

## Modelos de estimativa de elementos micrometeorológicos em ambiente protegido

Jéfferson de Oliveira Costa<sup>1</sup>, Alex Nunes de Almeida<sup>1</sup>, Rubens Duarte Coelho<sup>1</sup>,  
Marcos Vinicius Folegatti<sup>1</sup>, Jefferson Vieira José<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, SP, jeffersontaio@usp.br, alexn@usp.br, rdcoelho@usp.br, mvfolega@usp.br, jfvieira@usp.br

**Resumo:** Ambientes protegidos têm sido estudados, sobretudo os que utilizam cobertura plástica, tanto para fins comerciais quanto para fins de pesquisa. Nestes ambientes o manejo da irrigação muitas vezes depende de elementos micrometeorológicos internos, que muitas vezes não estão à disposição dos usuários. Uma das soluções para esse tipo de problema seria a utilização de modelos de estimativa desses elementos utilizando dados medidos no exterior da estufa. Neste trabalho objetivou-se desenvolver modelos para a estimativa de elementos micrometeorológicos em condições de ambiente protegido, para a região de Piracicaba-SP. Os dados utilizados (temperatura, umidade relativa e radiação solar global) foram obtidos no posto meteorológico da ESALQ/USP e em estação instalada dentro de ambiente protegido da mesma instituição. A estimativa de evapotranspiração foi calculada pelo método de Penman-Monteith preconizado pela FAO-56 por meio do software REF-ET. Foram utilizados indicadores estatísticos para as comparações entre as condições e conclui-se que os modelos possibilitam a estimativa de elementos micrometeorológicos para condições de ambiente protegido em função das condições de campo.

**Palavras-chave:** agrometeorologia, evapotranspiração de referência, Penman-Monteith.

## Estimation models of micrometeorological elements in a protected environment

**Abstract:** Protected environments have been studied, especially those using plastic sheeting, for both commercial and research purposes. In these environments, the irrigation management frequently depends on internal micrometeorological elements, which are often not available to users. One solution to this problem would be the utilization of models to estimate these elements using data measured outside the greenhouse. This work aimed to develop models for estimating micrometeorological elements in greenhouse conditions, for the region of Piracicaba-SP. The data used (temperature, relative humidity and solar radiation) were obtained from the meteorological station of the ESALQ/USP and from a station installed within a protected the environment of the same institution. The estimate of evapotranspiration was calculated using the Penman-Monteith method, recommended by FAO-56 through the program REF-ET. Statistical indicators were used for the comparisons between conditions and it is concluded that the models allow the estimation of micrometeorological elements for protected environments according to the field conditions.

**Keywords:** agrometeorology, reference evapotranspiration, Penman-Monteith.

## Introdução

Os estudos sobre ambientes protegidos com cobertura de plástico têm aumentado em diversas localidades do Brasil, tanto para fins de pesquisa quanto para fins comerciais, com o intuito de conhecer as diferentes estruturas utilizadas, as principais pragas e doenças que ocorrem nesses ambientes e as alterações ocorridas com relação aos elementos micrometeorológicos (Abdel-Ghany & Helal, 2011; Kittas & Bartzanas, 2007).

Na determinação da quantidade correta de água para a irrigação de cultivos nestes ambientes e os elementos micrometeorológicos são de extrema importância (Holcman et al., 2015). A quantidade de água que uma cultura necessita no interior de ambientes protegidos pode ser estimada por meios de modelos de regressão que utilizem variáveis micrometeorológicas medidas no exterior destes ambientes, o que seria possível com a utilização de uma estação meteorológica automática, com abrangência e representatividade da localidade, para a obtenção dos dados micrometeorológicos. Tal fato poderia reduzir custos e melhorar o aproveitamento da água e a qualidade dos produtos oferecidos (Tazzo et al., 2012).

A utilização de modelos de estimativa dos elementos micrometeorológicos, como a evapotranspiração de referência, em condição de ambiente protegido em função da condição de campo, pode ser uma forma viável de obtenção destes elementos.

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 (Dalmago et al., 2006). Os mesmos autores 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.

Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver modelos para a estimativa de elementos micrometeorológicos em condições de ambiente protegido, para a região de Piracicaba-SP.

## Material e Métodos

Os dados diários micrometeorológicos que representaram a condição de campo foram obtidos no posto meteorológico da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em Piracicaba, no Estado de São Paulo, localizado na latitude  $-22^{\circ}$

$40^{\circ} 30''$  S e longitude  $47^{\circ} 38' 00''$  W, altitude de 546 metros; e a uma distância de 600 metros da estação meteorológica instalada no centro casa de vegetação no qual representou a condição de ambiente protegido (Figura 1).

O clima da região de Piracicaba-SP, conforme classificação de Köppen é do tipo Cwa, isto é, subtropical úmido, caracterizado por chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média no mês mais quente é superior a  $22^{\circ}\text{C}$  e a do mês mais frio, inferior a  $18^{\circ}\text{C}$ .

O ambiente protegido é constituído de três vãos conjugados, com área total de aproximadamente  $480\text{ m}^2$  e pé-direito de 3,5 m, tendo cobertura plástica transparente e laterais fechadas com tela tipo "sombrite" preta com 30% de interceptação da radiação global. Possui cobertura de filme plástico polietileno transparente de 150 micras e laterais fechadas com 70 a 80%, em média, de interceptação da radiação solar, podendo este percentual atingir 95%.

Os sensores meteorológicos instalados no interior do ambiente protegido mediram a radiação solar global

A.



B.



**Figura 1.** Vista geral da estação meteorológica no ambiente protegido (A) e em campo (B)

( $W m^{-2}$ ), por meio de piranômetro de silício (LI200X - Licor), a temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ) e a umidade relativa do ar (%), por meio de sensor Vaissala (HMP45C - Vaissala).

Os dados das duas estações foram obtidos no período de 01 de novembro de 2013 a 31 de outubro de 2014. No desenvolvimento dos modelos foram utilizados os seguintes elementos micrometeorológicos: temperatura (máxima, mínima e média), umidade relativa média, radiação solar global e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). A ET<sub>o</sub> ( $mm d^{-1}$ ) foi calculada pelo método de Penman-Monteith preconizado pela FAO-56 por meio do software REF-ET (Allen, 2013)

Os elementos micrometeorológicos do ambiente protegido foram correlacionados com os de campo por meio de regressão linear simples. Para avaliar a compatibilidade média entre estes elementos dos dois ambientes aplicou-se o teste T pareado. Posteriormente a ET<sub>o</sub> do ambiente protegido foi estimada por meio da regressão linear e múltipla, utilizando as variáveis de temperatura e radiação solar global como variáveis independentes dos dois ambientes.

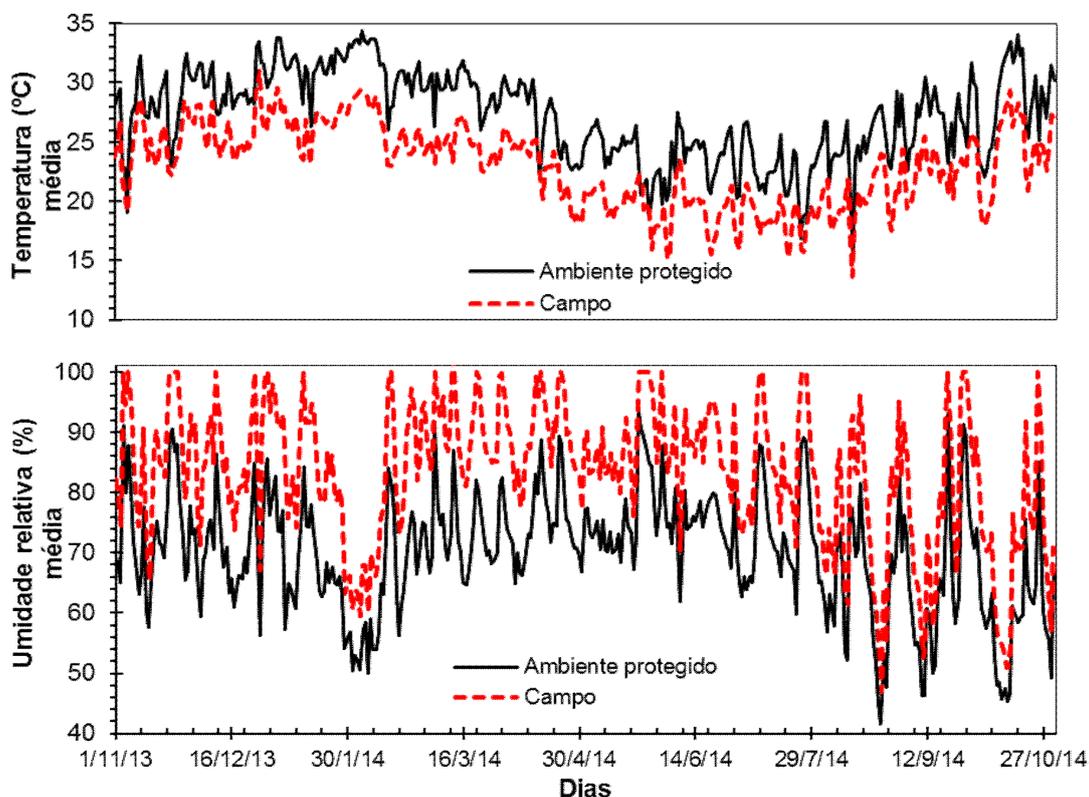
Os critérios estatísticos para seleção de modelos foram baseados no teste F, nos coeficientes de correlação de Person (r), no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), no índice de concordância de Willmott (d) e no índice de desempenho de Camargo-Sentelhas (c). A ET<sub>o</sub> calculada

pelo método de Penman-Monteith e a estimada pelos novos modelos ajustados, foram comparadas por procedimentos gráficos. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do software estatístico Action<sup>®</sup> versão 2.61, desenvolvido sob a plataforma R.

## Resultados e Discussão

Na Figura 2 são apresentados a variação diária da temperatura (mínima, máxima e média) e da umidade relativa média em ambiente protegido e nas condições de campo, no período de novembro de 2013 a novembro de 2014. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios dos elementos micrometeorológicos nos dois ambientes. Houve diferença significativa entre os valores médios destes elementos, com exceção da temperatura mínima, pelo teste T pareado.

Observa-se que a temperatura máxima no ambiente protegido é maior que a temperatura máxima em condições de campo na maioria dos dias do ano, diferindo em média de  $4^{\circ}C$ . Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2012), que estudaram a temperatura do ar em ambientes cobertos, com quatro tipos de telas, comparadas com o campo. Andrade Júnior et al. (2011) também observaram temperaturas em média mais elevadas no ambiente protegido,  $1,9$  a  $2,3^{\circ}C$  superiores. Reis et al. (2012)



**Figura 2.** Variação da temperatura média e da umidade relativa média em ambiente protegido e em condições de campo no município de Piracicaba-SP

salientam que o acréscimo nos valores da temperatura do ar pode ser desfavorável à cultura sob ambiente protegido.

As temperaturas mínimas do ar tendem a ser iguais ou ligeiramente maiores às observadas no campo aberto. Os valores das diferenças das temperaturas mínimas observadas entre ambientes foram, em média, de apenas 0,1°C (Figura 2). Essa variação da temperatura mínima está de acordo com resultados apresentados Chavarria et al. (2009); Oliveira et al. (2012) e Pedro Júnior et al. (2013) sob cobertura de plástico.

A umidade relativa nas condições de campo foi maior, em média 13,28%, que a umidade relativa nas condições de ambiente protegido (Tabela 1). Tal fato pode ser explicado em virtude de a umidade relativa estar relacionada à temperatura do ar, portanto, a maior temperatura na condição de ambiente protegido, faz com que haja uma maior tensão do vapor d'água. De acordo Mustafaraj et al. (2011) a umidade relativa do ar está diretamente relacionada com a radiação solar, pressão atmosférica e temperatura do ar.

Na Figura 3 estão apresentadas a variação diária da radiação solar global e a evapotranspiração de referência em ambiente protegido e em condições de campo, ao

longo do período. Observa-se que a radiação solar global em condições de campo é maior em praticamente todo o período estudado, sendo superior em média 8,96 MJ m<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>. Isto pode ser explicado em razão da reflexão e da absorção do material da cobertura plástica. Esse resultado é compatível com aqueles encontrados por Reis et al. (2012).

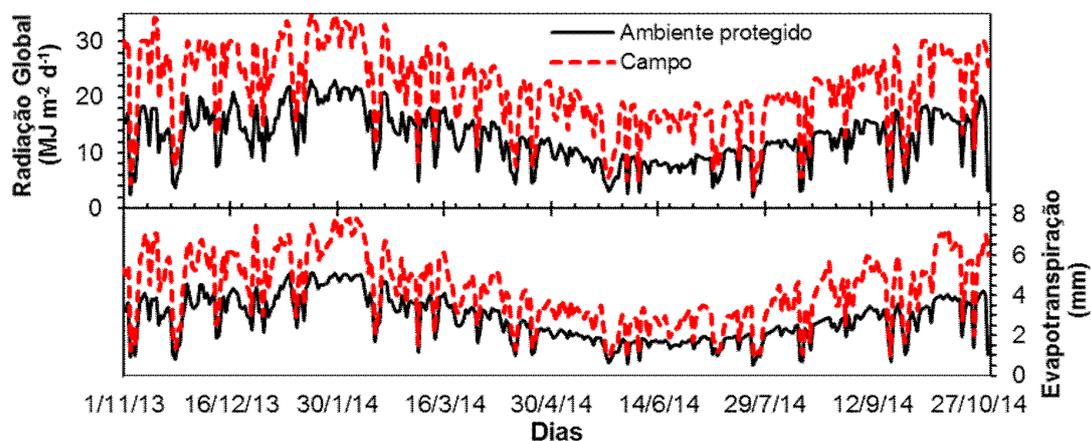
Observa-se que a evapotranspiração estimada para as condições de ambiente protegido foi menor, em média de 1,49 mm dia<sup>-1</sup>, representando aproximadamente 60% da ETo estimada para as condições de campo (Figura 3 e Tabela 1). Isso pode ser explicado pelos maiores valores de radiação solar global nessas condições e pela menor remoção do ar no ambiente protegido. Esta diferença é relacionada com mudanças no microclima provocados pela utilização de um ambiente protegido, tal como relatado por Reis et al. (2012), Guiselini et al. (2013) e Andrade Júnior et al. (2011), possibilitando o menor consumo de água pelas culturas em ambientes protegidos.

Na Figura 4 é apresentada a comparação entre a temperatura média nos dois ambientes nas quatro efemérides do ano (datas 25/12; 23/03; 23/06 e 22/09, respectivamente, verão, outono, inverno e primavera),

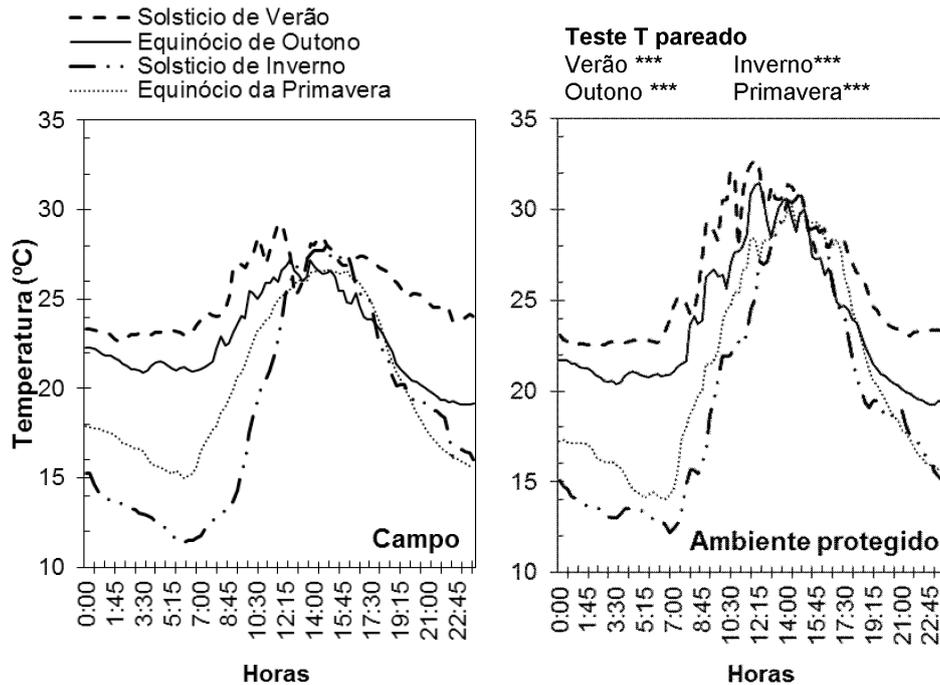
**Tabela 1.** Valores médios dos elementos micrometeorológicos obtidos em condições de ambiente protegido e em condições de campo no município de Piracicaba-SP

Ambiente	Tmed	Tmax	Tmin	Umidade relativa %	Radiação global MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	ETo mm
	°C					
Ambiente protegido	27,23±0,19a	34,53±0,24a	16,64±0,20a	70,09±0,52b	12,66±0,25b	2,79±0,06b
Campo	22,97±0,18b	30,53±0,21b	16,51±0,21a	83,36±0,60a	35,01±0,37a	4,29±0,09a
Média das diferenças	4,28±1,22	4,0±1,74	0,134±0,94	-13,28±3,16	-8,96±2,66	-1,49±0,71

Valores médios seguidos da mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste t de Student pareado; ±Erro padrão da média e Desvio padrão das diferenças; Tmed – Temperatura média; Tmax – Temperatura máxima; Tmin – Temperatura mínima; ETo – evapotranspiração de referência.

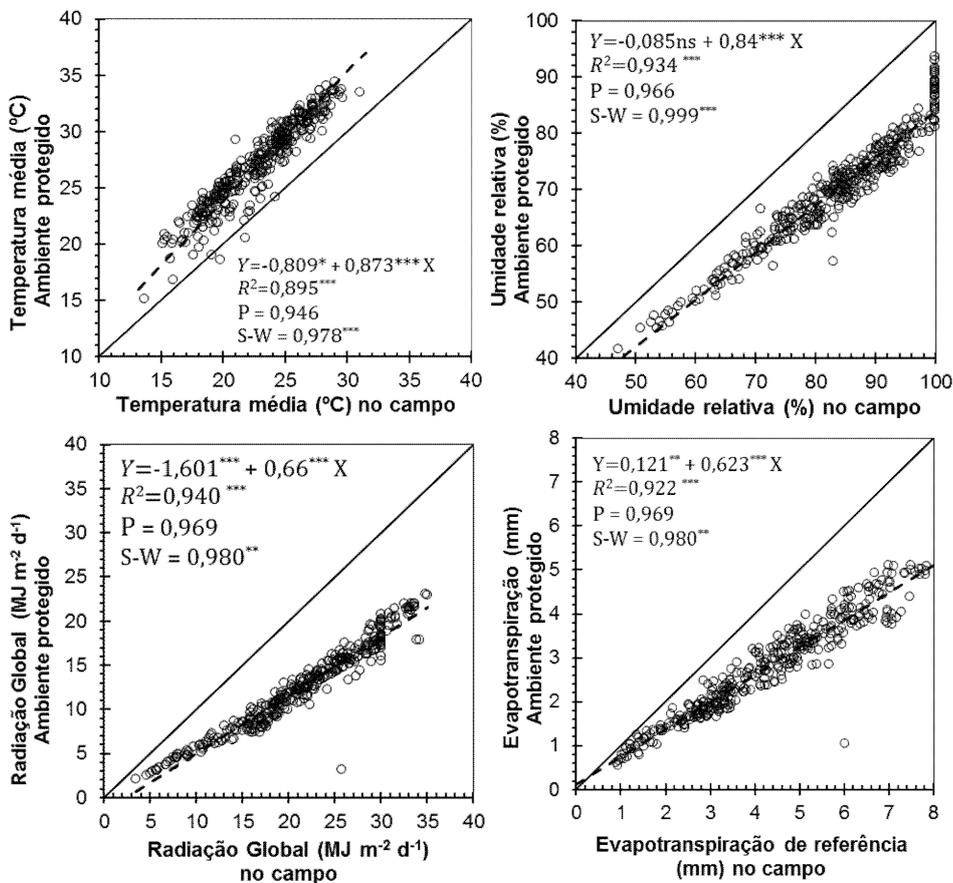


**Figura 3.** Variação da radiação global e evapotranspiração de referência em ambiente protegido e em condições de campo no município de Piracicaba-SP



\*\*\* Significativo pelo Teste T pareado para o conjunto de dados.

**Figura 4.** Variação da temperatura mediana nas quatro efemérides do ano sob ambiente protegido (A) e nas condições de campo (B) no município de Piracicaba-SP



**Figura 5.** Correlação entre os elementos micrometeorológicos no ambiente protegido e nas condições de campo no município de Piracicaba-SP

utilizando-se dados de 15 em 15 minutos. Observa-se que a amplitude térmica nas quatro efemérides é maior para

a condição de ambiente protegido quando comparado com as condições de campo. Essa diferença pode ser

observada por meio do teste T pareado. Resultados semelhantes foram encontrados por Andrade Júnior et al. (2011).

As análises de correlação linear utilizando os dados do ambiente protegido como variável dependente apresentaram boa concordância entre os valores da condição de campo e do ambiente protegido, indicado pelos altos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ). A relação radiação global no ambiente protegido e em campo apresentou boa correlação ( $R^2 = 0,92$ ) durante o período experimental com transmitância média do material (polietileno) que compõe o ambiente protegido de 62,3%, determinada com a inclinação da regressão linear (Figura 5). Reis et al. (2012) encontraram uma transmitância de 62% da radiação global para o ambiente protegido. Segundo os mesmos autores

esse fato é explicado pelo efeito de multirreflexões e emissão de radiação de ondas longas pelas estruturas da cobertura, que reduz a perda de energia ao longo do dia com maior contribuição no período noturno.

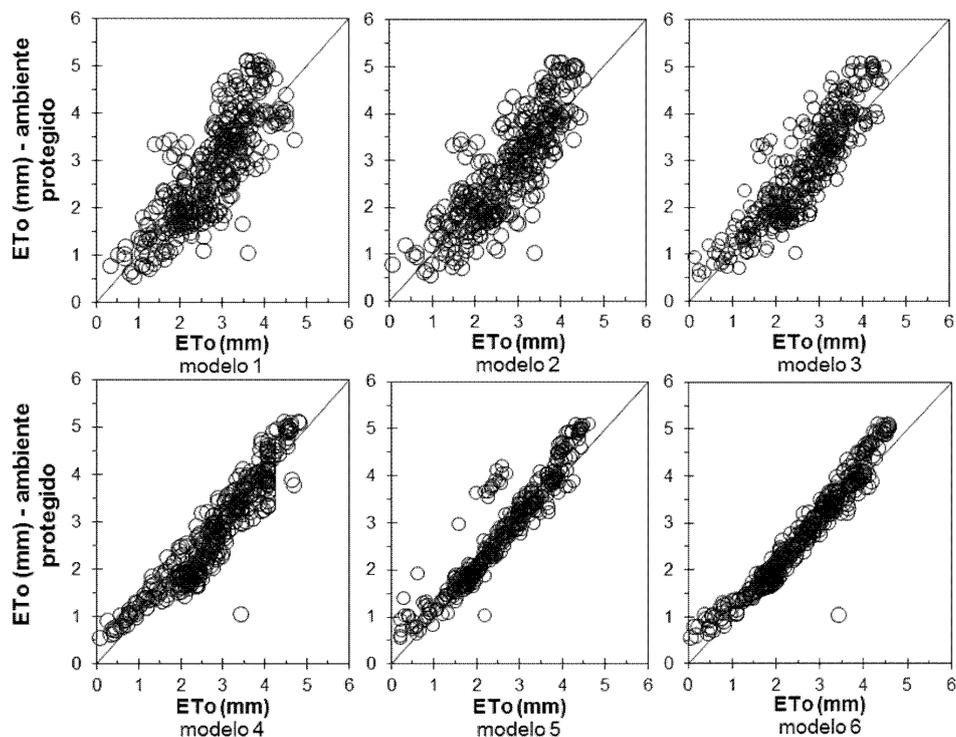
Na Tabela 2 são apresentados os modelos para estimativa da ETo em condições de ambiente protegido obtidos por meio de regressão linear múltipla utilizando elementos micrometeorológicos desse ambiente e das condições de campo. Estes modelos foram significativos a p-valor ( $<0,001$ ), demonstrando que existe estreita relação entre a ETo em ambientes protegidos e os valores micrometeorológicos internos e externos desse ambiente.

A qualidade do ajuste foi verificada por meio dos elevados coeficientes de determinação, que variaram de 0,659 a 0,946, sendo o menor valor correspondente ao modelo em que foi utilizada apenas a temperatura

**Tabela 2.** Modelos de regressão linear múltipla para estimativa da evapotranspiração de referência em ambiente protegido, utilizando elementos micrometeorológicos do ambiente protegido e das condições de campo

Modelos	P-valor	$R^2$	r	d	c
1- $ET_0 = -3,99 + 0,22 T_{maxC}$	$<0,001$	0,659	0,811	0,883	0,717
2- $ET_0 = -4,01 + 0,29 T_{medP} - 0,05 T_{medC}$	$<0,001$	0,707	0,841	0,922	0,775
3- $ET_0 = -4,28 + 0,20 T_{maxP}$	$<0,001$	0,773	0,879	0,924	0,812
4- $ET_0 = -0,43 + 0,15 RadC$	$<0,001$	0,887	0,942	0,969	0,913
5- $ET_0 = -2,3 + 0,01 T_{maxP} + 0,04 T_{medP} + 0,05 T_{medC} + 0,11 RadC$	$<0,001$	0,896	0,947	0,961	0,910
6- $ET_0 = -2,28 + 0,06 T_{medP} + 0,04 T_{medC} + 0,11 RadC$	$<0,001$	0,946	0,973	0,981	0,954

Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), correlação linear de Pearson (r), índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho de Camargo Sentelhas (c), temperatura máxima em condições de campo ( $T_{maxC}$ ), temperatura máxima em condições de ambiente protegido ( $T_{maxP}$ ), temperatura média em condições de campo ( $T_{medC}$ ), temperatura média em condições de ambiente protegido ( $T_{medP}$ ) e radiação solar global em condições de campo ( $RadC$ ).



**Figura 6.** Comparação entre os valores de ETo estimados pelos modelos com a estimativa de ETo pelo método de Penman-Monteith em ambiente protegido

máxima das condições de campo, enquanto que o maior valor foi obtido quando o modelo de estimativa da ETo utilizou dados de radiação solar e temperatura média das condições de campo e temperatura média do ambiente protegido (Tabela 2).

Com base nos valores de  $R^2$  (Tabela 2) e dos coeficientes de correlação verifica-se que os modelos mais apropriados para as relações são os modelos 4, 5 e 6 (Figura 6). O melhor resultado foi obtido com o modelo 6 ( $ET_0 = -2,28 + 0,06 T_{medP} + 0,04 T_{medC} + 0,11 RadC$ ), pois estes apresentaram maiores valores de  $R^2$  e melhores desempenhos nos outros indicadores estatísticos, comprovando que a temperatura interna e externa associada a radiação externa aumenta a intensidade da associação linear entre as variáveis. Neste modelo é possível estimar a ETo do ambiente protegido com precisão em 94,6% dos casos.

### Conclusões

Os modelos de regressão linear múltipla possibilitam a estimativa de elementos micrometeorológicos para condição de ambiente protegido em função das condições de campo na região de Piracicaba-SP.

O melhor resultado para estimar evapotranspiração de referência em ambiente protegido foi obtido com o modelo  $ET_0 = -2,28 + 0,06 T_{medP} + 0,04 T_{medC} + 0,11 RadC$ . Neste modelo é possível estimar a ETo do ambiente protegido com precisão em 94,6% dos casos.

### Literatura Citada

- Abdel-Ghany, A. M. Solar energy conversions in the greenhouses. *Sustainable Cities and Society*, v.1, p.219-226, 2011.
- Allen, R. G. REF-ET: Reference Evapotranspiration Calculation Software for FAO and ASCE Standardized Equations - Version 3.1. University of Idaho Research and Extension Center, 2013.
- Andrade Júnior, A. S. DE et al. Climate variations in greenhouse cultivated with gerbera and relationship with external conditions. *Engenharia Agrícola*, v.31, n.5, p.857-867, 2011.
- Chavarria, G. et al. Microclima de vinhedos sob cultivo protegido. *Ciência Rural*, v.39, n.7, p.2029-2034, 2009.
- Dalmago, G. A. et al. Evapotranspiração máxima da cultura de pimentão em estufa plástica em função da radiação solar, da temperatura, da umidade relativa e do déficit de saturação do ar. *Ciência Rural*, v.36, n.3, p.785-792, 2006.
- Guiselini, C. et al. Aclimatização de mudas de cana-de-açúcar em ambiente protegido sob dois tipos de malhas de sombreamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.8, p.877-882, 2013.
- Holcman, E.; Sentelhas, P. C.; Mello, S. C. Microclimatic changes caused by different plastic coverings in greenhouses cultivated with cherry tomato in southern Brazil. *Revista Brasileira de meteorologia*, v.30, n.2, p.125-133, 2015.
- Kittas, C.; Bartzanas, T. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and Environment*, v.42, n.10, p.3774-3784, 2007.
- Mustafaraj, G.; Lowry, G.; Chen, J. Prediction of room temperature and relative humidity by autoregressive linear and nonlinear neural network models for an open office. *Energy and Buildings*, v.43, n.6, p.1452-1460, 011.
- Oliveira, G. M. de; Leitão, M. de M. V. B. R.; Rocha, R. de C. Temperatura do ar no interior e exterior de ambientes protegidos. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.7, n.2, p.250-257, abr-jun, 2012. Disponível em: <<http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/1246>>. Acesso em: 28 ago. 2015.
- Pedro Júnior, M. J. et al. Microclima em vinhedos de “Niagara rosada” em diferentes sistemas de condução durante safras de inverno e de verão. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.35, n.1, p.151-158, 2013.
- Reis, L. S. et al. Componentes da radiação solar em cultivo de tomate sob condições de ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 7, p. 739-744, jul. 2012.
- Tazzo, I. F. et al. Evapotranspiração do pimentão em estufa plástica estimada com dados meteorológicos externos, na primavera. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.3, p.275-280, 2012.