

INFORMAÇÕES PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO DA COUVE DE BRUXELAS (*Brassica oleracea* var. *Gemmifera*) CULTIVADA EM AMBIENTE PROTEGIDO

JOSÉ GEANINI PERES¹; LEANDRO MARCUSSI²; CLAUDINEI FONSECA SOUZA³ E NORBERTO ANTONIO LAVORENTI⁴

¹Prof. Associado do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, CCA-UFSCar, Araras-SP, CP 153, CEP 13600-970. jogepe@cca.ufscar.br

²Engenheiro Agrônomo, CCA-UFSCar, Araras-SP, CP 153, CEP 13600-970. leandromarcussi@hotmail.com

³Prof. Adjunto do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, CCA-UFSCar, Araras-SP, CP 153, CEP 13600-970. cfSouza@cca.ufscar.br

⁴Prof. Associado do Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural, CCA-UFSCar, Araras-SP, CP 153, CEP 13600-970. norba@cca.ufscar.br

1 RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivos a determinação do consumo de água e dos coeficientes de cultura da couve de Bruxelas (*Brassica oleracea* var. *Gemmifera*) para cultivo em estufa agrícola sob irrigação e também a calibração dos modelos agroclimáticos de Penman, Makkink, Hargreaves e do Tanque Classe A em relação ao modelo padrão FAO de Penman-Monteith. A pesquisa foi realizada em uma estufa agrícola instalada na área experimental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, em Araras-SP. O solo típico da área experimental é um Latossolo vermelho-escuro, distrófico, de horizonte A moderado e de textura argilosa. A cultivar da couve de Bruxelas estudada foi o híbrido Jade Cross, que é considerado tolerante a temperaturas altas. Na irrigação do experimento foram utilizados tubos gotejadores de 16 mm de diâmetro nominal, com emissores espaçados de 25 cm e vazão unitária de 2,3 L.h⁻¹ para uma pressão de serviço de 100 kPa. O consumo de água da couve de Bruxelas foi medido através de dois lísimetros de pesagem instalados dentro da estufa, enquanto a evapotranspiração de referência foi estimada pelos modelos agroclimáticos de Penman-Monteith, Penman, Hargreaves, Makkink e do Tanque Classe A. O consumo de água total e médio diário da couve de Bruxelas foi, respectivamente, de 543 mm e 3,2 mm.dia⁻¹. Dentre os modelos agroclimáticos estudados, foi verificado que o modelo de Hargreaves pode substituir o modelo padrão FAO de Penman-Monteith na determinação da evapotranspiração de referência, quando não estiverem disponíveis as informações climáticas necessárias a sua aplicação. As durações determinadas para os estádios vegetativos da couve de Bruxelas foram as seguintes: estágio inicial 30 dias; estágio de desenvolvimento 30 dias, estágio intermediário 60 dias e estágio final 50 dias, perfazendo um ciclo vegetativo de 170 dias. Os coeficientes de cultura estimados pelo modelo padrão FAO de Penman-Monteith foram: 0,65 para o estágio inicial; 1,85 para o estágio intermediário e 0,80 para o estágio final.

Palavras-chave: estufa agrícola, lisímetro de pesagem, evapotranspiração de referência.

**PERES, J. G.; MARCUSSI, L.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A.
INFORMATION ON IRRIGATION MANAGEMENT OF BRUSSEL SPROUTS
(*Brassica oleracea* variety *Gemmifera*)**

2 ABSTRACT

The study aimed to determine water consumption and crop coefficients of Brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. *Gemmifera*) for cultivation in a greenhouse under irrigation, and the calibration of the models Penman, Makkink, Hargreaves and Tank class A in relation to the standard model FAO of Penman-Monteith. The study was conducted in a greenhouse installed at the experimental farm of the Center of Agricultural Sciences, Federal University of São Carlos, Araras city/SP. The soil in the experimental area was a dystrophic, moderate A horizon, clayey texture dark-red Latosol. The hybrid Jade Cross was the cultivar of Brussels sprouts, which is considered tolerant to high temperatures. Drip emitter pipes were 16 mm diameter, 25 cm-emitter spacing and flow rate of 2.3 L.h⁻¹ for 100 kPa working pressure. Water consumption of Brussels sprouts was measured by two weighing lysimeters installed inside the greenhouse, while the reference evapotranspiration was estimated by the agroclimatic models of Penman-Monteith, Penman, Hargreaves, Makkink and Class A tank. Total and mean daily water consumption of Brussels sprouts was 543 mm and 3.2 mm.day⁻¹, respectively. Considering the agroclimatic models, the Hargreaves model can replace the Penman-Monteith model to determine Reference evapotranspiration when climatic data required are not available. Duration of the crop development stages of Brussels sprouts were as follows: Initial stage, 30 days; developmental stage, 30 days, intermediate stage, 60 days and final stage, 50 days, reaching 170 day-growing cycle. The crop coefficients estimated by the FAO standard model of Penman-Monteith were as follows: 0.65 initial stage, 1.85 intermediate stage and 0.80 final stage.

Keywords: greenhouse, weighing lysimeter, reference evapotranspiration.

3 INTRODUÇÃO

Nas condições brasileiras, a couve de Bruxelas é uma cultura pouco conhecida e o seu cultivo ainda não está difundido entre os agricultores, bem como, também são escassos os profissionais ligados à horticultura que trabalham com esta hortaliça. Como consequência e, principalmente, devido a sua pouca importância econômica, a couve de Bruxelas não tem recebido no Brasil a atenção das instituições públicas de pesquisa, ou mesmo das empresas ligadas ao setor hortícola. Isto pode ser facilmente constatado pela quase total falta de informações técnicas disponíveis para o seu manejo, seja em condições de campo ou de ambiente protegido.

Como boa norma agrônômica, para que se possa ter um sistema de irrigação bem planejado e manejado, recomenda-se que sejam determinados o consumo de água e os coeficientes de cultura para cada um dos estádios vegetativos da cultura a ser irrigada. A determinação dos coeficientes de cultura (K_c) é um processo que se desenvolve em duas fases. Na primeira, é determinada a evapotranspiração da cultura (ET_c), o que geralmente é feito através de lisímetros; na segunda, uma equação empírica é utilizada para estimar a evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o), que pode ser a grama (DOORENBOS;

PRUITT, 1977), a alfafa (WRIGHT, 1982) ou, mesmo, uma cultura hipotética (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998). O coeficiente de cultura é então estimado através da relação $K_c = ET_c / ET_o$.

De acordo com Burman e Pochop (1994) e Pereira e Allen (1997), a evapotranspiração da cultura pode ser determinada por medição direta, ou, então, indiretamente através de modelos agroclimáticos que utilizam as informações meteorológicas disponíveis localmente. No primeiro grupo estão os diferentes tipos de lisímetros e o balanço de água no solo, enquanto no segundo estão incluídos os modelos agroclimáticos e o tanque Classe A.

Dentre os lisímetros, destacam-se, pela sua exatidão, precisão e facilidade operacional, os lisímetros de pesagem, nos quais são utilizadas células de carga como mecanismo de pesagem. Este tipo de lisímetro determina a evapotranspiração da cultura diretamente, medindo a variação verificada no seu peso, admitindo-se a água como incompressível (BURMAN; POCHOP, 1994). A utilização de lisímetros de pesagem para a determinação do consumo de água dos cultivos agrônômicos, apesar do custo inicial elevado, tem se difundido muito no Brasil, podendo ser destacados estudos conduzidos por Silva (1996), Pereira (1998), Peres (1999), Gonçalves et al. (2005), Fietz et al. (2005), Carvalho et al. (2006) e Medeiros (2008).

A evapotranspiração de referência também pode ser medida diretamente via lisímetros (FIETZ et al., 2005; CARVALHO et al., 2006), ou, como é o procedimento mais usual, estimada através de modelos agroclimáticos. Dentre estes, segundo Smith (1991) e Allen et al. (1998), o modelo de Penman-Monteith estima a evapotranspiração de referência de uma cultura hipotética, a qual, em última análise, é a própria grama. Segundo estes autores, este modelo foi adotado como padrão pela FAO pelo fato dele fornecer estimativas de evapotranspiração de referência com boa exatidão e precisão, que seriam resultado da incorporação em sua estrutura matemática de parâmetros ligados à fisiologia das plantas e à aerodinâmica da atmosfera. No entanto, como destacado por Fietz et al. (2005), Medeiros (2002) e Medeiros (2008), a utilização do modelo de Penman-Monteith está condicionada à disponibilidade de vários dados climatológicos, que nem sempre estão disponíveis localmente. Esta constatação tem levado à utilização de outros modelos agroclimáticos, pelo fato deles demandarem um número menor de informações climáticas para o seu uso, como é o caso dos modelos de Makkink, Hargreaves, Priestley-Taylor, Thornthwaite, Linacre e do Tanque Classe A, entre outros. Além disso, aqueles mesmos autores sugerem que os modelos agroclimáticos utilizados sejam calibrados em relação ao modelo de Penman-Monteith, que é então assumido como modelo padrão.

Doorenbos e Pruitt (1977) propuseram a divisão do ciclo vegetativo das principais culturas agrônômicas em quatro estádios de desenvolvimento: inicial, de desenvolvimento, intermediário e de maturação. Segundo Doorenbos e Pruitt (1977) e Allen et al. (1998), considerando-se a couve de Bruxelas plantada na primavera em um clima mediterrâneo, as durações destes estádios vegetativos seriam, respectivamente, de 20, 30, 20 e 10 dias, perfazendo um ciclo total de 80 dias. De acordo com Marouelli et al. (1996) os coeficientes de cultura da couve de Bruxelas para estes mesmos estádios vegetativos são os seguintes: 0,40, 0,70, 0,95 e 0,80, considerando-se alta umidade relativa e velocidade de vento fraca. Allen et al. (1998) fizeram uma ampla revisão do relatório FAO-24 (DOORENBOS; PRUITT, 1977) e propuseram a divisão do ciclo vegetativo das culturas em três estádios vegetativos, nominalmente estádio inicial, intermediário e final, apresentando para estes estádios os seguintes coeficiente de cultura para a couve de Bruxelas: 0,70, 1,05 e 0,95. Segundo estes autores, estes coeficientes de cultura são para serem utilizados com a evapotranspiração de referência determinada pelo modelo de Penman-Monteith.

Em razão do exposto, esta pesquisa teve como objetivos: 1) Determinar o consumo de água e os coeficientes de cultura para os diferentes estádios vegetativos da couve de Bruxelas para seu cultivo em estufa agrícola sob irrigação nas condições edafoclimáticas de Araras-SP.

2) Calibrar os modelos agroclimáticos de Penman, Makkink, Hargreaves e do Tanque Classe A em relação ao modelo padrão FAO de Penman-Monteith.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi conduzida na área experimental do Centro de Ciências Agrárias - CCA da Universidade Federal de São Carlos-UFSCar, localizado no município de Araras-SP. As coordenadas geográficas locais são 22°18' de latitude sul e 47°23' de longitude oeste. A sua altitude média é de aproximadamente 700 m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, mesotérmico, com verões quentes e úmidos e invernos secos. As normais climatológicas anuais da área são as seguintes: precipitação pluvial: 1.414 mm; temperatura do ar: 21,1°C; evaporação de tanque Classe A: 1.443 mm, velocidade média do vento: 1,44 m.s⁻¹; umidade relativa ar 68,6% e insolação 2.572,7 horas.

O solo predominante na área experimental é um Latossolo vermelho-escuro, distrófico, de horizonte A moderado e de textura argilosa. Considerando-se a profundidade de 0-0,60 m, ele apresenta os seguintes indicadores físico-hídricos: massa específica do solo 1.240 kg.m⁻³, massa específica das partículas 3.000 kg.m⁻³ e umidades volumétricas de 33,1 e 25,3 %, respectivamente, para os potenciais matriciais de -3,3 e -150 J.N⁻¹ (-1/3 e -15 atm).

Esta pesquisa foi conduzida em uma estufa plástica convencional, dotada de estrutura de madeira e de ferro galvanizado, medindo 20 m de comprimento, 6,5 m de largura, 4,5 m de altura no seu centro e 3 m de altura nas suas laterais. A estufa é coberta com um plástico transparente de polietileno de baixa densidade, 150 micra de espessura, aditivado contra a ação dos raios ultravioletas. A estufa está disposta com seu maior comprimento acompanhando a direção leste – oeste.

O consumo de água da couve de Bruxelas (ETc) foi medido por meio de dois lisímetros de pesagem instalados dentro da estufa. Basicamente, cada lisímetro de pesagem é constituído de dois tanques metálicos encaixáveis construídos com chapas de aço de 4,8 mm de espessura. O tanque externo não tem fundo e sua função é conter as paredes da escavação. O tanque interno, que é o elemento funcional do lisímetro, apresenta as seguintes dimensões: 1,40 m x 1,20 m x 0,75 m, resultando em uma área exposta de 1,68 m². O sistema de pesagem de cada lisímetro é constituído por três células de carga, montadas nos vértices de um triângulo equilátero, cada uma delas com capacidade de pesagem de 1.135 kgf (≈11.135 N).

Os dados climáticos foram coletados dentro e fora da estufa, sendo que, para tanto, foram instalados sensores para coleta de dados de temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação global e radiação líquida, pressão barométrica e evaporação de água, entre outros. As informações climáticas e lisimétricas eram coletadas de hora em hora e processadas posteriormente para valores diários e de cinco dias ou pentadía.

Os canteiros foram levantados manualmente e mediam 14,0 m de comprimento por 1,2 m de largura e 0,2 m de altura média. Na adubação de plantio foram aplicados 20 kg da fórmula 4-14-8 em área total, enquanto a de cobertura constou da aplicação de uma mistura de 10 kg de uréia, 5 kg de cloreto de potássio e 5 kg de nitrato de cálcio, distribuída em seis aplicações ao longo do ciclo vegetativo da couve de Bruxelas.

A cultivar da couve de Bruxelas plantada no experimento foi o híbrido Jade Cross, que apresenta ampla adaptação climática, plantas vigorosas e muito uniformes, com folhas apresentando coloração verde-escuro e pecíolos longos. Os seus frutos, normalmente

denominado de *repolhinhas*, apresentam diâmetro médio de 38 mm e se caracterizam pelo formato uniforme e por serem bastante firmes (FILGUEIRA, 1982).

As mudas utilizadas foram adquiridas de produtor especializado e tinham, quando do seu transplântio, 30 dias de idade e de 3 a 4 folhas definitivas. O transplântio foi realizado em 26 de maio de 2009, obedecendo ao espaçamento de 0,40 m por 0,80 m.

A irrigação foi realizada por gotejamento utilizando-se tubos gotejadores de 16 mm de diâmetro, com os emissores espaçados de 25 cm e vazão de 2,3 L.h⁻¹ para a pressão de serviço de 100 kPa (≈ 1 atm). O manejo da irrigação foi feito através de dois lisímetros de pesagem e da medição da umidade do solo por meio de uma sonda TDR, devendo ser destacado que a umidade do solo foi mantida sempre próxima da sua capacidade de campo.

A evapotranspiração de referência foi estimada pelos modelos de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965; ALLEN et al., 1998), de Penman (PENMAN, 1948; DOORENBOS; PRUITT, 1977), de Hargreaves (HARGREAVES, 1975; HARGREAVES; SAMANI, 1985; CONCEIÇÃO, 2009), de Makkink (MAKKINK, 1957; PEREIRA; ALLEN, 1997) e do Tanque Classe A (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998).

Na escolha dos métodos agroclimáticos para a determinação da evapotranspiração de referência se procurou contemplar situações de pesquisa muito diversas, desde aquelas onde há disponibilidade de informações climáticas em quantidade e qualidade (modelos de Penman-Monteith e de Penman) até aquelas onde elas são escassas (modelos de Hargreaves e de Makkink). A escolha do modelo do Tanque Classe A foi feita em função do seu baixo custo e pela simplicidade de uso do equipamento.

1) Modelo de Penman-Monteith

$$ET_{oPM} = \frac{0,408 \Delta R_n + \left[\gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) V (e_s - e_a) \right]}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 V)} \quad (1)$$

na qual ET_{oPM} é a evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹); Δ é a tangente à curva da pressão de saturação do vapor de água (kPa °C⁻¹); γ o coeficiente psicrométrico (kPa.°C⁻¹); R_n é a densidade de fluxo de radiação líquida (MJ m⁻² dia⁻¹); e_s é a pressão de saturação do vapor de água (kPa); e_a é a pressão atual do vapor de água (kPa) e V a velocidade média do vento (m.s⁻¹).

2) Modelo de Penman

$$ET_{oPen} = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_n + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) 2,7 (1 + 0,864 V_2) (e_s - e_a) \quad (2)$$

na qual ET_{oPen} é a evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹); V_2 a velocidade do vento média (m.s⁻¹).

3) Modelo de Hargreaves

$$ET_{oHarg} = 0,0135 R_s (t + 17,8) \quad (3)$$

em que ET_{oHarg} é a evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}), R_s é a densidade de fluxo de radiação global (mm.dia^{-1}); t a temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$).

4) Modelo de Makkink

$$ET_{oMak} = 0,61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s - 0,12 \quad (4)$$

na qual ET_{oMak} é a evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}); Δ a tangente à curva da pressão de saturação do vapor de água ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); R_s é a densidade de fluxo de radiação global (mm.dia^{-1}).

5) Modelo do Tanque Classe A

$$ET_{oTCA} = k_p ECA \quad (5)$$

na qual ET_{oTCA} é a evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}) e k_p um coeficiente adimensional.

Segundo Snyder (1992), o coeficiente de tanque pode ser estimado pela equação:

$$k_p = 0,482 + 0,024 \ln F - 0,000376 V + 0,0045 UR \quad (6)$$

na qual F é o tamanho da bordadura em relação ao tanque de evaporação (m); V é a velocidade média do vento (km.dia^{-1}) e UR é a umidade relativa média do ar (%).

Os coeficientes de cultura (K_c) da couve de Bruxelas foram estimados dividindo-se o consumo de água (ET_c) medido nos lisímetros de pesagem pela evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelos modelos agroclimáticos apresentados anteriormente, ou seja, $K_c = ET_c / ET_o$.

Para os efeitos desta pesquisa, o modelo de Penman-Monteith foi considerado como modelo padrão (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998) e suas estimativas de ET_o (ET_{oPM}) e de K_c (K_{cPM}) utilizadas como referência para comparação com as estimativas fornecidas pelos demais modelos. As análises de regressão foram realizadas tomando-se as estimativas da evapotranspiração de referência pelo o modelo de Penman-Monteith (ET_{oPM}) como variável dependente e as estimativas dos outros modelos como variáveis independentes (ET_{oPen} ; ET_{oMak} , ET_{oHar} e ET_{oTCA}), o mesmo ocorrendo no caso dos coeficientes de cultura. Ainda deve ser salientado que as respectivas equações lineares foram obtidas forçando-se a passagem da reta da regressão pela origem dos eixos coordenados.

A metodologia utilizada na comparação dos resultados se baseou na avaliação do coeficiente angular (b) e do coeficiente de determinação (R^2) das retas de regressão, pois estes dois indicadores traduzem tanto a exatidão, máxima quando $b=1$, quanto a precisão, máxima quando $R^2=1$, do modelo utilizado nas estimativas. O modelo de melhor desempenho será aquele que apresentar o melhor conjunto desses indicadores, salientando-se que são desejáveis valores altos de $R^2(R)$ e valores de b próximos da unidade. Adicionalmente, também foi traçada uma reta 1:1 em cada um dos gráficos obtidos na análise de regressão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Consumo de água e duração dos estádios vegetativos

O consumo de água da couve de Bruxelas medido nos lisímetros ao longo do seu ciclo vegetativo está apresentado na Figura 1 na escala de cinco dias ou pentadia. A duração do ciclo vegetativo da cultura foi de 170 dias, durante os quais foram consumidos 543 mm de água, resultando em um consumo médio de $3,2 \text{ mm.dia}^{-1}$, enquanto que os consumos máximo e mínimo foram, respectivamente, de $6,3 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $0,9 \text{ mm.dia}^{-1}$. Nas condições edafoclimáticas da África do Sul a duração do ciclo vegetativo desta hortaliça varia de 105 a 165 dias e o consumo de água total chega a 440 mm, com gastos semanais de 30 a 38 mm (REPUBLIC OF SOUTH AFRICA, 2012).

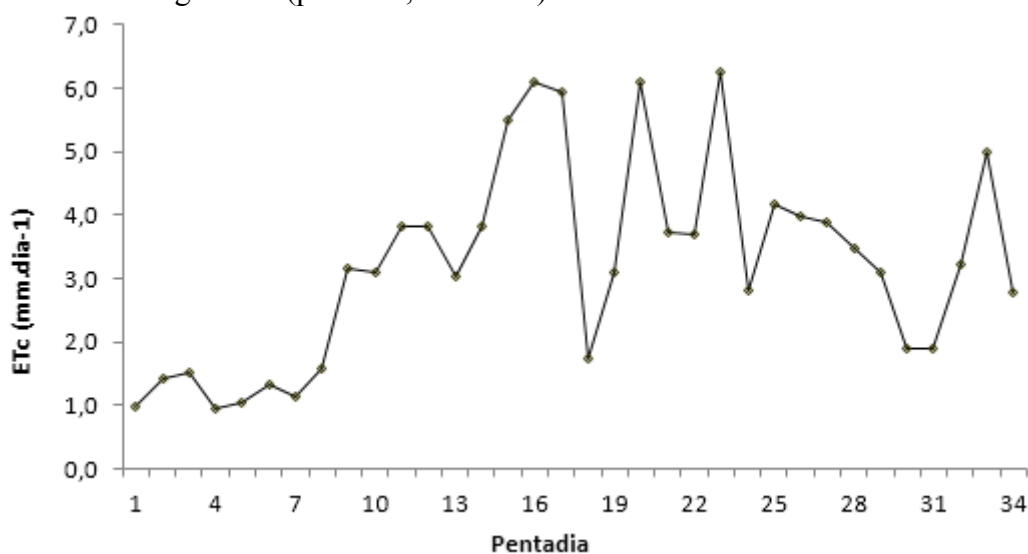
As oscilações no consumo de água na Figura 1 se deveram a duas causas principais: ao manejo agrícola adotado para a couve de Bruxelas, que constou da realização de desfolhas periódicas para estimular a emissão dos frutos, e às variações bruscas da temperatura do ar.

Durante o ciclo vegetativo da couve de Bruxelas foram realizadas quatro desfolhas (pentadias 12, 23, 27 e 30) e cinco colheitas (pentadias 15, 23, 27, 30 e 33). Pode ser observado na Figura 1 que o consumo de água sempre diminuiu após as desfolhas, o que pode ser explicado pela drástica diminuição da área foliar das plantas, sempre algo entre 40 e 50 %.

A grande diminuição do consumo de água observada na pentadia 18 não se deveu aos efeitos da desfolha, mas sim a uma queda brusca da temperatura, que, na ocasião, chegou à marca dos 15°C . Por outro lado, logo após desfolha realizada na pentadia 27, ocorreu uma grande elevação da temperatura, que atingiu os 26°C , muito acima da temperatura ótima para o desenvolvimento da couve de Bruxelas, que está ao redor de 16°C .

A combinação desfolha e alta temperatura se mostrou muito adversa para a couve de Bruxelas, uma vez que ela afetou profundamente o desenvolvimento vegetativo da cultura, principalmente o foliar, reduzindo o seu consumo de água, como pode ser observado no final do gráfico da Figura 1. Outras consequências dessa combinação adversa foram a diminuição da produtividade e da longevidade da couve de Bruxelas.

Figura 1. Consumo de água da couve de Bruxelas medido nos lisímetros ao longo do seu ciclo vegetativo (pentadia; mm.dia^{-1}).

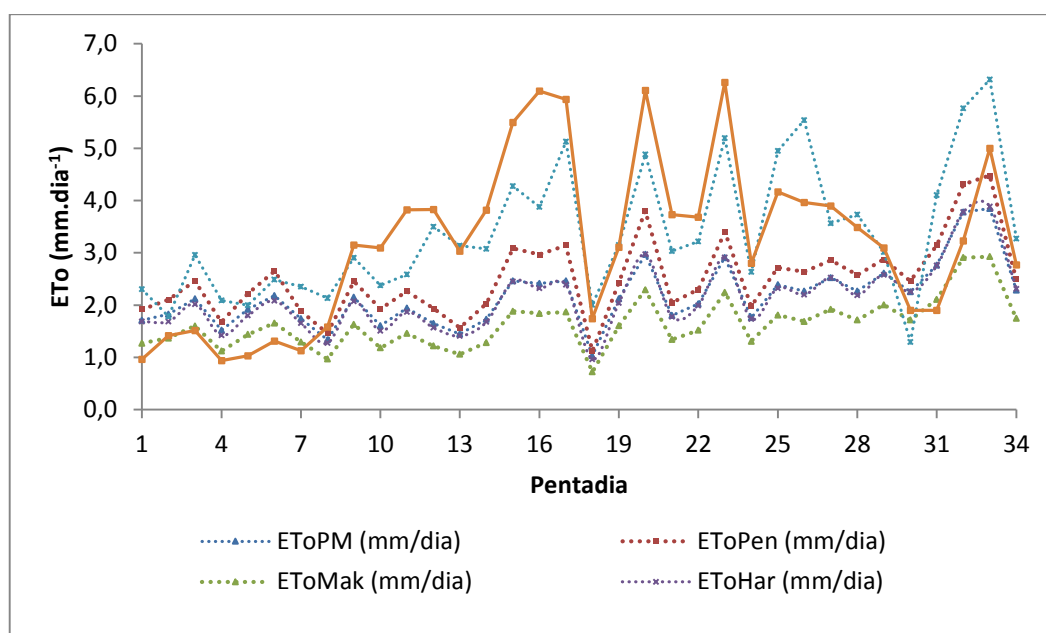


A duração dos estádios vegetativos da couve de Bruxelas foi estimada a partir dos gráficos da Figura 1 e da Figura 4. O primeiro estágio, ou estágio inicial, teve duração de 30 dias e se caracterizou por apresentar um consumo de água médio relativamente baixo, ao redor de $1,2 \text{ mm.dia}^{-1}$, o que pode ser explicado pelo baixo índice de área foliar da cultura nesse período. O segundo estágio, o estágio de desenvolvimento, teve duração de 30 dias, merecendo destaque a variação do consumo de água pela cultura, que variou de um mínimo de $1,10 \text{ mm.dia}^{-1}$ até um máximo de $3,8 \text{ mm.dia}^{-1}$, com um consumo médio de $2,8 \text{ mm.dia}^{-1}$. O aumento do consumo de água neste estágio pode ser explicado pela combinação do aumento da área foliar da cultura e da temperatura. No terceiro estágio, o estágio intermediário, cuja duração foi de 60 dias, o consumo de água pelas plantas também variou de um mínimo de $1,7 \text{ mm.dia}^{-1}$ a um máximo $6,3 \text{ mm.dia}^{-1}$, com consumo médio de $4,3 \text{ mm.dia}^{-1}$. Esta variabilidade no consumo de água certamente se deveu à realização de duas desfolhas nas pentadias 12 e 23 e por variações abruptas na temperatura. No quarto estágio, o estágio final, cuja duração foi de 50 dias, o consumo de água também variou bastante, de um mínimo de $1,3 \text{ mm.dia}^{-1}$ a um máximo $5,0 \text{ mm.dia}^{-1}$, resultando em um consumo médio de $2,8 \text{ mm.dia}^{-1}$. É necessário destacar que neste estágio foram feitas duas desfolhas, nas pentadias 27 e 30, as quais foram seguidas de temperaturas muito altas, combinação esta que afetou o desenvolvimento e, principalmente, a longevidade da couve de Bruxelas. Como pode ser verificado, as durações dos estádios vegetativos obtidas nesta pesquisa diferiram muito daquelas apresentadas por Doorenbos e Pruitt (1977) e Allen et al. (1998), o que pode ser explicado pelas diferenças nas condições climáticas. No caso do experimento, o clima se caracteriza por precipitações pluviárias altas, com verões quentes e úmidos e invernos secos, enquanto que, no caso das citações, ele é caracterizado por apresentar baixa precipitação pluvial, temperaturas amenas, invernos e outonos chuvosos e verões secos.

5.2 Evapotranspiração de referência

A Figura 2 mostra que os modelos agroclimáticos utilizados geraram valores de E_{To} , que, embora diferentes numericamente, apresentaram a mesma tendência estimativa entre si e com o consumo de água medido nos lisímetros (E_{Tc}). Este fato, que pode ser observado comparando-se o caminhamento das respectivas curvas ao longo do ciclo vegetativo da couve de Bruxelas, é um bom indicativo de que os modelos agroclimáticos podem ser utilizados na determinação de E_{To} e de K_c e, conseqüentemente, do consumo de água da couve de Bruxelas nas condições edafoclimáticas de Araras-SP.

Figura 2. Consumo de água medido nos lisímetros e evapotranspiração de referência estimada pelos modelos agroclimáticos ao longo do ciclo vegetativo da couve de Bruxelas (pentadia; mm.dia⁻¹).



Na Tabela 1, estão apresentados os indicadores estatísticos da evapotranspiração de referência média (ETo), medida em pentadias, estimada pelos cinco modelos agroclimáticos utilizados nesta pesquisa. Verifica-se que as estimativas de ETo apresentaram uma dispersão acentuada, como pode ser constatado pelos desvios padrões e coeficientes de variação, o que, certamente, se deveu a variabilidade natural dos parâmetros climáticos utilizados nos cálculos de ETo.

Tabela 1. Indicadores estatísticos da evapotranspiração de referência pentadiária estimada pelos modelos agroclimáticos (mm.dia⁻¹).

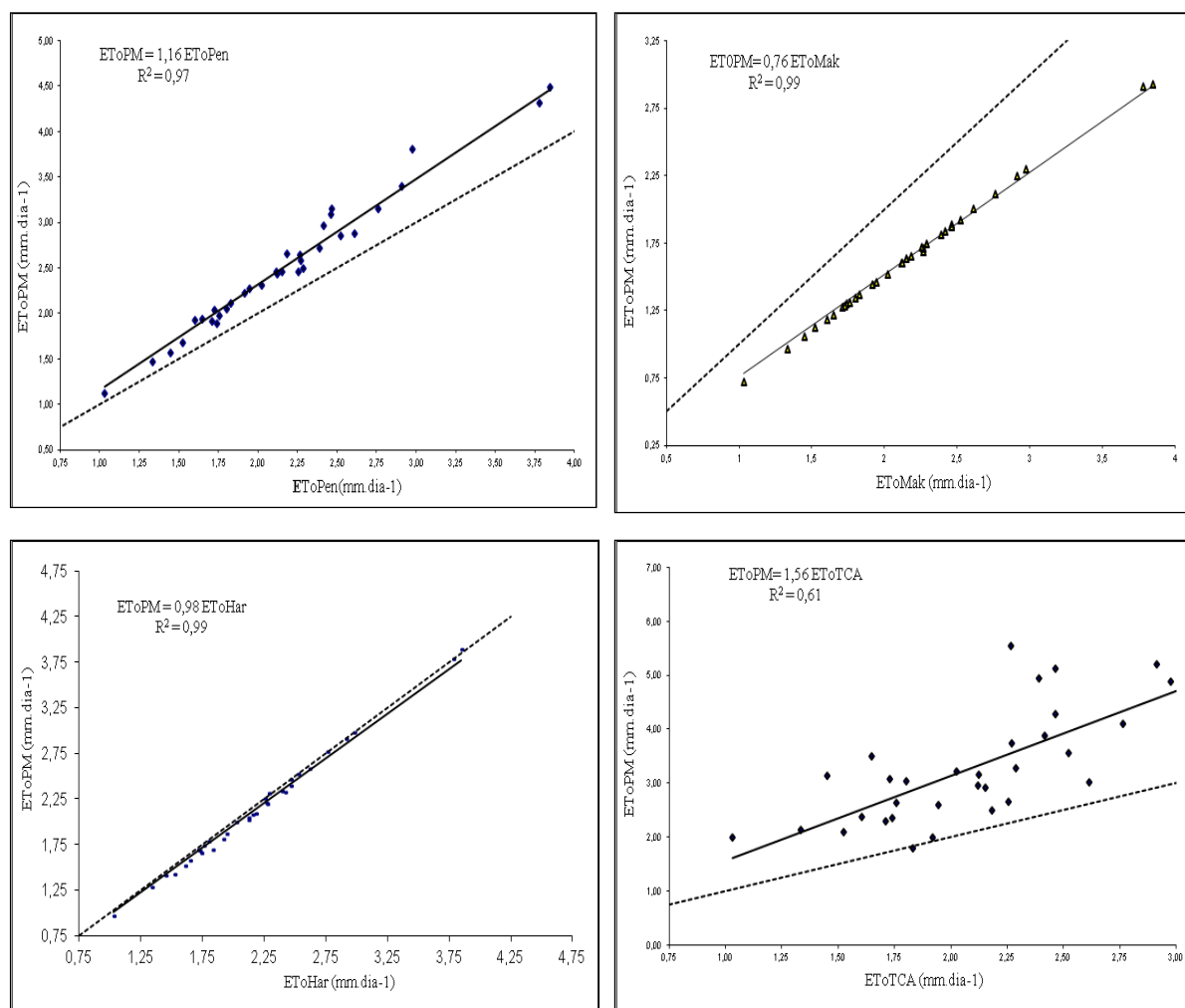
	EToPM	EToPen	EToMak	EToHar	EToTCA
Máximo	3,85	4,48	2,93	3,89	6,31
Mínimo	1,03	1,12	0,72	0,97	1,79
Média	2,17	2,51	1,64	2,12	3,41
Desvio padrão	0,61	0,75	0,48	0,64	1,21
CV (%)	28,1	29,7	29,5	30,0	35,3

Na Figura 3 estão apresentadas as equações e os gráficos das regressões entre a evapotranspiração de referência estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToPM) e aquelas estimadas pelos demais modelos agroclimáticos (EToPen; EToMak; EToHar; EToTCA). Nos gráficos, a linha pontilhada representa a reta 1:1, que correspondem à regressão linear na qual os coeficientes de determinação e de correlação são iguais a um.

Analisando-se as equações e os gráficos da Figura 3, pode ser verificado que os modelos agroclimáticos de Penman e do Tanque Classe A subestimaram as estimativas de EToPM,

respectivamente, em 16% e 56%, enquanto que os modelos de Makkink e de Hargreaves a superestimaram, respectivamente, em 24% e 2%. Como se pode depreender dos números anteriores, o modelo de Hargreaves foi o que apresentou maior exatidão na estimativa de EToPM, ficando o pior desempenho com o modelo do Tanque Classe A. No tocante a precisão das estimativas, que é medida pelos coeficientes de determinação das regressões, pode ser verificado que os modelos agroclimáticos de Penman, Makking e Hargreaves tiveram desempenho excelente, o mesmo não acontecendo com o modelo do Tanque Classe A.

Figura 3. Equações e gráficos das regressões entre as estimativas da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith (EToPM) e pelos modelos (EToPen; EToMak; EToHar; EToTCA).



Pereira et al. (2009) avaliaram o desempenho de 10 modelos agroclimáticos utilizados para a estimativa da evapotranspiração de referência nas condições climáticas da Serra da Mantiqueira mineira e verificaram que o modelo de Makkink foi o que estimou a EToPM com maior exatidão, vindo a seguir os modelos de Penman e de Hargreaves. Conceição e Mandelli (2005), em estudo realizado na região de Bento Gonçalves-RS, estudaram o desempenho de seis modelos agroclimáticos para a determinação da evapotranspiração de referência e

verificaram que as melhores estimativas de EToPM foram obtidas através dos modelos de Makkink e de Hargreaves. Conceição (2009), trabalhando na região de Jales-SP, verificou que o modelo de Hargreaves estimou a EToPM com elevada exatidão, porém com precisão apenas regular. Gonçalves et al. (2009), em estudo realizado no município de Sobral-CE, verificaram que dentre quatro modelos agroclimático o de Hargreaves foi o que estimou a EToPM com maior exatidão e precisão. Oliveira et al. (2010) estimaram a evapotranspiração de referência através dos modelos agroclimáticos de Penman-Monteith, Tanque Classe A, Hargreaves e Makkink e concluíram que o modelo agroclimático de Makkink foi o que melhor se correlacionou com o de Penman-Monteith.

Portanto, pelos resultados desta pesquisa, se pode concluir que o modelo agroclimático de Hargreaves ($b=0,98$; $R^2=0,99$) pode ser utilizado como modelo alternativo ao de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência nas condições edafoclimáticas de Araras-SP. Pelo exposto, o modelo agroclimático de Hargreaves merece ser destacado não só pela sua capacidade de estimar a EToPM com alta exatidão e precisão, mas, também, por necessitar para a sua aplicação de apenas de dados de temperatura, uma vez que a densidade de fluxo de radiação global pode ser estimada a partir da densidade de fluxo de radiação solar no topo da atmosfera e da temperatura local.

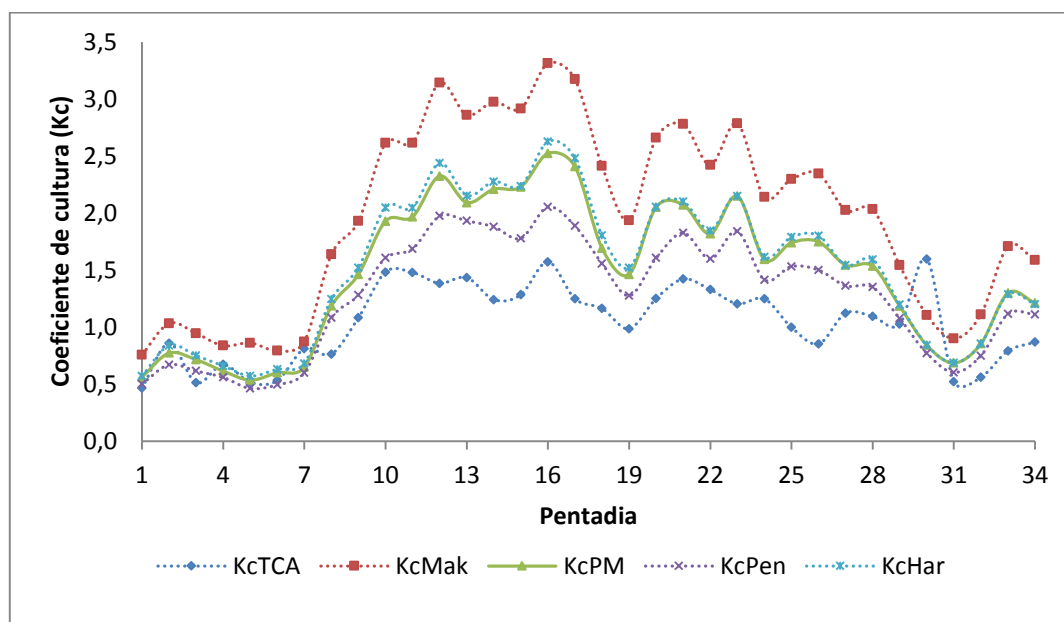
5.3 Coeficientes de cultura

Na Tabela 2, estão apresentados os indicadores estatísticos dos coeficientes de cultura médios estimados pelos modelos agroclimáticos utilizados nesta pesquisa. Nesta tabela pode ser verificado que as estimativas de Kc, assim como ocorreu com as de ETo, também apresentaram uma grande dispersão, que pode ser constatada pelos respectivos desvios padrões e coeficientes de variação. Entretanto, é preciso destacar que a variabilidade de KcTCA foi a mais baixa entre todos os modelos agroclimáticos estudados, exatamente o contrário que aconteceu no caso das estimativas de ETo apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2. Indicadores estatísticos dos coeficientes de cultura pentadiários estimados pelos modelos agroclimáticos.

Indicador	KcPM	KcPen	KcMak	KcHar	KcTCA
Máximo	2,52	2,05	3,32	2,63	1,57
Mínimo	0,54	0,46	0,76	0,57	0,47
Média	1,48	1,28	1,97	1,52	1,02
Desvio padrão	0,62	0,51	0,82	0,64	0,33
CV (%)	42,0	40,1	41,7	42,0	32,4

A Figura 4 mostra que os modelos agroclimáticos geraram valores de Kc que apresentaram a mesma tendência estimativa. Este fato pode ser observado comparando-se o caminhamento das respectivas curvas ao longo do ciclo vegetativo da couve de Bruxelas, é um bom indicativo de que os modelos agroclimáticos podem ser utilizados para a determinação de ETo e de Kc e, conseqüentemente, do consumo de água da cultura.

Figura 4. Coeficientes de cultura ao longo do ciclo vegetativo da couve de Bruxelas.

Na Tabela 3, estão apresentados os coeficientes de cultura médios estimados pelos modelos agroclimáticos para os estádios vegetativos da couve de Bruxelas. Nesta tabela pode ser verificado que as estimativas do coeficiente de cultura para os estádios inicial e final, à exceção de KcMak, foram muito próximas daquelas apresentadas por Doorenbos e Pruitt (1977) e Allen et al. (1998). O mesmo, entretanto, não ocorreu no caso do estádio intermediário, onde as estimativas dos coeficientes de cultura, fazendo exceção aquelas obtidas pela aplicação do modelo do Tanque Classe A (KcTCA), foram muito mais altas que as citadas na literatura especializada (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998), na qual se verifica que o valor máximo para o coeficiente de cultura neste estádio é 1,3. É importante destacar que as estimativas dos coeficientes de cultura pelo modelo do Tanque Classe A (KcTCA) foram as que mais se aproximaram dos valores citados na literatura especializada.

Tabela 3. Coeficientes de cultura para os diferentes estádios de desenvolvimento da couve de Bruxelas.

Modelo	Estádio de desenvolvimento da cultura			
	Inicial	Desenvolvimento	Intermediário	Final
KcPM	0,65	0,65-1,85	1,85	0,80
KcPen	0,60	0,60-1,60	1,60	0,85
KcMak	0,90	0,90-2,60	2,60	1,00
KcHar	0,60	0,60-2,00	2,00	0,80
KcTCA	0,60	0,60-1,35	1,35	0,75

Comparando-se os coeficientes de cultura estimados pelo modelo de Penman-Monteith (KcPM) com aqueles propostos por Allen et al. (1998), pode ser verificado que nos

três estádios vegetativos os coeficientes de cultura estimados foram superiores aos da literatura, com especial destaque para aquele do estágio intermediário. Uma possível explicação para esta ocorrência seria que a estufa plástica atua no sentido da diminuição da velocidade do vento e do déficit de saturação de vapor dentro da estufa, praticamente anulando o termo aerodinâmico da equação de Penman-Monteith, o que implicaria no aumento dos valores do coeficiente de cultura. Assim posto, a utilização do modelo de Penman-Monteith como padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência dentro de estufas plásticas precisa ser ratificada pela pesquisa.

6 CONCLUSÕES

Considerando-se as condições edafoclimáticas de Araras-SP, os resultados desta pesquisa permitem concluir que:

- O consumo de água da couve de Bruxelas durante o ciclo vegetativo é de 543 mm, o que corresponde a um consumo médio de 3,2 mm.dia⁻¹.
- O modelo agroclimático de Hargreaves pode substituir o modelo padrão FAO de Penman-Monteith na determinação da evapotranspiração de referência.
- As durações dos estádios vegetativos da couve de Bruxelas são: estágio inicial 30 dias, estágio de desenvolvimento 30 dias, estágio intermediário 60 dias e estágio final 50 dias.
- Os coeficientes de cultura determinados para serem utilizados com o modelo de Penman-Monteith são 0,65 para o estágio inicial, 1,85 para o intermediário e 0,80 para o estágio final.
- Os coeficientes de cultura determinados pelo modelo do Tanque Classe A são os mais consistentes com os valores disponíveis na literatura especializada.
- Há indicações de que o modelo de Penman-Monteith necessita ser calibrado localmente para ser utilizado como padrão para estimativa da evapotranspiração de referência em estufa plástica.

7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BURMAN, R.; POCHOP, L. **Evaporation, evapotranspiration, climatic data**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 275 p. (Developments in Atmospheric Science 22).
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 14, n. 2, p. 187-195. 2006.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. **Novo método para estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, 2009. 6 p. (Comunicado Técnico 97).

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. **Cálculo da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, 2005. 4 p. (Comunicado Técnico, 61).

REPUBLIC OF SOUTH AFRICA. Department of Agriculture, Forestry and Fisheries. **Brussels sprouts: production guideline**. Pretoria, 2012. 16 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 156 p. (FAO Irrigation and Drainage Papers, 24).

FIETZ, C. R.; SILVA, F. C.; URCHER, M. A. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 13, n. 2, p. 250-255, 2005.

FILGUEIRA, F. A. R. **Manual de olericultura: cultura e comercialização de hortaliças**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1982. v. 2, 357 p.

GONÇALVES, A. O.; FAGNANI, M. A.; PERES, J. G. Efeitos da cobertura do solo com filme de polietileno azul no consumo de água da cultura da alface cultivada em estufa. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 622-631, 2005.

GONÇALVES, F. M.; FEITOSA, H. O.; CARVALHO, C. M.; GOMES FILHO, R. R.; VALNIR JÚNIOR, M. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 3, n. 2, p. 71-77, 2009.

HARGREAVES, G. H. Moisture and availability and crop production. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 18, p. 277-78, 1975.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. **Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature**. St. Joseph: ASAE Meeting, 1985. (Paper 85-2517).

MAKKINK, G. F. Testing the Penman formula by means of lysimeters. **Journal of the Institution of Water Engineers**, New York, v. 11, p. 277-88, 1957.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. Manejo da irrigação em hortaliças. Brasília: EMBRAPA-SPI/EMBRAPA-CNPH, 1996. 72 p.

MEDEIROS, A. T. **Estimativas da evapotranspiração de referência a partir da Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas**. 2002. 103 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MEDEIROS, P. V. **Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de estimativas de nove equações empíricas com base na equação de Penman-Monteith**. 2008. 241 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, Cambridge, v. 19, p. 205-34, 1965.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; ALMEIDA, A. C. Determinação da evapotranspiração e dos coeficientes de cultura para as diferentes fases de desenvolvimento do melão (*Cucumis melo* L.) na região norte da Bahia. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 5, n. 2, p. 142-151, 2010.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, London, v. 193, p. 120-45, 1948.

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

PEREIRA, F. A. C. **Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em relação a um lisímetro de pesagem**. 1998. 87 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 4, p. 118-143, 1997.

PERES, J. G. **Determinação das necessidades de água dos cultivos protegidos**. Araras: UFSCar, 1999. 80 p.

SILVA, F. C. **Uso de dispositivos lisimétricos para determinação da evapotranspiração de referência**. 1996. 68 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45 p.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 118, p. 977-80, 1992.

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 108, n. 2, p. 57-74, 1982.