

ISSN 0104-1347

## Modelos para a estimativa da evapotranspiração máxima da abóbora italiana em estufa plástica

Models to estimate maximum evapotranspiration of squash under plastic greenhouse conditions

Arno Bernardo Heldwein<sup>1</sup>, Luciano Streck<sup>2</sup>, Flavio Miguel Schneider<sup>3</sup>, Edenir Luis Grimm<sup>4</sup>, Astor Henrique Nied<sup>5</sup> e Ivonete Fátima Tazzo<sup>6</sup>

**Resumo** - Foram obtidos modelos matemáticos para a estimativa da evapotranspiração máxima diária para a cultura da abóbora italiana (*Cucurbita pepo* L.), cultivar caserta. A evapotranspiração máxima foi medida em dois cultivos realizados numa estufa plástica com largura de 10 m e comprimento de 24 m, localizada na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, no período de outono de 2000 e de 2001. As plantas foram espaçadas em 0,80 m e cultivadas em fileiras pareadas. Foram feitas medições semanais de área foliar, com as quais estimou-se o índice de área foliar diário ao longo do ciclo. Os modelos para estimativa da evapotranspiração máxima foram gerados a partir dos valores de variáveis meteorológicas e fenométricas obtidas no cultivo de 2001. As variáveis meteorológicas foram medidas no interior e no exterior da estufa plástica. Os modelos foram testados e avaliados na estimativa dos valores de evapotranspiração máxima do cultivo de 2000. A utilização dos valores de evapotranspiração máxima por unidade da raiz quadrada do índice de área foliar melhorou a sua relação com as variáveis meteorológicas. Os modelos que apresentaram as melhores respostas ao teste e às avaliações têm como variáveis independentes os valores de evapotranspiração de referência determinada pelos métodos de Penman-Monteith e de Penman e os valores de insolação, obtidos no exterior da estufa plástica, os valores de radiação solar e de evaporação d'água no evaporímetro de Piche exposto à radiação solar no interior da estufa plástica e a temperatura do ar obtida no interior e no exterior.

**Palavras-chave:** evapotranspiração, modelos, abóbora italiana, estufa plástica, evaporação.

**Abstract** - Mathematical models were obtained to estimate daily maximum evapotranspiration of squash plants (*Cucurbita pepo*, L.) grown inside a plastic greenhouse. Meteorological and crop variables were used in the models. The maximum evapotranspiration was measured with lysimeters during two squash growing seasons (autumn 2000 and autumn 2001). The experiment was carried out in a plastic greenhouse of 10.0 m wide and 24.0 m long, located at the Experiment Field of the Crop Production Department of the Federal University of Santa Maria. Experimental plots were pared rows with 0.80 m within plants, and 1.50 m between border row. Leaf area was weekly measured and daily leaf area index was estimated. The maximum evapotranspiration models were obtained with meteorological and crop variables measured during autumn 2001. Meteorological variables were measured inside and outside the greenhouse. The measured and estimated maximum evapotranspiration during autumn 2000 was used to test and evaluate the models. The best correlation between daily maximum evapotranspiration and meteorological variables was obtained when the maximum evapotranspiration was divided by root square of leaf area index. The best estimators of the crop maximum evapotranspiration were obtained with Penman and Penman-Monteith reference evapotranspiration and sunshine duration at weather station, solar radiation and water evaporation inside greenhouse and air temperature inside and outside.

**Key words:** evapotranspiration, models, squash, plastic greenhouse, evaporation.

<sup>1</sup>Eng. Agr., Dr., Prof. titular do Departamento de Fitotecnia, UFSM, 97105-900 Santa Maria, e-mail: heldwein@creta.ccr.ufsm.br, bolsista CNPq.

<sup>2</sup>Eng. Agr., doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, UFSM, bolsista CAPES.

<sup>3</sup>Eng. Agr., M.Sc., Prof. titular do Departamento de Fitotecnia, doutorando do PPG em Agronomia, UFSM.

<sup>4</sup>Acadêmico do curso de Agronomia da UFSM, bolsista BIC/FAPERGS.

<sup>5</sup>Eng. Agr., Mestre pelo PPG em Agronomia, UFSM.

<sup>6</sup>Eng. Agr., Aluna de mestrado do PPG em Agronomia, UFSM, bolsista CAPES.

## Introdução

O cultivo em estufa plástica possibilita melhorar as condições ambientais e de desenvolvimento das culturas e por essa razão as modelizações matemáticas desenvolvidas para culturas cultivadas a campo não são válidas para cultivos no interior de estufas (GARY *et al.*, 1998). Porém, a praticidade dos modelos matemáticos revela a sua importância para a atividade agrícola. Os modelos possibilitam estimar o volume de água necessária para o ciclo de uma cultura, obtendo-se melhor crescimento vegetal, produtividade e qualidade de produção (JONES & TARDIEU, 1998).

Da mesma forma que o uso do coeficiente de cultura, a modelização da evapotranspiração máxima das culturas pode ser considerada ferramenta adequada para estimativa das suas necessidades hídricas. Modelos baseados em variáveis medidas no interior ou no exterior das estufas oferecem bons parâmetros para essa estimativa em diferentes culturas (DALMAGO, 2001). Os cuidados na coleta e organização dos dados irão determinar o grau de representatividade do modelo matemático com relação a realidade. Porém, dentre todas as variáveis existentes, nem sempre ocorre o mesmo grau de associação com os valores medidos de evapotranspiração máxima. DALSSASSO (1997), CARON (1999) e VALANDRO (1999) obtiveram uma baixa relação entre a necessidade hídrica e as variáveis meteorológicas externas à estufa plástica para cultivos no outono. As variáveis obtidas no interior da estufa explicaram melhor a transpiração da cultura do que as variáveis externas (FOLEGATTI *et al.*, 1997; RIGHI, 2000). DALMAGO (2001), no entanto, em cultivo de outono, verificou que tanto as variáveis meteorológicas internas quanto as externas à estufa apresentaram boa correlação com a evapotranspiração máxima do pimentão no interior de estufa plástica.

Segundo a bibliografia, vários foram os modelos gerados, correlacionando a evapotranspiração com as variáveis meteorológicas do ambiente interno e externo e com as variáveis fenométricas de diferentes culturas. No entanto, ainda há a necessidade de obtenção de modelos, para a cultura da abóbora italiana. O ideal é que estes sejam pouco complexos, sem a necessidade dos usuários disporem de aparelhos dispendiosos e de difícil manuseio no dia-a-dia da propriedade rural. Nesse sentido, recentemente HELDWEIN *et al.* (2001) verificaram que a

evaporação medida com evaporímetro de Piche, exposto ao sol no interior da estufa, foi uma variável consistente, simples e de fácil observação para a estimativa da evapotranspiração máxima do pimentão, quando esta é considerada por unidade de área foliar ou de índice de área foliar. Para os produtores de abóbora italiana esta seria uma técnica que iria melhorar e facilitar o manejo da irrigação em estufa plástica.

Objetivou-se com este trabalho obter modelos e testá-los para a estimativa da evapotranspiração máxima para a cultura da abóbora italiana em função dos elementos meteorológicos, da evaporação de água no interior da estufa e de variáveis fenométricas.

## Material e métodos

Foram conduzidos dois experimentos em estufa plástica localizada junto a área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, nos períodos de 26/02 a 12/05/2000 e de 01/03 a 10/05/2001. O clima da região, conforme classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido com verões quentes e sem estação seca definida (MORENO, 1961). O solo pertence à unidade de Mapeamento São Pedro e é classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (EMBRAPA, 1999).

Foi utilizada uma estufa plástica com 24 m de comprimento e 10 m de largura, orientada no sentido norte-sul. A estrutura da estufa foi de madeira de eucalipto e a cobertura feita segundo o modelo “arco-pampeano”, com filme transparente de polietileno de baixa densidade (PEBD) com espessura de 100  $\mu\text{m}$ .

As plantas de abóbora italiana, cultivar caserta, foram obtidas a partir de mudas transplantadas quando apresentavam duas a três folhas definitivas. O cultivo foi realizado em fileiras pareadas distanciadas 0,80 m entre si e entre plantas nas fileiras. O espaçamento entre as fileiras externas dos canteiros com fileiras pareadas foi de 1,50 m. As fileiras foram constituídas de camalhões com cerca de 0,10 m de altura e 0,40 m de largura, cobertos com filme opaco à luz, de PEBD de cor preta (“mulching”) com 35  $\mu\text{m}$  de espessura. A condução das plantas de abóbora foi feita em haste única, sendo as mesmas sustentadas por fios de ráfia.

A evapotranspiração máxima da cultura ( $ET_m$ ) foi obtida pela utilização de oito e onze

minilímetros de drenagem com solo e de seis e nove lisímetros de drenagem com substrato nos experimentos de 2000 e de 2001, respectivamente. Para fins de análise, os valores médios de  $ET_m$  foram obtidos pela média aritmética entre os valores da evapotranspiração dos minilímetros com solo e a dos lisímetros com substrato, previamente ajustados a um mesmo índice de área foliar médio, conforme DALMAGO, et al. (2001).

Os minilímetros de drenagem com cultivo em solo foram construídos com galões cilíndricos com capacidade para 25 litros de solo, conforme descrito por DALMAGO (2001). Em cada minilímetro foram instalados dois tensiômetros com cápsula porosa, a 0,10 m e a 0,20 m de profundidade, para o controle do potencial matricial da água no solo ( $\Psi_m$ ), obtido pela transformação da leitura matinal da coluna de mercúrio no manômetro. A instalação e o manejo dos tensiômetros foram realizados conforme HELDWEIN et al. (1995). A extração da água drenada da irrigação do dia anterior foi realizada utilizando-se a aplicação de vácuo parcial com bomba de sucção e extratores de cápsula porosa, instalados no fundo dos minilímetros com solo.

Os valores de evapotranspiração máxima ( $ET_m$ ), das plantas cultivadas nos minilímetros, foram obtidos pelo método do balanço hídrico do solo, sendo desconsiderada a precipitação. A equação simplificada do balanço hídrico do solo constou de:

$$ET_m = I - q - \Delta A \quad (01)$$

em que  $I$  é a quantidade de água irrigada,  $q$  é a densidade de fluxo vertical de água a 0,25 m de profundidade, que no caso é o volume de água da drenagem coletado e  $\Delta A$  é a variação de armazenamento de água na camada de solo explorado pelo sistema radicular.

A  $\Delta A$  foi obtida a partir da umidade volumétrica do solo ( $\theta$ , em  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ), calculada com a curva característica de água no solo determinada por CARON (1999) e utilizando-se o  $\Psi_m$  medido com os tensiômetros. Determinou-se a  $\Delta A$  para as camadas de solo de 0,0 a 0,15 m e de 0,15 a 0,25 m de profundidade, sendo a  $\Delta A$  diária obtida pela soma do valor de  $\Delta A$  das duas camadas de solo. A quantificação da irrigação das plantas nos minilímetros foi realizada conforme o valor do  $\Psi_m$  relacionado às condições meteorológicas do momento, conforme critérios adotados por DALSSASSO et al. (1997).

Para as plantas cultivadas em substrato utilizou-se a metodologia descrita por VALANDRO et al. (1999), mediante adaptações. Os lisímetros comportavam uma planta e constituíram-se de galões individuais de PVC com capacidade para 20 litros de substrato, sendo a água drenada coletada em reservatórios com capacidade de 5 litros. A  $ET_m$  foi determinada pela simples diferença entre o volume irrigado e o volume drenado. Dessa forma, a diferença correspondeu a reposição da água retirada do substrato pelas plantas no dia anterior. As fertirrigações dos lisímetros de substrato foram realizadas com a formulação de solução nutritiva proposta por ANDRIOLO & POERSCHKE (1997).

A partir da medida semanal da maior largura das folhas foi estimada a área do limbo de cada folha ( $A_{LF}$ ), através da equação matemática definida por TRENTIN et al. (2000) para folhas de plantas de abóbora italiana cultivada em estufa plástica. O cálculo do índice de área foliar diário ( $IAF_m$ ) foi realizado a partir dos valores diários de área foliar total de cada planta, os quais, para os dias sem medida foram estimados por interpolação ao longo do ciclo.

Para o outono de 2000, os dados meteorológicos do interior da estufa foram obtidos através de um termo-higrógrafo instalado a 1,5 m da superfície do solo em um abrigo meteorológico no centro da estufa plástica. A densidade de fluxo de radiação solar no interior da estufa foi estimada a partir dos registros obtidos na estação meteorológica, localizada 100 m a sul da estufa. Para o outono de 2001 os dados meteorológicos foram armazenados a intervalos de 10 minutos por um aquisitor eletrônico. Foram utilizados dois tubos solarímetros de marca  $\Delta$ -T, com um metro de comprimento, para a medida da densidade de fluxo de radiação solar incidente no interior da estufa plástica ( $R_{gi}$ , em  $\text{W}.\text{m}^{-2}$ ). Os mesmos foram orientados no sentido norte-sul, distanciados 4,0 m um do outro e instalados a 2,5 m de altura do solo na parte central da estufa plástica. Para a determinação da temperatura ( $T_{ai}$ , em  $^{\circ}\text{C}$ ), da umidade relativa ( $UR_i$ , em %) e do déficit de saturação do ar ( $D_i$ , em hPa), foram instalados dois sensores Pt-100 de resistência elétrica, formando um par psicrométrico não aspirado alojado num abrigo meteorológico a 1,5 m de altura do solo no centro da estufa plástica. Para quantificar a evaporação no interior da estufa, nos dois experimentos, foram utilizados quatro minitanques ( $Ev_{pi}$ , em mm) com formato circular ( $\varnothing = 0,278$  m e  $h = 0,353$  m) e dois

evaporímetros de Piche (*Evphi*, em mm), ficando as suas superfícies de evaporação a 1,5 m do solo e expostas à radiação solar.

Os valores diários das variáveis meteorológicas externas foram obtidos na Estação Meteorológica Principal de Santa Maria, localizada 100 m a sul do local do experimento.

A partir dos dados obtidos no outono de 2001, foram obtidos modelos de regressão, simples e múltiplos, para estimativa da evapotranspiração máxima diária da cultura da abóbora italiana com a utilização de um software específico. Considerou-se, para isso, a evapotranspiração máxima (*ETm*), a evapotranspiração máxima por unidade de índice de área foliar (*ETmf*) e a evapotranspiração máxima por unidade da raiz quadrada do índice de área foliar (*ETmrf*) e suas relações com as variáveis fenométricas e meteorológicas.

Os modelos foram selecionados segundo os seus coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e a significância dos seus coeficientes angulares pelo teste t a 5% de probabilidade de erro. Os modelos gerados com dados de 2001 foram testados com dados de 2000. Para isso realizou-se a estimativa da *ETm* de 2000, cujos valores foram comparados e avaliados com os valores de *ETm* medidos em 2000.

O desempenho dos modelos foi avaliado segundo os índices propostos na literatura por WILLMOTT (1982), WILLMOTT (1985) e CAMARGO & SENTELHAS (1997). Para melhor entendimento da descrição dos parâmetros de avaliação do desempenho dos modelos foi tomada a letra T para representar o número total de dados e a notação *Ot* e *Et* para os valores de evapotranspiração máxima (*ETm*) observados e estimados, respectivamente. Os valores de *ETm* foram obtidos a cada dia *t*, sendo  $t = 1, 2, \dots, T$ . Os parâmetros de avaliação estão definidos no conjunto de equações apresentadas abaixo.

a) Diferença média normalizada

$$DMN = (\bar{O} - \bar{E}) \div \bar{O} \quad (2)$$

em que:  $\bar{O}$  é a média aritmética dos valores de *ETm* observados e  $\bar{E}$  é a média aritmética dos valores de *ETm* estimados. Este parâmetro adimensional foi utilizado para a obtenção da tendência do comportamento dos valores de *ETm* estimados versus os observados. O ideal é que seus valores sejam próximos de zero.

b) Raiz quadrada do quadrado médio do erro sistemático (RMSEs) e não sistemático (RMSEn)

$$RMSEs = \left( \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Ot - \hat{E}t)^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$RMSEn = \left( \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\hat{E}t - Et)^2 \right)^{0.5} \quad (4)$$

em que:

$$\hat{E}t = a + bOt \quad (5)$$

sendo *a* e *b* os coeficientes linear e angular da equação de regressão linear obtidos por:

$$a = \bar{E} - b\bar{O} \quad (6)$$

$$b = \left[ \sum_{t=1}^T (Ot - \bar{O})(Et - \bar{E}) \right] \div \left[ \sum_{t=1}^T (Ot - \bar{O})^2 \right] \quad (7)$$

O cálculo de verificação consta de:  $RMSE^2 = RMSEs^2 + RMSEn^2$ .

Segundo WILLMOTT (1982), para um bom modelo, a porção não sistemática do erro deve ser muito maior do que a sistemática. Quanto maior o erro sistemático tanto mais pobre o modelo.

d) Coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação ou índice de precisão (*r*), foi utilizado como indicativo do grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, ao erro aleatório.

e) Coeficiente de concordância ou exatidão

Também denominado de índice de WILLMOTT (1985) foi utilizado para quantificar matematicamente o afastamento dos valores de *ETm* estimados em relação aos observados. O índice de concordância é representado pela letra “d” e seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a um para concordância perfeita entre observações e estimativas.

f) Índice de confiança

$$c = r * d \quad (8)$$

O índice de confiança “c”, que reúne as indicações dos coeficientes “r” e “d” (CAMARGO & SENTELHAS, 1997) e os critérios de interpretação são apresentados na Tabela 1.

## Resultados e discussão

Nas Tabelas 2, 3 e 4 são apresentados os modelos obtidos no outono de 2001, com variáveis internas e externas à estufa plástica, segundo avaliação realizada com base nos coeficientes de determinação ( $r^2$ ) do próprio modelo. Também são apresentados valores da diferença média normalizada (DMN), da raiz quadrada do quadrado médio do erro sistemático e não sistemático (RMSEs e RMSEn, respectivamente), os coeficientes linear e angular e de determinação da regressão de comparação entre os valores de *ETm* medidos e estimados para o outono de 2000 e os índices de precisão (r), de concordância (d) e de confiança (c).

A observação dos modelos gerados permitiu constatar que houve diferença entre modelos no que diz respeito ao local de obtenção das variáveis independentes. As variáveis meteorológicas internas proporcionaram a obtenção de um número maior de modelos. Para esses modelos os coeficientes de determinação foram mais elevados do que aqueles obtidos com variáveis medidas externamente à estufa. Além disso, mesmo os modelos obtidos a partir de variáveis internas com  $r^2$  menores que 0,7 estimaram a *ETm* com menor dispersão se comparados aos modelos obtidos com variáveis externas, o que pode ser observado através da comparação entre os coeficientes de determinação obtidos no teste e pela

comparação entre os índices r, d e c, apresentados nas Tabelas 3 e 4. Mesmo assim, a utilização de variáveis externas tem como vantagem a possibilidade de estimativa da *ETm* no interior da estufa quando da ausência ou falha de registro das variáveis meteorológicas em seu interior.

Com exceção do modelo 8.e, em todos os modelos obtidos foi incluída uma variável fenométrica, sendo essa adotada como variável independente ou como divisor da variável dependente ( $ETm IAFm^{0.5}$  ou  $ETm nFl^{0.5}$ ). A utilização direta do *IAFm* e do número de folhas (*nFl*) como variáveis independentes, não permitiu a obtenção de um número expressivo de modelos com precisão aceitável. A partir da transformação raiz quadrada dessas variáveis, ( $IAFm^{0.5}$  e  $nFl^{0.5}$ , respectivamente), os modelos apresentaram maiores coeficientes de determinação e houve melhor ajuste entre os valores de *ETm* e as variáveis meteorológicas. Isso reforça a hipótese de que a duplicação do *IAFm* de uma área vegetada não implica na duplicação da sua *ETm*, principalmente se  $IAFm > 1$ , devido ao aumento da proporção de área foliar sombreada. Nessa lógica, pode-se inferir também que o incremento da *ETm* em função do incremento de *IAFm* tende a zero quando *IAFm* alcança valores em que a cobertura vegetal recobre totalmente a superfície do solo. Ao analisar os dados dos dois experimentos, observou-se também que os valores pequenos das variáveis fenométricas transformadas assumiram maior peso na estimativa da *ETm* frente aos valores do final do ciclo. Verificou-se ainda que essa transformação tornou possível a obtenção de modelos de regressão mais precisos e com menor dispersão entre valores medidos e estimados (modelos 1.e e 8.e, Figura 2). Esses resultados reforçam o observado por RIGHI (2000) e DALMAGO (2001), que utilizaram a *ETm* por unidade de área foliar de cada planta e por unidade de índice de área foliar, respectivamente. Pode-se inferir também, que os modelos de estimativa obtidos por RIGHI (2000) e DALMAGO (2001) possam ser melhorados se gerados com dados de *ETm* divididos pela raiz quadrada das variáveis fenométricas.

Os modelos denominados “mistos”, gerados com pelo menos uma variável independente obtida no interior e no exterior da estufa, são apresentados na Tabela 2. De acordo com a significância dos coeficientes dos modelos pelo teste t e valor dos respectivos coeficientes de determinação ( $r^2 \geq 0,70$ ), foram doze os melhores modelos selecionados. Uma vez que

**Tabela 1.** Intervalos de valores do índice “c” utilizados para a interpretação do desempenho dos modelos para estimativa da evapotranspiração máxima da abóbora italiana, em cultivo em estufa plástica no outono de 2000, em Santa Maria, RS.

Valor de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

**Tabela 2.** Modelos matemáticos gerados a partir de variáveis meteorológicas medidas do interior e do exterior da estufa e de variáveis fenométricas do interior da estufa plástica medidas no outono de 2001, valores dos testes e dos índices de desempenho dos mesmos na estimativa da evapotranspiração máxima (*ETm*) da cultura da abóbora italiana, num cultivo no outono de 2000, em Santa Maria, Rio Grande do Sul.

Mod	<i>ETm</i> =	Modelos de regressão*	<i>r</i> <sup>2</sup>	DMN	RMSE		Coeficiente		Índice		
					Sist.	Não Sist.	Lin.	Ang.	<i>r</i> <sup>2</sup> do teste	<i>r</i>	d
1.ie	$= -7,163797 - 0,781172 ETpen^2 + 4,854074 ETpen + 2,204909 IAFm^{0,5}$	0,86	0,116	0,199	0,695	-0,066	0,925	0,60	0,763	0,861	0,657
2.ie	$= IAFm^{0,5}(-1,120563 - 0,203634 ETpen^2 + 1,470504 ETpen + 0,112796 Rgi)$	0,85	-0,103	0,222	0,404	0,426	0,837	0,78	0,873	0,930	0,813
3.ie	$= -5,90142 - 0,640041 ETmth^2 + 4,086718 ETmth + 1,844264 IAFm^{0,5}$	0,85	0,104	0,217	0,496	0,075	0,849	0,71	0,833	0,909	0,757
4.ie	$= IAFm^{0,5}(-0,967347 - 0,162849 ETmth^2 + 1,390861 ETmth + 0,073292Rgi)$	0,84	-0,044	0,197	0,345	0,392	0,799	0,82	0,893	0,945	0,844
5.ie	$= -10,09029 - 0,997784 ETpen^2 + 5,812581 ETpen + 0,986455 nF^{0,5}$	0,81	0,035	0,095	0,738	0,079	0,916	0,56	0,741	0,844	0,626
6.ie	$= IAFm^{0,5}(-0,848544 - 0,353622 ETpen^2 + 2,71609 ETpen - 0,050153 Tmxi)$	0,81	0,029	0,241	0,458	0,360	0,746	0,69	0,823	0,909	0,748
7.ie	$= IAFm^{0,5}(-1,242484 - 0,019059 Rne^2 + 0,480648 Rne + 0,085896 Rgi)$	0,81	0,163	0,401	0,404	0,269	0,668	0,70	0,824	0,877	0,723
8.ie	$= IAFm^{0,5}(-1,114023 - 0,250805 ETpen^2 + 1,746969 ETpen + 1,740845Evphi)$	0,80	0,021	0,259	0,392	0,415	0,720	0,74	0,849	0,918	0,779
9.ie	$= -6,566461 - 0,074425 Rne^2 + 1,468458 Rne + 1,724525 IAFm^{0,5}$	0,79	0,478	0,833	0,758	-0,200	0,646	0,38	0,608	0,662	0,403
10.ie	$= -7,943734 - 0,766734 ETmth^2 + 4,642243 ETmth + 0,793498 nF^{0,5}$	0,79	0,014	0,168	0,509	0,268	0,819	0,68	0,817	0,907	0,741
11.ie	$= IAFm^{0,5}(-1,280557 - 0,050327 Evphi^2 + 0,554261 Evphi + 0,073593 Tmxe)$	0,76	0,008	0,188	0,378	0,310	0,798	0,79	0,879	0,940	0,826
12.ie	$= IAFm^{0,5}(-3,014638 - 0,0074 Tame^2 + 0,333971 Tame + 4,876968 Evphi)$	0,71	0,103	0,394	0,380	0,462	0,609	0,68	0,816	0,875	0,714

\*Todos os coeficientes angulares são significativos pelo teste t a 5% de probabilidade de erro; em que: *ETpen* e *ETmth* = evapotranspiração de referência (mm.dia<sup>-1</sup>) calculadas pelos métodos de Penman e Penman-Monteith, respectivamente; *Rgi* = radiação global incidente no interior da estufa (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>); *Rne* = saldo de radiação externo (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>); *nF* = média do número de folhas por planta; *Tmxi* = temperatura máxima do ar no interior da estufa (°C); *Evphi* e *Evphi* = evaporação de água no tanque reduzido e no evaporímetro de Piche, expostos ao sol no interior da estufa (mm); *Tmxe* e *Tame* = temperaturas máxima e média diária no exterior da estufa (°C).

**Tabela 3:** Modelos matemáticos obtidos a partir de variáveis meteorológicas do exterior da estufa e de variáveis fenométricas do interior da estufa plástica medidas no outono de 2001, valores dos testes e dos índices de desempenho dos mesmos na estimativa da evapotranspiração máxima ( $ETm$ ) da cultura da abóbora italiana, num cultivo no outono de 2000, em Santa Maria, Rio Grande do Sul.

Mod	$ETm =$	Modelos de regressão*	$r^2$	DMN	RMSE		Coeficiente			Índice		
					Sist.	Não Sist.	Lin. (a)	Ang. (b)	$r^2$ do teste	r	d	c
1.e		$=IAFm^{0.5}(-1,089676 - 0,216406 ETpen^2 + 1,676926 ETpen + 0,058387insl)$	0,84	-0,047	0,173	0,387	0,348	0,829	0,79	0,879	0,940	0,827
2.e		$=IAFm^{0.5}(-0,254095 + 0,871079 ETmth^2)$	0,80	0,028	0,276	0,331	0,431	0,703	0,79	0,878	0,928	0,815
3.e		$=IAFm^{0.5}(-0,439126 + 0,293591 Rne^2)$	0,77	0,305	0,687	0,332	0,355	0,473	0,63	0,784	0,760	0,596
4.e		$=IAFm^{0.5}(-1,147204 - 0,001918 DeI5^2 + 0,116013 DeI5 + 0,065742 Tmxe)$	0,76	0,140	0,318	0,441	0,168	0,755	0,71	0,832	0,898	0,748
5.e		$=IAFm^{0.5}(0,366132 + 0,108324 DeI5^2)$	0,68	0,167	0,386	0,457	0,218	0,696	0,66	0,803	0,873	0,701
6.e		$=IAFm^{0.5}(-9,658487 - 0,026576 Tame^2 + 0,636564 Tame + 0,387314 Tmxe)$	0,64	-0,396	0,645	0,931	0,878	0,831	0,43	0,646	0,715	0,462
7.e		$=IAFm^{0.5}(-1,824954 + 0,132252 TeI5^2)$	0,64	0,089	0,306	0,469	0,330	0,705	0,65	0,799	0,887	0,708
8.e		$=1,866876 - 0,799349 ETpen^2 + 3,173751 ETpen + 0,195673 insl$	0,63	-0,164	0,516	0,659	1,114	0,470	0,30	0,593	0,738	0,438
9.e		$=IAFm^{0.5}(-1,988314 + 0,135094 Tmxe^2)$	0,63	0,058	0,336	0,496	0,471	0,648	0,59	0,758	0,864	0,654

\*Todos os coeficientes angulares são significativos pelo teste t a 5% de probabilidade de erro; em que:  $ETpen$  e  $ETmth$  = evapotranspiração (mm) calculada pelos métodos de Penman e Penman-Monteith, respectivamente;  $insl$  = número diário de horas de brilho solar;  $Rne$  = saldo de radiação externo à estufa plástica ( $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ );  $DeI5$  = déficit de pressão de saturação de vapor d'água (hPa) e  $Tame$ ,  $TeI5$  e  $Tmxe$  = temperatura média diária, a temperatura as 15 horas e a temperatura máxima do ar ( $^{\circ}C$ ), determinadas no exterior da estufa, respectivamente

**Tabela 4:** Modelos matemáticos obtidos a partir de variáveis meteorológicas e fenométricas do interior da estufa plástica medidas no outono de 2001, valores dos testes e dos índices de desempenho dos mesmos na estimativa da evapotranspiração máxima (*ETm*) da cultura da abóbora italiana, num cultivo no outono de 2000, em Santa Maria, Rio Grande do Sul.

Mod	<i>ETm</i> =	Modelos de regressão *	<i>r</i> <sup>2</sup>	DMN	RMSE			Coeficiente		Índice		
					Sist.	Não sist.	Lin. (a)	Ang. (b)	<i>r</i> <sup>2</sup> do teste	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>
1.i	$=IAFm^{0.5}(-4,08474 - 0,00544 Tmdi^2 + 0,321837 Tmxi + 0,192446 Rgi)$	0,82	-0,189	0,336	0,409	0,556	0,841	0,78	0,874	0,913	0,798	
2.i	$=IAFm^{0.5}(-3,86182 - 0,00381 Tmx^2 + 0,264665 Tmxi + 0,182852 Rgi)$	0,81	-0,206	0,362	0,397	0,589	0,838	0,79	0,879	0,911	0,800	
3.i	$=IAFm^{0.5}(-3,83361 - 0,00419 TiI5^2 + 0,278046 TiI5 + 0,176042 Rgi)$	0,81	-0,191	0,338	0,412	0,555	0,844	0,78	0,873	0,913	0,797	
4.i	$=IAFm^{0.5}(-3,75897 - 0,00555 TiI2^2 + 0,303986 TiI2 + 0,220428 Rgi)$	0,77	-0,227	0,399	0,458	0,645	0,824	0,74	0,846	0,887	0,751	
5.i	$=IAFm^{0.5}(-4,64096 - 0,00625 TiI5^2 + 0,375979 TiI5 + 0,048968 Evpi)$	0,75	0,029	0,351	0,349	0,552	0,626	0,73	0,846	0,899	0,761	
6.i	$=IAFm^{0.5}(-4,80496 - 0,00611 Tmx^2 + 0,374762 Tmxi + 0,271627 Evpi)$	0,75	0,026	0,361	0,352	0,576	0,614	0,72	0,839	0,894	0,750	
7.i	$=IAFm^{0.5}(-5,06083 - 0,00917 Tmdi^2 + 0,464887 Tmdi + 4,758641 Evpi)$	0,74	0,049	0,375	0,356	0,553	0,605	0,71	0,834	0,888	0,740	
8.i	$=IAFm^{0.5}(-3,52178 - 0,01235 Tmxi^2 + 0,45583 Tmxi + 5,62521 Evpi)$	0,73	-0,026	0,209	0,528	0,513	0,623	0,63	0,799	0,897	0,717	
9.i	$=IAFm^{0.5}(-3,31679 - 0,00575 TiI2^2 + 0,306362 TiI2 + 4,943984 Evpi)$	0,72	0,051	0,393	0,367	0,581	0,586	0,69	0,832	0,877	0,729	
10.i	$=IAFm^{0.5}(-7,73136 - 0,01423 Tmdi^2 + 0,700891 Tmdi + 0,392672 Evphi)$	0,71	-0,075	0,297	0,385	0,584	0,709	0,75	0,853	0,914	0,780	
11.i	$=IAFm^{0.5}(-5,99993 - 0,00814 TiI5^2 + 0,482143 TiI5 + 0,294344 Evphi)$	0,71	-0,066	0,302	0,357	0,589	0,698	0,77	0,866	0,919	0,795	
12.i	$=IAFm^{0.5}(-6,405067 - 0,008246 Tmxi^2 + 0,49595 Tmxi + 0,321735 Evphi)$	0,71	-0,078	0,313	0,374	0,616	0,693	0,75	0,854	0,912	0,780	
13.i	$=IAFm^{0.5}(-0,75772 - 0,06805 Evphi^2 + 0,716039 Evphi + 0,041961 Tmxi)$	0,70	-0,076	0,220	0,337	0,434	0,804	0,83	0,900	0,946	0,852	
14.i	$=IAFm^{0.5}(0,637256 + 0,398229 Evphi)$	0,57	-0,033	0,285	0,342	0,536	0,699	0,78	0,873	0,925	0,807	
15.i	$=IAFm^{0.5}(0,544946 + 5,340004 Evpi)$	0,67	0,092	0,393	0,366	0,485	0,607	0,69	0,827	0,881	0,729	

\*Todos os coeficientes angulares são significativos pelo teste *t* a 5% de probabilidade de erro; *Rgi* = radiação solar incidente no interior da estufa (MJ.m<sup>2</sup>.dia<sup>-1</sup>); *Evpi* e *Evphi* = evaporação de água medida, respectivamente, no tanque reduzido e no evaporímetro de Piche, ambos expostos ao sol no interior da estufa (mm); *Tmdi* = temperatura média do ar diurna no interior da estufa, obtida pela média das temperaturas horárias entre as 7 h e as 19 h (°C); *Tmxi* e *Tmxi* = respectivamente, temperatura máxima e mínima do ar no interior da estufa (°C); *TiI2* e *TiI5* = temperatura do ar registrada às 12 horas e às 15 horas no interior da estufa (°C), respectivamente.



para o teste dos modelos foi adotado como critério um valor máximo de 0,50 para os coeficientes lineares e um valor mínimo de 0,70 para os coeficientes angulares e de determinação da regressão entre  $ET_m$  observada e estimada, verificou-se que somente com os modelos 2.*ie*, 3.*ie*, 4.*ie*, 8.*ie* e 11.*ie* foram satisfeitos esses critérios. Observou-se também que oito dos doze modelos mistos selecionados têm a inclusão da variável evapotranspiração de referência, tanto determinada pelo método de Penman ( $ET_{pen}$ ) quanto de Penman-Monteith ( $ET_{mth}$ ), sendo os coeficientes de determinação desses modelos com  $ET_{pen}$  e  $ET_{mth}$  bastante similares. No entanto, tomando os modelos 1.*ie* e 3.*ie* como exemplo, no teste realizado com os dados do outono de 2000, observou-se que o modelo 1.*ie* apresentou grande dispersão dos valores de  $ET_m$  estimados em relação aos observados. Já o modelo 3.*ie* mostrou-se mais ajustado que o modelo 1.*ie*, conforme pode ser verificado através do coeficiente de determinação e dos índices r, d e c (Figura 1 e Tabela 2). Isso está de acordo com PEREIRA et al. (1997), que consideram a evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith a mais representativa para uso como evapotranspiração de referência na estimativa da  $ET_m$ .

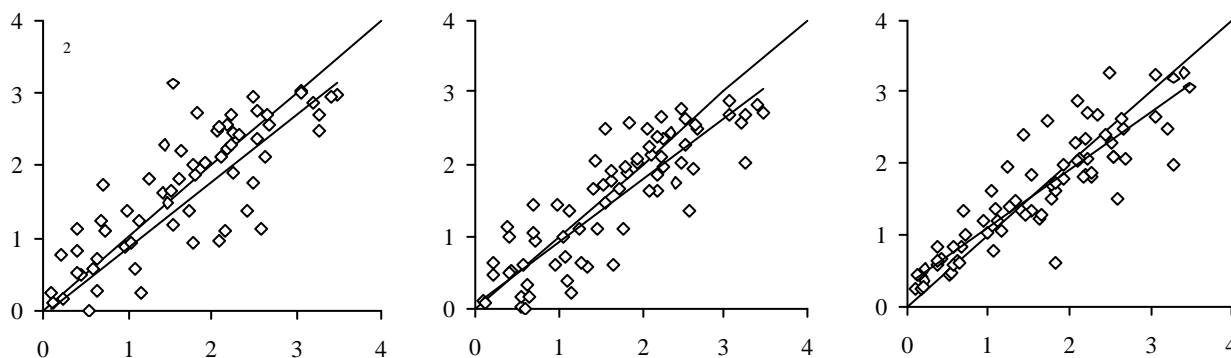
A partir de variáveis externas à estufa foram obtidos nove modelos com coeficientes de determinação acima de 0,60 (Tabela 3). Ao serem testados na estimativa dos valores de  $ET_m$  do outono de 2000, somente os resultados com os modelos 1.*e*, 2.*e* e 4.*e* apresentaram coeficientes lineares menores do que 0,5 e coeficientes angulares e de determinação acima de 0,70 (Figura 2). Verificou-se que, a exceção do modelo 4.*e*, os melhores modelos possuem de difícil obtenção. Dessa forma a sua utilização poderá

ficar restrita aos produtores cujas propriedades situam-se na área de abrangência das estações meteorológicas, onde as variáveis são obtidas criteriosamente por pessoas treinadas e processadas adequadamente para sua utilização.

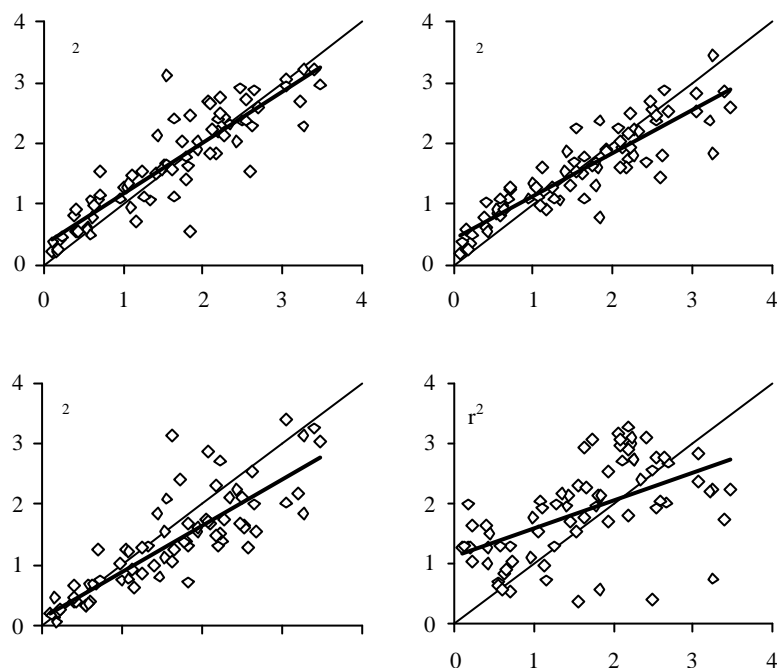
Houve baixa correlação entre a  $ET_m$  e as variáveis meteorológicas externas à estufa plástica, o que pode ser verificado pelos altos valores de RMSE e dos baixos valores do  $r^2$  do teste e do índice c. Isso também foi verificado por DALSSASSO (1997), CARON (1999) e VALANDRO (1999) e provavelmente está associado ao maior tempo que o ambiente interno fica vedado à livre renovação de ar na época de outono em relação à primavera.

Os melhores modelos gerados com variáveis observadas exclusivamente no interior da estufa plástica (Tabela 4), considerando os seus coeficientes de determinação, foram aqueles que envolveram a radiação solar incidente ( $R_{gi}$ ), seguidos dos modelos gerados com as medidas de evaporação d'água nos tanques de tamanho reduzido ( $Ev_{pi}$ ) e em evaporímetros de Piche instalados expostos ao sol ( $Ev_{phi}$ ). Nesses modelos, as variáveis citadas foram associadas aos dados de temperatura do ar e a raiz quadrada do índice de área foliar.

Observou-se que para esses modelos a temperatura do ar no interior da estufa teve um papel importante. Isso pode ser evidenciado pela sua contribuição significativa observada em 13 dos 15 modelos apresentados. Esses resultados confirmam os de DALSSASSO (1997), que para cultivo na época de outono, obteve os melhores modelos a partir de dados de temperatura do ar. Normalmente em cultivos outonais ocorre maior número de períodos em que as



**Figura 1:** Relação entre a evapotranspiração máxima ( $ET_m$ , em  $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) observada e a estimada com os modelos 1.*ie*, 3.*ie* e 11.*ie*, gerados a partir de variáveis independentes obtidas no interior e no exterior da estufa plástica, num cultivo de abóbora italiana no outono de 2001, e testados com dados do outono de 2000 em Santa Maria, RS.



**Figura 2:** Relação entre a evapotranspiração máxima ( $ET_m$ , em  $\text{mm.dia}^{-1}$ ) observada e a estimada com os modelos 1.e, 2.e, 4.e e 8.e, gerados a partir de variáveis independentes obtidas no exterior da estufa plástica, num cultivo de abóbora italiana no outono de 2001 e testados com dados obtidos no outono de 2000 em Santa Maria, RS.

condições meteorológicas são de tempo nublado e ou chuvoso. Essa condição meteorológica é normal para essa época do ano, ocorrendo diminuição do déficit de saturação do ar, bem como da radiação solar incidente. Sendo assim, durante o dia o ar mais quente do interior da estufa assume importante contribuição no aporte de energia para a evapotranspiração nas folhas e o vapor d'água liberado acaba condensando na face interna da cobertura plástica, que nessa condição está mais fria.

O teste dos modelos obtidos com variáveis determinadas no interior da estufa revelou que praticamente todos modelos apresentam coeficientes lineares com valores acima de 0,50. Esses valores indicam que os valores iniciais de  $ET_m$  foram superestimados, fato que deve ser observado para que sejam evitados excessos nas primeiras irrigações do cultivo e nos dias com baixa demanda atmosférica. Porém, ao ampliar-se o valor máximo admissível para os coeficientes lineares de 0,50 para 0,60, pode-se destacar os modelos 1.i, 2.i, 3.i e 13.i, por apresentarem coeficientes angulares maiores do que

0,80 e ainda a menor dispersão dos pontos em relação à reta 1:1 (Figura 3). Observou-se que o teste dos modelos 10.i, 11.i e 14.i apresentou coeficientes angulares e de determinação um pouco inferiores ( $\approx 0,70$ ). Dentre estes modelos destaca-se o modelo 14.i, gerado a partir da evaporação no evaporímetro de Piche exposto a radiação solar, que apresenta um coeficiente de determinação baixo na sua obtenção. No entanto, os coeficientes do teste e os índices  $r$ ,  $d$  e  $c$  permitem inferir que existe uma associação aceitável entre essa variável e a evapotranspiração máxima observada no interior de estufas plásticas, principalmente se forem considerados o índice de concordância ( $d$ ) e de confiança ( $c$ ).

Dentre todos os modelos obtidos, os modelos apresentados na Tabela 4 são os de menor complexidade e podem ser classificados como de fácil aplicabilidade. Com exceção dos modelos 1.i, 2.i, 3.i, 4.i, os quais incluem a radiação solar global ( $R_{gi}$ ), os demais modelos têm variáveis de

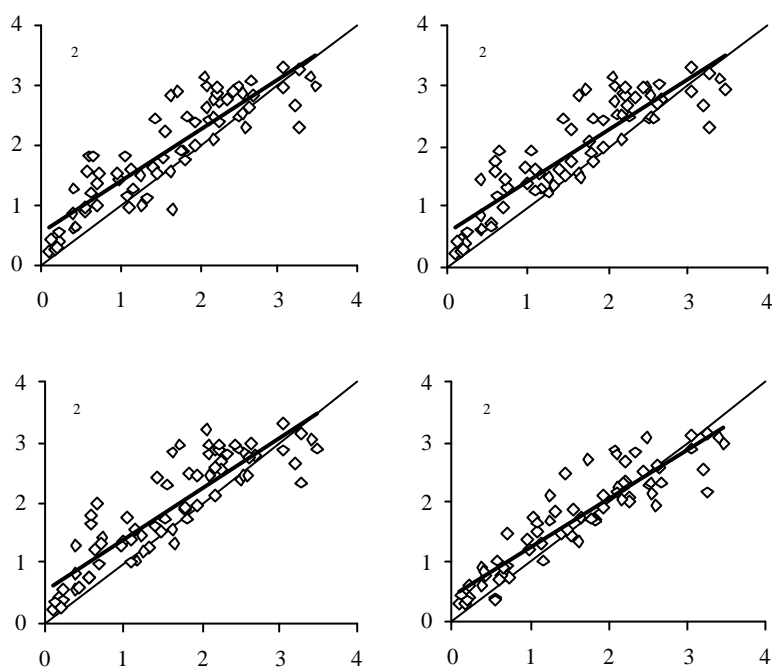
fácil obtenção, dispensando a necessidade de se dispor de aparelhos sofisticados e de manuseio mais complexo. Também apresentaram essas características os modelos mistos 11.ie e 12.ie (Tabela 2) e os modelos 6.e, 7.e e 9.e (Tabela 3).

Os resultados obtidos com os modelos 11.ie (Figura 1) e 13.i (Figura 3), confirmam a possibilidade de utilização do evaporímetro de Piche na estimativa da  $ET_m$  conforme verificado por HELDWEIN *et al.* (2001).

É importante considerar que os modelos anteriormente discutidos foram gerados, testados e avaliados quanto ao seu desempenho segundo os índices propostos na literatura. Ressalta-se porém, que para outras regiões e épocas, os modelos podem não apresentar o mesmo desempenho.

## Conclusões

- Os modelos matemáticos de estimativa da evapotranspiração máxima mais eficientes incluem



**Figura 3.** Relação entre a evapotranspiração máxima da abóbora italiana ( $ET_m$ , em  $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) observada e estimada pelos modelos 1*i*, 2*i*, 3*i* e 13*i*, gerados a partir de variáveis independentes determinadas no interior da estufa plástica num cultivo de outono em 2001, e testados com variáveis obtidas num cultivo de outono em 2000, em Santa Maria, RS.

a divisão dessa variável dependente pela raiz quadrada do índice de área foliar;

- O uso de variáveis ambientais obtidas no interior da estufa melhora a estimativa da evapotranspiração máxima em relação àquelas do ambiente externo.
- A evapotranspiração máxima pode ser estimada a partir de modelos matemáticos com variáveis obtidas com instrumentos de baixo custo e fácil leitura, como a evaporação medida em evaporímetro de Piche associada à temperatura máxima do ar.
- Os modelos com melhor desempenho têm como variáveis independentes a insolação e a evapotranspiração de referência obtidas no exterior da estufa plástica, a radiação solar e a evaporação d'água no interior da estufa plástica, bem como a temperatura do ar obtida nos dois ambientes.

#### Referências bibliográficas

ANDRIOLO, J.L.; POERSCHKE, P.R.C. **Cultivo de tomateiro em substrato**. Santa Maria: UFSM – Centro de Ciências Rurais, 1997. 12 p. (Informe Técnico, 2).

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

CARON, B.O. **Consumo d'água e coeficiente de cultura do meloeiro cultivado em estufa plástica**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1999. 71 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia/UFSM, 1999.

DALMAGO, G.A. **Evapotranspiração máxima e sua modelagem para a cultura do pimentão em estufa plástica**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2001. 165 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), curso de Pós-Graduação em Agronomia/UFSM, 2001.

DALMAGO, G.A. et al. Avaliação de métodos para a determinação da evapotranspiração máxima da cultura do pimentão em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 201-211, 2001.

DALSASSO, L.C.M. **Consumo de água e coeficiente de cultura do tomateiro (*Lycopersicon esculentum*, M.) e do pepineiro (*Cucumis sativus*, L.) cultivados em estufa plástica**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1997. 84 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), curso de Pós-Graduação em Agronomia/UFSM, 1997.

DALSASSO, L.C.M. et al. Consumo d'água do tomateiro tipo salada em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 61-67, 1997.

EMBRAPA **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa - Produção de Informações e Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 1999. 412 p.

FOLEGATTI, M.V. et al. Efeitos da cobertura plástica sobre os elementos meteorológicos e evapotranspiração da cultura de crisântemo em estufa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 155-163, 1997.

GARY, C.; JONES, J.W.; TCHAMITCHIAN, M. Crop modelling in horticulture: state of the art. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 74, p. 3-20, 1998.

- HELDWEIN, A.B. et al. **Tensiometria**. Santa Maria: UFSM/ Centro de Ciências Rurais, 1995. 7 p. (Informe Técnico, 6)
- HELDWEIN, A.B. et al. Utilização do evaporímetro de Piche exposto à radiação solar para estimar a evapotranspiração máxima do pimentão em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 213-217, 2001.
- JONES, H.G.; TARDIEU, F. Modelling water relations of horticultural crops: a review. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 74, p. 21-46, 1998.
- MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46 p.
- PEREIRA, A.R.; NOVA, N.A.V.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- RIGHI, E.Z. **Consumo hídrico do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado em estufa plástica e sua relação com variáveis meteorológicas em Santa Maria**, RS. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000. 83 p. (Dissertação de Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – ESALQ/USP.
- TRENTIN, G.. et al. Determinação não destrutiva da área foliar de plantas de abobrinha italiana. **In: JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA**, 15., 2000. Santa Maria: **MariaAnais...**, Santa Maria: CCR/UFSM, 2000. p. 386.
- VALANDRO, J. **Transpiração do tomateiro cultivado fora do solo em estufa plástica e sua relação com os elementos meteorológicos e parâmetros de crescimento**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1999. 67 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia/ UFSM, 1999.
- VALANDRO, J.; ANDRIOLO, J.L.; BURIOL, G.A. Dispositivo lisimétrico simples para determinar a transpiração das hortaliças cultivadas fora do solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 189-193, 1999.
- WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Lancaster, v. 63, p. 1309-1313, 1982.
- WILLMOTT, C.J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.