Penman de 1948 é considerado como o primeiro método combinado, pois relaciona os efeitos do balanço de energia e do poder evaporante do ar (VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997). Monteith (1965), aperfeiçoou o método de Penman. Mais tarde, Doorenbos; Pruitt (1977), introduziram o conceito de ET<sub>o</sub>, em substituição ao termo ET<sub>p</sub>. Além desses, outros métodos foram desenvolvidos ao longo dos anos para a estimativa da ET (DOORENBOS; PRUITT, 1977; PEREIRA et al., 1997; JENSEN et al., 1990; ALLEN et al., 1998), desde aqueles mais simples, com base puramente empírica, como por exemplo o método Hargreaves que estima a ET<sub>o</sub> apenas com dados de T<sub>ar</sub> (ALLEN et al., 1998), até aqueles que apresentam embasamento físico consistente sobre o fenômeno, como o método padrão Penman Monteith FAO (FAO-PM), recomendado pela Food and Agriculture Organization (FAO) (ALLEN et al., 1998). O método FAO-PM foi parametrizado para superfície, com 12 cm de altura, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s.m<sup>-1</sup> e albedo de 0,23 (ALLEN et al., 1998; ALLEN, 2005). Atualmente, é o método com maior probabilidade de estimar corretamente a ET<sub>o</sub> em uma ampla gama de locais e climas e pode ser aplicado em situações com dados de curto período de tempo (XU; CHEN, 2005; YODER et al., 2005; LÓPEZ-URREA et al., 2006; JABLOUN; SAHLI, 2008; BARROS et al., 2009).

A ETo pode ser estimada por diferentes métodos, alguns citados neste trabalho, e, em diferentes escalas de tempo (mensal, semanal, diária, horária e futura), dependendo da finalidade com que se propõe utilizar (dimensionamento de projetos de irrigação, manejo da água da irrigação, estimativa de secas, estimativa de rendimento de safras, entre outras). A estimativa da ETo, para uma escala de tempo diária e futura, utilizando dados da previsão meteorológica, foi a temática de alguns resultados de estudos já publicados (PERERA et al., 2013, XU et al., 2012; SILVA et al., 2010; ER-RAKI et al., 2010; ISHAK et al., 2010; CAI et al., 2007; CAI et al., 2009). O resumo dos resultados desses autores permitem inferir que essa metodologia pode ser aplicada, com precisão, para facilitar o manejo e o planejamento de sistemas irrigados ou em situações que a disponibilidade de dados meteorológicos medida é limitada. Cai et al. (2007), avaliaram a precisão da estimativa da ETo com dados da previsão meteorológica com um banco de dados de 5 anos, para locais com clima árido, semi-árido, úmido e semi-úmido na China, observando valores de RMSE que variaram de 0,052 mm dia<sup>-1</sup> em clima úmido a 0,993 mm dia<sup>-1</sup> em clima árido. Avaliando a estimativa da ETo com dados da previsão do tempo para Shepparton, Victoria, Austrália no período compreendido entre 1996 e 2012, para nove dias de antecedência ao dia observado, Perera et al. (2013), verificaram um RMSE variando entre 0,65 e 1,26 mm dia<sup>-1</sup> para o dia anterior ao observado e para o nono dia antecedente ao observado, respectivamente. Cabe salientar sobre a facilidade de obtenção de dados da previsão meteorológica, pela ampla divulgação nas mídias digitais e impressas, que disponibilizam a maioria dos dados necessários para o cálculo da ETo ( $T_{max}$ ,  $T_{min}$ , RH e  $U_2$ ).

A irrigação é importante para o Estado de Goiás, pois de acordo os dados da Secretaria da Agricultura, Pecuária e Irrigação, no Estado existem aproximadamente sete mil empreendimentos com alguma modalidade de irrigação, sendo a grande maioria com aspersão (pivô central e aspersão convencional). Além disso, a estimativa da ETo em escala de tempo futura pode contribuir para o planejamento da atividade irrigada. A determinação do requerimento hídrico dos cultivos agrícolas com antecedência, permite que as irrigações sejam realizadas em horários que a energia é mais barata, que a mesmas sejam antecipadas evitando que vários equipamentos operem ao mesmo tempo. Além disso, o manejo fitossanitário e nutricional das plantas poderá ser realizado de acordo com a prática de irrigação, entre outras vantagens, que contribuem para a maior eficiência do uso da água na agricultura.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi determinar para Cristalina e Morrinhos - GO, Brasil, a ETo diária (definida como  $ET_{odia}$ ) e a ETo para sete dias futuros (definida como  $ET_{oest}$ ), usando as equações FAO-PM e Hargreaves e, avaliar a precisão da  $ET_{oest}$  para todo o conjunto de dados obtidos e para as duas estações do ano (seca e chuvosa).

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado para os municípios de Cristalina e Morrinhos – GO. Cristalina está situada a uma altitude de 1189 m, na Latitude de 16° 46' 07" S e na Longitude de 47° 36' 49" W. Morrinhos está situada a uma altitude de 771 m, na Latitude de 17° 43' 52" S e na Longitude de 49° 05' 58" W. O clima de Goiás é tropical de savana, com a divisão marcante de duas estações bem definidas durante o ano: verão úmido e inverno seco.

No período compreendido entre 24 de novembro de 2011 a 31 de março de 2014, por meio de um script desenvolvido em linguagem PHP, foram coletados, diariamente (6:00 AM), do site: <http://www.tempoagora.com.br/>, os dados de previsão meteorológica para Cristalina e Morrinhos – GO. Coletaram-se os dados de previsão da  $T_{max}$ , da  $T_{min}$ , da  $RH_{max}$ , da  $RH_{min}$  e da  $U_2$  para os próximos sete dias. Os dados de  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $U_2$  e umidade relativa média ( $RH_{med}$ ) ( $RH_{med} = (RH_{max} + RH_{min})/2$ ) foram armazenados em um banco de dados, conforme ilustrado na tabela 3.1.

Os dados meteorológicos estimados pela previsão meteorológica foram comparados com dados meteorológicos medidos, obtidos da estação meteorológica automática (Waisala, modelo Maws 301) do INMET. Estes dados meteorológicos estão disponíveis para os dois locais no site: [http://www.inmet.gov.br/sonabra\\_](http://www.inmet.gov.br/sonabra_)

A verificação da precisão das estimativas dos dados meteorológicos, foi realizada com o auxílio dos seguintes indicadores estatísticos: ME (Equação 3.1), RMSE (Equação 3.2),  $R^2$  (Equação 3.3) e b (Equação 3.4).

O cálculo da  $ET_{oest}$  para um a sete dias de antecedência ao dia observado, conforme demonstra a tabela 3.2, foi realizado utilizando os métodos Hargreaves (Equação 3.5) e FAO-PM (Equação 3.6). O cálculo  $ET_{odia}$  foi realizado utilizando o método FAO-PM (Equação 3.6). Os procedimentos de cálculo da ETo (FAO-PM)

foram os propostos por Allen et al. (1998), utilizando as equações expostas no Artigo 1 (Equações 3.7 a 3.14).

O grau de associação entre as variáveis meteorológicas e a  $ET_o$ , foi determinado mediante ao  $R^2$  (Equação 3.3). Os valores de  $ET_o$  estimados (est+1 a est+7), foram comparados com os valores do dia observado ( $ET_{o\text{dia}}$ ). A verificação da precisão das estimativas da  $ET_{o\text{est}}$ , foi realizada pelos seguintes indicadores estatísticos: ME (Equação 3.1), RMSE (Equação 3.2),  $R^2$  (Equação 3.3) e b (Equação 3.4). A avaliação da precisão da estimativa da  $ET_{o\text{est}}$  foi realizada para as seguintes situações: (i) todo o conjunto de dados, (ii) para duas estações do ano: seca e chuvosa. Considerou-se estação seca, o período compreendido entre abril a setembro e, estação chuvosa, o período compreendido entre outubro a março.

#### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período compreendido entre 24 de novembro de 2011 a 31 de março de 2014 foram coletados 817 e 791 dados meteorológicos para Cristalina e Morrinhos, respectivamente. Na tabela 4.1 estão apresentados os valores máximos, mínimos e médios das variáveis meteorológicas observadas e das variáveis meteorológicas estimadas pela previsão do tempo, para sete dias.

Tabela 4.1 - Valores máximos, mínimos e médios das variáveis meteorológicas observadas e estimadas pela previsão do tempo para sete dias, para Cristalina e Morrinhos no período de 24/11/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

	Cristalina			Morrinhos		
	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio
	<b>Temperatura máxima do ar (°C)</b>					
est+7	42,00	23,00	30,53	40,00	24,00	30,50
est+6	42,00	22,00	30,47	40,00	21,00	30,52
est+5	40,00	21,00	30,39	40,00	20,00	30,30
est+4	40,00	21,00	30,14	40,00	17,00	29,64
est+3	41,00	20,00	30,06	41,00	15,00	29,63
est+2	41,00	17,00	30,07	39,00	21,00	29,59
est+1	41,00	15,00	30,05	39,00	19,00	29,59
Obs	33,70	15,00	25,60	37,40	17,40	29,15

Continuação...

<b>Temperatura mínima do ar (°C)</b>						
est+7	27,00	13,00	19,31	25,00	11,00	19,07
est+6	26,00	12,00	19,23	25,00	11,00	19,04
est+5	26,00	13,00	19,05	26,00	12,00	18,75
est+4	26,00	12,00	18,99	25,00	11,00	18,67
est+3	26,00	11,00	18,99	24,00	10,00	18,65
est+2	25,00	11,00	18,95	24,00	10,00	18,57
est+1	25,00	7,00	18,88	24,00	9,00	18,53
Obs	24,50	9,50	16,76	24,20	6,00	17,60
<b>Umidade relativa média do ar (%)</b>						
est+7	99,00	21,00	68,80	99,00	23,50	61,83
est+6	99,00	21,00	68,51	99,00	23,50	61,84
est+5	99,00	21,00	68,49	99,00	21,50	61,81
est+4	99,00	18,50	68,27	99,00	22,00	69,91
est+3	99,00	20,00	68,22	99,00	22,50	70,06
est+2	99,00	20,00	67,85	99,00	23,00	69,24
est+1	99,00	18,50	67,36	98,00	21,00	68,60
Obs	93,00	24,50	65,86	93,50	38,50	67,19
<b>Velocidade do vento (ms<sup>-1</sup>)</b>						
est+7	4,44	0,28	2,57	4,17	0,56	2,48
est+6	4,17	0,28	2,38	4,44	0,56	2,38
est+5	4,44	0,28	2,22	4,72	0,56	1,93
est+4	4,44	0,28	2,18	4,44	0,56	1,87
est+3	7,78	0,28	2,16	5,83	0,56	1,53
est+2	7,22	0,28	2,12	7,78	0,56	1,47
est+1	3,78	2,78	2,08	7,50	0,56	1,42
Obs	3,89	0,20	2,06	3,48	0,34	1,41

est+1... est+7: dados da previsão meteorológica com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: dados meteorológicos do dia observado.

Observa-se, para todas as variáveis meteorológicas, uma maior proximidade dos valores (máximos, mínimos e médios) estimados com os observados à medida que a previsão se aproxima do dia observado, evidenciada por uma melhoria significativa nos indicadores estatísticos apresentados na tabela 4.2.

Analisando individualmente as variáveis meteorológicas observa-se para ambos os locais que, as variáveis estimadas com maior precisão são a  $U_2$  e a umidade relativa média do ar ( $RH_{med}$ ). Havendo uma pequena superestimativa para a  $U_2$ , variando entre os dias de previsão de 0,03 a 0,52  $ms^{-1}$  e de 0,25 a 1,08  $ms^{-1}$  para Cristalina e Morrinhos, respectivamente, e, para a  $RH_{med}$  variando de 1,50 a 2,94% e de 1,41 a 2,87%, respectivamente.

Tabela 4.2 - Resultado dos indicadores estatísticos para as variáveis meteorológicas observadas e estimadas pela previsão meteorológica para sete dias, para Cristalina e Morrinhos no período de 24/11/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

	Cristalina				Morrinhos			
	R <sup>2</sup>	b	RMSE*	ME*	R <sup>2</sup>	b	RMSE*	ME*
<b>Temperatura máxima do ar (°C)</b>								
est+7	0,51	1,19	6,05	4,93	0,64	1,03	3,36	1,35
est+6	0,53	1,18	6,03	4,87	0,67	1,03	3,16	1,37
est+5	0,55	1,18	5,95	4,79	0,66	1,03	3,07	1,15
est+4	0,55	1,17	5,60	4,54	0,74	1,01	2,91	0,49
est+3	0,57	1,17	5,47	4,47	0,73	1,01	2,94	0,48
est+2	0,55	1,17	5,52	4,46	0,78	1,01	2,80	0,44
est+1	0,57	1,17	5,56	4,45	0,79	1,01	2,75	0,44
<b>Temperatura mínima do ar (°C)</b>								
est+7	0,62	1,14	3,56	2,56	0,71	1,07	2,74	1,48
est+6	0,64	1,14	3,44	2,48	0,74	1,06	2,73	1,44
est+5	0,65	1,13	3,38	2,30	0,75	1,05	2,62	1,15
est+4	0,65	1,12	3,24	2,24	0,75	1,05	2,58	1,08
est+3	0,66	1,12	3,23	2,24	0,75	1,05	2,55	1,05
est+2	0,66	1,12	3,19	2,20	0,74	1,04	2,41	0,98
est+1	0,67	1,12	3,15	2,13	0,79	1,04	2,28	0,93
<b>Umidade relativa média do ar (%)</b>								
est+7	0,71	1,04	16,14	2,94	0,75	1,10	15,16	2,87
est+6	0,74	1,04	15,82	2,65	0,75	1,09	15,17	2,72
est+5	0,75	1,04	15,98	2,63	0,77	1,09	14,92	2,63
est+4	0,75	1,03	15,59	2,41	0,75	1,05	14,92	2,52
est+3	0,72	1,03	15,59	2,36	0,77	1,05	14,59	2,19
est+2	0,77	1,03	14,66	1,99	0,79	1,04	13,64	2,05
est+1	0,75	1,02	14,63	1,50	0,80	1,03	13,29	1,41
<b>Velocidade do vento (ms<sup>-1</sup>)</b>								
est+7	0,54	1,17	1,12	0,52	0,52	1,69	1,47	1,08
est+6	0,57	1,10	0,92	0,33	0,53	1,61	1,37	0,96
est+5	0,53	0,99	0,90	0,17	0,53	1,33	0,95	0,55
est+4	0,53	0,98	0,90	0,13	0,50	1,28	0,92	0,49
est+3	0,53	0,99	0,89	0,11	0,56	1,19	0,84	0,37
est+2	0,55	0,97	0,88	0,07	0,62	1,14	0,81	0,30
est+1	0,59	0,97	0,81	0,03	0,61	1,10	0,79	0,25

\*expresso na unidade que a variável foi medida; est+1... est+7: dados da previsão meteorológica com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: dados meteorológicos do dia observado; b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

Nota-se uma diferença nos valores observados de T<sub>ar</sub> em função da diferença de altitude dos dois locais (Tabela 4.3), principalmente para a T<sub>max</sub>, em que o valor médio de 25,60 °C observado para Cristalina é inferior ao valor médio de 29,15 °C observado para Morrinhos. De acordo com Fritzsons et al. (2008), a relação da altitude

com a  $T_{ar}$  é especialmente importante para as regiões tropicais e subtropicais, onde uma diferença altitudinal de algumas centenas de metros provoca mudanças sensíveis no ambiente. Contudo, essa diferença não é representada pela previsão meteorológica, havendo assim, maior precisão na estimativa da  $T_{ar}$  ( $T_{max}$  e  $T_{min}$ ) para Morrinhos, com uma superestimativa inferior a 1,5 °C tanto para  $T_{max}$  e quanto para a  $T_{min}$ . Para Cristalina essa superestimativa é superior a 4,45 e a 2,13 °C para  $T_{max}$  e  $T_{min}$ , respectivamente (Tabelas 4.3 e 4.4). Desenvolvendo um modelo matemático (altitude, latitude, longitude) para a estimativa da  $T_{med}$  no Estado de Goiás Antonini et al. (2009), verificaram que, o modelo gerado possuiu desempenho mediano para altitudes baixas (300 m) e elevadas (1100 m) similar à de Cristalina (1189 m), e desempenho muito bom para altitudes médias (700 m) similar à de Morrinhos (771 m).

Todas as variáveis meteorológicas descritas, participam do processo de ET direta ou indiretamente. A  $T_{ar}$  é uma variável direta para o cálculo da ET, considerada pelos métodos Hargreaves e FAO-PM. Além disso, a  $T_{ar}$  foi utilizada para estimar a  $e_s$  (Equação 3.8), parâmetro de entrada no método FAO-PM, que por consequência foi superestimado com maior ênfase para Cristalina em comparação a Morrinhos. A taxa de ET é influenciada pela RH, pois em ambiente com RH elevada, o ar já está muito próximo da saturação, assim, menos água adicional pode ser armazenada e, portanto, a taxa de ET é usualmente mais baixa. Para o método FAO-PM (equação 4.2), a  $e_a$  foi calculada a partir da RH que, por consequência foi superestimada. O déficit de pressão de vapor ( $e_s - e_a$ ) foi subestimado para ambos os locais. Lyra et al. (2004), avaliando a média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar e sua influência na ETo estimada pelo FAO-PM em Piracicaba – SP concluíram que, dos métodos sugeridos pelo boletim FAO 56, apenas o que utilizou a RH média para estimar a  $e_a$ , também utilizado nesse trabalho, estão entre os que proporcionaram melhor estimativa de ETo. Além dessas variáveis, a  $U_2$  atua no processo da evaporação renovando o ar em contato com as massas de água ou com a vegetação, afastando do local as massas de ar que já tenham grau de umidade elevado. Assim, quanto maior a  $U_2$  maior será a ETo. Na tabela 4.3, pode-se observar o grau de associação entre as variáveis meteorológicas com a ETo observada e estimada (FAO-PM).

Tabela 4.3 – Coeficiente de determinação entre os valores diários de evapotranspiração de referência observados e estimados com dados da previsão meteorológica (est+1/ FAO -PM) e as variáveis meteorológicas. Santa Maria, RS, 2015.

Variável meteorológica	Cristalina		Morrinhos	
	ET <sub>odia</sub>	ET <sub>est+1</sub>	ET <sub>odia</sub>	ET <sub>est+1</sub>
	<b>R<sup>2</sup></b>			
Radiação solar (Mj m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	0,76	0,51	0,83	0,58
Temperatura máxima do ar (°C)	0,61	0,59	0,64	0,58
Temperatura mínima do ar (°C)	0,06	0,09	0,08	0,10
e <sub>a</sub> -e <sub>s</sub>	0,36	0,51	0,45	0,52
Velocidade do vento (m s <sup>-1</sup> )	0,02	0,06	0,07	0,06

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; ET<sub>odia</sub> evapotranspiração de referência calculada com dados meteorológicos observados; ET<sub>est+1</sub>: evapotranspiração de referência estimada com os dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado.

A variável meteorológica com maior associação com ET<sub>odia</sub> é a Rs (R<sup>2</sup>=0,8). Para a ET<sub>est</sub>, maior associação foi observada com a T<sub>max</sub>, estimada pela previsão meteorológica com um RMSE superior a 2,75°C (Tabela 4.2), que influenciou na estimativa da Rs, resultando em menor associação da Rs com a ET<sub>est</sub> (R<sup>2</sup> < 0,60). O e<sub>a</sub>-e<sub>s</sub> foi a terceira com maior associação com a ET<sub>est</sub> e a ET<sub>odia</sub>. O efeito da U<sub>2</sub> e da T<sub>min</sub> no cálculo da ETo foi praticamente nulo. Todavia, em estudo similar a este, realizado na Austrália por Perera et al. (2013), foi observada uma maior associação da U<sub>2</sub> para a estimativa da ETo com um dia a três dias de antecedência ao dia observado e para estimativas de quatro a nove dias de antecedência ao dia observado maior influência da T<sub>ar</sub> e Rs. Silva et al. (2011), em estudo realizado no Estado da Paraíba – Brasil verificaram que, a variável mais sensível na determinação da ETo pelo método de FAO-PM foi o saldo de radiação líquida, seguida da RH, da U<sub>2</sub> e da T<sub>med</sub>. Xu et al. (2006), em estudo conduzido na China observaram que, a variável mais importante no cálculo da ETo (FAO-PM) foi a RH, seguida da Rs e da T<sub>ar</sub>, já a variável U<sub>2</sub> apresentou os menores valores de coeficiente de sensibilidade.

No caso do presente estudo, prevaleceu no cálculo da ET<sub>est</sub> o efeito da superestimativa da T<sub>max</sub> (R<sup>2</sup> = 0,58 e 0,57) em detrimento ao efeito da subestimativa do e<sub>a</sub>-e<sub>s</sub> (R<sup>2</sup> = 0,51 e 0,52), resultando na superestimativa da ET<sub>est</sub> (Figura 4.1 e Tabela 4.4).

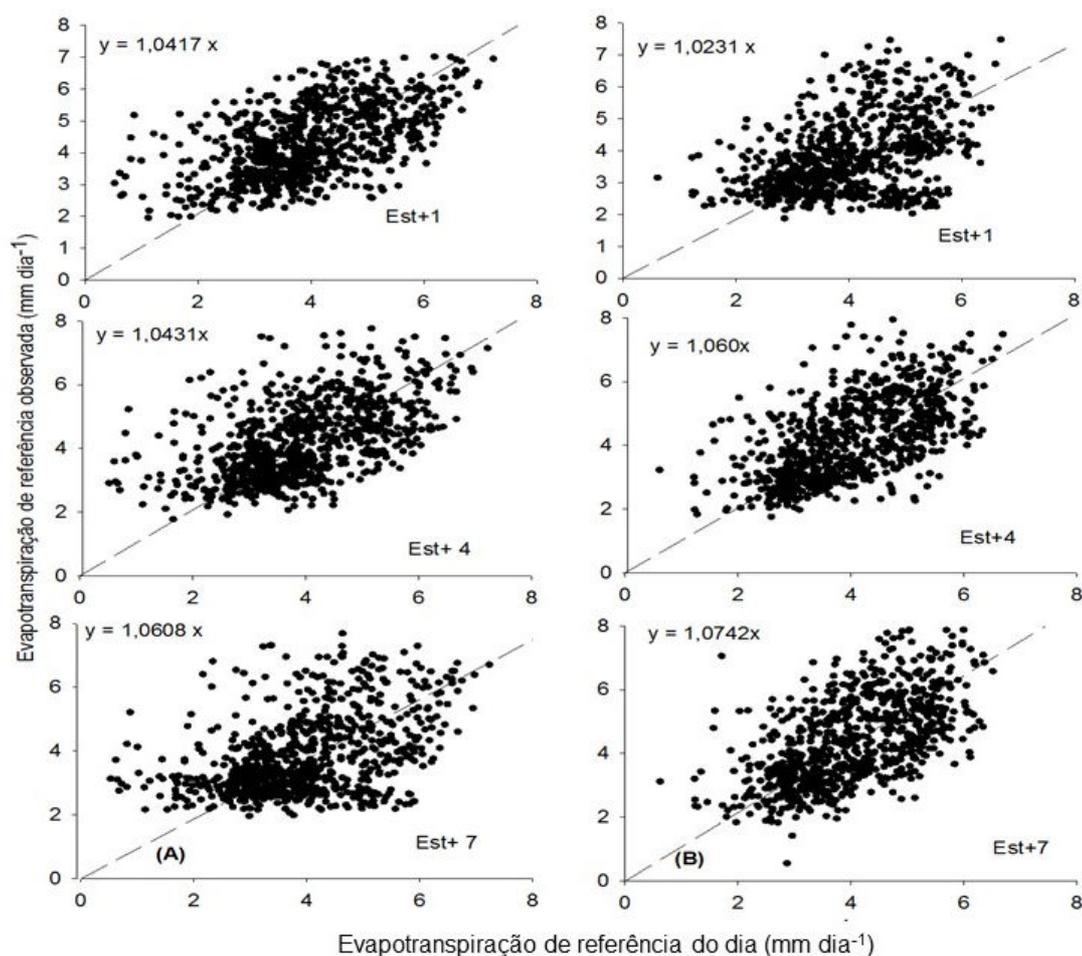


Figura 4.1 – Regressão forçada a origem de valores de evapotranspiração de referência observados e estimados para Cristalina (A) e Morrinhos (B), Goiás. Santa Maria, RS, 2015.

Tabela 4.4 – Resultado dos indicadores estatísticos comparando a evapotranspiração de referência observada com a estimada com dados da previsão meteorológica pelos métodos FAO-Penman-Monteith e Hargreaves, para Cristalina e Morrinhos no período de 24/11/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

Previsão	Cristalina				Morrinhos			
	R <sup>2</sup>	b	RMSE	ME	R <sup>2</sup>	B	RMSE	ME
	FAO-PM							
est+7	0,60	1,06	1,26	0,39	0,68	1,07	1,23	0,19
est+6	0,60	1,04	1,29	0,36	0,68	1,07	1,23	0,18
est+5	0,60	1,05	1,26	0,35	0,70	1,07	1,24	0,16
est+4	0,60	1,04	1,23	0,32	0,74	1,06	1,22	0,14
est+3	0,61	1,04	1,21	0,10	0,76	1,02	1,19	0,05
est+2	0,64	1,04	1,20	0,10	0,76	1,02	1,10	0,04
est+1	0,64	1,04	1,21	0,05	0,76	1,02	1,08	0,04

Continuação...

	Hargreaves							
est+7	0,61	1,12	1,28	0,69	0,67	1,10	1,08	0,59
est+6	0,61	1,10	1,21	0,62	0,67	1,10	1,08	0,56
est+5	0,63	1,10	1,23	0,62	0,67	1,10	1,08	0,57
est+4	0,61	1,10	1,22	0,62	0,74	1,09	1,06	0,49
est+3	0,65	1,10	1,25	0,62	0,75	1,09	1,02	0,49
est+2	0,68	1,09	1,21	0,61	0,75	1,09	1,02	0,50
est+1	0,68	1,09	1,19	0,60	0,74	1,09	1,00	0,49

\*expresso na unidade que a variável foi medida; est+1... est+7: ETo estimada com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: ETo calculada com dados observados; b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

A precisão da ETo<sub>est</sub> aumenta à medida que a estimativa se aproxima do dia observado, evidenciado pela redução nos valores de RMSE e ME. Os valores de RMSE de 1,21 a 1,26 mm dia<sup>-1</sup>, obtidos para Cristalina e de 1,08 a 1,23 mm dia<sup>-1</sup>, obtidos para Morrinhos, indicam similaridade na qualidade da ETo<sub>est</sub>, para os dois locais. Todavia, se analisado os valores médios (ME), verifica-se uma menor superestimativa para Morrinhos (<0,04 >0,69 mm dia<sup>-1</sup>) em comparação a Cristalina (<0,05 >0,59 mm dia<sup>-1</sup>). Esta superestimativa foi maior quando utilizou-se o método Hargreaves (<0,49 >0,69 mm dia<sup>-1</sup>) em comparação a utilização do método FAO-PM (<0,05 >0,39 mm dia<sup>-1</sup>). Justificando assim, a utilização do método FAO-PM, mesmo na indisponibilidade dos dados de Rs. Estes resultados diferem dos obtidos por Sentelhas et. al, (2010), que observou que quando a Rs está faltando, o método FAO-PM não é o adequado para estimar a ETo (RMSE >0,79 mm dia<sup>-1</sup>). Além disso, verifica-se para ambos locais (Tabela 4.4), menores valores de erro (ME e RMSE) para estimativas com até três dias de antecedência ao dia observado (RMSE de 1,08 a 1,21 mm dia<sup>-1</sup> e ME de 0,10 a 0,04 mm dia<sup>-1</sup>). A partir desse dia os erros são maiores (RMSE de 1,26 a 1,23 mm dia<sup>-1</sup> e ME de 0,39 a 0,32 mm dia<sup>-1</sup>), indicando uma menor confiabilidade da utilização destes dados. Perera et. al (2013), observaram uma maior precisão na estimativa da ETo com dados da previsão meteorológica para um período de até seis dias de antecedência ao dia observado, com valores de RMSE variando de 0,65 a 1,01 mm dia<sup>-1</sup>, a partir disso, de sete a nove dias de antecedência, os valores de RMSE são de 1,14 a 1,26 mm dia<sup>-1</sup>.

Na tabela 4.5 são apresentados os valores máximos, mínimos e médios da ETo<sub>dia</sub> e da ETo<sub>est</sub> para Cristalina e Morrinhos, evidenciando que as maiores diferenças

entre valores observados e estimados são a partir do terceiro dia de previsão (est+3 a est+7).

Tabela 4.5 – Valores máximos, mínimos e médios da evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) observada e estimada com dados da previsão meteorológica para sete dias, para Cristalina e Morrinhos no período de 24/11/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

	Cristalina			Morrinhos		
	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio
	FAO-PM					
est+7	7,69	1,97	4,29	9,42	1,87	4,20
est+6	7,67	1,03	4,26	9,31	0,76	4,19
est+5	8,10	1,02	4,25	8,19	0,76	4,17
est+4	8,73	1,78	4,23	7,95	0,76	4,15
est+3	8,86	1,63	4,01	7,75	0,76	4,06
est+2	8,83	1,61	4,01	7,59	0,76	4,05
est+1	7,01	1,48	3,96	7,48	0,76	4,05
obs	6,70	0,53	3,91	7,21	0,62	4,01
	Hargreaves					
est+7	7,33	2,20	4,60	7,64	1,50	4,60
est+6	7,20	2,20	4,53	7,47	1,23	4,58
est+5	7,46	1,95	4,53	7,50	2,13	4,58
est+4	7,16	1,77	4,53	7,30	0,81	4,51
est+3	7,15	1,26	4,53	7,04	1,73	4,51
est+2	6,95	0,83	4,52	7,00	1,85	4,51
est+1	6,98	0,80	4,51	7,00	1,91	4,50
obs	6,70	0,53	3,91	7,21	0,62	4,01

est+1... est+7: ETo estimada com um a sete dias de antecedência ao dia observado; obs: ETo calculada com dados observados.

O clima predominante em Goiás é tropical de Savana. Em geral, a precipitação média anual fica entre 1200 e 1800 mm, com grande estacionalidade. Os meses de primavera verão (outubro a março) caracterizam a estação chuvosa, enquanto que, nos meses de maio a setembro os índices pluviométricos reduzem bastante, chegando a zero, caracterizando assim, a estação seca (MARCUIZZO; FARIA, 2012). Devido às suas características climáticas, a prática da irrigação torna-se fundamental para viabilizar e incrementar a produção agrícola em Goiás, assumindo caráter de irrigação suplementar, durante a estação chuvosa, e de irrigação total, na estação seca. Por isso, avaliou-se a precisão da  $E_{To_{est}}$  nas duas estações, sendo os valores médios das variáveis meteorológicas observadas e estimadas (est+1) apresentados na tabela 4.6 e a precisão das variáveis meteorológicas estimadas com um dia de antecedência ao dia observado (est+1) apresentada na tabela 4.7.

Tabela 4.6 – Valores médios observados e estimadas pela previsão do tempo com um dia de antecedência ao dia observado das variáveis meteorológicas utilizadas para o cálculo da evapotranspiração de referência, na estação seca e na estação chuvosa, para Cristalina e Morrinhos no período compreendido de 24/11/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

	Cristalina				Morrinhos			
	Estação seca							
	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	RH	U <sub>2</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	RH	U <sub>2</sub>
Obs	24,84	15,06	59,95	2,06	28,88	15,19	62,48	1,35
Est+1	30,50	17,88	55,99	2,30	29,31	17,27	58,62	2,19
	Estação chuvosa							
Obs	26,10	17,96	70,09	2,05	29,39	19,79	71,49	1,46
Est+1	29,96	18,89	75,49	2,39	29,65	17,79	76,87	2,35

T<sub>max</sub>: temperatura máxima do ar (°C); T<sub>min</sub>: temperatura mínima do ar (°C); RH: umidade relativa do ar média (%); U<sub>2</sub>: velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>); Obs: valores observados; est+1: valores estimados com um dia de antecedência ao dia observado.

Tabela 4.7 – Resultado dos indicadores estatísticos comparando as variáveis meteorológicas medidas com as estimadas pela previsão do tempo com um dia de antecedência ao dia observado, na estação seca e na estação chuvosa, para Cristalina e Morrinhos no período compreendido de 24/11/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

	Cristalina				Morrinhos			
	R <sup>2</sup>	B	RMSE	ME	R <sup>2</sup>	B	RMSE	ME
	Estação seca							
T <sub>max</sub>	0,67	1,22	6,55	5,66	0,73	1,01	2,90	0,43
T <sub>min</sub>	0,69	1,17	3,91	2,82	0,64	1,12	2,95	2,08
RH	0,85	0,97	13,71	-3,96	0,91	0,95	12,35	-3,86
U <sub>2</sub>	0,59	1,04	1,02	0,24	0,51	1,81	1,59	0,84
	Estação chuvosa							
T <sub>max</sub>	0,69	1,14	4,97	3,86	0,64	1,01	2,61	0,26
T <sub>min</sub>	0,61	1,10	3,00	1,93	0,51	1,00	1,40	0,00
RH	0,68	1,06	15,75	5,40	0,68	1,09	14,10	5,38
U <sub>2</sub>	0,56	1,12	1,17	0,34	0,54	1,56	1,32	0,89

T<sub>max</sub>: temperatura máxima do ar (°C); T<sub>min</sub>: temperatura mínima do ar (°C); RH: umidade relativa do ar média (%); U<sub>2</sub>: velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>); b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio

Na tabela 4.6, visualizam-se as diferenças meteorológicas que caracterizam as duas estações (seca e chuvosa), evidenciada pelos menores valores de RH e valores superiores de T<sub>ar</sub> na estação seca em comparação a estação chuvosa. Observa-se (Tabela 4.6 e 4.7) menor precisão na estimativa da T<sub>max</sub> para Cristalina em

comparação a Morrinhos, atribuída as diferenças altitudinais entre os dois locais, não abordada corretamente pela previsão meteorológica, visto que os valores médios estimados de  $T_{max}$  e  $T_{min}$  são muito similares para os dois locais (Tabela 4.6). A medida que a altitude se eleva, normalmente os valores de  $T_{med}$  tendem a ser menores, contribuindo para a redução da demanda evapotranspirativa da região (LIMA; RIBEIRO, 1998; PEREIRA et al., 2002). Além disso, para ambos os locais, a maior precisão na estimativa da  $T_{max}$ , variável com elevada associação com a  $ET_{Oest}$  (Tabela 4.3), é observada na estação chuvosa (RMSE <4,97°C) em comparação a estação seca (RMSE <6,55°C). A superestimativa  $T_{max}$  foi de 3,86 e 0,26 °C na estação chuvosa e de 5,66 e 0,43 °C na estação seca, para Cristalina e Morrinhos, respectivamente (Tabela 4.7). Observa-se, também, uma subestimativa da RH de 3,96 e 3,86% na estação seca e uma superestimativa de 5,40 e 5,38% na estação chuvosa, para Cristalina e Morrinhos, respectivamente (Tabela 4.7). Os efeitos destes resultados na estimativa da  $ET_{O}$  (est+1) são visualizados na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultado dos indicadores estatísticos comparando a evapotranspiração de referência observada com a estimada pelos métodos FAO-Penman-Monteith e Hargreaves com dados da previsão meteorológica com um dia de antecedência ao dia observado, na estação seca e na estação chuvosa, para Cristalina e Morrinhos, no período compreendido de 24/11/2011 a 31/03/2014. Santa Maria, RS, 2015.

ET <sub>O</sub>	Cristalina					Morrinhos				
	R <sup>2</sup>	B	RMSE*	ME*	Méd	R <sup>2</sup>	B	RMSE*	ME*	Méd
<b>Estação seca</b>										
<b>Est+1 FAO-PM</b>	0,78	1,10	1,14	0,32	3,93	0,79	1,01	1,00	0,11	3,86
<b>Est+ 1 Har</b>	0,81	1,11	1,38	0,61	4,22	0,74	1,08	1,16	0,53	4,28
<b>Dia</b>	-	-	-	-	3,61	-	-	-	-	3,75
<b>Estação chuvosa</b>										
<b>Est+1 FAO-PM</b>	0,70	1,00	1,05	0,22	4,34	0,76	1,00	1,00	0,01	4,26
<b>Est+ 1 Har</b>	0,71	1,10	1,21	0,51	4,63	0,73	1,06	1,09	0,30	4,55
<b>Dia</b>	-	-	-	-	4,12	-	-	-	-	4,25

\* mm dia<sup>-1</sup>; b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

Maior precisão da  $ET_{Oest}$  ocorre na estação chuvosa (RMSE <1,20 mm dia<sup>-1</sup>) em comparação a estação seca (RMSE <1,38 mm dia<sup>-1</sup>). Para a estação seca, a maior superestimativa da  $T_{max}$  resulta na superestimativa da  $ET_{Oest}$  superior a observada na

estação chuvosa, sendo esta de 0,32 e 0,11 mm dia<sup>-1</sup> para Cristalina e Morrinhos, respectivamente. Pereira et al. (2009), também, tiveram dificuldades de estimar a ETo na estação seca. Estes autores, avaliaram o desempenho de dez métodos de estimativa da ETo em comparação ao método padrão FAO-PM, para a região da Serra da Mantiqueira, MG, que também possuiu as duas estações do ano bem definidas (seca e chuvosa) e, observaram que 8 dos 10 métodos estudados, possuem um desempenho inferior na estação seca em comparação ao desempenho obtido na estação chuvosa.

Maiores valores de ETo observados na estação chuvosa (outubro a março), estão relacionadas a maior T<sub>ar</sub> nesse período e a maior disponibilidade de água no solo que favorece a evaporação (PEREIRA et al., 2009). Oliveira et al. (2001), estudando modelos para a estimativa da ETo em localidades nos Estados de Goiás e Distrito Federal, observaram um decréscimo da ETo na estação seca e uma elevação na estação chuvosa. Comparando metodologias de cálculo de estimativa da ETo na região de Goiânia, Oliveira et al. (2005), observaram para uma altitude de 823 m valores médios de ETo (FAO-PM) de 3,35 mm dia<sup>-1</sup> (estação seca) e de 3,59 mm dia<sup>-1</sup> (estação chuvosa), amplitude similar a observada neste trabalho (Tabela 4.8).

O método Hargreaves superestimou a ETo<sub>est</sub> para todas as situações avaliadas. Fernandes et al. (2012) observaram para o Estado de Goiás que, mesmo com ajustes, a equação de Hargreaves superestima os valores diários de ETo comparados com a equação FAO-PM. Pallareti et al. (2014) observaram para a região de Bebedouro – SP que, método de Hargreaves e Samani (1985) tende a superestimativa dos valores mensais de ETo em até 13%, quando comparado ao método padrão de FAO-PM. Assim, cabe salientar que se este método for empregado como uma alternativa simplificada para o cálculo da ETo<sub>est</sub>, essa maior superestimativa deve ser corrigida.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam para a Cristalina e Morrinhos – GO, uma superestimativa de 0,04 a 0,69 mm dia<sup>-1</sup> da ETo<sub>est</sub> com um a sete dias de antecedência

ao dia observado, sendo está atribuída a superestimativa da  $T_{max}$  pela previsão meteorológica.

A superestimativa da  $ET_{oest}$  foi reduzida à medida que a previsão se aproximou do dia observado, sendo o ME de até  $0,39 \text{ mm dia}^{-1}$ , para estimativas com sete dias de antecedência ao dia observado e o ME de  $0,05 \text{ mm dia}^{-1}$ , para estimativas com um dia de antecedência ao dia observado.

A qualidade da  $ET_{oest}$ , foi representada por um RMSE de  $1,00$  a  $1,23 \text{ mm dia}^{-1}$  para Morrinhos e de RMSE  $1,19$  a  $1,26 \text{ mm dia}^{-1}$  para Cristalina. As melhores estimativas da  $ET_{oest}$  foram na estação chuvosa, para ambos os locais (RMSE  $<1,21 \text{ mm dia}^{-1}$ ).

O método Hargreaves, se adotado como uma alternativa simplificada para o cálculo da  $ET_{oest}$ , resultará em uma maior superestimativa se comparada a obtida com o método padrão FAO-PM.

#### 4.5 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**. v.98, p.899–920, 2011.

ALLEN, R. G. 46: Evaporation Modeling: Potential. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. 2005.

ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. FAO, Irrigation and Drainage **Paper No. 56**, FAO, Rome, Italy, pp.300-309, 1998.

ANTONINI, J. C. DOS A.; SILVA, E. M.; OLIVEIRA, L. F. C. DE.; SANO, E. E. Modelo matemático para estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 4, p. 331-338, abril 2009.

BARROS, V. R et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.2, p.198-203, 2009.

CAI, J. B. et al. Simulation of the soil water balance of wheat using daily weather forecast messages to estimate the reference evapotranspiration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.1045–1059, 2009.

CAI, J. et al. Estimating reference evapotranspiration with FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 145, n. 01/02, p. 22-35, 2007.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DA UNIVERSIDADE DE CALIFORNIA. **Experimental Forecast Reference Crop Evapotranspiration**. Disponível em: <http://www.wrh.noaa.gov/forecast/evap/FRET/FRET.php?wfo=sto>. Acesso em 9 de outubro de 2014.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 179p., 1977. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 24).

ER-RAKI et. al. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as a alternate of ground meteorological parameters? **Journal of Arid Environments**, v.3, p. 1-10, 2010.

FERNANDES, S. D. et al. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 2, p. 246-255, abr-jun, 2012.

FERREIRA, S.P. estudo comparativo do pós-processamento estatístico aplicado ao modelo BRAMS. **Dissertação**. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L.E.; AGUIAR, A.V. Relação entre altitude e temperatura: Uma contribuição ao zoneamento climático no estado do Paraná. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 10, n. 01, p. 49-64, 2008.

HARGREAVES, G.H., SAMANI, S. Estimating potential evapotranspiration. **J. Irrig. Drain. Div.**, 108-3, 225–230, 1982.

ISHAK, A.M., BRAY, M., REMESAN, R., HAN, D. Estimating reference evapotranspiration using numerical weather modelling. **Hydrol. Processes**. 24, 3490–3509, 2010.

JARA, J. C. STÖCKLE, J. KJELGAARD. Measurement of evapotranspiration and its components in a corn (*Zea mays* L.) field. **Agricultural and Forest Meteorology**, 92 (2) pp. 131–145, 1998.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**. v. 95, n. 06, p. 707-715, 2008.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN R.G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. **American Society of Civil Engineers**, New York 332 pp, 1990.

LIMA, M.G. DE; RIBEIRO, V.Q. Equações de estimativa da temperatura do ar para o Estado do Piauí, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.221-227, 1998.

LOPEZ-URREA, R., SANTA OLALLA, F., FABEIRO, C., AND MORATALLA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate, **Agricultural Water Management**., 85(1–2), 15–26, 2006.

MARCUZZO, F. F. N.; FARIA, T. G.; PINTO FILHO, R. DE F. Chuvas no Estado de Goiás: Análise Histórica e Tendência Futura. **Revista Acta Geográfica**, v.6, n.12, p. 125-137, 2012.

OLIVEIRA, L. F et al. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no estado de goiás e distrito federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 31(2): 121-126, 2001.

OLIVEIRA, R. Z et al. Comparação de metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Goiânia – GO. **Bioscenece Jornal**.Uberlândia. v21, n.3, p19-27, 2005.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G.C. Análise da sensibilidade dos componentes da equação de Hargreaves - Samani para a região de Bebedouro - SP. **Rev. bras. meteorol. [online]**. vol.29, n.2, pp. 299-306. ISSN 0102-778. 2014.

PENMAN, H.L. **Natural evaporation from open water, bare soil, and grass**. Proc. Roy. Soc. London A193:120-146, 1948.

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

PEREIRA, D. R. et al. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v.39, n.9, dez, 2009.

PERERA, K.; WETERN, A.; NAWARATHNA, B.; GEORGE, B. Forecasting Daily Reference Evapotranspiration for Shepparton, Victoria, Australia using Numerical Weather Prediction outputs. In **20th International Congress on Modelling and Simulation**, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013.

Rana, N. Katerji, F. de Lorenzi. Measurement and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, 128 (3–4) pp. 199–209, 2005.

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. 05, p. 635-644, 2010.

SILVA, B. K. N et al. Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e razão de Bowen em cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**.v.15, n.10, p.1046–1053, 2011.

SILVA, D.; MEZA, F.J.; VARAS, E. Estimating reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) using numerical weather forecast data in central Chile. **Journal of Hydrology**. v. 382, p. 64–71, 2010.

XU, C. et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. **Journal of Hydrology**, v.329, p.620-629, 2006.

XU. J.Z. et al. Predicting daily evapotranspiration in a Humid region of China by the locally calibrated Hargreaves-Samani equation using weather forecast data. **J. Agr. Sci. Tech**. v.14, p.1331-1342, 2012.

YODER, R. E.; ODHIAMBO, L. O.; WRIGHT, W. C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 2, p. 197-202, 2005.

## 5 Artigo 3: SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DE UM SOLO CULTIVADO COM MILHO UTILIZANDO VALORES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADOS COM DADOS DA PREVISÃO METEOROLÓGICA

**RESUMO:** A determinação da evapotranspiração (ET) em tempo futuro pode ser útil para determinações mais exatas do balanço hídrico do solo, contribuindo para o uso mais eficiente da água de irrigação. O objetivo do presente trabalho foi simular o balanço hídrico de um solo cultivado com milho utilizando no modelo SIMDualKc os valores de evapotranspiração de referência calculados com dados da previsão meteorológica ( $ET_{O_{est}}$ ) e, avaliar a precisão do conteúdo volumétrico e da água disponível no solo simulada em comparação a medida durante um experimento de campo. Para isso, a cultura do milho foi implantada no ano agrícola 2011/12, em área experimental da Universidade Federal de Santa Maria. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, bifatorial, com quatro repetições. O fator “A” constituiu de duas metodologias de cálculo para a estimativa da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ): (i) utilizando coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) simples e (ii) utilizando  $K_c$  dual. O fator “D” constituiu de quatro estratégias de irrigação: (i) 100% de reposição da  $ET_c$ ; (ii) 75% de reposição da  $ET_c$ ; (iii) 50% de reposição da  $ET_c$ ; (iv) 25% de reposição da  $ET_c$ . Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, monitorou-se o conteúdo de água no solo (camada de 0 a 90 cm), realizou-se determinações culturais e análise do rendimento de grãos do milho ( $Kg\ ha^{-1}$ ). Coletou-se, diariamente (6:00 AM), do site: <http://www.tempoagora.com.br/>, dados de previsão de temperatura máxima ( $T_{max}$ ), temperatura mínima ( $T_{min}$ ), umidade relativa máxima ( $RH_{max}$ ), umidade relativa mínima ( $RH_{min}$ ) e velocidade do vento ( $U_2$ ), necessários para o cálculo da  $ET_{O_{est}}$  pelo método FAO-Penman-Monteith (FAO-PM), realizado para um a três dias de antecedência ao dia observado (est+1 a est+3). A  $ET_o$  do dia observado ( $ET_{O_{dia}}$ ) foi calculada pelo método FAO-PM com dados medidos. Posteriormente, foram realizadas quatro simulações do balanço hídrico do solo utilizando o modelo SIMDualKC, sendo três com valores de  $ET_{O_{est}}$  (est+1 a est+3) e uma com valores de  $ET_{O_{dia}}$ . O conteúdo volumétrico e a água disponível no solo medidos (tratamento de 100% de reposição da  $ET_c$  calculada com  $K_c$  simples) foram comparados com os simulados. Os resultados indicam que, a menor quantidade de água aplicada via irrigação nos tratamentos que utilizaram  $K_c$  dual para o cálculo da  $ET_c$ , implica em menor rendimento de grãos do milho nestes tratamentos. Assim como, ocorre uma redução progressiva no rendimento de grãos de milho quando adota-se a irrigação deficitária, sendo esta de 9.180 e de 5.950  $Kg\ ha^{-1}$  para as estratégias de irrigação de 100 e 25% de reposição da  $ET_c$ . Os dados meteorológicos disponíveis na previsão do tempo, são eficazes para a estimativa da  $ET_o$ , mas resulta em uma superestimativa média de 0,80  $mm\ dia^{-1}$ , para estimativas com três dias de antecedência ao dia observado e, de 0,54  $mm\ dia^{-1}$ , para estimativas com um dia de antecedência ao dia observado. Os resultados da simulação do balanço hídrico do solo são de uma boa concordância entre a água disponível no solo medida e a simulada pelo modelo SIMDualKC (RMSE inferior a 10 mm), ocorrendo subestimativa variando de 1,19 a 3,67 mm para todo o

ciclo utilizando os valores de  $ET_{O_{est}}$  e uma superestimativa de 4,87 mm para todo o ciclo utilizando valores de  $ET_{O_{dia}}$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** previsão meteorológica, modelo de simulação, evapotranspiração.

**ABSTRACT:** The determination of evapotranspiration (ET) in future time can be useful for more accurate determination of the soil water balance, contributing to more efficient use of irrigation water. The aim of this study was to simulate the water balance of a soil cultivated with maize using the SIMDualKc model reference evapotranspiration calculated with data from the weather forecast ( $ET_{O_{est}}$ ) and assess the accuracy of the volumetric content and water available in the simulated soil compared the measure during a field experiment. For this, the corn crop was planted in the agricultural year 2011/12, in an area of the Federal University of Santa Maria. The experimental design was a completely randomized factorial design with four replications. The factor "A" consisted of two methods of calculation to estimate crop evapotranspiration (ETc): (i) using crop coefficient (Kc) single and (ii) using dual Kc. The "D" factor irrigation consisted of four strategies: (i) 100% replacement ETc (ii) 75% replacement of ETc; (iii) 50% replacement of ETc; (iv) 25% of replacement ETc. During the development cycle of the crop, monitored is the water content in the soil (depth of 0 to 90 cm), held cultural determinations and analysis of corn grain yield ( $kg\ ha^{-1}$ ). Collected up daily (6:00 AM), the site: <http://www.tempoagora.com.br/>, forecast data maximum temperature ( $T_{max}$ ), minimum temperature ( $T_{min}$ ), maximum relative humidity ( $RH_{max}$ ), minimum relative humidity ( $RH_{min}$ ) and wind speed ( $U_2$ ) required for the calculation of  $ET_{O_{est}}$  by Penman-Monteith (FAO-PM method held for one to three days before the observed day (est+1... est+3). The  $ET_{O_{day}}$  to the observed day ( $ET_{O_{day}}$ ) was calculated by the method FAO-PM with measured data. Subsequently, four simulations were carried out of the soil water balance using the SIMDualKC model, three with  $ET_{O_{est}}$  values (est+1...est+3) and one with  $ET_{O_{day}}$  values. The volumetric water content and available on the measured ground (100% replacement treatment ETc calculated with simple Kc) were compared with the simulated. The results indicate that the least amount of water applied by irrigation to the dual treatments of Kc for calculating the ETc implies lower yield of corn grain these treatments. Just as there is a progressive reduction in the yield of corn grain when it is adopted to deficit irrigation, which is of 9.180 and 5.950  $kg\ ha^{-1}$  for irrigation strategies of 100 and 25% of replacement etc. Meteorological data available on weather, are effective for estimating  $ET_{O}$ , but results in an average overestimation of 0,80  $mm\ day^{-1}$ , estimates for three days before the observed day and 0,54  $mm\ day^{-1}$  for estimates with a day in advance to the observed day. The results of the simulation of the soil water balance, are a good agreement between the available soil water measured and simulated by SIMDualKC model (RMSE less than 10 mm) occurring underestimation ranging from 1,19 to 3,67 mm for all  $ET_{O_{est}}$  using the cycle of values and an overestimation of 4,87 mm for the entire cycle using  $ET_{O_{day}}$  values.

**KEYWORDS:** weather forecasting, simulation model, evapotranspiration

## 5.1 INTRODUÇÃO

A irrigação é uma tecnologia que está em crescente uso no Brasil, tendo em vista a sua importância para a manutenção ou elevação da produtividade na maioria das regiões agrícolas, que em determinados períodos do ano tem seu potencial produtivo comprometido pela deficiência hídrica. No Estado do Rio Grande do Sul, os Dados da Secretaria da Agricultura, Pecuária e Agronegócio (2012), são de que existe um comprometimento do potencial produtivo das lavouras gaúchas, no mínimo em sete a cada dez anos, havendo uma necessidade de irrigação suplementar às culturas (primavera/verão), em volumes que variam de 80 a 300 mm. Por isso, o Estado tem passado por uma recente expansão da irrigação por aspersão, situação em que a cultura do milho tem adquirido importância, por apresentar altas produtividades em áreas irrigadas por aspersão. A produtividade do milho, média de dez anos (2001 a 2011), no Estado do RS é de 3.486 e de 12.000 Kg ha<sup>-1</sup> em área de sequeiro e áreas irrigadas, respectivamente (SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E AGRONEGÓCIO, 2012).

A irrigação pode ser realizada das seguintes formas: total, suplementar ou deficitária. A irrigação é total quando toda a água necessária para atender a demanda hídrica das culturas é aplicada via irrigação; é suplementar quando a água utilizada para atender a demanda evapotranspirométrica das culturas, em parte vem da irrigação e em parte vem da precipitação efetiva; é deficitária quando se planeja atender somente uma fração da demanda hídrica da cultura. Segundo Martins et al. (2012), as investigações sobre a irrigação deficitária têm permitido um aumento da eficiência do uso da água, pois a adoção de estratégias neste sentido pode ser capaz de reduzir a quantidade de água aplicada, causando um mínimo impacto na produção.

Além disso, a irrigação deve ser manejada de forma correta para que proporcione os resultados almejados, com sustentabilidade. Para realizar o manejo de irrigação, torna-se necessário definir de forma precisa a lâmina e o momento da irrigação, para isso, é fundamental o conhecimento de uma série de variáveis relacionadas ao solo e as culturas. Por isso, é importante determinar o consumo de água pelas plantas, denominado de evapotranspiração (ET) (DOORENBOS; PRUITT, 1977; PEREIRA et al., 1997; JENSEN et al., 1990; ALLEN et al., 1998). Desde a

primeira abordagem sobre a ET, realizada por Thornthwaite; Wilm (1944), outros tantos métodos foram desenvolvidos e avaliados (DOORENBOS; PRUITT, 1977; PEREIRA et al., 1997; JENSEN et al., 1990; ALLEN et al., 1998). Mas, a grande evolução sobre a estimativa da ET foi com a publicação do boletim FAO – 56 (ALLEN et al., 1998), a partir da realização da estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) pelo método desenvolvido por Penman-Monteith, que, após parametrização, passou a denominar-se Penman-Monteith FAO (FAO–PM), o qual foi bastante aceito, internacionalmente, devido a sua elevada precisão em uma grande variabilidade de condições meteorológicas (XU; CHEN, 2005; YODER et al., 2005; LÓPEZ-URREA et al., 2006; JABLOUN; SAHLI, 2008; BARROS et al., 2009; ROCHA, 2011) atualmente o método (FAO–PM), ficou estabelecido como método padrão para a estimativa da ET<sub>o</sub>. Além disso, está apresentado nesse documento (boletim FAO 56), a atualização do coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), que é utilizado como uma integração das diferenças físicas e fisiológicas existentes entre a cultura em questão e a cultura de referência, sendo este necessário para a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) (ET<sub>c</sub> = ET<sub>o</sub> x K<sub>c</sub>). De acordo com Pereira et al. (2014), a publicação do boletim FAO 56 foi um avanço na aplicação das curvas de K<sub>c</sub> para uma vasta variedade de climas e localizações.

De acordo com Allen et al. (1998), existem dois métodos de cálculo da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) a partir do valor ET<sub>o</sub>: a primeira abordagem integra a relação entre a ET<sub>c</sub> e a ET<sub>o</sub> com um único coeficiente K<sub>c</sub> e; na segunda abordagem o K<sub>c</sub> é dividido em dois fatores distintos que descrevem os componentes de evaporação (K<sub>e</sub>) e de transpiração (K<sub>cb</sub>). Allen et al. (2005) relatam que, para culturas com cobertura parcial do solo e para irrigações de alta frequência ou locais com chuvas frequentes, o uso da metodologia dos coeficientes culturais duais permite produzir estimativas mais exatas da ET<sub>c</sub>. Todavia, essa metodologia de cálculo é complexa e pode ser realizada mais facilmente com o auxílio de modelos computacionais, como é o caso do modelo SIMDualK<sub>c</sub> (ROSA et al., 2012), que realiza a simulação do balanço hídrico do solo utilizando a abordagem K<sub>c</sub> dual para o cálculo da ET<sub>c</sub>, visando o planejamento e programação da irrigação. Seu primeiro teste publicado foi realizado com observações de água no solo (ROSA et al., 2012). O modelo, também, foi testado para observações da evaporação e transpiração em pêssego (PAÇO et al., 2012), para considerar o efeito de cobertura ativas do solo em videiras (FANDIÑO et al., 2012), para validar as duas fases da evaporação de água

no solo (RITCHIE, 1972) para milho e trigo (ZHAO et al., 2013), e para obtenção do coeficiente de cultura basal do milho em sistema de cultivo plantio direto (MARTINS et al., 2013).

Para fins de balanço hídrico do solo, conceituado de uma maneira simplificada como o as diferenças entre as entradas e saídas de água do sistema (camada de solo considerada), a estimativa da  $ET_c$  é realizada, na maioria das vezes, na escala de tempo diária. Todavia, tem-se uma defasagem no balanço hídrico do solo, em função de não ter a  $ET$  do dia da irrigação, que só pode ser calculada no dia posterior, em que haverá dados meteorológicos medidos. Por isso, a determinação da  $ET_o$  em tempo futuro, a partir de dados da previsão meteorológica, pode ser útil para determinações mais exatas do balanço hídrico, além de contribuir para o gerenciamento da atividade irrigada. Todavia, existe a necessidade da verificação dos impactos da utilização destes dados na disponibilidade de água no solo. Pois, trabalhos com essa finalidade são insipientes.

Uma abordagem realizando a simulação do balanço hídrico do solo durante o ciclo de desenvolvimento do trigo, utilizando valores de  $ET_o$  estimados a partir de dados da previsão meteorológica e o modelo ISAREG, foi realizada por Cai et al. (2009) para Beijing - China, em local de clima semiárido a sub úmido e solo siltoso. Os autores obtiveram resultados satisfatórios do conteúdo de água no solo estimado em comparação aos valores medidos, com RMSE variando de 0,007 a 0,016m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para diferentes manejos de irrigação.

Assim, a determinação da  $ET_o$  realizada na escala de tempo futuro (dias), a partir de dados da previsão meteorológica, conforme propõem os seguintes autores: Perera et al. (2013), Xu et al. (2012), Silva et al. (2010), Er-Raki et al. (2010), Cai et al. (2009) e Cai et al. (2007), pode ser uma alternativa para obter o melhor gerenciamento da atividade irrigada, para a maximização do uso da água na agricultura, para a otimização do uso de insumos agrícolas e dos recursos naturais.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi simular o balanço hídrico de um solo cultivado com milho utilizando no modelo SIMDualKc e valores de  $ET_o$  estimados com dados da previsão meteorológica e, avaliar a precisão do conteúdo de água no solo e da água disponível no solo simulada em comparação a medida durante um experimento de campo.

## 5.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1 Experimento de Campo

O trabalho de campo foi realizado no ano agrícola de 2011/12 em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, localizada na Latitude de 29° 41' 24" S, Longitude de 53° 48' 42" O e altitude de 95 m. O clima do local é do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen (MORENO, 1961). O solo está classificado como ARGISSOLO VERMELHO distrófico arênico (EMBRAPA, 2006).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, bifatorial, com quatro repetições. O fator "A" constituiu de duas metodologias de cálculo para a estimativa da ETc: (i) utilizando Kc simples e (ii) utilizando Kc dual. O fator "D" constituiu de quatro estratégias de irrigação: (i) 100% de reposição da ETc; (ii) 75% de reposição da ETc; (iii) 50% de reposição da ETc; (iv) 25% de reposição da ETc.

O trabalho foi conduzido no interior de uma cobertura móvel que somente era fechada quando da ocorrência de chuvas, possibilitando assim o controle das entradas de água no sistema. A cultura do milho foi implantada no sistema de plantio direto com 2,8 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos culturais de aveia preta na superfície do solo. A semeadura foi realizada manualmente no dia 15 de outubro de 2011, utilizando-se a cultivar DKB 240, com uma população final de 66.000 plantas ha<sup>-1</sup>.

A irrigação foi realizada por um sistema de gotejamento superficial, espaçados a 0,4 m entre gotejadores e a 0,5 m entrelinhas, cuja taxa de aplicação foi de 12 mm h<sup>-1</sup>. As irrigações foram aplicadas quando a ETc acumulasse 25 mm. Para a determinação da ETc, a ETo (ET<sub>odia</sub>), foi estimada pelo método FAO-PM (equação 3.1) e, os valores dos coeficientes de cultura (Kc simples) utilizados foram os propostos Allen et al. (1998).

As variáveis meteorológicas necessárias para o cálculo da ET<sub>odia</sub>, foram obtidas de uma estação meteorológica automática do INMET, situada a cerca de 400 m da área experimental. Os dados diários de T<sub>max</sub>, T<sub>min</sub> (°C) e RH (%) observados durante o período experimental estão apresentados na figura 5.1.

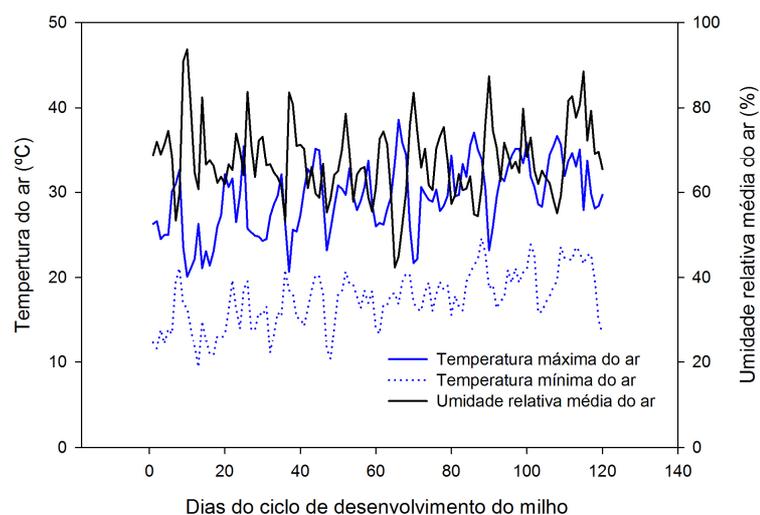


Figura 5.1 – Variáveis meteorológicas observadas durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Santa Maria, RS, 2015.

O conteúdo volumétrico de água no solo foi medido utilizando um conjunto FDR (Frequency Domain Reflectometer), constituído por um datalogger CR10X e multiplexadores AM16/32, e sensores CS626, todos da Campbell Science. As leituras foram realizadas em intervalos de 15 minutos, desde a sementeira até a colheita. As determinações da umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) foram realizadas em diferentes camadas do solo (0-0,10; 0,10-0,25; 0,25-0,55; 0,55-0,90 m) de acordo com a distribuição dos horizontes no perfil do solo.

Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, determinou-se duas vezes por semana, a estatura das plantas, a fração de cobertura do solo pela cultura e o índice de área foliar (IAF). A medição da área foliar (método não destrutivo) foi realizada em duas plantas por parcela, utilizando o equipamento LI-COR 3000. O IAF foi determinado pela razão entre a área foliar fotossinteticamente ativa de cada planta pela área de solo ocupada pela mesma. Para determinação das datas dos estágios de desenvolvimento da cultura, foi considerada a etapa inicial de desenvolvimento o período compreendido entre a sementeira e o momento em que o cultivo atingiu uma fração de cobertura do solo de aproximadamente 10%. A fase de rápido desenvolvimento foi compreendida entre o período em que a cultura atingiu uma cobertura do solo de 10% até a sua cobertura plena, isto é, quando atingir um IAF de 3 (Allen et al., 1998), que determinou o início do período intermédio de desenvolvimento da cultura. O período final de desenvolvimento compreende entre o

início da senescência das plantas de milho foi determinado quando a cultura atingiu um IAF de 3.5, até a colheita.

No final do ciclo de desenvolvimento da cultura determinou-se o rendimento de grãos do milho ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ). A avaliação se deu mediante a colheita das duas linhas centrais de cada parcela, desprezando 50 cm no início e no final das linhas de semeadura. Os resultados obtidos foram extrapolados para  $\text{Kg ha}^{-1}$ , considerando-se uma umidade de 13%.

### **5.2.2 Estimativa da ETo com dados da previsão meteorológica**

Durante o ciclo de desenvolvimento do milho (15/10/2011 a 12/02/2012), por meio de um script desenvolvido em linguagem PHP, foram coletados diariamente (às 6:00 AM), do site: <http://www.tempoagora.com.br/>, os dados de previsão de temperatura máxima ( $T_{\text{max}}$ ), temperatura mínima ( $T_{\text{min}}$ ), umidade relativa máxima ( $\text{RH}_{\text{max}}$ ), umidade relativa mínima ( $\text{RH}_{\text{min}}$ ) e velocidade do vento ( $U_2$ ) para os próximos três dias, conforme ilustra a tabela 3.1. O portal Tempo Agora, foi escolhido pela facilidade de transformar os dados no formato de imagem (formato disponível) em dados numéricos (formato de armazenamento no banco de dados).

A partir destes dados, a ETo denominada de estimada ( $\text{ET}_{\text{Oest}}$ ), foi calculada para um a três dias de antecedência ao dia observado, conforme demonstra a tabela 3.2, utilizando o método FAO-PM (Equação 3.1). Os procedimentos de cálculo da ETo foram os descritos por Allen et al. (1998) e as equações estão apresentadas no Artigo 1 (Equações 3.7 a 3.14). A radiação solar ( $R_s$ ) foi estimada com os dados de temperatura do ar (HARGREAVES; SAMANI, 1982).

A  $\text{ET}_{\text{Oest}}$  foi comparada com a ETo do dia observado ( $\text{ET}_{\text{Odia}}$ ). A verificação da precisão das estimativas foi realizada com o auxílio dos seguintes indicadores estatísticos: ME (Equação 3.1), RMSE (Equação 3.2),  $R^2$  (Equação 3.3) e b (Equação 3.4).

### **5.2.3 Simulações do Balanço Hídrico do Solo com o Modelo SIMDualKc**

Os parâmetros de entrada no modelo SIMDualKc para a simulação do balanço hídrico do solo, constam de: (i) variáveis metrológicas (Figura 5.1); (ii) valores de ETo (ETo<sub>día</sub> e ETo<sub>est</sub>); (iii) parâmetros culturais determinados a campo (Tabelas 5.1 e 5.2); (iv) parâmetros de solo, em que alguns foram medidos e outros foram calibrados por Martins et al. (2013) para o mesmo local e cultura (Tabela 5.3).

Tabela 5.1 – Parâmetros culturais utilizados nas simulações com o modelo SimDualKc. Santa Maria, RS, 2015.

Parâmetros culturais	Etapas do ciclo da cultura				
	Semeadura	Inicial	Média	Colheita	Senescência
Profundidade das raízes (m)	0,15	0,5	0,8	0,8	0,8
Altura de Plantas (m)	0,0	0,19	1,0	2,1	2,1
Cobertura do solo pelo dossel	0,01	0,28	0,70	0,99	0,50
$p^*$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$K_{cb}^*$		<b>Inicial</b>	<b>Médio</b>	<b>Final</b>	<b>Mínimo</b>
		0,2	1,12	0,2	0,15

$p$ : fração de esgotamento da água do solo em conforto hídrico;  $K_{cb}$ : Coeficiente de cultura basal; \* Parâmetros calibrados por Martins et al. (2013).

Tabela 5.2– Datas das diferentes etapas do ciclo do desenvolvimento do milho que são parâmetros culturais utilizados nas simulações com o modelo SimDualKc. Santa Maria, RS, 2015.

Etapa do ciclo da cultura	Data
Semeadura	15/10/2011
Início do crescimento	12/11/2011
Início do rápido crescimento	08/12/2011
Senescência	20/01/2012
Colheita	12/02/2012

Tabela 5.3 - Parâmetros relacionados ao solo utilizados nas simulações com o modelo SIMDualKc. Santa Maria, RS, 2015.

Camada (m)	Textura (%)			Umidade volumétrica (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		
	Areia	Silte	Argila	CC	PMP	Saturação
<b>0,0 - 0,10</b>	36,0	44,7	19,4	0,385	0,119	0,519
<b>0,10- 0,25</b>	35,5	40,4	24,2	0,357	0,112	0,491
<b>0,25- 0,55</b>	32,1	35,4	32,5	0,307	0,117	0,477
<b>0,55- 0,90</b>	24,2	31,7	44,1	0,329	0,191	0,476
<b>Parâmetros hidráulicos</b>	<b>TAW (mm)</b>	<b>C.Ev (m)</b>	<b>TEW (mm)</b>	<b>REW (mm)</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>
	168,65	0,10	49,0	12,00	353	-0,022

\* Parâmetros calibrados por Martins et al. (2013); CC: Capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; TAW: total de água disponível; C.Ev.: Camada de evaporação; TEW: Total de água evaporável; REW: água facilmente evaporável; a e b são parâmetros da equação de percolação proposta por Liu et al. (2006).

A partir dos parâmetros de solo e de cultura estabelecidos, o modelo SIMDualKC foi rodado variando os parâmetros de meteorológicos, sendo estes os valores determinados de ETo e de ETo<sub>dia</sub> e os valores estimados de ETo com os dados de previsão do tempo ETo<sub>est+1</sub>, ETo<sub>est+2</sub> e ETo<sub>est+3</sub> (est+1 a est+3). Dentre os inúmeros resultados de saída do modelo, utilizou-se nesse estudo, os valores de conteúdo volumétrico de água no solo e de água disponível no solo, para a comparação com valores medidos durante o ciclo de desenvolvimento do milho. A comparação foi realizada com os resultados obtidos para o tratamento de 100% de reposição da ETC calculada com o Kc simples. A verificação da precisão das estimativas foi realizada pelos seguintes indicadores estatísticos: ME (Equação 3.1), RMSE (Equação 3.2), R<sup>2</sup> (Equação 3.3) e b (Equação 3.4).

### 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 5.2, está apresentada a quantidade de água aplicada na cultura do milho, em função de diferentes estratégias de irrigação adotadas.

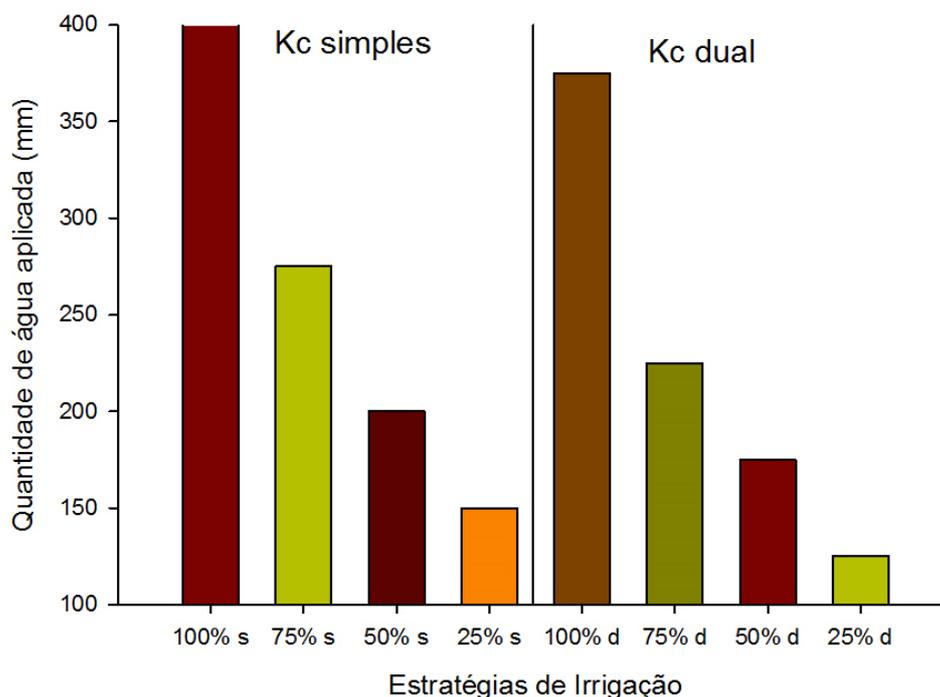


Figura 5.2 – Quantidade de água aplicada na cultura do milho, em função de diferentes estratégias de irrigação adotadas na condução do experimento de campo. Santa Maria, RS, 2015.

Durante o ciclo de desenvolvimento do milho, para todas as estratégias de irrigação (100, 75, 50 e 25% de reposição da  $ET_c$ ), aplicou-se uma irrigação a menos (25 mm) quando utilizou -se o Kc dual para a o cálculo da  $ET_c$ . Isso pode ser explicado, pelo fato da metodologia do Kc dual utilizar o coeficiente de redução da evaporação ( $K_r$ ) aplicado ao  $K_e$ . O valor de  $K_e$  é reduzido à medida que o solo seca, chegando a zero quando não houver mais água disponível para a evaporação, esta redução é expressa pelo  $K_r$  (ALLEN et al., 1998; ALLEN et al., 2005). Portanto, o  $K_e$  diminui à medida que o solo vai perdendo umidade, situação em que permanece, basicamente, o  $K_{cb}$  (coeficiente de transpiração) e, assim, a  $ET_c$  fica mais reduzida que a calculada com o Kc simples, demorando mais para acumular o valor previamente estipulado (25 mm) para a aplicação da irrigação. Com isso, observa-se na figura 5.3, que o armazenamento de água no solo manteve-se inferior nas estratégias de irrigação em que utilizou-se o Kc dual para o cálculo da  $ET_c$ . De acordo com Alves (2009), o cálculo do Kc dual ( $K_{cb}+K_e$ ) possibilita maior acurácia da estimativa da  $ET_c$ , em estações chuvosas e quando se utiliza irrigação em área total, uma vez que o  $K_e$  varia muito de acordo com os elementos meteorológicos e a umidade da superfície do solo. Para

Allen et al. (2005), para culturas com cobertura parcial do solo e para irrigações de alta frequência ou locais com chuvas frequentes, o uso da metodologia dos coeficientes culturais duais permite produzir estimativas mais exatas da ET<sub>c</sub>. Tais situações diferem das quais o experimento foi realizado, pois ocorreu uma boa cobertura do solo pela cultura (Tabela 5.3), as irrigações foram espaçadas (lâminas acumuladas de 25 mm) e localizadas (gotejamento superficial).

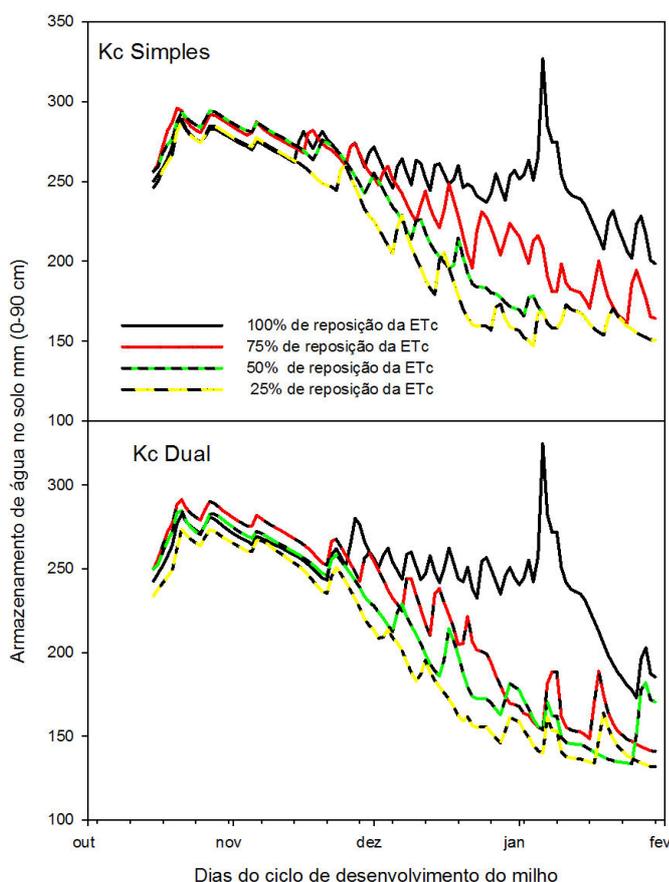


Figura 5.3 - Armazenamento de água no solo (camada de 0 a 90 cm) observado para diferentes estratégias de irrigação, durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Santa Maria, RS, 2015.

As diferentes estratégias de irrigação influenciaram significativamente o rendimento de grãos de milho, sendo este mais expressivo ( $7.778,40 \text{ kg ha}^{-1}$ ) utilizando do Kc simples para o cálculo da ET<sub>c</sub> em comparação a utilização da Kc dual ( $6.461,40 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e, para a estratégia de irrigação de 100% de reposição da ET<sub>c</sub> ( $9.221,40 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 5.4).

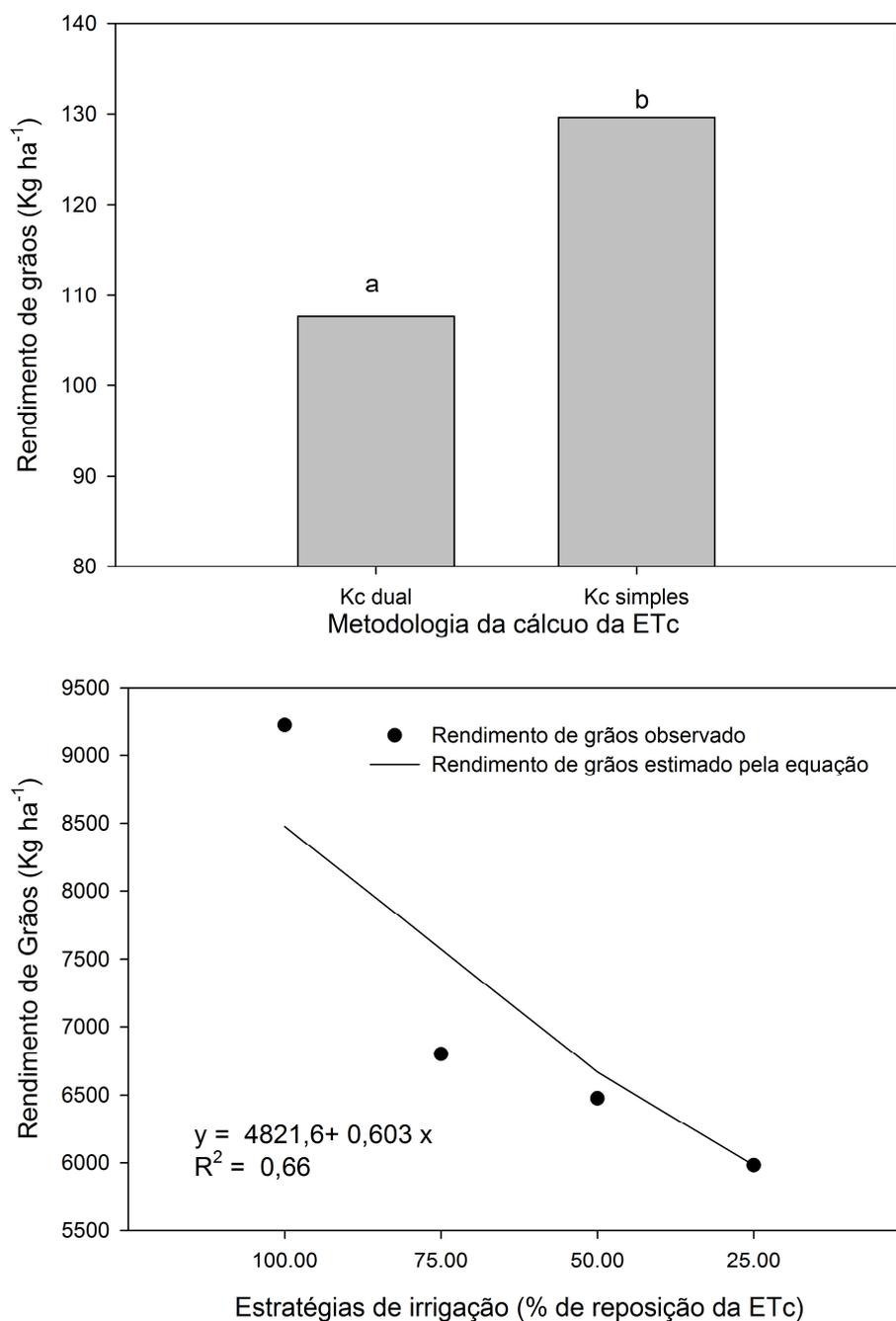


Figura 5.4 – Rendimento de grãos da cultura do milho submetida a diferentes estratégias de irrigação. Santa Maria, RS, 2015.

Os resultados demonstrados na figura 5.4 indicam que, para a maximização do rendimento de grãos de milho, a irrigação deve ser efetuada para suprir totalmente as necessidades hídricas das culturas (reposição de 100% da ETc). A irrigação deficitária consiste na aplicação de lâminas inferiores às necessárias para satisfazer às

necessidades hídricas da cultura, afetando assim, a ET e a produtividade, entretanto, a redução da produtividade deve ser mínima ao ponto de manter o retorno econômico da cultura irrigada (KANG et al., 2000). De acordo com Martins et al. (2012), a irrigação deficitária pode constituir uma tecnologia apropriada para contribuir com a economia de água, pois a irrigação em excesso leva a um desperdício de água, a um aumento dos custos de produção e a uma gestão inapropriada dos recursos hídricos disponíveis. Estes mesmos autores, estudando a irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de milho silagem, concluíram que esta técnica mantém um retorno econômico semelhante à opção de irrigação plena.

Os valores diários de  $ET_{\text{dia}}$  e  $ET_{\text{est}}$  verificados ao longo dos 120 dias do ciclo de cultivo do milho estão apresentados na figura 5.5.

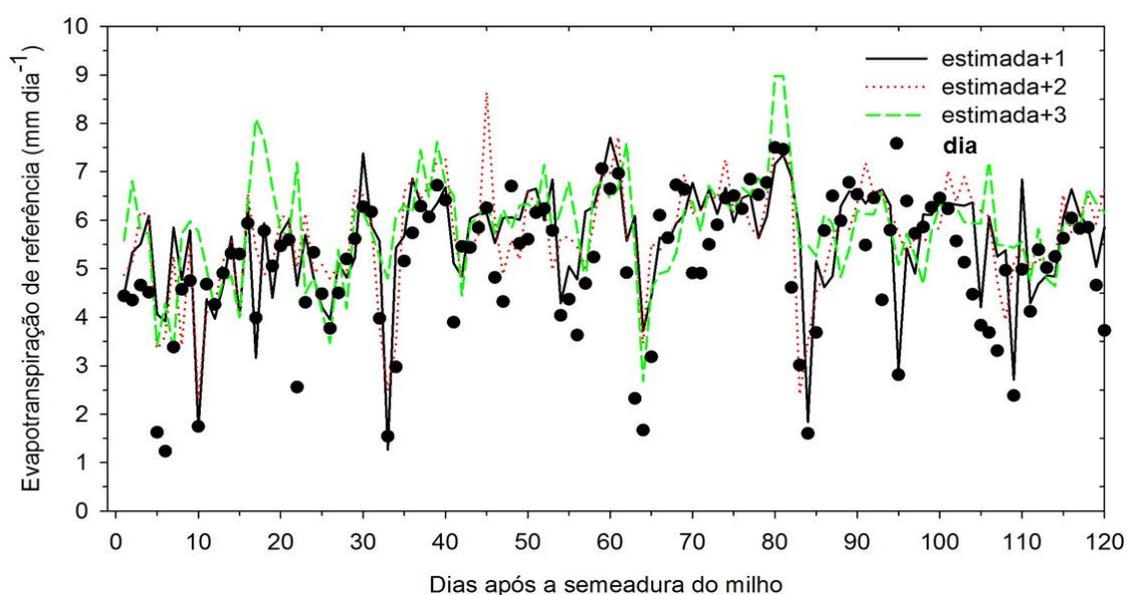


Figura 5.5- Valores diários de evapotranspiração de referência observados e estimados com dados da previsão meteorológica para três dias de antecedência ao dia observado, verificados durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Santa Maria, RS, 2015.

Observa-se uma boa concordância entre os valores de  $ET_{\text{o}}$  observados e estimados. A superestimativa da  $ET_{\text{est}}$  é reduzida a medida que a previsão se aproxima do dia observado, sendo esta de 0,80, 0,57 e 0,54  $\text{mm dia}^{-1}$  para os dias est+3, est+2 e est+1, respectivamente (Figura 5.6). Assim como, ocorre uma redução nos valores de RMSE de 1,53  $\text{mm dia}^{-1}$  (est+3) para 1,18  $\text{mm dia}^{-1}$  (est+2 e est+1).

Estes resultados de RMSE foram superiores aos obtidos em trabalhos já publicados. Cai et al. (2009), em estudo conduzido na China, durante dois anos agrícolas para a cultura do trigo, que obtiveram um RMSE de 0,77 mm dia<sup>-1</sup>. PERERA et al. (2013), avaliando a estimativa da ETo com dados da previsão do tempo para Shepparton, Victoria, Austrália no período compreendido entre 1996 e 2012, para nove dias de antecedência ao dia observado, verificaram um RMSE variando entre 0,65 e 1,26 mm dia<sup>-1</sup> para o dia anterior ao observado e para o nono dia antecedente ao observado, respectivamente. Trabalhando com a estimativa da ETo (FAO–PM), utilizando dados numéricos da previsão do tempo obtidos do modelo MM5 (Mesocale Model versão 5) na região central do Chile, Silva et al. (2010) observaram para um dia de antecedência ao dia observado, em diferentes locais valores de RMSE variando de 0,67 a 1,15 mm dia<sup>-1</sup>.

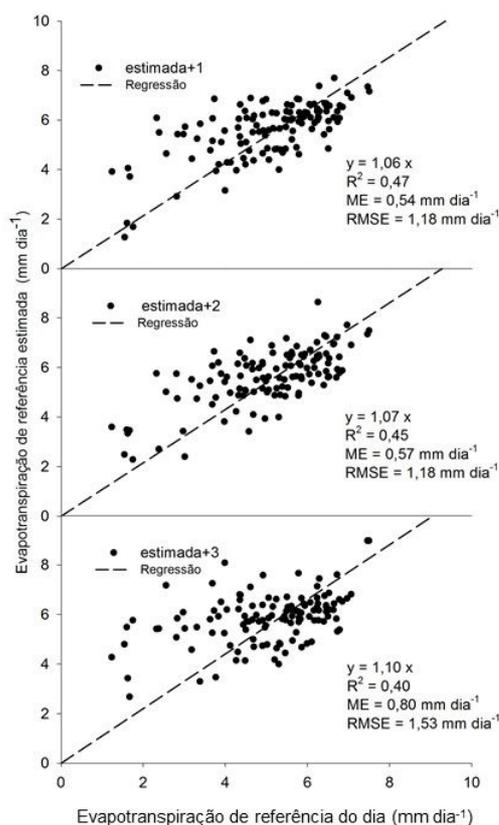


Figura 5.6- Comparação entre os valores diários de evapotranspiração de referência observados com os estimados com dados da previsão meteorológica para três dias de antecedência ao dia observado, verificados durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Santa Maria, RS, 2015.

Na tabela 5.4 estão apresentados os resultados dos indicadores estatísticos comparando a água disponível medida com a simulada pelo modelo SIMDualKc, utilizando valores de ETo observados e estimados (est+1 a est+3), durante o ciclo de desenvolvimento do milho.

Tabela 5.4- Resultado dos indicadores estatísticos comparando a água disponível no solo medida, com a simulada com valores de evapotranspiração de referência observados e estimados com um a três dias de antecedência ao dia observado. Santa Maria, RS, 2015.

	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>B</b>	<b>RMSE (mm)</b>	<b>RMSE (% TAW)</b>	<b>ME (mm)</b>	<b>ME (% TAW)</b>
<b>ET<sub>odia</sub></b>	0,94	1,03	9,82	5,67	4,87	2,81
<b>ET<sub>est+1</sub></b>	0,97	0,99	6,83	3,95	-2,20	-1,27
<b>ET<sub>est+2</sub></b>	0,97	0,99	6,32	3,65	-1,19	-0,68
<b>ET<sub>est+3</sub></b>	0,98	0,97	7,09	4,10	-3,67	-2,12

ET<sub>est</sub>: evapotranspiração de referência estimada com dados da previsão meteorológica com um a três dias de antecedência ao dia observado; ET<sub>odia</sub>: evapotranspiração de referência calculada com dados meteorológicos observados; TAW: total de água disponível; b: coeficiente angular; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; ME: erro médio.

Verifica-se uma boa concordância entre os valores de água disponível no solo medidos e simulados durante o ciclo de desenvolvimento do milho (Tabela 5.7), evidenciado pelos pequenos valores de RMSE e ME, que foram inferiores a 6 e a 3% do total de água disponível (TAW), respectivamente. Utilizando valores de ET<sub>odia</sub> ocorreu uma pequena superestimativa na água disponível no solo durante o ciclo de desenvolvimento do milho de 4,87 mm (2,81 % do TAW). Já, quando utilizados valores de ET<sub>est</sub>, observa-se uma pequena subestimativa da água disponível, sendo esta muito similar entre os dias de previsão (est+1 a est+3), variando entre 1,19 e 3,67 mm (0,68 e 2,12 % do TAW). A superestimativa da ET<sub>est</sub> (Figura 5.6), resulta em valores mais elevados de ET<sub>c</sub> em comparação a utilização da ET<sub>odia</sub> (Figura 5.7) e, dessa forma, em menor disponibilidade de água no solo, resultando na subestimativa da água disponível no solo utilizando valores de ET<sub>est</sub>

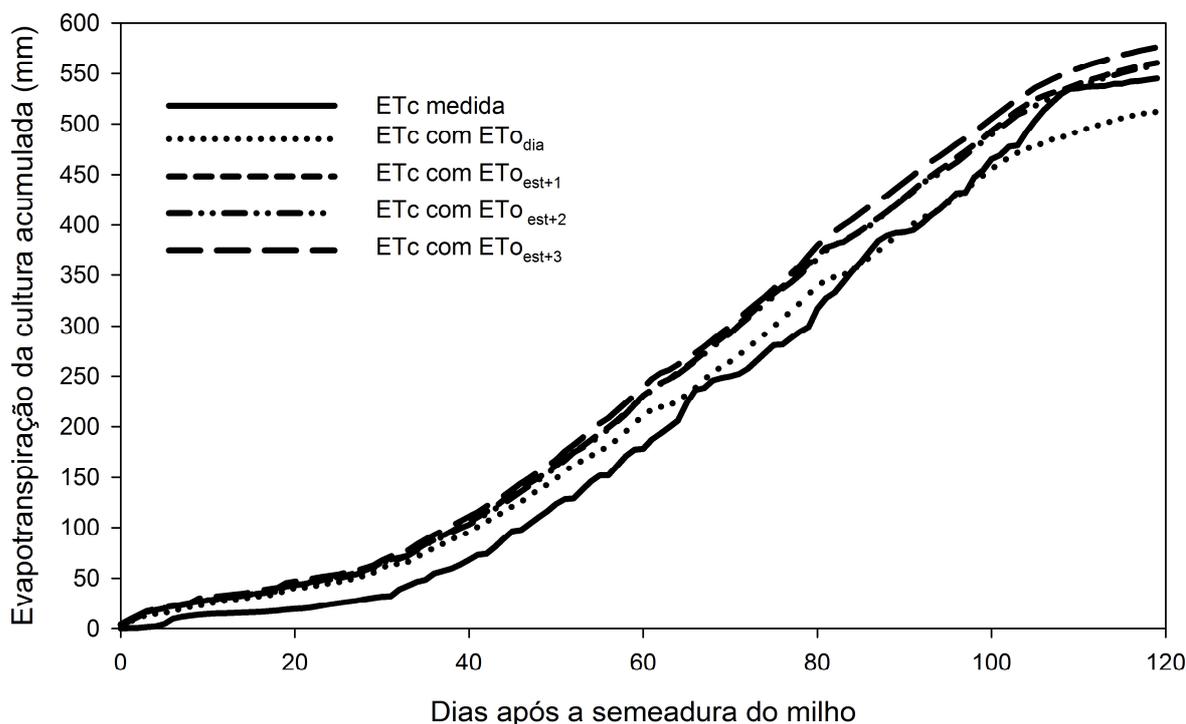


Figura 5.7 – Evapotranspiração da cultura medida e calculada utilizando valores de evapotranspiração de referência do dia e estimados, durante o ciclo do desenvolvimento da cultura do milho. Santa Maria, RS, 2015.

Observa-se que, até aproximadamente 50 dias após a semeadura do milho (DAS), os valores acumulados de ETc utilizando a  $ET_{o_{dia}}$  e a  $ET_{o_{est}}$  são semelhantes, apresentando valores superiores aos medidos. Somente no final do ciclo da cultura, após os 100 DAS, os valores acumulados de ETc estimados com a  $ET_{o_{dia}}$  são menores que os valores medidos e, a ETc acumulada estimada com dados de  $ET_{o_{est}}$  permanece superior à média. Razão pela qual, os valores de RMSE comparando a água disponível medida e estimada são semelhantes, independente de utilizar para o cálculo da ETc a  $ET_{o_{dia}}$  ou a  $ET_{o_{est}}$  (Tabela 5.6) e, que ocorre uma pequena superestimativa da água disponível (valores médios) utilizando a  $ET_{o_{dia}}$  e uma subestimativa utilizando a  $ET_{o_{est}}$ . A água disponível medida e a simulada pelo modelo SIMDualKc, as chuvas e as irrigações, verificadas durante o ciclo de desenvolvimento do milho, estão apresentadas na figura 5.8.

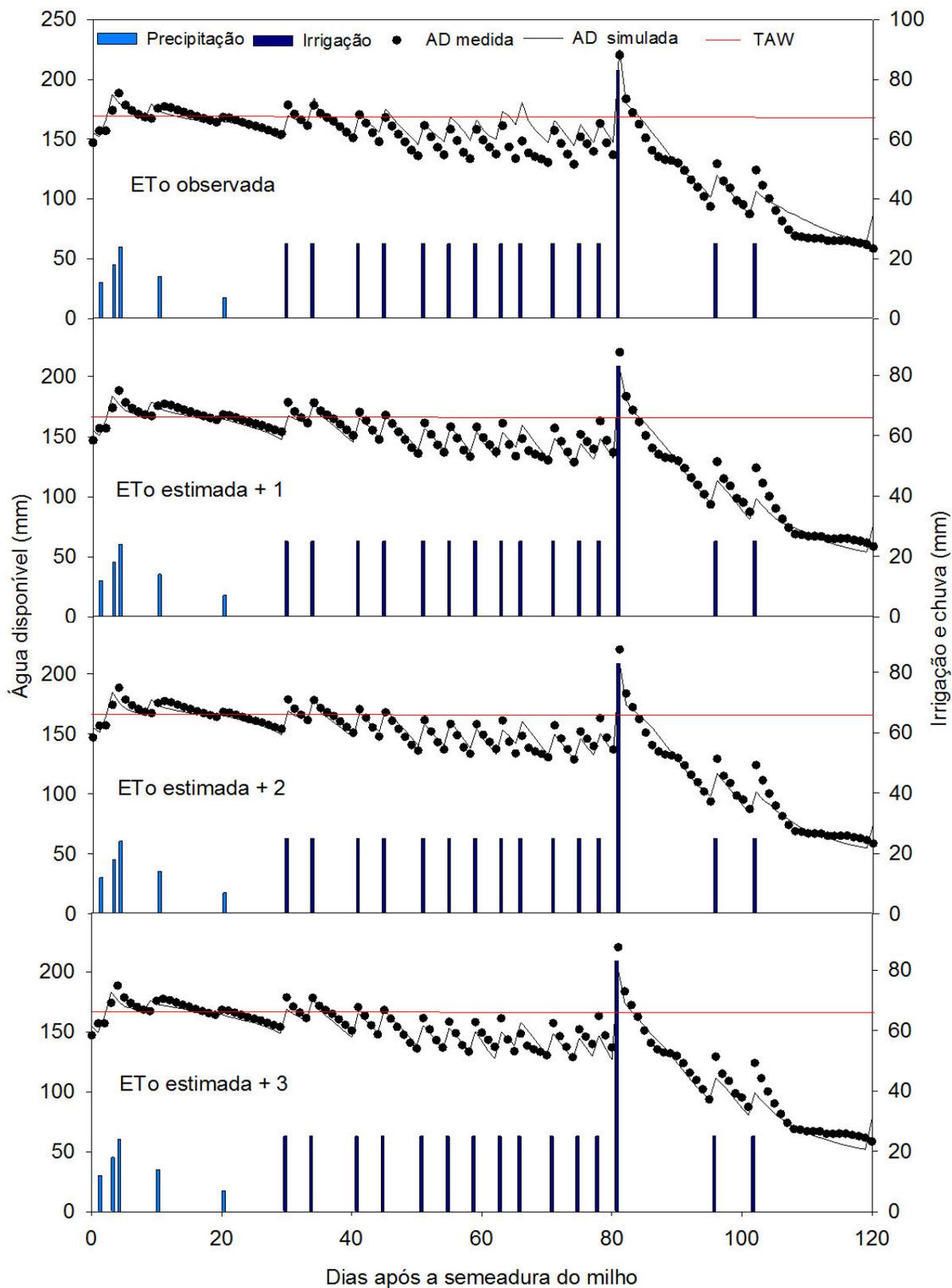


Figura 5.8- Comparação entre a água disponível observada e a simulada e demonstração das chuvas e irrigações, verificadas durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Santa Maria, RS, 2015.

Até os 80 dias após a semeadura da cultura do milho (DAS), as irrigações mantiveram a água disponível no solo a valores muito próximos ao TAW, havendo um declínio nesses valores no período final do ciclo em que a cultura, em que demanda hídrica da cultura é menor (Figura 5.8). A boa concordância entre a água disponível medida e a simulada pelo modelo SIMDualKc é observada para todo o ciclo da cultura, resultando em pequenos valores de RMSE e ME (Tabela 5.8). Especialmente, para a água disponível simulada com valores de  $ET_{o\text{est}}$ , que está relacionada com a elevada precisão na estimativa do conteúdo volumétrico de água no solo pelo modelo SIMDualKc (Figura 5.9).

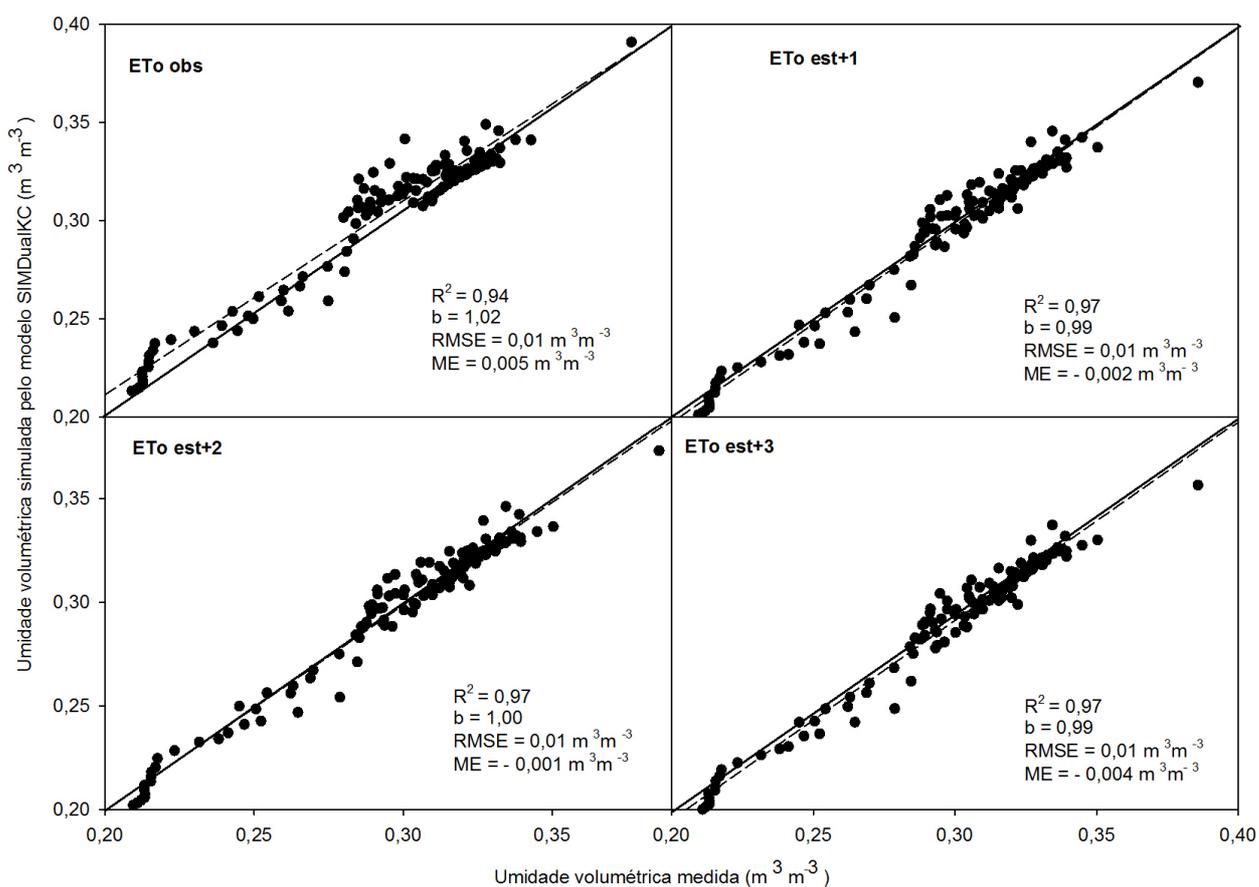


Figura 5.9- Comparação entre os valores medidos do conteúdo volumétrico de água no solo com os simulados pelo modelo SIMDualKc utilizando valores de evapotranspiração de referência observados e estimados com dados da previsão meteorológica para três dias de antecedência ao dia observado, verificados durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Santa Maria, RS, 2015.

Os valores de RMSE de  $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , observados para o conteúdo de água volumétrico do solo simulado durante o ciclo de desenvolvimento do milho pelo modelo SIMDualKc, utilizando valores de  $ET_{o_{est}}$  (est+1 a est+3) foi igual aos observados por Cai et al. (2009), em estudo similar a este. Estes autores, trabalhando com a cultura do trigo, obtiveram valores médios (diferentes tratamentos de reposição de irrigação) de RMSE de 0,010 e  $0,012 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , para os anos agrícolas 2005/6 e 2006/7, respectivamente.

Assim como concluiu Er-Raki et al. (2010), os resultados do presente estudo indicam que, os dados meteorológicos disponíveis na previsão do tempo são eficazes para a estimativa da  $ET_o$  futura ( $ME < 0,8 \text{ mm dia}^{-1}$ ), proporcionando pequenos erros médios na água disponível do solo ( $ME < -3,67 \text{ mm}$ ), observados durante todo o ciclo de cultivo do milho. Assim, estes dados podem contribuir para o planejamento da agricultura irrigada e para o manejo da irrigação em tempo real e futuro.

#### 5.4 CONCLUSÕES

A menor quantidade de água aplicada via irrigação nos tratamentos que utilizaram Kc dual para o cálculo da  $ET_c$ , implica em menor rendimento de grãos do milho em comparação aos que utilizaram o Kc simples para o cálculo da  $ET_c$ .

Ocorre uma redução progressiva no rendimento de grãos de milho quando adotou-se a irrigação deficitária, sendo esta de 9.180 e de 5.950  $\text{Kg ha}^{-1}$  para as estratégias de irrigação de 100 e 25% de reposição da  $ET_c$ .

Os dados meteorológicos disponíveis na previsão do tempo, são eficazes para a estimativa da  $ET_o$ , mas resulta em uma superestimativa média de  $0,80 \text{ mm dia}^{-1}$ , para estimativas com três dias de antecedência ao dia observado e, de  $0,54 \text{ mm dia}^{-1}$ , para estimativas com um dia de antecedência ao dia observado.

Os resultados da simulação do balanço hídrico do solo são de uma boa concordância entre a água disponível no solo medida e a simulada pelo modelo SIMDualKC (RMSE inferior a 10 mm), ocorrendo subestimativa variando de 1,19 a 3,67 mm para todo o ciclo utilizando os valores de  $ET_{o_{est}}$  e uma superestimativa de 4,87 mm para todo o ciclo utilizando valores de  $ET_{o_{dia}}$ .

## 5.5 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. FAO, Irrigation and Drainage **Paper No. 56**, FAO, Rome, Italy, pp.300-309, 1998.

ALLEN, R. G. 46: Evaporation Modeling: Potential. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. 2005.

ALVES, M.E.B. Disponibilidade e demanda hídrica na produtividade da cultura do eucalipto. 2009. 136f. **Tese** (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BARROS, V. R et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.2, p.198-203, 2009.

CAI, J. B. et al. Simulation of the soil water balance of wheat using daily weather forecast messages to estimate the reference evapotranspiration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.1045–1059, 2009.

CAI, J. et al. Estimating reference evapotranspiration with FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 145, n. 01/02, p. 22-35, 2007.

CARVALHO, L. G. de; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.41, n.3, p.456-465, 2011.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 179p., 1977. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 24).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. 306p. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006.

ER-RAKI et. al. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as a alternate of ground meteorological parameters? **Journal of Arid Environments**, v.3, p. 1-10, 2010.

FANDIÑO, M. et al. Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. albariño) with consideration of active ground cover. **Agricultural Water Management**. v. 112, p. 75 - 87, 2012.

KANG, S.; SHI, W.; ZHANG, J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. **Field Crops Research**, v.67, p.207–214, 2000.

LOPEZ-URREA, R., SANTA OLALLA, F., FABEIRO, C., AND MORATALLA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate, **Agricultural Water Management**., 85(1–2), 15–26, 2006.

MARTINS, J. D et al. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga, Botucatu**, Edição Especial, p. 192 - 205, 2012.

MARTINS, J. D et al. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: Model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Bioprocess and Biosystems Engineering**.v.115, p. 291 - 310, 2013

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, 42p.1961.

PAÇO, T. A. et al. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model vs. eddy covariance measurements. **Irrigation Science**. v. 30, n. 2, p. 115 - 126, 2012.

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

PERERA, K.; WETERN, A.; NAWARATHNA, B.; GEORGE, B. Forecasting Daily Reference Evapotranspiration for Shepparton, Victoria, Australia using Numerical Weather Prediction outputs. In **20th International Congress on Modelling and Simulation**, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013.

ROSA, R. D. et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. **Agricultural Water Management**. v. 103, p. 8 - 24, 2012.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E AGRONEGÓCIO. **Mais Água, Mais Renda.** Disponível em: [http://www.agricultura.rs.gov.br/conteudo/1032/?Mais\\_%C3%81qua%2C\\_Mais\\_Renda](http://www.agricultura.rs.gov.br/conteudo/1032/?Mais_%C3%81qua%2C_Mais_Renda). Acesso em 01/09/2014.

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. 05, p. 635-644, 2010.

SILVA, D.; MEZA, F.J.; VARAS, E. Estimating reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) using numerical weather forecast data in central Chile. **Journal of Hydrology**. v. 382, p. 64–71, 2010.

XU, J.Z. et al. Predicting daily evapotranspiration in a Humid region of China by the locally calibrated Hargreaves-Samani equation using weather forecast data. **J. Agr. Sci. Tech**. v.14, p.1331-1342, 2012.

ZHAO, N. N. et al. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat/summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component. **Agricultural Water Management**. v. 117, p. 93 - 105, 2013.

## 6 DISCUSSÃO GERAL

Para Santa Maria – RS, as variáveis estimadas com maior precisão pela previsão meteorológica foram a  $T_{max}$  e  $T_{min}$  com um superestimativa média da  $T_{max}$  inferior a 0,74 °C e subestimativa média da  $T_{min}$  inferior a 0,19 °C. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Ferreira (2011), que realizou um estudo comparativo do pós-processamento estatístico aplicado ao modelo BRAMS (modelo de escala regional CPTEC/INPE) e observou para Santa Maria – RS a superestimativa média da  $T_{ar}$  de 0,65 °C (previsão para 3 dias). Para Morrinhos e Cristalina – GO a  $U_2$  e a RH foram as variáveis estimadas com maior precisão, discordando de Ishak et al. (2013) e Huntington et al. (2014), que afirmam que as maiores dificuldades de utilizar dados gerados por modelos de circulação geral da atmosfera para a estimativa da  $ET_o$ , é a imprecisão na estimativa da  $U_2$ . Como pode-se perceber, houveram diferenças na qualidade da previsão meteorológica entre os locais de estudo, atribuída as diferenças climáticas dos locais. Todavia, a variável meteorológica que apresentou maior associação com a  $ET_{o\ est}$  (est+1) foi a mesma para os três locais de estudo. A  $T_{max}$ , apresentou  $R^2$  superior 0,60, seguida da  $R_s$  (estimada com dados de  $T_{ar}$ ) e da RH com  $R^2$  de 0,17 para Santa Maria e superior a 0,50 para Cristalina e Morrinhos. Estes resultados diferem em parte dos obtidos por Perera et al. (2013), que observaram maior associação da  $U_2$  para a estimativa da  $ET_o$  com um dia a três dias de antecedência ao dia observado. Fica então, evidente que existem diferenças na capacidade preditiva variáveis meteorológicas mais relevantes para o cálculo da  $ET_o$  (FAO–PM) em função do local, mas que na maioria dos casos a  $R_s$ , a  $T_{ar}$  e RH são as variáveis mais significativas (FONSECA; MARIN, 2007; SILVA et al., 2011; XU et al., 2006).

Para os três locais estudados e para as diferentes situações avaliadas (anos agrícolas, períodos secos e chuvosos), maior precisão (RMSE inferior a 1,21 mm dia<sup>-1</sup>) na estimativa da  $ET_{o\ est}$  foi observada quando se utiliza dados meteorológicos com um dia de antecedência ao dia observado (superestimativa inferior a 0,5 mm dia<sup>-1</sup>). Tendo em vista que, a qualidade da estimativa da  $ET_{o\ est}$  é afetada pela qualidade das variáveis meteorológicas, que melhora a medida que a previsão se aproxima do dia observado. Diante disso, para uma melhor qualidade na estimativa da  $ET_o$  (RMSE

$<1,30 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $ME <0,56 \text{ mm dia}^{-1}$ ), recomenda-se a utilização de dados da previsão meteorológica estimados com até quatro dias de antecedência ao dia observado. Do mesmo modo, Perera et. al (2013), observou uma maior precisão na estimativa da  $ET_o$  com dados da previsão meteorológica para um período de até seis dias de antecedência ao dia observado, com valores de RMSE variando de 0,65 a 1,01  $\text{mm dia}^{-1}$  e a partir disso, de sete a nove dias de antecedência, os valores de RMSE são de 1,14 a 1,26  $\text{mm dia}^{-1}$ .

Maior precisão da  $ET_{o\text{est}}$  foi verificada para Morrinhos (superestimativa média inferior a 0,59  $\text{mm dia}^{-1}$ ), Cristalina (superestimativa média inferior a 0,69  $\text{mm dia}^{-1}$ ) e Santa Maria (superestimativa média inferior a 0,72  $\text{mm dia}^{-1}$ ). A diferença entre Morrinhos e Cristalina foi atribuída a menor qualidade da estimativa da  $T_{ar}$  para Cristalina, não sendo considerada as diferenças de altitude entre os dois locais pela previsão do tempo. De acordo com Fritzsos et al. (2008), a altitude, latitude e longitude, nesta ordem, influenciam a  $T_{med}$ . Para Santa Maria, a menor precisão em comparação a Cristalina e a Morrinhos, foi atribuída a baixa qualidade da estimativa da  $T_{max}$  e RH em dias com chuva, que aumenta consideravelmente a superestimativa da  $ET_o$ . Por isso, para Santa Maria – RS, os melhores resultados da  $ET_{o\text{est}}$  são observados em dias sem chuva (superestimativa média entre 0,03 e 0,99  $\text{mm dia}^{-1}$ ) em comparação a dias com chuva (superestimativa média entre 0,97 e 5,30  $\text{mm dia}^{-1}$ ), possivelmente pela dificuldade dos modelos de previsão do tempo em estimar o aumento da RH e a redução da  $T_{max}$  que ocorre nestes dias. Por outro lado, para Cristalina e Morrinhos – GO, os melhores resultados da  $ET_{o\text{est}}$  foram observados na estação chuvosa ( $ME <0,51 \text{ mm dia}^{-1}$ ) em comparação a estação seca ( $ME <0,61 \text{ mm dia}^{-1}$ ), devido à maior superestimativa da  $T_{max}$  pela previsão meteorológica na estação seca. Avaliando o desempenho de dez métodos de estimativa da  $ET_o$  em comparação ao método padrão FAO–PM, para a região da Serra da Mantiqueira, MG, que também possui duas estações do ano bem definidas (seca e chuvosa), Pereira et al. (2009), observaram elevada variabilidade no desempenho das equações para o período chuvoso e seco, sendo que 8 dos 10 métodos estudados, possuem um desempenho inferior na estação seca.

O método Hargreaves superestimou a  $ET_{o\text{est}}$  para todas as situações avaliadas. Silva et al. (2014), relatam que o método Hargreaves, possui tendência de superestimar a  $ET_o$  para a cidade de Santa Maria, sendo que ajustes na equação e ajustes específicos por época podem resultar em melhoras adicionais. Por outro lado,

Fernandes et al. (2012), observaram para o Estado de Goiás, que mesmo com ajustes, a equação de Hargreaves superestima os valores diários de  $ET_o$  comparados com a equação FAO-PM. Assim, se este método for empregado com uma alternativa simplificada para o cálculo da  $ET_{oest}$ , essa maior superestimativa deve ser considerada, especialmente, para Morrinhos e Cristalina que foi maior que para Santa Maria, em função da maior superestimativa da  $T_{max}$  nestes locais.

Os resultados obtidos no experimento conduzido com a cultura do milho, foram de uma menor quantidade de água aplicada via irrigação nos tratamentos que utilizaram o  $K_c$  dual para o cálculo da  $ET_c$ , implicando em menor rendimento de grãos do milho nestes tratamentos (16% menor). Além disso, houve uma redução progressiva no rendimento de grãos de milho quando adotou-se estratégias de irrigação deficitárias, sendo este de 9.180 e de 5.950 Kg ha<sup>-1</sup> para as estratégias de irrigação de 100 e 25% de reposição da  $ET_c$ . Para Martins et al. (2012), a irrigação deficitária é uma alternativa em cenários onde se priorize a economia de água e sua eficiência, além de manter um retorno econômico semelhante à opção de irrigação plena.

Nas comparações entre a água disponível medida em nível de campo (tratamento de 100% de reposição da  $ET_c$  calculada com  $K_c$  simples) com a água disponível simulada pelo modelo SIMDual $K_c$ , os resultados são de uma boa concordância entre a água disponível no solo medida e a simulada pelo modelo SIMDual $K_c$  (RMSE inferior a 10 mm), ocorrendo subestimativa variando de 1,19 a 3,67 mm para todo o ciclo utilizando os valores de  $ET_{oest}$  e uma superestimativa de 4,87 mm para todo o ciclo utilizando valores de  $ET_{odia}$ .

A partir do exposto, pode-se afirmar que as diferenças entre a  $ET_{odia}$  e a  $ET_{oest}$ , tem pequena influência nos resultados do balanço hídrico do solo (RMSE inferior a 10 mm), sendo uma alternativa para a determinação da necessidade de irrigação das culturas em tempo futuro, que poderá contribuir para o gerenciamento da atividade irrigada e para a maior eficiência na utilização dos recursos naturais e demais insumos agrícolas.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A  $ET_{O_{est}}$  é superestimada ( $>0,04$  e  $<0,72$  mm dia<sup>-1</sup>) para os três locais de estudo (Santa Maria, Cristalina e Morrinhos), atribuída a superestimativa da  $T_{max}$  pela previsão meteorológica, variável que apresentou associação com a  $ET_{O_{est}}$  representada por um  $R^2$  de 0,60. A superestimativa da  $A ET_{O_{est}}$  é reduzida à medida que a estimativa se aproxima do dia observado, recomendando-se a utilização de dados meteorológicos estimados com até quatro dias de antecedência ao dia observado.

Maior precisão da  $ET_{O_{est}}$  é observada para Morrinhos - GO (RMSE inferior a 1,23 mm dia<sup>-1</sup>), Cristalina -GO (RMSE inferior a 1,28 mm dia<sup>-1</sup>) e Santa Maria – RS (RMSE inferior a 1,48 mm dia<sup>-1</sup>). Para Santa Maria – RS, os melhores resultados são observados em dias sem chuvas em comparação a dias com chuva. Para Cristalina e Morrinhos – GO, melhores resultados são observados na estação chuvosa em comparação a estação seca.

O rendimento de grãos de milho é 16% menor, quando adota-se para o manejo de irrigação o  $K_c$  dual para o cálculo da  $ET_c$  em comparação a utilização de  $K_c$  simples. Ocorre uma redução progressiva no rendimento de grãos de milho de 9.180 para 5.950 Kg ha<sup>-1</sup> utilizando as estratégias de irrigação de 100 e 25% de reposição da  $ET_c$ .

Os resultados da simulação do balanço hídrico do solo, são de uma boa concordância entre a água disponível no solo medida e a simulada pelo modelo SIMDualKC (RMSE inferior a 10 mm), ocorrendo subestimativa variando de 1,19 a 3,67 mm para todo o ciclo utilizando os valores de  $ET_{O_{est}}$  e uma superestimativa de 4,87 mm para todo o ciclo utilizando valores de  $ET_{O_{dia}}$ .

As diferenças entre a  $ET_{O_{dia}}$  e a  $ET_{O_{est}}$ , tem pequena influência nos resultados do balanço hídrico do solo (RMSE inferior a 10 mm para a água disponível), sendo uma alternativa para a determinação da necessidade de irrigação das culturas em tempo futuro, o que poderá contribuir para o gerenciamento da atividade irrigada e para a maior eficiência na utilização dos recursos naturais e demais insumos agrícolas.

## 8 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. 46: Evaporation Modeling: Potential. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. 2005.

ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **FAO, Irrigation and Drainage Paper No. 56**, FAO, Rome, Italy, pp.300-319, 1998.

ASCE-EWRI. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Report 0-7844-0805-X, ASCE Task **Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration**. Reston, Va., American Soc. Civil Engineers, 2005.

BACHOUR, R. Modeling and forecasting evapotranspiration for better management of irrigation command areas All Graduate Theses and Dissertations. Paper 2077, 2013.

BARROS, V. R et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.2, p.198-203, 2009.

BRASIL. Retrato da Irrigação no Brasil. Ministério da Integração Nacional. 15/04/2013. Disponível in: [http://www.integracao.gov.br/noticias/-/asset\\_publisher/xW1t/content/retrato-da-irrigacao-no-brasil](http://www.integracao.gov.br/noticias/-/asset_publisher/xW1t/content/retrato-da-irrigacao-no-brasil). Acesso em: 1/10/2014.

CAI, J. B. et al. Simulation of the soil water balance of wheat using daily weather forecast messages to estimate the reference evapotranspiration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.1045–1059, 2009.

CAI, J. et al. Estimating reference evapotranspiration with FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 145, n. 01/02, p. 22-35, 2007.

CAMARGO, A. P.; Camargo, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 179p., 1977. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 24).

ER-RAKI et. al. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as a alternate of ground meteorological parameters? **Journal of Arid Environments**, v.3, p. 1-10, 2010.

FERNANDES, S. D. et al. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 2, p. 246-255, abr-jun, 2012.

FERREIRA, S.P. estudo comparativo do pós-processamento estatístico aplicado ao modelo BRAMS. **Dissertação**. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FONSECA, M. A.; MARIN, F. R. Efeito de variáveis meteorológicas sobre a evapotranspiração de referência em uma região de clima tropical úmido no Brasil. In: X REUNIÓN ARGENTINA Y IV LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA, 2004, Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata, 10., Associação Argentina de Agrometeorologia, 2004. v. 1, p. 1-10.

FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L.E.; AGUIAR, A.V. Relação entre altitude e temperatura: Uma contribuição ao zoneamento climático no estado do Paraná. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 10, n. 01, p. 49-64, 2008.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HART, K. A.; STEENBURGH, W. J.; ONTON, D. J.; SIFFERT, A. J. An evaluation of mesoscale model based model output statistics (mos) during the 2002 olympic and Paralympic winter games. *Weather and Forecasting*, v. 19, p. 200–218, 2004.

IBGE. **Conjuntura Agrícola**. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr\\_201203.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr_201203.pdf). Acesso em 8 de maio de 2014.

HUNTINGTON, J.L et al. West-wide climate risk assessments: bias-corrected and spatially downscaled irrigation demand and reservoir evaporation projections. In: **Technical Memorandum** No. 86-68210-2014-01. US Bureau of Reclamation, Dept. Interior, Denver, CO, 215 p. 2014.

ISHAK, A.M., BRAY, M., REMESAN, R., HAN, D. Estimating reference evapotranspiration using numerical weather modelling. **Hydrological Processes**. 24, 3490–3509, 2010.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**. v. 95, n. 06, p. 707-715, 2008.

LOPEZ-URREA, R., SANTA OLALLA, F., FABEIRO, C., AND MORATALLA, A.: Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate, **Agricultural Water Management**., 85(1-2), 15-26, 2006.

MARTINS, J. D et al. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: Model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Bioprocess and Biosystems Engineering**.v.115, p. 291 - 310, 2013

MARTINS, J. D et al. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga, Botucatu**, Edição Especial, p. 192 - 205, 2012.  
PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc. Roy. Soc. London A193:120-146, 1948.

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

PEREIRA, D. R. et al. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v.39, n.9, dez, 2009.

PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>, 2014.

PERERA, K.; WETERN, A.; NAWARATHNA, B.; GEORGE, B. Forecasting Daily Reference Evapotranspiration for Shepparton, Victoria, Australia using Numerical Weather Prediction outputs. In **20th International Congress on Modelling and Simulation**, Adelaide, Australia, 1-6 December 2013.

RAZIEI, T. & PEREIRA, L.S. Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 121, p.1-18, 2013.

ROCHA, E.T. et al. Estimativa da ETo pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 75-83, jan-mar, 2011.

ROSA, R. D. et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. **Agricultural Water Management**. v. 103, p. 8 - 24, 2012.

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. 05, p. 635-644, 2010.

SILVA, D.; MEZA, F.J.; VARAS, E. Estimating reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) using numerical weather forecast data in central Chile. **Journal of Hydrology**. v. 382, p. 64–71, 2010.

SILVA, J. R et al. Ajustes dos coeficientes da equação de hargreaves-samani para a estimativa da evapotranspiração de referência em Santa Maria – RS. Resumo. **Anais**. 66ª Reunião Anual da SBPC. Ciência e Tecnologia emu ma Amazonia sem Fonteiros. Acre, Brasil. 2014.

TABARI H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. **Water Resour Manage**. 24:2311–2337, 2010.

THORNTHWAITE, W. H. An approach toward a ration classification classification on climate. **Geographical Review**, n. 38, p. 55-94, 1948.

XU, C.Y.; GONG, L.; JIANG, T.; CHEN, D.; SINGH, V.P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration in Changjiang (Yangtze River) basin. **Journal of Hydrology**, v. 30, n.1-2, p. 81-93, 2006.

XU, C-Y.; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 18, p. 3717- 3734, 2005.

XU. J.Z. et al. Predicting daly evapotranspiration in a Humid region of China by the locally calibrated Hargreaves-Samani equation using weather forecast data. **J. Agr. Sci. Tech**. v.14, p.1331-1342, 2012.

YODER, R. E.; ODHIAMBO, L. O.; WRIGHT, W. C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 2, p. 197-202, 2005.