



Evapotranspiração do pimentão em estufa plástica estimada com dados meteorológicos externos, na primavera

Ivonete F. Tazzo¹, Arno B. Heldwein², Ivan C. Maldaner³,
Carina R. Pivetta², Luciano Streck⁴ & Evandro Z. Righi²

RESUMO

Neste trabalho o objetivo foi gerar e testar modelos matemáticos para a estimativa da evapotranspiração máxima para a cultura do pimentão, com variáveis meteorológicas medidas no exterior de estufa, na primavera, em Santa Maria, RS. Dois experimentos foram conduzidos, um no ano de 2005 e outro em 2006, visando à geração e aos testes dos modelos, respectivamente. A evapotranspiração foi medida em três lisímetros de drenagem e um lisímetro de balança. Foram feitas medições semanais da altura de plantas, do número de folhas e da área foliar. Os valores diários das variáveis meteorológicas externas foram obtidos na Estação Meteorológica Principal de Santa Maria, concluindo-se ser possível estimar, com precisão aceitável e em nível diário, a evapotranspiração máxima da cultura do pimentão em estufa, na primavera, com modelos matemáticos que utilizam variáveis medidas no exterior da estufa. O déficit de saturação do ar médio diário, a radiação solar global, o saldo de radiação e a evapotranspiração de referência medidos no exterior da estufa, foram as variáveis que apresentaram os melhores resultados na estimativa da evapotranspiração máxima da cultura do pimentão na primavera em estufa plástica.

Palavras-chave: *Capsicum annuum* L., modelos, radiação

Evapotranspiration cultivated in greenhouse of sweet pepper estimated with outside meteorology data in spring season

ABSTRACT

The objective of this work was to develop, test and validate mathematical models for maximum evapotranspiration estimations of a sweet pepper crop using meteorological variables measured outside the greenhouse, in Santa Maria, RS. Two experiments were conducted during spring of 2005 and 2006, for data collection, respectively for development and testing of models. The maximum evapotranspiration was measured using three drainage and one weighting lysimeter. Plant height, number of leaves and leaf area were weekly determined. The daily values of meteorological variables were obtained at the main Meteorological Station of Santa Maria. It is possible to estimate the maximum evapotranspiration of sweet pepper crop grown inside greenhouses during the spring with mathematical models that use various external measurements. Better estimations of maximum evapotranspiration of sweet pepper crop grown inside plastic greenhouse during the spring were obtained using meteorological variables, mean vapor pressure deficit, solar radiation, net radiation and reference evapotranspiration, measured outside the greenhouse. It was concluded that it is possible to estimate, with acceptable accuracy at daily level, the maximum crop evapotranspiration of sweet pepper grown in greenhouse in spring, using complex mathematical models that use meteorological variables measured outside the greenhouse.

Key words: *capsicum annuum* L., models, radiation

¹ Centro de Ciências Agroveterinárias/UDESC. E-mail: ivonetetazzo@yahoo.com.br

² Departamento de Fitotecnia/UFSM. Avenida Roraima nº 1000, Prédio 77, Cidade Universitária, Bairro Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria, RS. Fone: (55) 3220-8179. E-mail: heldweinab@smail.ufsm.br, urucapiveta@yahoo.com.br, ezrighi@yahoo.com.br

³ Instituto Federal Farroupilha, Campus de São Vicente do Sul. Rua 20 de Setembro, CEP 97420-000, São Vicente do Sul, RS. Fone: (55) 3257-1114. E-mail: ivan_maldaner@yahoo.com.br

⁴ Instituto Federal Catarinense – Sombrio. Rua das Rosas, s/n, Vila Nova, CEP 88965-000, Santa Rosa do Sul, SC. E-mail: streckl@gmail.com

INTRODUÇÃO

O pimentão está entre as dez hortaliças mais consumidas no Brasil e no mundo. Estima-se que são cultivados 13.000 ha de pimentão no Brasil dentre os quais 1.000 ha são em cultivo protegido. No interior desses ambientes ocorrem alterações das variáveis meteorológicas devido à cobertura plástica (Heldwein et al., 2001; Cunha & Escobedo, 2003). Em virtude deste fato, nota-se a necessidade de determinar parâmetros adequados para a irrigação dos cultivos nesses ambientes e, concomitantemente, evitar o excesso de água no solo para não criar condições favoráveis ao aparecimento de doenças, como é o caso da podridão do colo, especialmente no caso do pimentão, que exige em torno de 80% de água útil no solo ao longo do ciclo (Filgueira, 2003).

Uma das maneiras de se determinar a quantidade correta de irrigação em um cultivo é através do conhecimento da evapotranspiração máxima da cultura (ET_m). Essa variável básica da irrigação depende dos elementos meteorológicos, da cultura e de parâmetros de solo, podendo ser medida diretamente (lisímetros ou evapotranspirômetros) ou indiretamente (modelos matemáticos) (Chaves et al., 2005). Essa informação possibilita economia para o produtor uma vez que a maximização no rendimento das espécies vegetais depende, dentre outros fatores, do dimensionamento do sistema de irrigação e do conhecimento da demanda hídrica da cultura (Chaves et al., 2005).

Para estimar a necessidade de água da cultura no interior da estufa pode-se fazer uso de modelos matemáticos de regressão que utilizem variáveis meteorológicas medidas no exterior da estufa (Valandro et al., 1999) o que seria possível com a utilização de uma estação meteorológica automática, com abrangência e representatividade da localidade, para a obtenção dos dados meteorológicos. Tal fato poderia reduzir custos e melhorar o aproveitamento da água e a qualidade dos frutos oferecidos, ainda mais se considerando que a maioria das estufas da região Sul do Brasil não dispõe de sensores para medir as variáveis meteorológicas no seu interior.

Para a região de Santa Maria verificou-se uma relação entre o consumo d'água e a radiação solar incidente, medida no ambiente externo, para o cultivo do tomateiro na primavera, tanto no cultivo em solo como no cultivo em substrato no interior da estufa (Valandro et al., 1999). Dalmago et al. (2006) também verificaram que o saldo de radiação solar medido no exterior da estufa foi a variável meteorológica que apresentou maior relação com a evapotranspiração máxima do pimentão cultivado em estufa plástica no outono. Para a abóbora italiana cultivada no outono também em estufa plástica, os melhores modelos incluem a evapotranspiração de referência e o saldo de radiação medido no ambiente externo (Heldwein et al., 2004).

Pivetta et al. (2010) verificaram a existência de alta relação entre a evapotranspiração máxima do pimentão e o déficit de saturação do ar e geraram modelos utilizando o Evaporímetro de Piche, além de variáveis meteorológicas obtidas no interior da estufa plástica, porém para a cultura do pimentão cultivado na primavera na região de Santa Maria, RS, não existem modelos gerados e testados utilizando-se somente variáveis medidas no exterior da estufa plástica. A obtenção dessas variáveis

nem sempre é possível, devido ao custo dos equipamentos e à falta de treinamento dos produtores. Modelos gerados com variáveis meteorológicas obtidas no exterior da estufa plástica, especialmente de uma estação meteorológica padrão, têm maior viabilidade prática por tornar esses modelos regionais e permitirem sua extrapolação para outras estufas.

No presente trabalho também se ampliam o espectro de modelos e o período do ano de sua utilização em relação ao trabalho desenvolvido por Dalmago et al. (2006), além de incluir o teste dos modelos gerados. Além disso, o atual trabalho apresenta modelos gerados para a estação de cultivo da primavera o que, em geral, resulta em coeficientes diferentes daqueles gerados para a estação de outono (Dalsasso 1997; Valandro et al., 1999), visto que na primavera a disponibilidade de radiação solar, o saldo de radiação, a temperatura do ar e o déficit de saturação do ar são maiores quando a planta se apresenta em pleno desenvolvimento vegetativo (metade final do ciclo) enquanto no período de outono essas variáveis são maiores na metade inicial do ciclo e, portanto, apresentam variação oposta ao longo do ciclo em relação à maior demanda hídrica da cultura, em função do seu menor índice de área foliar no outono. Por esta razão, o objetivo do trabalho foi gerar e testar modelos matemáticos para a estimativa da evapotranspiração máxima para a cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.), com variáveis meteorológicas medidas no exterior de estufa, na primavera, em Santa Maria, RS.

MATERIAL E MÉTODOS

Dois experimentos foram realizados em estufa com cobertura plástica (240 m²), em Santa Maria, RS (latitude: 29°42' S; longitude: 53°48' W; altitude: 95 m), nos períodos de 09/08 a 18/12/2005 e de 13/09 a 7/12/2006. O clima da região, conforme classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido com verões quentes e sem estação seca definida (Heldwein et al., 2009). O solo pertence à unidade de Mapeamento São Pedro, classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006). A estufa estava orientada na direção Norte-Sul, coberta com filme de plástico transparente de polietileno de baixa densidade (PEBD) com espessura de 150 mm. A abertura e o fechamento das portas e das cortinas laterais foram realizados conforme condição ambiental do dia. Nos dias com temperaturas mais elevadas a abertura foi realizada em torno das 6 h e 30 min e seu fechamento antes do por do sol, em torno das 20 h.

A cultura foi implantada em fileiras com espaçamento de 1,0 x 0,3 m e a sustentação das plantas foi feita com fitas de ráfia, enroladas verticalmente na haste principal. As plantas foram conduzidas com uma haste principal e as hastes laterais foram podadas após a primeira bifurcação permanecendo com, no mínimo, sete folhas. Ainda foram desbrotados os ramos provenientes das axilas foliares.

A evapotranspiração máxima (ET_m; mm) do cultivo foi determinada por meio de três lisímetros de drenagem com substrato com 5 plantas em cada um, conforme metodologia descrita por Valandro et al. (1999) e a ET_m calculada pela diferença entre o volume de água fornecido e o drenado. Também foi utilizado um lisímetro de drenagem com substrato

semelhante, contendo 2 plantas de pimentão colocado sobre uma balança eletrônica de bancada, com capacidade de 50 kg e resolução de 0,005 kg, caso em que a ETm foi quantificada pela diferença de massa medida com a balança entre as leituras realizadas no dia em questão e no dia subsequente.

Semanalmente foram medidos, com uma régua graduada, o comprimento de todas as folhas (C; cm) e a altura da planta (AP; cm) e o número de folhas (NF), em duas plantas por lisímetro de substrato e nas plantas do lisímetro de balança. A área de cada folha (AF; cm²) foi determinada pela equação Dalmago (2001):

$$AF = 0,46432813 * C^{1,837927} \quad (1)$$

Com área foliar total de cada planta (AFt) calculou-se o índice de área foliar (IAF) conforme a Eq. (2):

$$IAF = (AFt \times 0,0001 / Ef \times Ep) \quad (2)$$

em que:

IAF- índice de área foliar

Ef - espaçamento entre fileiras, m

Ep - espaçamento entre plantas, m

Para os demais dias do intervalo o IAF foi interpolado em função dos dias após o transplante (DAT).

Os valores diários das variáveis meteorológicas externas, como t_m , t_{15} , t_{\min} e t_{\max} (temperatura do ar média, das 15 h, mínima e máxima diária, (°C); respectivamente), n (insolação), d (déficit de saturação do ar médio (hPa)), UR_m , UR_{15} , UR_{21} (umidade relativa do ar média diária, das 15 e 21 h (%)), foram obtidos na Estação Meteorológica Principal de Santa Maria, localizada 100 m ao sul do local do experimento. A densidade de fluxo de radiação solar global no exterior da estufa (Rg) foi estimada a partir de dados de insolação registrados na estação meteorológica, através da equação de Ångström-Prezcott, com os coeficientes mensais ajustados para Santa Maria (Estefanel et al., 1990). O saldo de radiação externo à estufa (Rn) foi calculado com a equação de Brunt-Penman com parâmetros apresentados por Berlatto & Molion (1991), utilizando um albedo de 0,23. Calculou-se a evapotranspiração de referência (ETo) pelo método de Penman-Monteith, conforme Pereira et al. (1997), para as condições meteorológicas externas.

Os modelos de regressão para a estimativa da ETm (variável dependente) foram gerados utilizando-se o banco de dados experimentais obtidos na primavera de 2005. As variáveis independentes foram: t_m , t_{15} , t_{\min} , t_{\max} , n, d, UR_m , UR_{15} , UR_{21} , Rg, Rn, ETo, IAF, AP e NF. Em alguns modelos as variáveis IAF, NF e AP foram utilizadas como divisores da ETm na forma de valores transformados pela extração da raiz quadrada (ETm IAF^{0.5}, ETm NF^{0.5} e ETm AP^{0.5}, respectivamente), por apresentarem o melhor desempenho na regressão múltipla.

Os modelos de estimativa da ETm selecionados em 2005, foram testados com os dados experimentais obtidos na primavera de 2006. A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada com os valores das estatísticas: raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE), coeficientes de determinação (R²) e de confiança (c). Para a interpretação, lançou-se mão dos

critérios de desempenho (D) propostos por Camargo & Sentelhas (1997). Também foram testados os modelos publicados por Dalmago et al. (2006) para o outono, com os dados observados de ETm na primavera de 2006.

No total, foram encontrados 266 modelos para a estimativa da ETm do pimentão na primavera de 2005, selecionados conforme seus coeficientes de determinação (R²) e respectivos testes de avaliação realizados com os valores observados e estimados na primavera de 2006. Pela avaliação, 32 obtiveram desempenho ótimo, 186 muito bom, 46 bom, 2 mediano e somente 1 com desempenho sofrível, considerando-se o índice c, segundo Camargo & Sentelhas (1997). Devido à grande quantidade de modelos obtidos neste trabalho, foram selecionados para utilização e discussão apenas 25 dos modelos que obtiveram desempenho ótimo e muito bom (Tabela 1), tomando-se o cuidado de eliminar todos os modelos que, mesmo com a inclusão de uma variável adicional, não apresentaram melhora no desempenho e/ou apresentaram índice de confiança (c) maior ou igual a 0,75. Modelos com desempenho pior ou igual a muito bom ($c \leq 0,85$) só foram mantidos se as variáveis meteorológicas foram de mais fácil mensuração, preferencialmente valores de medida pontual de temperatura e/ou umidade do ar.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os 25 modelos selecionados apresentaram parâmetros angulares significativos pelo teste t ($p < 0,05$) e coeficiente de determinação na geração dos modelos (R²) maior do que 0,75; as respectivas estatísticas do teste são apresentadas na Tabela 1.

A maioria dos modelos utilizou a raiz quadrada do IAF como divisor da variável dependente (ETm IAF^{-0.5}) (modelos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 13, 14, 18, 19, 21 e 22), ou a raiz quadrada da AP como divisor da variável dependente (ETm AP^{-0.5}) (modelos 7, 8, 9 e 15) e apenas o modelo 20 utiliza a raiz quadrada do NF como divisor da variável dependente (ETm NF^{-0.5}). Os demais modelos (10, 11, 16, 17, 23, 24 e 25) utilizam apenas a ETm de forma direta, como variável dependente. Esses resultados demonstram que o IAF é a variável fenométrica mais apropriada a ser utilizada em modelos para a estimativa da ETm do pimentão. Além disso, infere-se que a estabilidade dos modelos está mais bem associada à relação da ETm com a raiz quadrada do índice de área foliar (IAF^{0.5}) do que a raiz quadrada da altura de plantas (AP^{0.5}) ou do número de folhas (NF^{0.5}), embora a utilização da relação ETm IAF^{-0.5} como variável dependente tenha resultado em modelos com menor coeficiente de determinação na sua geração (R²). Dalmago (2001) e Heldwein et al. (2004) obtiveram resultados semelhantes gerando modelos que estimaram melhor a ETm quando a utilizaram por unidade de AF, por IAF e pela raiz quadrada do IAF, respectivamente. Este fato foi observado principalmente com relação à aproximação dos dados à reta 1:1 gerada pela relação entre valores de ETm observados e estimados e os coeficientes linear e angular da equação de regressão de comparação. Segundo Heldwein et al. (2004) a provável razão é que a ETm não aumenta linearmente com o IAF, AP e NF, sobretudo quando o IAF > 1, em razão do sombreamento das folhas do interior do dossel de plantas.

Tabela 1. Modelos matemáticos obtidos a partir de variáveis meteorológicas medidas no exterior da estufa plástica, com dados experimentais da primavera de 2005 e valores das estatísticas dos testes dos modelos selecionados com melhor desempenho na estimativa da evapotranspiração máxima (ETm) da cultura do pimentão, utilizando-se dados experimentais obtidos na primavera de 2006

No.	Modelo de regressão*	R ^{2*}	R ²	RMSE	c	D
	Dados de 2005					
1	ETm = IAF ^{0,5} (-0,1465 + 0,4873ETo - 0,0315n)	0,76	0,88	0,19	0,89	0
2	ETm = IAF ^{0,5} (-0,0705 + 0,3842ETo)	0,74	0,89	0,20	0,89	0
3	ETm = IAF ^{0,5} (-0,035 + 0,0043AP + 0,0763d + 0,0383Rn)	0,78	0,88	0,21	0,88	0
4	ETm = IAF ^{0,5} (-0,2862 + 0,0518Rn + 0,0158t _{max} + 0,0619d)	0,78	0,89	0,21	0,88	0
5	ETm = IAF ^{0,5} (-0,0281 + 0,0802d + 0,0543Rn)	0,78	0,88	0,21	0,88	0
6	ETm = IAF ^{0,5} (-0,7700 + 0,0565t _m + 0,0421Rg)	0,75	0,87	0,20	0,88	0
7	ETm = AP ^{0,5} (-0,0349 + 0,0541AF - 0,0034Rg + 0,0638ETo)	0,88	0,88	0,20	0,88	0
8	ETm = AP ^{0,5} (-0,0286 + 0,0651AF - 0,0077Rn + 0,0638ETo)	0,88	0,88	0,20	0,88	0
9	ETm = AP ^{0,5} (-0,0713 + 0,0913ETo - 0,0082n)	0,86	0,87	0,19	0,88	0
10	ETm = -0,3363 + 0,6828IAF + 0,0786d + 0,0262Rn	0,92	0,86	0,21	0,87	0
11	ETm = -0,2987 + 0,7279IAF + 0,0808d + 0,0093Rg	0,92	0,86	0,21	0,87	0
12	ETm = IAF ^{0,5} (-0,0077 + 0,0060AP + 0,0786d + 0,0145Rg)	0,78	0,88	0,22	0,87	0
13	ETm = IAF ^{0,5} (0,0470 + 0,0917d + 0,0209Rg)	0,76	0,88	0,22	0,87	0
14	ETm = IAF ^{0,5} (-0,6890 + 0,0892Rn _e + 0,0456t _m)	0,75	0,86	0,20	0,87	0
15	ETm = AP ^{0,5} (-0,0250 + 0,0770IAF + 0,0092d + 0,0021Rg)	0,89	0,88	0,22	0,87	0
16	ETm = -0,2389 + 0,7606IAF + 0,0903d	0,92	0,85	0,22	0,86	0
17	ETm = -0,4010 + 0,6811IAF + 0,2978ETo	0,89	0,85	0,21	0,86	0
18	ETm = IAF ^{0,5} (-0,7024 + 0,0794Rn + 0,0387t _{max})	0,74	0,86	0,22	0,86	0
19	ETm = IAF ^{0,5} (-0,6597 + 0,0492t ₁₅ + 0,0284Rg)	0,73	0,87	0,23	0,86	0
20	ETm = NF ^{0,5} (0,0321 + 0,0011AP + 0,0075d + 0,0052Rn)	0,87	0,84	0,21	0,86	0
21	ETm = IAF ^{0,5} (-0,1179 + 0,0608t ₁₅ - 0,0064UR ₁₅)	0,70	0,84	0,27	0,83	MB
22	ETm = IAF ^{0,5} (0,0693 + 0,0581t _{max} - 0,0096UR ₁₅)	0,68	0,84	0,25	0,83	MB
23	ETm = 1,4006 + 0,0248AP + 0,0114UR ₂₁ - 0,0328UR _m	0,87	0,8	0,24	0,81	MB
24	ETm = -0,6516 + 0,9857IAF - 0,0317t _{min} + 0,0512t _{max}	0,87	0,77	0,26	0,78	MB
25	ETm = -0,9998 + 0,0244AP - 0,0318t _{min} + 0,0540t _{max}	0,85	0,74	0,27	0,76	MB

* Todos os coeficientes angulares dos modelos são significativos pelo teste t a 5% de probabilidade de erro; R^{2*} = coeficiente de determinação na geração do modelo; RMSE - raiz quadrada do quadrado médio do erro; R² - coeficiente de determinação da equação de regressão entre valores observados e estimados; c - coeficiente de confiança; IAF - índice de área foliar; NF - número de folhas; AP - altura de plantas, cm; IAF^{0,5}, AP^{0,5} e NF^{0,5} - raiz quadrada do IAF, da AP e do NF, respectivamente; Rg = radiação solar global incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); Rn = Saldo de radiação, MJ m⁻² dia⁻¹; n - insolação; ETo - evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹; d - déficit de saturação do ar médio, hPa; t_m, t₁₅, t_{min} e t_{max} - temperatura do ar média, das 15 h, mínima e máxima diária, °C, respectivamente; UR_m, UR₁₅, UR₂₁ - umidade relativa do ar média diária, das 9, 15 e 21 h (%), respectivamente

Com referência às variáveis meteorológicas, observa-se que a maioria dos modelos selecionados com desempenho ótimo utilizou uma variável relacionada à disponibilidade de energia (Rg, Rn ou n), com exceção apenas dos modelos 2, 16 e 17, que utilizaram somente a ETo e/ou d (Tabela 1). Os cinco modelos classificados como muito bons, utilizaram basicamente a umidade relativa e/ou a temperatura do ar como variáveis independentes.

Na maioria dos modelos em que foi utilizada, a variável ETo está associada à disponibilidade de energia. Heldwein et al. (2004) também obtiveram modelos que apresentaram bons desempenhos, utilizando essa mesma variável. No entanto, a ETo é uma variável mais complexa para ser determinada, por ser necessária a medição (ou estimação) de quatro diferentes elementos meteorológicos (Rn, t_m, d e velocidade do vento).

Dalmago (2001) verificou que, para o pimentão cultivado no outono, as variáveis externas ETo e Rn apresentaram os modelos com melhor desempenho para a estimativa da ETm dessa cultura e Heldwein et al. (2004) constataram que os modelos que apresentaram melhores desempenhos na estimativa da ETm da abóbora italiana utilizaram a ETo e a insolação medida no exterior da estufa. Novamente se verifica, nos modelos, a dependência da transpiração das plantas pela radiação solar e pelo déficit de saturação do ar (Righi et al., 2002; Heldwein et al., 2004; Dalmago et al., 2006; Valandro et

al., 2007), mesmo que essas variáveis tenham sido medidas no exterior da estufa.

Em condições de clima mediterrâneo a radiação solar foi considerada o melhor estimador da ETm em ambiente protegido (De Villèle, 1972), porém os resultados atuais indicam que o déficit de saturação do ar (ou a umidade relativa do ar) foi o segundo elemento meteorológico que influencia significativamente a evapotranspiração das culturas nesses ambientes (Baille et al., 1994; Righi et al., 2002; Dalmago et al., 2006), podendo superar, em precisão, a estimativa feita com a radiação solar, o que se verifica ao comparar o modelo 5 com o modelo 14 (Tabela 1).

Na Figura 1 são apresentadas as relações entre os valores estimados da ETm do pimentão utilizando-se os modelos 10 (d e Rn), 11 (d e Rg) e 16 (d) para o período de primavera e os modelos publicados por Dalmago et al. (2006) para o período de outono, com os valores medidos de ETm no experimento de 2006.

Pode-se verificar que o modelo 16 (Figura 1C), que possui apenas o déficit de saturação do ar como variável meteorológica, obteve um coeficiente de determinação (R²) de 0,85 e que a inclusão das variáveis meteorológicas Rne no modelo 10 (Figura 1A) e Rge no modelo 11 (Figura 1B) apresentaram pequeno aumento no coeficiente de determinação (R^{2*} = 0,86) na geração dos respectivos modelos. Este pequeno ganho em coeficiente de determinação pode ser explicado em

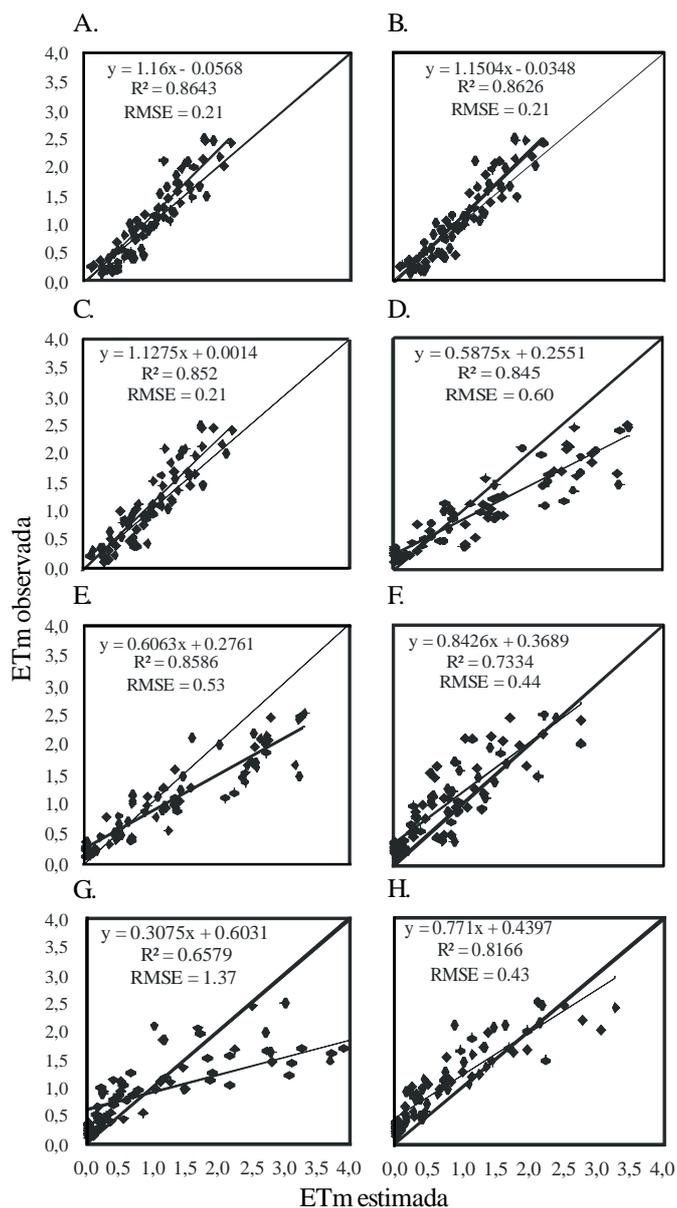


Figura 1. Relação entre a evapotranspiração máxima do pimentão (ETm; mm dia⁻¹) observada e estimada com os modelos: (A) 10: $ETm = -0,3363 + 0,6828 IAF + 0,0786 d + 0,0262 Rn$; (B) 1: $ETm = -0,2987 + 0,7279 IAF + 0,0808 d + 0,0093 Rg$; (C) 16: $ETm = -0,2389 + 0,7606 IAF + 0,0903 d$, gerados com os dados experimentais obtidos na primavera de 2005 e modelos gerados por Dalmago et al. (2006) para o outono, (D) evapotranspiração por unidade de área foliar (ETmf) $ETmf = -0,460 + 0,226 Rn$; (E) $ETmf = -0,454 + 0,124 Rg$; (F) $ETmf = + 1,527370 - 0,166842 t_m + 0,006470 t_m^2$; (G) $ETmf = 735,271311e^{-0,089003URm}$; (H) $ETmf = -0,205005 + 0,167219 d$. Todos os modelos foram testados com os dados experimentais na primavera

virtude do déficit de saturação do ar ser dependente da radiação solar global incidente e do saldo de radiação e que, nesta condição, ele representaria melhor as duas variáveis (Rg ou Rn). Nas Figuras 1D, 1E, 1F, 1G e 1H são apresentados os testes para os modelos obtidos por Dalmago et al. (2006) e se

verifica que os mesmos apresentam uma acurácia menor para a estimativa da ETm para o período da primavera que os modelos obtidos neste trabalho.

A temperatura do ar apresentou desempenho ótimo em apenas 5 modelos (modelos 4, 6, 14, 18 e 19) sendo que, em todos eles, está acompanhada da Rn ou Rg. De forma mais frequente, o mesmo pode ser verificado para a variável (d), resultado que confirma essa variável como estimador da ETm. A correlação do d com a ETm se justifica pela sua associação física com o gradiente de concentração de vapor do interior do estômato e para o ar adjacente à folha.

Todos os modelos expostos na Tabela 1 podem ser utilizados na estimativa da ETm do pimentão cultivado em estufa plástica em Santa Maria, RS. A escolha do modelo dependerá dos dados fenométricos e meteorológicos disponíveis ao agricultor. Neste sentido, os modelos apresentados na Tabela 1, apesar de terem desempenhos ótimos e muito bons e se considerando a praticidade na obtenção dos dados, o modelo 16 é o mais apropriado para a estimativa da ETm do pimentão, pois utiliza apenas o déficit de saturação médio do ar como variável meteorológica sendo necessário, para isto, apenas um termohigrógrafo ou um psicrômetro. Os demais modelos utilizam a ETo com ou sem a inclusão de uma variável que represente o aporte de energia, variáveis essas de maior dificuldade de determinação devido ao número de variáveis necessárias para sua obtenção, como é o caso da ETo (insolação, temperatura do ar média diária, velocidade do vento a 2 m de altura e umidade relativa média do ar) e ainda em razão dos aparelhos para obtenção das variáveis que representem o aporte de energia (Rg, Rn e n) serem mais caros e não estarem presentes em todos postos meteorológicos.

Quanto aos modelos classificados como muito bons, segundo o desempenho medido pelo índice c, embora apresentem desempenho inferior aos demais, possuem maior praticidade na sua aplicação operacional, uma vez que utilizam variáveis meteorológicas de maior facilidade de mensuração por parte dos usuários. Também o custo de obtenção desses dados é menor por ser necessário apenas um termômetro comum e/ou um termômetro de máxima e de mínima ou, ainda, um psicrômetro. Os modelos que utilizam a AP podem ser considerados de mais fácil aplicação, em razão da necessidade de medir apenas a altura das plantas com uma régua graduada e a leitura de um termômetro de máxima e um de mínima, como é o caso dos modelos 23 e 25. Da mesma forma, o modelo 20 foi o único com desempenho ótimo em que a variável fenométrica IAF, de obtenção mais trabalhosa, não se fez necessária.

CONCLUSÕES

1. É possível estimar a evapotranspiração máxima do pimentão cultivado sob estufas plásticas na primavera com modelos matemáticos que incluem variáveis externas.

2. O índice de área foliar é a variável fenométrica mais apropriada a ser utilizada em modelos para a estimativa da evapotranspiração máxima da cultura do pimentão cultivado em estufa plástica na primavera.

3. Os modelos matemáticos que incluem a divisão da evapotranspiração máxima pela raiz quadrada do índice de área foliar, apresentam ótimo desempenho quando testados, embora na sua geração nem sempre apresentem as melhores estatísticas.

4. O déficit de saturação do ar médio, a radiação solar global, o saldo de radiação e a evapotranspiração de referência obtidos externamente à estufa, apresentam os melhores resultados na estimativa da evapotranspiração máxima do pimentão cultivado no interior da estufa plástica.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de doutorado e de Pesquisa, concedida ao primeiro e ao segundo autor, respectivamente, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas bolsas de mestrado e doutorado concedidas aos demais autores.

LITERATURA CITADA

- Baille, M.; Baille, A.; Delmon, D. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.71, p.83-97, 1994.
- Berlato, M. A.; Molion, L. C. B. Evaporação e evapotranspiração. Porto Alegre: IPAGRO, 1991. 96p. Boletim Técnico
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, p.89-97, 1997.
- Chaves, S. W. P.; Azevedo, B. M. de; Medeiros, J. F. de; Bezerra, F. M. L.; Morais, N. B. de. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da pimenteira em lisímetro de drenagem. *Revista Ciência Agronômica*, v.36, p.262-267, 2005.
- Cunha, A. R.; Escobedo, J. F. Alterações micrometeorológicas causadas pela estufa plástica e seus efeitos no crescimento e produção da cultura de pimentão. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.11, p.15-26, 2003.
- Dalmago, G. A. Evapotranspiração máxima e coeficiente da cultura do pimentão em estufa plástica. Santa Maria: UFSM, 2001. 165p. Dissertação Mestrado
- Dalmago, G. A.; Heldwein, A. B.; Nied, A. H.; Grimm, E. L.; Pivetta, C. R. Evapotranspiração máxima da cultura do pimentão em estufa plástica em função da radiação solar, da temperatura, da umidade relativa e do déficit de saturação do ar. *Ciência Rural*, v.36, p.785-792, 2006.
- Dalsasso, L. C. Consumo d'água e coeficiente de cultura do tomateiro (*Lycopersicon esculentum*, M) e do pepino (*Cucumis sativus*, L.) cultivados em estufas plásticas. Santa Maria: UFSM, 1997. 84p. Dissertação Mestrado
- De Villèle, O. Besoins en eau des cultures sous serre: casai de conduite des arrosages en fonction de l'ensoleillement. *Acta Horticulturae*, v.350, p.123-129, 1972.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- Estefanel, V.; Schneider, F. M.; Moacir, A. B.; Buriol, G. A.; Heldwein, A. B. Insolação e radiação solar em Santa Maria, RS: I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir de dados de insolação. *Revista do Centro de Ciências Rurais*, v.20, p.203-218, 1990.
- Filgueira, A. R. F. Novo manual de olericultura. Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 2.ed., Viçosa: UFV. 2003. 412p.
- Heldwein, A. B.; Buriol, G. A.; Streck, N. A. O clima de Santa Maria. *Ciência e Ambiente*, v.38, p.43-58, 2009.
- Heldwein, A. B.; Nied, A. H.; Saggin, S. L.; Buriol, G. A.; Schneider, F. M. Evaporação d'água em estufas plásticas e sua relação com o ambiente externo: 2-Efeito da espécie cultivada e da época do ano nos valores obtidos com minitanques. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, p.43-49, 2001.
- Heldwein, A. B.; Streck, L.; Schneider, F. M.; Grimm, E. L.; Nied, A. H.; Tazzo, I. F. Modelos para a estimativa da evapotranspiração máxima da abóbora italiana em estufa plástica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.12, p.75-86, 2004.
- Pereira, A. R.; Villa-Nova, N. A.; Sediya, G. C. Evapo(trans)piração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- Pivetta, C. R.; Heldwein, A. B.; Maldaner, I. C.; Radons, S. Z.; Tazzo, I. F.; Lucas, D. D. Evapotranspiração máxima do pimentão cultivado em estufa plástica em função de variáveis fenométricas e meteorológicas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.768-775, 2010.
- Righi, E. Z.; Angelocci, L. R.; Buriol, G. A.; Heldwein, A. B. Transpiração do tomateiro em estufa plástica e suas relações com a radiação solar e o déficit de saturação. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, p.9-18, 2002.
- 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*, v.7, p.189-193, 1999.
- Valandro, J.; Buriol, G. A.; Andriolo, J. L.; Heldwein, A. B. Transpiração do tomateiro cultivado fora do solo em estufa plástica e sua relação com os elementos meteorológicos. *Revista Ciência Rural*, v.37, p.1593-1600, 2007.